



HAL
open science

Commande volontaire d'un manipulateur robotique d'assistance placé dans l'espace péripersonnel

Alexis Poignant

► **To cite this version:**

Alexis Poignant. Commande volontaire d'un manipulateur robotique d'assistance placé dans l'espace péripersonnel. Robotique [cs.RO]. Sorbonne Université, 2024. Français. NNT: 2024SORUS248 . tel-04797846

HAL Id: tel-04797846

<https://theses.hal.science/tel-04797846v1>

Submitted on 22 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



INSTITUT DES SYSTÈMES INTELLIGENTS ET DE ROBOTIQUE, SORBONNE UNIVERSITÉ
École doctorale n°391 : *Sciences Mécaniques, Acoustiques, Électroniques et Robotiques*

THÈSE

présentée par

Alexis Poignant

et présentée publiquement le 15 octobre 2024
Discipline : Robotique

Commande volontaire d'un manipulateur robotique d'assistance placé dans l'espace péripersonnel

Thèse dirigée par :

M. Guillaume Morel
M. Nathanael Jarrassé

Professeur, Sorbonne Université
Directeur de Recherche CNRS, Sorbonne Université

Rapporteurs :

M^{me} Marie Babel
M. Andrea Cherubini

Professeure, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes
Professeur, Université de Montpellier

Membres du jury :

M^{me} Christine Azevedo-Costes
M^{me} Isabelle Bloch
M^{me} Caroline Moricot
M. Vincent Padois

Directrice de Recherche, INRIA Montpellier
Professeure, à Sorbonne Université
Professeure, à Paris I
Directeur de Recherche, à INRIA Bordeaux, Président du Jury

Table des matières

Abstract	i
Résumé	iii
Remerciements	v
Notations scientifiques	vii
1 Contexte et Objectifs	1
1.1 Le robot collaboratif, un robot cohabitant	1
1.2 Le contrôle volontaire d'un manipulateur robotique à 6 degrés de liberté	3
1.3 Objectifs	6
2 Méthode et Dispositifs expérimentaux	11
2.1 Présentation générale du système expérimental	11
2.2 Commande en position de l'effecteur du Kinova Gen3	12
2.2.1 Schéma général de commande	13
2.2.2 Cinématique inverse sous contraintes de sécurité	14
2.3 Description des modes de téléopération	16
2.3.1 Commande Position-Position : Couplage par Reproduction Distante de Mouvement (RDM)	16
2.3.2 Commande Position-Position : Couplage par Lien Virtuel	17
2.3.3 Commande Position-Vitesse (PV)	17
2.3.4 Commande Hybride : Lien Virtuel Reconfigurable (LVR)	19
2.4 Méthodologie expérimentale	19
2.4.1 Métriques de performance	20
2.4.2 Métriques d'analyse du mouvement humain	20
2.4.3 Étude de la distribution des contributions de la tâche lors du couplage LVR	21
2.4.4 Questionnaires	22
3 Évaluations expérimentales	23
3.1 Comparaison des couplages RDM vs LV	24
3.1.1 Résultats RDM vs LV	25
3.1.2 Conclusion sur la comparaison RDM vs LV	28
3.2 Utilisation d'une partie du corps proximal : comparaison PV, LV et LVR	29
3.2.1 Résultats PV, LV et LVR	30
3.2.2 Conclusion sur la comparaison entre les couplages LV, PV et LVR	32
3.2.3 Peut-on anticiper le terme de vitesse dans le couplage LVR?	34

4 Reconfiguration automatique du Lien Virtuel: le CCC dans un cadre général de robotique (dé)portée	35
4.1 Formulation généralisée du CCC sous forme de contrôle optimal	37
4.1.1 Cinématique	37
4.1.2 Hypothèses sur le système proximal	39
4.1.3 Contrôleur du robot reconfigurable	39
4.1.4 Point d'équilibre	41
4.2 Résolution de l'équation d'optimalité du contrôleur	41
4.3 Analyse de la stabilité du CCC appliqué au couplage LV	46
4.4 Intégration du CCC dans une tâche LVR à 3 DdL de tête	49
4.4.1 Protocole	49
4.4.2 Analyse des résultats pour un sujet entraîné	51
4.5 Conclusion sur le CCC généralisé	53
5 Observations et activités complémentaires	55
5.1 De l'enfant naïf au professeur émérite, du mouvement tenu à la danse <i>de couple</i> : une exploration impromptue du couplage LV	55
5.1.1 De 7 à 77 ans: une collection de participants	55
5.1.2 Découverte du LVR avec deux participantes en situation de handicap	58
5.1.3 Du couplage série au couplage parallèle, le bras robotique comme partenaire de danse?	60
5.2 Un mois d'entraînement: la pratique quotidienne d'une commande en vitesse	62
5.3 Trois ans d'entraînement: retour personnel sur l'apprentissage du CCC et l'exploration d'une <i>troisième main</i>	66
6 Conclusion et perspectives	71
6.1 Principaux résultats obtenus	71
6.2 Perspectives	72
6.2.1 Développement d'un environnement écologique du Lien Virtuel	72
6.2.2 Comprendre le mouvement humain pour généraliser le CCC	73
6.2.3 Combiner la commande volontaire et automatisée	74
6.3 Bilan	74
Bibliographie	77
Annexes	83
1 A Practical Control Approach for Safe Collaborative Supernumerary Robotic Arms	84
2 Teleoperation of a robotic manipulator in peri personal space a virtual wand approach	92
3 Hands free teleoperation of a nearby manipulator through a virtual body to robot link	100
4 6DoF control of an assistive manipulator through a virtual body to robot link	108
5 Controlling a motion extender without end effector task explicitness	115
6 Posture-based hybrid position/velocity of a nearby robot	124

Abstract

Despite the democratization of collaborative robots, designed to co-habit and co-manipulate with humans, "cobots" are still automated as traditional industrial robots. While this automation is efficient for performing a single, repetitive task (such as palletizing), its implementation remains challenging for variable, diverse, and unknown tasks. Therefore, it is necessary to introduce voluntary control of the robot by the operator, either to perform the task or for robot teaching purposes. Current solutions use either velocity coupling, like joysticks, which are easy to integrate but often unintuitive, or position coupling, by copying the user's movements. Although the latter method is highly efficient and intuitive, it is limited by the physical capabilities of the operator (particularly for assisting people with reduced mobility), the reduced workspace of interfaces, or a task's large workspace.

Six-degree-of-freedom position control thus remains a challenge, and there are still few collaborative robots voluntarily and efficiently controlled by their users. In this thesis, we propose a new position coupling through a virtual link, which, by leveraging effect, allows for a large translation space of the robotic end-effector at the cost of a restricted rotation space. We also introduce a hybrid position/speed control where the link is reconfigurable and extensible, either via a joystick-type interface, or by detecting the user's postural compensations, which serve as an error signal to reconfigure the link. This coupling further allows the use of body parts that exhibit minimal translations but significant rotations, such as the head or torso.

This coupling is implemented and experimentally tested, using the hand, torso, and head, and compared to existing speed and position couplings. The results show that this virtual link coupling is as intuitive and as efficient as usual motion-copy coupling when using user's hand motion as an input. Its main interest stands in the fact that it can be used with the head or torso. These new applications open up the possibility of position control for people with little to no manual dexterity, particularly for assistive and tri-manual tasks.

Résumé

Malgré la démocratisation des robots collaboratifs, amenés à co-habiter et co-manipuler avec l'humain, les "cobots" sont pour la plupart automatisés, à la manière des robots industriels classiques. Si cette automatisation est performante pour la réalisation d'une tâche unique et répétitive (palettisation par exemple), elle est ardue à mettre en oeuvre pour des tâches variables, variées ou inconnues. Il est alors nécessaire d'introduire une commande volontaire de l'opérateur, soit pour réaliser la tâche, soit pour montrer la tâche à des fins de programmation du robot. Les solutions actuelles de commande volontaire utilisent soit des couplages en vitesse, de type joystick, faciles à intégrer mais souvent peu intuitifs, soit des couplages en position, par copie des mouvements de l'utilisateur. Si cette dernière méthode est très performante et intuitive, elle est cependant limitée par les capacités physiques de l'opérateur (en particulier pour l'assistance aux personnes à mobilité réduite), par la taille de l'interface utilisée, ou par l'espace de travail de la tâche (grands déplacements).

La commande à 6 degrés de liberté est donc encore aujourd'hui un défi, et il existe encore peu de robots collaboratifs volontairement commandés par leurs utilisateurs. Nous proposons dans cette thèse un nouveau couplage en position, par lien virtuel, qui permet, par effet de bras de levier, d'avoir un grand espace de translations de l'effecteur robotisé, au prix d'un espace de rotation restreint. Nous introduisons une commande hybride position/vitesse où le lien est également reconfigurable, extensible, soit par un périphérique de type joystick, soit par détection des compensations posturales de l'utilisateur, qui servent de signal d'erreur pour reconfigurer le lien. De plus, ce nouveau couplage permet d'utiliser des parties du corps qui exhibent peu de translations mais d'importantes rotations, comme la tête ou le buste.

Ce couplage est implémenté et testé expérimentalement, à la main, au buste et à la tête, et comparé aux couplages existants en vitesse et en position. Les résultats montrent que ce couplage par lien virtuel est aussi intuitif et performant que le couplage par copie de mouvements lorsqu'on utilise en entrée le mouvement de main de l'utilisateur. Son principal avantage réside dans le fait qu'il peut-être utilisé avec la tête ou le buste. Ces applications ouvrent la possibilité d'une commande en position pour les gens n'ayant pas ou peu de dextérité manuelle, notamment pour l'assistance au handicap et les tâches tri-manuelles.

Remerciements

Je remercie les membres du jury pour leurs remarques et leur bienveillance qui m'ont aidé à faire progresser ce travail, ainsi que pour les questions durant la soutenance, ce temps de réflexion long et réfléchi qu'il est rare de rencontrer. Je remercie Guillaume et Nathanael, mes encadrants, pour leurs réflexions critiques, techniques, mais également pour leur humanité, toutes les réunions mais aussi toutes les opportunités qu'ils m'ont données, et par leur simple présence, les voir évoluer, présenter et circuler dans ce laboratoire m'a profondément appris en tant que roboticien et en tant qu'humain. Merci pour votre vision qui a su unir cette équipe et qui portera ce laboratoire encore de nombreuses années. Je remercie plus globalement tous ceux que j'ai pu rencontrer à l'ISIR et en dehors, avec qui j'ai travaillé et progressé, particulièrement le personnel administratif et technique sans qui rien ne pourrait tourner. Je remercie mes parents, ils savent déjà je l'espère tout ce qu'ils m'ont apporté et tout ce que je pense d'eux. Et enfin je remercie les gens du travail, collègues et amis, sans qui cette traversée aurait été bien morne. Je suis nul pour les remerciements mais j'espère qu'ils savent qu'ils me manquent déjà maintenant que je ne peux plus les embêter pendant les pauses.

Notations scientifiques

a (minuscule, italique) désigne un scalaire.

P (majuscule, italique) désigne un point.

M (majuscule, gras) désigne une matrice.

v (minuscule, gras) désigne un vecteur.

$\mathbf{p}_{A \rightarrow B}$ désigne le vecteur allant du point A au point B .

\mathbf{p}^O indique que le vecteur est exprimé dans la base orthonormée $B_0 = (\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{z}_0)$; en l'absence de cette notation, il est implicite que la base considérée est la base monde.

$\mathcal{F}_0 = (O_0, \mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{z}_0)$ (majuscule, cursive) désigne le repère d'origine O_0 et de base orthonormale $(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{z}_0)$.

$\mathbf{T}_{A \rightarrow B} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{A \rightarrow B} & \mathbf{p}_{A \rightarrow B} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ désigne la matrice de transformation homogène du point A au point B constituée d'une matrice de rotation $\mathbf{R}_{A \rightarrow B}$ et d'un vecteur position $\mathbf{p}_{A \rightarrow B}$ reliant O_A à O_B .

Chapitre 1

Contexte et Objectifs

1.1 Le robot collaboratif, un robot cohabitant

En 2022, 553 000 nouveaux robots industriels ont été installés dans le monde. Parmi eux, 53 000 sont des robots "collaboratifs" ou cobots [1]. Légers, flexibles et transportables, ces derniers peuvent, contrairement aux robots industriels dits "classiques", évoluer dans un cadre de travail partagé avec l'opérateur. Libérés de leurs cages, ils sont destinés à changer les dynamiques de travail [2] et d'interaction, ne plus être de simples machines programmables [3], à assister, étendre, remplacer les capacités physique de leur opérateur.

Cependant, si les espaces physiques entre humains et robots sont peu à peu redessinés par cette nouvelle génération, la "collaboration" entre l'utilisateur et le robot reste encore limitée, et le cobot demeure avant tout une entité automatisée, qui évolue en parallèle de l'humain [4]. Le cobot n'est pas tant collaboratif que cohabitant. En ce sens, la "révolution 4.0" tant annoncée (et notamment caractérisée par l'intelligence artificielle [2]) stagne, et le cobot subsiste comme machine-outil automatisée, dédiée à remplir une seule fonctionnalité, un verbe d'action unique (saisir, placer), explorant un champ des possibles discret, ponctuel. Dans l'industrie française, 80% des cobots sont ainsi cantonnés à de la palettisation et du (dé)chargement [4] tandis que les robots d'assistance sont souvent limités à de la saisie de nourriture pré-découpée et compartimentée [5] – c'est-à-dire, dans les deux cas, une forme de "pick and place" où l'humain est distributeur ou receveur (voir Fig. 1.1).

Dans le cadre d'une interaction directe entre l'opérateur et le robot, les actions sont souvent complexes et variées. Si l'on considère une personne en situation de handicap utilisant un bras robotisé pour se servir un verre d'eau, il est nécessaire de saisir, verser, relever, reposer, apporter, etc. La tâche peut être alors résolue par une décomposition



FIG. 1.1 – Un robot de palettisation Omron (à gauche) et un robot Obi pour l'aide au repas (à droite), tous deux évoluant proches de l'humain mais en autonomie quasi-totale de leurs utilisateurs.

en sous-mouvements élémentaires, déclenchés les uns après les autres par des signaux physiologiques discrets, comme le regard [6] ou les EEG [7]. Mais une telle multiplication des automatisations conduit à une perte de robustesse et des performances souvent décevantes pour les utilisateurs [6]. De plus, le confort cognitif est amoindri, l'utilisateur devant constamment superviser ce système qui est lourd en données, en temps de calcul et en matériel, et donc peu interprétable. L'utilisateur chapeaute plus qu'il n'agit.

Afin de tendre vers un élargissement des tâches, et une meilleure appropriation, il apparaît alors nécessaire d'introduire une plus grande part de commande volontaire du robot par son utilisateur. C'est ce que propose par exemple la société Kinova pour son bras Jaco [8] qui se monte sur un fauteuil roulant et dont un joystick, à deux (ou trois) degrés de liberté (DDL) permet de piloter la vitesse de l'effecteur. Ce mode de commande est certes simple, mais aussi stable et interprétable, permettant une intégration facile du cobot dans l'environnement du patient.

En 2022, afin de comprendre les besoins et les utilisations de ces commandes volontaires, nous rencontrons Noémie, propriétaire depuis plusieurs années d'un bras Kinova installé sur son fauteuil. Intégré à l'armature de son fauteuil, son robot la suit tous les jours, toute la journée. Elle le décrit comme "son" bras. La proximité entre Noémie et son robot redéfinit complètement le rapport à son corps. Car cette proximité est certes spatiale, mais aussi auditive, proprioceptive, tactile. Au son de la mécanique, Noémie peut distinguer son robot parmi des exemplaires de ce modèle qu'on lui prête lors de maintenances. Elle peut attraper un objet dans son dos. Elle appuie le bras sur son buste pour faciliter sa respiration. Elle tend "sa main" aux enfants. C'est "son bras". Elle en a une utilisation fonctionnelle, mais aussi sociale : elle l'utilise pour boire son café et, inconsciemment, pendant que nous discutons, joue machinalement avec son joystick, déplace la tasse autour d'elle. Le robot exprime un langage non-verbal, comme nous bougeons nos mains lorsque nous lui parlons. En plus d'une dextérité et d'une expertise, Noémie a développé, au contact de son robot, une expression sociale de son bras robotisé.

Quelques mois plus tard, nous discutons en visio-conférence avec Johann Chaulet, chargé de recherches CNRS au Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires. Johann possède également un Kinova. Passionné de vidéo et de photographie, il documente l'utilisation d'un bras Jaco qu'il a acquis en décembre 2020. Sous une de ses vidéos Youtube¹, il écrit :

Après deux semaines passées avec Jack, je ne cesse, jour après jour, d'être surpris par tout ce à quoi il me donne accès. Bien plus que ce que j'avais imaginé (et pourtant, croyez-moi, j'avais pris le temps de réfléchir à tout ce que je comptais faire), je découvre des possibles toujours plus grands et je constate que mon esprit s'ouvre, s'engage dans des directions où j'avais appris à ne plus le laisser s'égarer.

(Johann Chaulet, décembre 2020)

L'extension de son corps est physique, mais aussi cognitive (on pourra par ailleurs noter que, contrairement à Noémie, qui l'évoque comme étant "son bras", Johann lui donne un nom, "Jack", qui le dissocie, comme un partenaire). Si cette thèse n'a pas vocation à analyser plus en avant les rapports qui peuvent se créer entre le cobot et son utilisateur, il apparaît que le partage d'espace constant, couplé à la commande volontaire du robot, redéfinit le

¹<https://www.youtube.com/watch?v=5IVancdyJU4>

lien humain-robot. Cette incorporation dans la représentation du schéma corporel rejoint des observations précédemment notées avec des prothèses ou des exosquelettes [9].

Cependant, pourquoi cette commande volontaire, si elle ouvre un tel champ des "possibles", n'est-elle pas plus répandue? En réalité, le contrôle à 6 DdL (trois translations et trois rotations) d'un bras comme le Kinova, par un joystick à 2 ou 3 DdL nécessite plusieurs modes (translation, orientation, pince, auquel s'ajoute des modes spécifiques tel que "boire") entre lesquels l'utilisateur commute via des appuis boutons. Par cette permutation constante, l'utilisation du cobot devient alors un exercice souvent complexe et peu intuitif pour les novices. Un extrait du manuel du Jaco est reproduit Fig.1.2 pour illustrer la concentration nécessaire à la commande du bras. Une vidéo commerciale du système est également disponible sur Youtube². Elle montre une utilisatrice experte se servir un verre d'eau ou ranger un livre dans une étagère, et on y voit la décomposition successive des mouvements et de nombreux appuis boutons permettant ces changements de mode.

1.2 Le contrôle volontaire d'un manipulateur robotique à 6 degrés de liberté

Depuis de nombreuses années, une importante recherche sur la commande volontaire et continue de cobots s'intéresse au développement d'interfaces homme-machine [10] plus ergonomiques afin d'augmenter le nombre de Degrés de Liberté (DdL) simultanés. Si les interfaces de commande à 1 ou 2 DdL se sont démultipliées avec des joystick de bouche [11], de pied [12], ou encore par l'utilisation de signaux physiologiques (regard³, électroencéphalographie [13], électromyographie [14]), les solutions à 6 DdL mobilisent ainsi des interfaces complexes, difficilement applicables dans de nombreux cas de co-habitation.

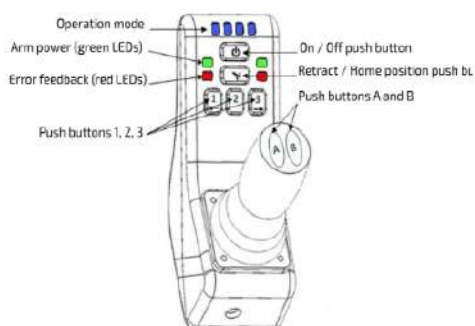
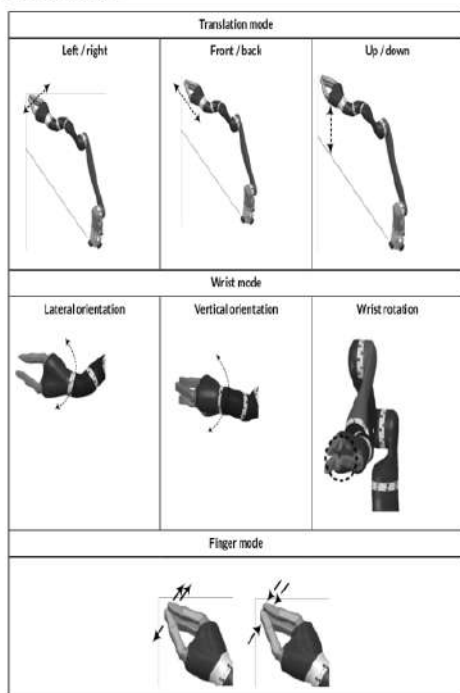
La majorité des interfaces à 6 DdL existantes se retrouvent aujourd'hui dans la téléopération à distance, où elles sont bimanuelles (manettes de jeu vidéo [15, 16] ou interfaces visuelles [17]). Mais cette dextérité n'est ni transposable à l'assistance de personnes en situation de handicap, où les mains sont souvent peu ou non mobiles et précises, ni sur des chaînes de montage, où elles y sont occupées. Inspirées par ce modèle à deux mains, plusieurs interfaces ont exploré la multiplication des entrées. Par exemple, [18] propose de coupler un joystick de main avec un joystick de menton et quatre boutons tandis que [19] utilise plusieurs centrales inertielles sur le haut du corps. Cependant, en plus de pluraliser les entrées, ces interfaces démultiplient la complexité des couplages, via des modèles souvent non linéaires (tel que des Support Vector Regression [20] ou des auto-encodeurs [19]) qui nécessite une personnalisation des commandes, conduisant à des apprentissages longs et une intuitivité moindre. Ainsi, on trouve aujourd'hui très peu de solutions effectives pour un contrôle à plus de deux DdL et qui libèrent les mains.

Par ailleurs, il a été observé dans un cadre de téléopération à distance que ces commandes position-vitesse (pour lesquels un déplacement de la main génère une vitesse de l'effecteur robotique) sont souvent moins appréciées [21], moins rapides [22] et moins précises [23] que des commandes position-position (un déplacement de la main génère un déplacement en position de l'effecteur robotique). Des exemples de commande position-position avec un couplage direct (c'est-à-dire que les déplacements commandant l'effecteur robotisé sont égaux à ceux des mains des utilisateurs à un facteur d'échelle près) incluent le robot Da

²<https://www.youtube.com/watch?v=KAsIfe8xxGA>

³<https://www.youtube.com/watch?v=61mhppeZryw&t=9s>

Table 2: Robot control modes



Buttons	One click	Hold 2 sec (Hold until position is reached)
	Deactivate / Activate Joystick	Change joystick operating mode (2-axis Vs 3-axis)
	--	Home / Retracted function
3-Axis		
1	Deactivate / Activate Drinking mode	--
2	--	Set Position
3	--	Go to pre-set position
A	Reach Finger mode	Decrease speed
B	Reach Translation & Wrist mode	Increase speed
Ext1	Reach Finger mode	Decrease speed
Ext2	Reach Translation and Wrist mode	Increase speed
Ext3	--	Home / Retracted function
Ext4	Deactivate / Activate Drinking mode	--

Buttons	One click	Hold 2 sec (Hold until position is reached)
2-Axis		
1	Deactivate / Activate Drinking mode	--
2	Reach Wrist orientation & Finger mode	Decrease speed
3	Reach Translation-X/Y & Translation-Z / Wrist rotation mode	Increase speed
A	--	--
B	--	--
Ext1	Reach Wrist orientation & Finger mode	Decrease speed
Ext2	Reach Translation-X/Y & Translation-Z / Wrist rotation mode	Increase speed
Ext3	--	Home / Retracted function
Ext4	Deactivate / Activate Drinking mode	--

FIG. 1.2 – Manuel d’instruction de commande de l’effecteur d’un Jaco de Kinova pour fauteuil roulant : à gauche, les différents déplacements possibles de l’effecteur; en haut à droite le schéma du joystick et des boutons; en bas à droite, les séquences d’actions permettant de changer d’un mode à l’autre.

Vinci de Intuitive Surgical [24], ou encore des robots Kinova installés dans des boites à gants en milieu nucléaire et pilotés via des bras Haption Virtuose [25]. On note enfin la société Nordbo⁴ qui propose depuis 2023 un système de programmation de tâches robotiques par démonstration, où l’utilisateur montre le geste, que le robot reproduit par couplage direct; la démonstration permet ensuite d’automatiser une tâche, et l’apprentissage est ainsi immédiat ou quasi-immédiat.

Très efficaces, ces commandes position-position n’existent cependant que dans des environnements contrôlés et restreints, et il existe plusieurs freins à leur incorporation dans

⁴<https://www.youtube.com/watch?v=WqaS1p9BVHA>



FIG. 1.3 – A gauche, un robot Da Vinci, téléopéré à distance pour la laparoscopie. A droite, une interface Haption permet de commander un bras robot situé dans une boîte à gant (où un second opérateur interagit généralement via des gants).

un cadre de proximité flexible et mobile. En plus d'avoir recours à des interfaces souvent lourdes et encombrantes (tel que le Virtuose de Haption [26]), ainsi qu'à l'utilisation des mains, ces commandes position-position sont intrinsèquement limitées par leur espace de travail en translation. Là où l'intérieur d'un patient ou d'une boîte à gants sont des environnements clos et de taille limitée, les tâches d'assistance pour les activités quotidiennes à domicile ou en atelier ouvert se déroulent dans des espaces de travail plus étendus. Or, avec un couplage position-position sans facteur d'échelle, un déplacement d'un mètre du robot nécessite un déplacement d'un mètre de la main de l'opérateur. Dès lors que l'espace de travail s'agrandit, la tâche en devient pénible pour l'utilisateur, qui préfère alors la commande position-vitesse [22].

Afin d'amplifier les mouvements, une première solution consiste à effectuer un pompage [27], c'est-à-dire à se déconnecter temporairement du robot puis s'y reconnecter, ce qui permet de revenir à un point de confort d'origine pour ensuite reprendre le mouvement. Cette solution conserve le couplage direct de la commande position-position, mais nécessite de nombreux allers-retours pour de grands déplacements. Une seconde solution est de faire une mise à l'échelle en démultipliant les mouvements de l'utilisateur [28], ce qui rend cependant la téléopération moins précise et plus sensible au bruit. Enfin, on trouve des systèmes de commutation entre position-position et position-vitesse afin de s'adapter selon la tâche [29, 30]. Mais, de nouveau, cette dissociation des modes nous ramène au problème existant des interfaces position-vitesse dans le cas proximal à 6 DdL.

Il existe une modalité de téléopération, amplificatrice et propre à l'interaction de proximité. Cette dernière n'a été que peu ou rarement évaluée : il s'agit d'un corps allongé selon un axe principal, que nous appellerons baguette (ou "wand" en anglais). Par l'utilisation d'un bras de levier, l'outil baguette permet de transformer les rotations d'une partie du corps de l'utilisateur où elle est fixée en translations, et de les mettre à l'échelle en fonction de sa longueur. D'une certaine façon, ce couplage n'est plus "position-position" mais "orientation-position". Historiquement, on peut trouver l'utilisation de cette méthode dans le domaine de l'assistance au handicap : depuis le début des années 80, on trouve des baguettes de tête permettant de communiquer via la pression de touches ou la manipulation



FIG. 1.4 – Exemples de baguette de tête. A gauche et au centre, des baguettes [31] pour utiliser un clavier ou dessiner. A droite, une version plus récente et commercialisée [32].

de stylos [31] Fig. (1.4). Bien que rendues désuètes par l'apparition de détecteurs de regard, ces baguettes sont encore commercialisés [32] et permettent par exemple, avec de faibles rotations de tête, de dessiner. Plutôt que de déplacer un stylo, on peut alors se demander si ce système ne pourrait pas être utilisé pour transmettre des instructions de position et/ou d'orientation à un cobot.

On notera que cette manipulation peut se rapprocher du "Raycasting", un pointeur généralement utilisé en réalité virtuelle pour la manipulation d'objets [33][34] mais le RayCasting :

- nécessite la connaissance de l'environnement (virtuel ou réel) afin de transformer un pointeur 2D en un point 3D de l'environnement afin de gérer l'ambiguïté de profondeur;
- est généralement limité à une interaction 3D et non 6D comme nous le proposons ici, avec un contrôle de l'orientation de l'effecteur.

Nous ne proposons donc ici pas d'utiliser un pointeur à deux dimensions, mais bien un outil rigide permettant de spécifier des instructions selon 6 DdL simultanés.

1.3 Objectifs

Ce document, accompagné d'un corpus d'articles scientifiques publiés ou soumis ces dernières années, présente une étude sur un couplage de type baguette, pour la téléopération de proximité d'un manipulateur robotique à 6 DdL, permettant d'utiliser une commande de type orientation-position, qui amplifie les mouvements de rotations du corps (par exemple de la tête ou du tronc) afin de générer des déplacements amples de l'effecteur robotisé.

Plutôt que d'utiliser une baguette réelle, comme illustrée Fig. 1.4, non actionnable, et donc à l'espace de travail réduit (l'effet de levier selon les déplacements avant-arrière est inexistant, et ces déplacements ne sont réalisables que par une translation du corps, comme avec le couplage direct position-position), nous proposons d'utiliser une baguette dite virtuelle Fig. 1.5. Cette virtualisation permet de reconfigurer instantanément l'outil baguette, par exemple en allongeant sa longueur pour commander ces mouvements avant-arrière.

Cependant, si cette virtualisation est source de flexibilité, elle supprime toute visualisation ou retour tangible. De plus, la lenteur du cobot (notamment pour des raisons de sécurité) peut entraîner un retard significatif entre le mouvement de l'utilisateur et celui du robot.

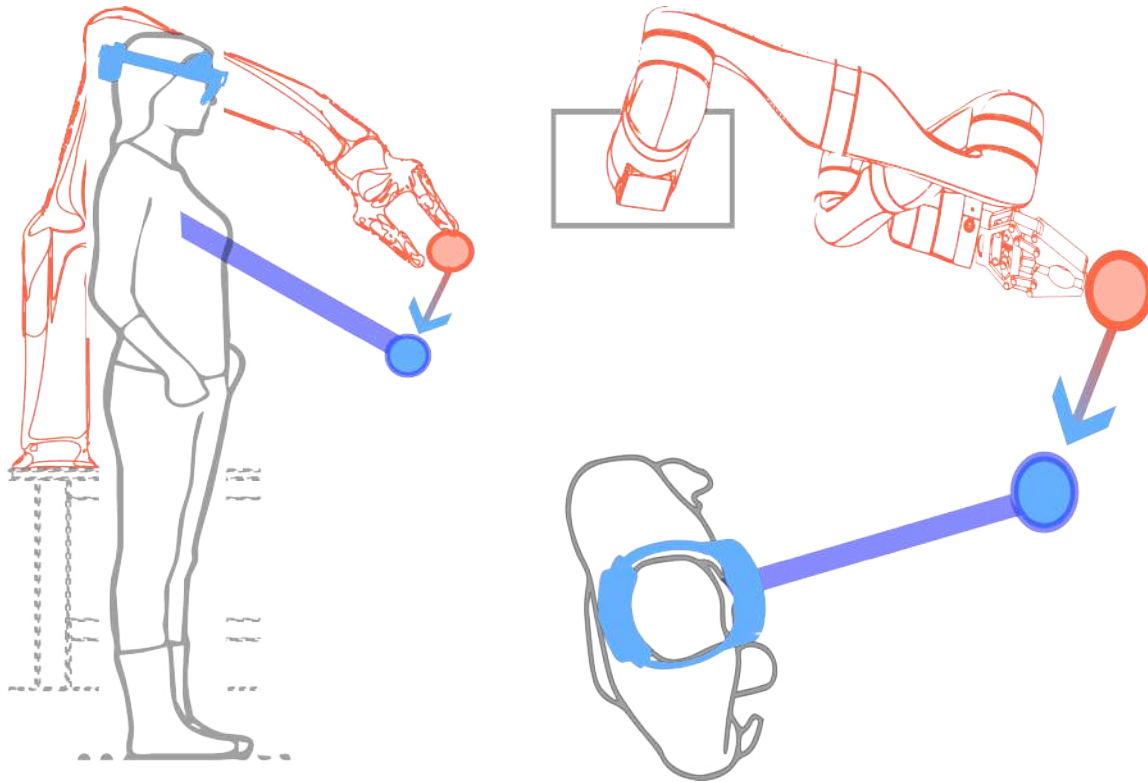


FIG. 1.5 – Schémas de couplage dans le cas d’une fixation de buste (à gauche vue de profil, à droite vue de haut). Une baguette virtuelle (en bleu) est fixée à la base du buste de l’utilisatrice, et son effecteur (cercle bleu clair) pointe une position désirée qui permet d’asservir (flèche) l’effecteur d’un robot manipulateur de proximité (en orange) dès lors que le robot et le casque ont été recalés. La baguette est visualisée par l’opérateur grâce à un casque de réalité augmentée (bleu clair).

Or, en téléopération, les retards sont jugés indésirable pour l’opérateur, et mène à des dégradations importantes des performances et de préférences de l’opérateur [22]. Afin d’y remédier, nous proposons l’option de rendre visible la baguette par l’utilisation de la réalité augmentée (AR) via un casque holographique. Ce dernier, par une visière transparente, permet d’afficher en temps réel une représentation de la baguette superposée à la scène réelle. Si le cobot est ainsi toujours sujet à un retard, le retour visuel de l’opérateur ne l’est plus, et il peut contrôler la baguette sans être gêné par les mouvements du robot. On pourra cependant noter que cette visualisation ne remplace pas le retour haptique inhérent d’une baguette réelle et que tout retour tactile ne pourrait s’effectuer que par une interface adéquate et /ou une estimation des forces sur l’effecteur robotisé.

Nous faisons l’hypothèse que ce couplage de type baguette est un couplage qui, en plus d’amplifier et de potentiellement libérer les mains, fait appel à des techniques du corps, des savoir-faire que nous possédons déjà (la manipulation d’outils rigides), permettant ainsi un apprentissage rapide et intuitif. De plus, contrairement aux couplages position-vitesse, lorsque le lien est rigide, ce couplage repose sur une relation géométrique fixe et ne nécessite aucun réglage de gain, ni aucune personnalisation. Notre objectif n’est pas de

remplacer le couplage position-vitesse ou l'utilisation d'un joystick, mais de proposer un mode de couplage alternatif et simple d'utilisation, afin de tendre vers une interface plus performante et plus intuitive.

Dans la suite de ce document, nous détaillons premièrement l'implémentation pratique d'un tel système (Chapitre 2), de la capture de mouvement de l'opérateur jusqu'à l'asservissement du robot, puis nous évaluons expérimentalement ce nouveau couplage baguette (Chapitre 3), ou position-orientation, comparativement aux couplages position-position et position-vitesse à 6 DdL standards. Nous nous intéressons notamment à des questions de performance, mais aussi d'intuitivité, d'incorporation dans le schéma corporel ou de préférence, à la fois via des questionnaires, mais aussi par l'analyse des mouvements de l'opérateur. Au cours de ces études, nous nous ajoutons également une commande en vitesse superposées aux mouvements de l'opérateur, menant à une commande volontaire hybride position/vitesse : générés dans un premier temps par un joystick, puis dans un second temps par les mouvements compensatoires (Chapitre 4) (méthode inspirée de la commande de prothèse de membre supérieur [35]) ce qui supprime le besoin d'un périphérique secondaire. Enfin, dans une dernière partie (Chapitre 5), nous relatons un certain nombre d'expériences informelles et de rencontres avec des publics variés (adultes, enfants, artistes ou personnes à mobilité réduite) que nous avons observées au cours de ces dernières années et qui ont été sources de nombreuses réflexions et perspectives.

Le document est accompagné en annexe de 6 articles de conférence. "A Practical Control Approach for Safe Collaborative Supernumerary Robotic Arms", publié dans ARSO 2023, présente un contrôle d'un bras manipulateur à proximité d'un opérateur sous contraintes de sécurité par la résolution d'une optimisation quadratique, appliquée en particulier au cas d'un robot porté comme membre surnuméraire. "A comparative study between a virtual wand and a one-to-one approach for the teleoperation of a nearby robotic manipulator", soumis à ICRA 2025, introduit le concept de lien virtuel contrôlé à la main et le compare à la téléopération par reproduction de mouvement, montrant des performances similaires entre les deux modes lors de la tâches d'atteintes à 6 DdL. "Hands free teleoperation of a nearby manipulator through a virtual body to robot link", publié dans BioRob 2024, étend le concept de lien virtuel avec un contrôle au buste, et introduit également le lien virtuel reconfigurable avec l'utilisation d'un joystick secondaire; le lien virtuel et le lien virtuel reconfigurable sont comparés à un contrôle de joystick de main pour des tâches à 3 DdL et montrent de meilleures performances malgré un contrôle mains-libres. "6DoF control of an assistive manipulator through a virtual body-to-robot link", soumis à ICRA 2025, étend ces observations à des tâches à 6 DdL, démontrant toujours de meilleures performances du lien virtuel au buste. "Posture-based hybrid position/velocity of a nearby robot", soumis à ICRA 2025, introduit le lien virtuel reconfigurable basé sur l'observation de la posture de l'utilisateur par rapport à une posture de référence, ce qui permet de supprimer l'utilisation d'un joystick secondaire et de libérer les mains de l'utilisateur, et aboutit à une commande hybride position/vitesse avec une seule entrée afin de contrôler la longueur du lien. "Computing the positioning error of an upper arm robotic prosthesis from the observation of its wearer's posture", publié dans ICRA 2021, étend ce concept à plusieurs DdL par l'utilisation non plus d'une posture de référence mais d'une fonction de coût ergonomique qui est optimisée. Enfin, "Teleoperating a 6 DoF robotic manipulator from head movements", soumis à ICRA 2025, montre l'implémentation de ce contrôle hybride à 6 DdL (reconfiguration de la longueur et de l'orientation de l'effecteur), uniquement la tête, ce qui permet à l'utilisateur d'explorer entièrement l'espace de travail d'un bras

manipulateur de proximité, et de réaliser des tâches aussi bien sur un espace large qu'avec une grande précision, comme pour l'empilement de briques Lego.

Chapitre 2

Méthode et Dispositifs expérimentaux

2.1 Présentation générale du système expérimental

Le système expérimental utilisé pour cette recherche est représenté sur la Figure 2.3. Il se compose :

- d’un manipulateur robotique Kinova Gen3 à 7 DdL [8], équipé d’une pince Robotiq à deux doigts de 85 mm (900 g). Le Gen3 est un robot léger (8.2 kg) et est équipé de régulateurs PID en vitesse pour chacune de ses 7 articulations. L’effecteur du robot est également équipé d’une caméra RGB-D (couleur et profondeur) qui n’est cependant pas utilisée ici, et le mécanisme des doigts peut être activé par des signaux binaires (bouton activé par le regard, touche de clavier, pédale de pied, etc.);
- d’un casque de réalité augmentée Hololens 2 de Microsoft [36] permettant l’affichage en temps réel (jusque 60 images par seconde) de divers objets géométriques. Le casque est équipé de centrales inertielles et de caméras infrarouge et couleur. Grâce à un SLAM (localisation et cartographie simultanées) en temps réel sont également localisées les positions absolues de la tête et des mains du participant; il est enfin équipé de capteurs de regard et de microphones;
- d’un système de capture de mouvements Optitrack [37], ensemble de 4 caméras infrarouge permettant d’enregistrer les positions et orientations de groupe de marqueurs passifs jusqu’à 120 Hz. Celui-ci sera utilisé pour mesurer les mouvements de l’utilisateur selon les expériences (les mains, le buste, la tête, etc.) et générer les différents couplages avec le robot;
- d’un joystick Space Mouse de 3D-Connexion [38]. Généralement utilisé pour des logiciels de CAO 3D, il permet ici de générer des commandes jusqu’à 6 DdL simultanés, via 3 translations et 3 rotations de sa poignée. Nous utilisons ces commandes pour générer des vitesses.

Le Kinova Gen3 peut être posé soit sur une table, soit sur une base mobile, comme un fauteuil roulant, ou directement sur l’opérateur via une veste équipée d’un support (constituant une plateforme de membre robotique surnuméraire). Les résultats expérimentaux du chapitre 3 ne concernent que le système posé sur une table (pour des raisons de sécurité, en conformité avec les conditions d’approbation du comité d’éthique de la recherche de Sorbonne Université) mais des observations complémentaires concernant le cas d’une base mobile ou portée sont fournies au chapitre 5. On pourra noter que l’utilisation du système Optitrack permet le fonctionnement de l’ensemble sans Hololens, qui ne sert ici que de retour visuel, et dont les fonctions de localisation ne sont pas utilisées dans ce document. On notera que l’utilisation d’un Optitrack sert ici de preuve de concept, le système étant rapide (120 Hz) et précis (0.5mm), mais l’utilisation de récents capteurs de position comme les HTC Vive Tracker permettrait de rendre le système portable.



FIG. 2.1 – Exemples de positionnement du Kinova : fixe attaché à une table, porté par l'utilisateur, ou posé sur une base mobile tel qu'un fauteuil roulant.

Le système mis en oeuvre est visible dans une vidéo disponible sur Youtube¹ et présentée dans la newsletter hebdomadaire IEEE Spectrum - Video Friday du 25 Nov 2022². Cette vidéo se compose de sections illustrant différentes possibilités du système posé sur une table, dont une dernière avec capture de mouvements effectuée sans Optitrack.

Dans la suite du document, nous désignerons par la lettre H les repères liés à l'opérateur (main, tête, buste), R au robot, et R^* à la localisation désirée de l'effecteur. Ces repères peuvent être mesurés par l'Optitrack (pour l'humain), par les capteurs de positions du robot (pour son effecteur) ou par le casque de réalité augmentée pour la visualisation. Premièrement, toutes ces bases sont identifiées par rapport à un repère de base commun W (aussi appelé repère monde), c'est-à-dire que l'on calibre les transformations entre tous ces repères de base. On choisit arbitrairement W comme étant la base du système Optitrack, et le repère de base du robot et du casque de réalité augmentée sont ensuite estimés par l'application de mouvements connus relativement dans chaque repère d'origine, permettant alors de résoudre la régression d'un système d'équation linéaires par la méthode des moindres carrés. On supposera dans la suite du document que la transformation $T_{W \rightarrow E_R}$ de l'effecteur robot E_R , et que la mesure du mouvement de l'effecteur humain E_H (main, tête, buste) $T_{W \rightarrow E_H}$ sont connues dans cette base monde.

2.2 Commande en position de l'effecteur du Kinova Gen3

On détaille dans cette section la commande en position de l'effecteur E_R du Kinova Gen3, et on désigne \mathbf{q}_R et $\dot{\mathbf{q}}_R \in \mathbb{R}^7$ respectivement les vecteurs des positions et vitesses articulaires du bras Kinova, et \mathbf{x}_{E_R} et $\dot{\mathbf{x}}_{E_R} \in \mathbb{R}^6$ la configuration spatiale opérationnelle de l'effecteur et la vitesse de paramétrage de l'effecteur exprimés dans le repère monde. La cinématique directe et le modèle de transmission de vitesse s'écrivent :

$$\mathbf{x}_{E_R} = \mathbf{f}_R(\mathbf{q}_R) \text{ et } \dot{\mathbf{x}}_{E_R} = \mathbf{J}(\mathbf{q}_R)\dot{\mathbf{q}}_R \quad (2.1)$$

¹<https://www.youtube.com/watch?v=Eg wz T784Fws>

²<https://spectrum.ieee.org/video-friday-turkey-sandwich>

où $\mathbf{J}(\mathbf{q}_R) \in \mathbb{R}^{6 \times 7}$ la matrice jacobienne pour une configuration articulaire \mathbf{q}_R donnée.

2.2.1 Schéma général de commande

2.2.1.1 Commande en vitesse opérationnelle

Soit $\tilde{\mathbf{x}}_{E_R}$ une vitesse opérationnelle désirée de l'effecteur.

Le Kinova Gen3 est nativement équipé de régulateurs en vitesse articulaire permettant de spécifier une vitesse $\tilde{\mathbf{q}}_R$ articulaire désirée. Cet asservissement est disponible sous la forme d'un package ROS, et consiste en un PID pour chaque articulation, dont la boucle est cadencée à 60 Hz.

A partir du package Kinematics and Dynamics Library (KDL) permettant l'implémentation de modèles géométriques, cinématique et dynamique, et du modèle complet du Kinova (fourni sous forme d'un fichier URDF), on peut reconstruire la cinématique directe et la matrice jacobienne du robot $\mathbf{J}(\mathbf{q}_R)$ à tout instant.

On implémente alors la commande en vitesse opérationnelle. Le Kinova Gen3 étant un robot à 7 articulations, il est redondant, et l'espace nul est résolu par le choix d'une vitesse articulaire $\dot{\mathbf{q}}_{R,null}$. Dans tous les résultats expérimentaux, cette vitesse est choisie afin de maintenir le plan épaule-coude-poignet du robot à la verticale afin qu'il soit éloigné des participants, c'est-à-dire, sur le Kinova, $\dot{\mathbf{q}}_{R,null} = [0, -\lambda q_1, 0, 0, 0, 0, 0]$ permettant de maintenir l'articulation 1 à 0°. Pour une vitesse opérationnelle désirée, on a donc le vecteur des vitesses articulaires désiré $\tilde{\mathbf{q}}_R$:

$$\tilde{\mathbf{q}}_R = \mathbf{J}^\dagger \tilde{\mathbf{x}}_{E_R} + (\mathbf{I} - \mathbf{J}^\dagger \mathbf{J}) \dot{\mathbf{q}}_{R,null} \quad (2.2)$$

où \dagger désigne le pseudo-inverse de Moore-Penrose (calculée par décomposition en valeurs singulières avec un paramètre de régularisation), et $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$ la matrice identité.

2.2.1.2 Commande en position opérationnelle

On propose enfin le schéma suivant pour la commande en boucle fermée de la position de l'effecteur :

La commande en position est constituée de trois étapes :

- un filtrage de la position désirée $\mathbf{x}_{E_R}^*$ par un filtre passe-bas à 15 Hz. Ce filtrage permet d'atténuer des effets de bruit de l'asservissement visuel (effectué par la suite via Optitrack), ainsi que des à-coups au démarrage lors d'importants changement de position;
- un terme proportionnel $k(\mathbf{x}_{E_R}^*,filt - \mathbf{x}_{E_R})$ avec k un gain scalaire permettant, par le caractère intégral de la commande en position, d'annuler l'erreur statique;
- un terme d'anticipation $\alpha \frac{d\mathbf{x}_{E_R}^*,filt}{dt}$ permettant de diminuer le retard de la commande en position.

Les gains k et α ont été choisis respectivement à 0.5 et 1, permettant une réponse sans dépassement avec un temps de réponse à 95% de 1.5 secondes environ. Une réponse sans dépassement a été ici préférée à une réponse rapide.

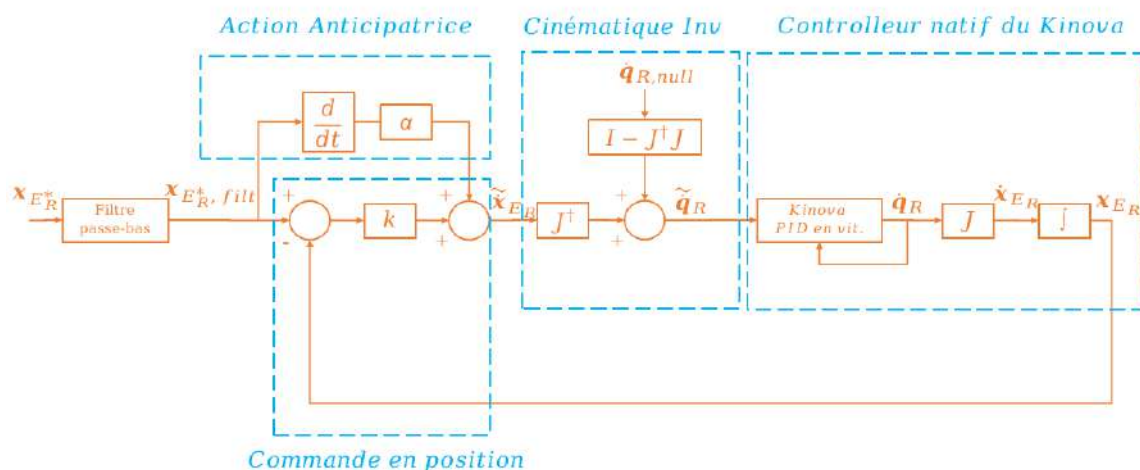


FIG. 2.2 – Schéma de commande en position du Kinova Gen3

2.2.2 Cinématique inverse sous contraintes de sécurité

Dans le cadre d'une interaction avec le grand public, ou lorsque le Kinova est posé sur une base mobile proche de l'opérateur, il convient d'ajouter des contraintes dans la résolution de la cinématique inverse afin de garantir la sécurité de l'opérateur. Si le Kinova est doté de certaines sécurités (comme une limitation de couple maximum sur les articulations) celles-ci sont supérieures aux normes ISO cobot recommandées par l'Union Européenne (par exemple de puissance ou de vitesse maximum) et ne sont applicables lorsque l'opérateur se situe à portée de contact du manipulateur.

Nous présentons dans "A Practical Control Approach for Safe Collaborative Supernumerary Robotic Arms" (Annexe 1) une méthode de résolution de la cinématique inverse sous contraintes permettant la sécurité de l'opérateur dans une application de membre surnuméraire, mais également transposable lorsque le robot est posé sur une table ou une base mobile. Pour cela, nous utilisons une méthode de résolution QP (Quadratic Programming) permettant l'optimisation de la cinématique inverse sous contraintes linéaires. Chaque articulation du robot étant équipé d'un capteur de couple, l'on peut également introduire des sécurités en force.

Les contraintes que nous ajoutons sont :

- des vitesses articulaires et opérationnelles maximum;
- des butées des positions articulaires;
- des forces opérationnelles de contact maximum;
- des positions opérationnelles (pas uniquement de l'effecteur mais de toutes les articulations du robot) par la définition de zones interdites (délimitant par exemple le corps ou le poste de travail de l'opérateur);

Cette formulation QP s'écrit :

$$\begin{aligned}
 \min_{\dot{\mathbf{q}}, \boldsymbol{\delta}} \quad & \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{W} \dot{\mathbf{q}} + \boldsymbol{\delta}^T \mathbf{Q} \boldsymbol{\delta} + \mathbf{g}^T \dot{\mathbf{q}} \\
 \text{s.t.} \quad & \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}} + \boldsymbol{\delta} = \dot{\mathbf{x}}_d \\
 & \dot{\mathbf{q}}_{min} < \dot{\mathbf{q}} < \dot{\mathbf{q}}_{max} \\
 & \boldsymbol{\delta}_{min} < \boldsymbol{\delta} < \boldsymbol{\delta}_{max} \\
 & \mathbf{a}_{min} < \mathbf{A} \dot{\mathbf{q}} < \mathbf{a}_{max}
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

où $\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^7$ les variables de décision, qui seront ensuite les vitesses angulaires; $\boldsymbol{\delta} \in \mathbb{R}^6$ les variables de relaxation; \mathbf{W} une matrice diagonale semi-définie positive, qui correspond au poids de la pseudo-inverse de la jacobienne selon chaque articulation; $\boldsymbol{\delta} \in \mathbb{R}^6$ des variables de relation, pondérées par une matrice de poids $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{6 \times 6} \succ 0$ définie telle que $\|\mathbf{Q}\| \gg \|\mathbf{W}\|$ (généralement $Q = \alpha \mathbf{I}_6$ avec α un scalaire, typiquement 10^6); $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^n$ un vecteur de gradient, choisi afin de minimiser une tâche secondaire, ici maintenir le coude haut ($q_2 = 0$, et donc $\mathbf{g} = [0, \beta q_2, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ et β un scalaire qui décrit la rigidité de la tâche secondaire).

Cette formulation permet de minimiser la distance de la vitesse cartésienne à la vitesse désirée $\dot{\mathbf{x}}_d \in \mathbb{R}^6$ tout en respectant des contraintes linéaires, définis par des inégalités linéaires : $\dot{\mathbf{q}}_{min}$ et $\dot{\mathbf{q}}_{max}$ des contraintes sur les vitesses minimales et maximales de chaque articulation, et \mathbf{a}_{min} et \mathbf{a}_{max} des contraintes linéaires en la matrice \mathbf{A} . Lorsque les inégalités sont respectées, la contrainte d'égalité $\mathbf{J} \dot{\mathbf{q}} + \boldsymbol{\delta} = \dot{\mathbf{x}}_d$ a pour solution :

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^\dagger \dot{\mathbf{x}}_d + (\mathbf{I} - \mathbf{J}^\dagger \mathbf{J}) \dot{\mathbf{q}}_n, \tag{2.4}$$

où $\mathbf{J}^\dagger = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{J}^T (\mathbf{J} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{J}^T)^{-1}$ la pseudo-inverse de Moore-Penrose pondérée par la matrice \mathbf{W} , et $\dot{\mathbf{q}}_n = [0, -\beta \frac{q_2}{2}, 0, 0, 0, 0, 0]$ le vecteur vitesse projeté sur l'espace nul, à une approximation près de l'ordre de $\frac{1}{\alpha}$.

L'implémentation de contraintes en vitesse angulaire est immédiate. Afin d'intégrer des contraintes en positions (butées mécaniques par exemple), on peut également intégrer ces contraintes afin de spécifier des vitesses maximales qui assureront le respect des positions de contrainte :

$$\frac{\mathbf{q}_{min} - \mathbf{q}}{p \Delta T} < \dot{\mathbf{q}} < \frac{\mathbf{q}_{max} - \mathbf{q}}{p \Delta T} \tag{2.5}$$

où ΔT le pas de temps de la boucle de commande, et $p > 1$ un facteur permettant de garantir que le robot ne pourra enfreindre la contrainte pendant p pas de temps avec la vitesse obtenue.

On peut également projeter ces équations dans l'espace des vitesses cartésiennes afin de définir des vitesses cartésiennes maximales, et des positions de l'espace de travail inatteignable par le robot :

$$\dot{\mathbf{x}}_{min} < \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}} < \dot{\mathbf{x}}_{max} \tag{2.6}$$

$$\frac{\mathbf{x}_{min} - \mathbf{x}}{p \Delta T} < \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}} < \frac{\mathbf{x}_{max} - \mathbf{x}}{p \Delta T} \tag{2.7}$$

De plus, toutes ces équations peuvent être exprimées pour le i -ème corps du robot en considérant la matrice jacobienne exprimée en l'articulation i .

Enfin, on peut les exprimer afin de contraindre des couples extérieurs de contact avec l'environnement, c'est-à-dire non dû aux compensations de gravité et à la commande :

$$\gamma(\tau_{min} + \tau_{mes} - \tau_{mod}) < \dot{\mathbf{q}} < \gamma(\tau_{max} + \tau_{mes} - \tau_{mod}) \quad (2.8)$$

où τ_{mod} représente les couples d'un modèle (poids ou dynamique selon le modèle); τ_{mes} les couples mesurés (la différence entre modèle et mesuré correspond à une estimation des couples extérieurs appliqués, notamment de contact avec l'environnement); γ un gain de raideur choisi expérimentalement, et τ_{min} et τ_{max} les bornes inférieures et supérieures des couples.

Dès lors qu'un effort trop important est détecté (contact brusque notamment), nous avons également implémenté le passage du robot dans un mode de compensation de gravité natif au Kinova permettant sa manipulation passive.

Pour une meilleure explicabilité, les résultats expérimentaux présentés Chap. 3 ne sont pas implémentés avec cette résolution QP, et seules les vidéos du système porté ou sur base mobile, et les interactions avec des publics externes au laboratoire ont été effectuées avec cette méthode.

2.3 Description des modes de téléopération

Grâce au schéma de commande représenté sur la Fig. (2.2), le robot est commandable via une position et une orientation désirées, regroupées dans un vecteur $\mathbf{x}_{E_R^*}(t)$. Ce vecteur peut être extrait d'une matrice de transformation $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t)$. Dans la suite de cette section, les différents modes de téléopération servent à générer $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t)$ soit par la mesure de $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_H}(t)$, c'est-à-dire les déplacements de l'utilisateur, soit par un joystick générant des vitesses. On définit t_0 l'instant initial auquel se produit le couplage, et on suppose que $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R}(t_0) = \mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t_0)$, c'est-à-dire que l'effecteur désiré et l'effecteur réel du robot sont confondus à l'instant initial.

Les différents modes de téléopération visant à calculer $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t)$ en fonction de la mesure $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_H}(t)$ et des conditions initiales $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R}(t_0)$ et $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_H}(t_0)$ sont détaillés ci-dessous.

2.3.1 Commande Position-Position : Couplage par Reproduction Distante de Mouvement (RDM)

On définit le couplage position-position par Reproduction Distante de Mouvement (RDM) comme étant une imitation des mouvements de l'utilisateur (relativement à sa posture initiale) par l'effecteur robotique désiré E_R^* (relativement à sa posture initiale). On mesure à l'instant initial les transformations $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t_0) = \mathbf{T}_{W \rightarrow E_R}(t_0)$ et $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_H}(t_0)$ puis on impose par la suite une relation géométrique constante entre les deux entre leurs déplacements relatifs par rapport au repère initial, c'est-à-dire que l'effecteur désiré est égal à :

$$\mathbf{T}_{E_R(t_0) \rightarrow E_R^*(t)} = \mathbf{T}_{E_H(t_0) \rightarrow E_H(t)}. \quad (2.9)$$

Ou encore :

$$\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t) = \mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t_0) (\mathbf{T}_{W \rightarrow E_H}(t_0))^{-1} \mathbf{T}_{W \rightarrow E_H}(t). \quad (2.10)$$

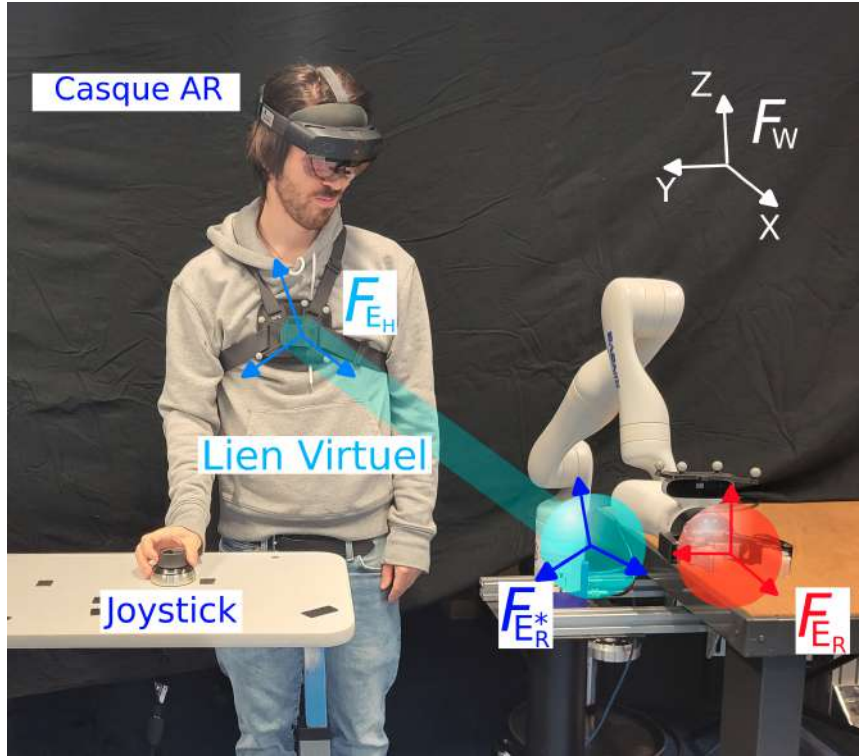


FIG. 2.3 – Plateforme expérimentale avec commande hybride d'un lien reconfigurable. L'effecteur virtuel $\mathcal{F}_{E_R^*}$ (sphère bleue claire) est ici liée (lien bleu) au buste de l'utilisateur \mathcal{F}_{E_H} , et ce lien peut être reconfiguré par une interface position-vitesse tel qu'un joystick. Le robot, posé sur une table et avec un effecteur \mathcal{F}_{E_R} (sphère rouge) est asservi sur $\mathcal{F}_{E_R^*}$. Ces illustrations représentent ce que l'utilisateur voit à travers le casque de réalité augmentée.

2.3.2 Commande Position-Position : Couplage par Lien Virtuel

On définit le couplage Lien Virtuel (LV) comme une relation géométrique fixe entre le point de travail de l'utilisateur et l'effecteur désiré, similairement à l'utilisation d'un outil que l'on porte. La configuration de ce lien est déterminée par la configuration initiale du lien. On impose ainsi que : $\mathbf{T}_{E_H(t) \rightarrow E_R^*(t)} = \mathbf{T}_{E_H(t_0) \rightarrow E_R^*(t_0)}$. Soit à tout instant la relation :

$$\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*(t)} = \mathbf{T}_{W \rightarrow E_H(t)} \mathbf{T}_{E_H(t_0) \rightarrow E_R^*(t_0)} \quad (2.11)$$

2.3.3 Commande Position-Vitesse (PV)

Soit une vitesse opérationnelle en translation $\mathbf{v}(t)$ et en rotation $\boldsymbol{\omega}(t)$ désirées à un instant t de l'effecteur E_R^* (par exemple données par une interface de type joystick, exprimée dans la base $(\mathbf{x}_W, \mathbf{y}_W, \mathbf{z}_W)$). Par l'intégration de ces vitesses désirées, on peut obtenir à tout instant t une position désirée \mathbf{p} et une matrice de rotation désirée \mathbf{R} en fonction de leur état initial à t_0 :



FIG. 2.4 – Un exemple de comparaison du couplage RDM et LV, où deux mouvements humains différents conduisent à des mouvements de l'effecteur robot similaires.

$$\mathbf{p}_{W \rightarrow E_R^*}(t) = \mathbf{p}_{W \rightarrow E_R}(t_0) + \int_{t_0}^t \mathbf{v}(\tau) d\tau \quad (2.12)$$

$$\mathbf{R}_{W \rightarrow E_R^*}(t) = \mathbf{R}_{W \rightarrow E_R}(t_0) + \int_{t_0}^t \boldsymbol{\Omega}(\tau) \mathbf{R}_{W \rightarrow E_R^*}(\tau) d\tau \quad (2.13)$$

où $\boldsymbol{\Omega}(\tau) = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z(\tau) & \omega_y(\tau) \\ \omega_z(\tau) & 0 & -\omega_x(\tau) \\ -\omega_y(\tau) & \omega_x(\tau) & 0 \end{pmatrix}$ représente la matrice antisymétrique associée à

la vitesse angulaire $\boldsymbol{\omega}(\tau)$ selon ses trois composantes désignées par x , y et z .

On peut alors à tout instant définir la matrice de transformation désirée $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t)$ à partir du vecteur translation $\mathbf{p}_{W \rightarrow E_R^*}(t)$ et de $\mathbf{R}_{W \rightarrow E_R^*}(t)$. C'est ce qu'on appelle le couplage Position-Vitesse (PV).

2.3.4 Commande Hybride : Lien Virtuel Reconfigurable (LVR)

Dans ce dernier mode de couplage de Lien Virtuel Reconfigurable (LVR), l'opérateur dispose de deux modes permettant de déplacer l'effecteur du robot. Le premier correspond au couplage du Lien Virtuel, c'est-à-dire l'utilisation des mouvements de son corps Eq. (2.11), et le second l'utilisation du couplage Position-Vitesse afin de générer une vitesse Eq. (2.12) et Eq. (2.13). Contrairement au couplage PV, cette vitesse sert cependant à reconfigurer le lien virtuel. Pour cette raison, le mode est appelé LVR. Alors, contrairement à Eq. (2.11) où le LV était constant et égal à $\mathbf{T}_{E_H(t_0) \rightarrow E_R^*(t_0)}$, on obtient :

$$\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t) = \mathbf{T}_{W \rightarrow E_H}(t) \mathbf{T}_{E_H(t) \rightarrow E_R^*}(t) \quad (2.14)$$

En projetant Eq. (2.12) et Eq. (2.13) dans le repère de l'utilisateur, on peut obtenir une expression de $\mathbf{T}_{E_H(t) \rightarrow E_R^*}(t)$ en fonction de $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_H}(t)$, de $\mathbf{v}(t)$ et de $\boldsymbol{\omega}(t)$:

$$\mathbf{p}_{E_H \rightarrow E_R^*}(t) = \mathbf{p}_{E_H \rightarrow E_R}(t_0) + \int_{t_0}^t \mathbf{R}_{E_H(\tau) \rightarrow W} \mathbf{v}(\tau) d\tau \quad (2.15)$$

$$\mathbf{R}_{E_H \rightarrow E_R^*}(t) = \mathbf{R}_{E_H \rightarrow E_R}(t_0) + \int_{t_0}^t \boldsymbol{\Omega}(\tau) \mathbf{R}_{E_H(\tau) \rightarrow E_R^*}(\tau) d\tau \quad (2.16)$$

Si $\mathbf{v}(t)$ et $\boldsymbol{\omega}(t)$ sont nuls, alors Eq. (2.11) est équivalente à Eq. (2.14), tandis que si l'utilisateur est immobile, alors Eq. (2.16) et Eq. (2.16) sont équivalentes à Eq. (2.12) et Eq. (2.13).

2.4 Méthodologie expérimentale

Toutes les campagnes expérimentales présentées dans ce document ont été menées selon les recommandations du comité d'éthique de Sorbonne Université CER-SU qui a approuvé les protocoles. Tous les participants, hommes et femmes, asymptotiques et âgés de 18 à 55 ans, se sont portés volontaires pour ces études et ont donné leur consentement éclairé, en accord avec la déclaration d'Helsinki.

Les campagnes expérimentales des articles "Teleoperation of a robotic manipulator in peri personal space a virtual wand approach" et "6DoF control of an assistive manipulator through a virtual body to robot link" (Annexe 2,3 et 4) présentent toutes trois des tâches d'atteinte de cibles (visualisées via le casque de réalité augmentée) par l'effecteur robotisé du robot Kinova, dont la base est posée sur une table à proximité du participant. Ces trois campagnes été analysées en utilisant les métriques de performance et d'analyse du

mouvement décrites ci-dessous, ainsi que des questionnaires renseignés en fin de sessions par chaque participant.

Les données issues de ces campagnes étant non-normales d'après le test de Shapiro-Wilk, les valeurs p ainsi que les significativités statistiques ont donc été analysées à partir du test de Mann-Whitney-U, aussi appelé test de la somme des rangs de Wilcoxon.

2.4.1 Métriques de performance

Lors de la comparaison de deux couplages différents, les utilisateurs réalisent les mêmes tâches en utilisant alternativement les deux modes de couplages. Cette tâche étant identique, afin d'évaluer la précision et la rapidité de complétion, on considèrera le temps par cible ainsi que le dépassement maximal par cible.

2.4.2 Métriques d'analyse du mouvement humain

Soit $\mathbf{p}_{E_H(t_{1,i}) \rightarrow E_H(t_{2,i})}$ et $\mathbf{R}_{E_H(t_{1,i}) \rightarrow E_H(t_{2,i})}$ le vecteur de translation et la matrice de rotation entre deux instants $t_{1,i}$ et $t_{2,i}$ correspondant respectivement au début (top départ) et à la fin (cible atteinte) d'une tâche d'atteinte de la cible numéro i .

On analysera les déplacements en translation $\mathbf{p}_{E_H(t_{1,i}) \rightarrow E_H(t_{2,i})}$ soit en utilisant les trois coordonnées vectorielles selon X , Y et Z , (où X correspond aux mouvements avant-arrière, Y latéraux, et Z verticaux) soit en utilisant la distance parcourue afin d'évaluer des déplacements relatifs entre deux cibles.

Afin d'analyser les rotations, nous utiliserons une représentation angle-axe, c'est-à-dire un vecteur $\boldsymbol{\theta}_{E_H(t_{1,i}) \rightarrow E_H(t_{2,i})} = \theta_{E_H(t_{1,i}) \rightarrow E_H(t_{2,i})} \mathbf{u}_{E_H(t_{1,i}) \rightarrow E_H(t_{2,i})}$ de norme $\theta_{E_H(t_{1,i}) \rightarrow E_H(t_{2,i})}$ et d'axe le vecteur unitaire $\mathbf{u}_{E_H(t_{1,i}) \rightarrow E_H(t_{2,i})}$. De la même manière, on pourra considérer soit le terme vectoriel $\boldsymbol{\theta}_{E_H(t_{1,i}) \rightarrow E_H(t_{2,i})}$ selon ses composantes X , Y et Z , soit sa norme $\theta_{E_H(t_{1,i}) \rightarrow E_H(t_{2,i})}$.

Ces représentations permettront d'évaluer les amplitudes du mouvement de E_H par cible, mais également d'étudier les trajectoires par cible en considérant tout instant $t \in [t_{1,i}, t_{2,i}]$.

On peut également normaliser en amplitude ces trajectoires pour tout instant t compris entre $t_{1,i}$ et $t_{2,i}$; ainsi que les normaliser temporellement, c'est-à-dire sous-échantillonner ces trajectoires selon n points. On note ainsi les trajectoires échantillonnées et normées :

$$\hat{p}(k)_i = \frac{d(\mathbf{p}_{E_H(t_{1,i}) \rightarrow E_H(t_{1,i}+kT)})}{d(\mathbf{p}_{E_H(t_{1,i}) \rightarrow E_H(t_{2,i})})} \text{ pour } k = [1, \dots, n] \quad (2.17)$$

où d désigne la distance signée, et $T = \frac{(t_{2,i} - t_{1,i})}{n}$ la période d'échantillonnage. Dans la suite, on utilise $n = 100$.

On effectue ces mêmes normalisations en θ :

$$\hat{\theta}(k)_i = \frac{\|\boldsymbol{\theta}_{E_H(t_{1,i}) \rightarrow E_H(t_{1,i}+kT)}\|}{\|\boldsymbol{\theta}_{E_H(t_{1,i}) \rightarrow E_H(t_{2,i})}\|} \text{ pour } k = [1, \dots, n] \quad (2.18)$$

On peut alors construire des courbes de trajectoire moyenne par cible de l'effecteur E_H , c'est-à-dire les moyennes selon les cibles i de $\hat{p}(k)_i$ et $\hat{\theta}(k)_i$ pour chaque $k \in [0, 1, \dots, n]$:

$$\bar{p}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{i=N} \hat{p}(k)_i \quad (2.19)$$

$$\bar{\theta}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{i=N} \hat{\theta}(k)_i , \quad (2.20)$$

pour $i = 1, \dots, N$ le numéro de cible.

Dans les résultats expérimentaux, les données étant non-normales, on préférera cependant utiliser la médiane plutôt que la moyenne.

Enfin, on peut également étudier le graphe $\bar{\theta}(k)$ en fonction de $\bar{p}(k)$ pour $k \in [0, 1, \dots, n]$, c'est-à-dire l'erreur moyenne en rotation en fonction de l'erreur moyenne en translation. Selon Torres [39], dans le cadre d'un mouvement balistique à 6 DdL, un invariant du mouvement de la main est la linéarité de ce tracé. Cette linéarité nous permettra d'évaluer la coordination du mouvement humain, et donc possiblement l'intuitivité et l'intégration du couplage dans le schéma corporel dans le cadre d'une tâche à 6 DdL. Afin de comparer la linéarité de deux courbes de couplage, on pourra utiliser une évaluation définie par exemple par Kroll [40].

De même, on étudie les courbes de vitesse $\hat{x}(k)$ et $\hat{\theta}(k)$ en fonction de $k \in [0, 1, \dots, n]$, et on généralise cette étude aux courbes de position et de vitesse de l'effecteur désiré E_R^* .

2.4.3 Étude de la distribution des contributions de la tâche lors du couplage LVR

Dans le couplage LVR, on peut identifier la quantité de tâche effectuée par le couplage PV et par le couplage LV afin de déterminer quel couplage est privilégié, aussi bien quantitativement que temporellement.

Par exemple, en position \mathbf{p} , la reconfiguration en vitesse entre l'instant $t_{1,i}$ de démarrage et $t_{2,i}$ de complétion d'une tâche est définie pour $t \in [t_{1,i}, t_{2,i}]$ par :

$$\mathbf{d}_v(t) = \mathbf{p}_{E_H \rightarrow E_R^*}(t) - \mathbf{p}_{E_H \rightarrow E_R^*}(t_{1,i}) . \quad (2.21)$$

Le déplacement total en translation de l'effecteur désiré étant défini par :

$$\mathbf{d}(t) = \mathbf{p}_{W \rightarrow E_R^*}(t) - \mathbf{p}_{W \rightarrow E_R^*}(t_{1,i}) , \quad (2.22)$$

on pourra définir le déplacement dû au couplage LV par :

$$\mathbf{d}_p(t) = \mathbf{d}(t) - \mathbf{d}_v(t) \quad (2.23)$$

Afin d'analyser la contribution de chaque couplage selon chaque composante X , Y et Z , on normalise ces déplacements afin d'obtenir un pourcentage; c'est-à-dire que l'on définit les ratios :

$$\begin{cases} v_{\bullet}(t) &= \frac{\delta_{p_{\bullet}}(t)}{\delta_{\bullet}(t_{2,i})} \\ p_{\bullet}(t) &= \frac{\delta_{v_{\bullet}}(t)}{\delta_{\bullet}(t_{2,i})} \end{cases} , \quad (2.24)$$

où $\delta(t) = [\delta_X \ \delta_Y \ \delta_Z]^T$, $\delta_p(t) = [\delta_{p_X} \ \delta_{p_Y} \ \delta_{p_Z}]^T$ est le ratio de réalisation de la tâche dû au couplage LV, et $\delta_v(t) = [\delta_{v_X} \ \delta_{v_Y} \ \delta_{v_Z}]^T$ le ratio dû au couplage PV.

On peut également définir ces ratios en utilisant la norme euclidienne plutôt que de

considérer chaque composante. Enfin, de la même manière, on définit un ratio similaire pour la rotation en utilisant la norme θ de la représentation angle-axe.

2.4.4 Questionnaires

A la fin de chaque campagne expérimentale a été fourni le même questionnaire afin d'évaluer chaque mode de couplage et chaque condition des campagnes expérimentales. Le questionnaire se constitue des six questions suivantes :

Dans quelle mesure...

1. *...la tâche vous a-t-elle demandé un effort physique?*
2. *...la tâche vous a-t-elle demandé un effort cognitif?*
3. *...vous êtes-vous senti en contrôle du robot?*
4. *...était-ce intuitif de manipuler le bras robot?*
5. *...avez-vous senti que le robot était une extension de vous?*
6. *Quelle note globale d'appréciation donneriez-vous à cette expérience?*

Chaque question est évaluée par un entier entre -3 et 3 (échelle de Likert), -3 correspondant à l'équivalent de "pas du tout", 3 de "beaucoup", de 0 de "neutre". On notera qu'une note positive aux deux premières questions dénote une caractéristique négative du système (charge physique et/ou cognitive importante) tandis qu'une note positive aux questions 3 à 6 dénote une caractéristique positive (intuitivité, sensation de contrôle, etc.).

Chapitre 3

Évaluations expérimentales

Afin d'évaluer les performances et les préférences du couplage Lien Virtuel (LV), nous avons décidé de le comparer aux couplages de l'état de l'art, que ce soit le couplage Reproduction de Mouvement (RDM) ou le couplage Position-Vitesse (PV) de type joystick.

Dans le cadre de la téléopération à distance, il existe dans la littérature un certain nombre de comparaisons entre ces deux derniers couplages [22, 23, 21, 41, 42]. Toutes ont conclu que, dans un cadre idéal, c'est-à-dire avec un espace de travail adapté, sans délai ni bruit, et pour une tâche à 1 ou 2 DdL, le couplage RDM présentait de meilleures performances et obtenait la préférence des utilisateurs comparé au couplage PV. Mais ces avantages se dégradent rapidement lorsque l'un espace de travail s'agrandit, ou lors de l'apparition d'un retard.

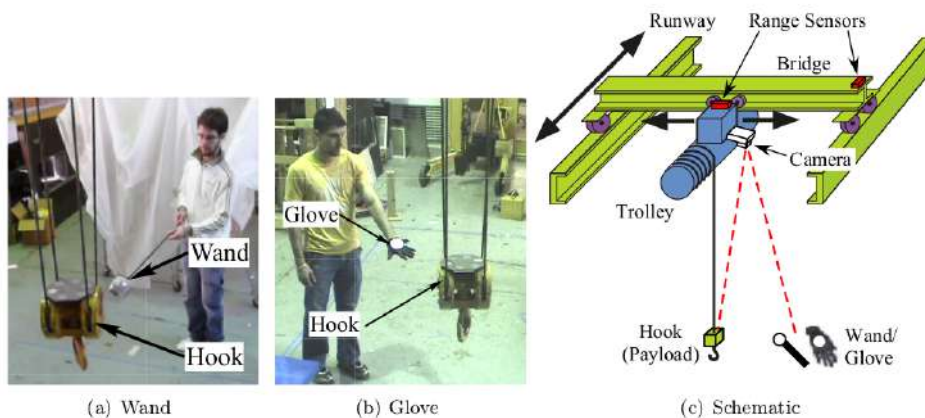


FIG. 3.1 – Comparaison entre un couplage PV, RDM et Baguette Physique (Wand) pour le contrôle d'une grue de pont-roulant, extrait de [Peng].

On note aussi que Peng [43] a étudié l'utilisation d'une baguette physique (légèrement souple, et d'une longueur d'environ 1m d'après photographie) pour piloter les déplacements d'une grue de pont roulant à 2 DdL. Cette commande, utilisant une baguette, est comparée à un guidage RDM avec la main, et à un guidage de type PV avec leviers de commande. La comparaison est effectuée lors d'une tâche de navigation dans un atelier de deux mètres de long et de large comprenant des obstacles (Fig.3.1). Les résultats (Fig.3.2) ont montré que le couplage PV est lent (77s par tâche) et peu précis (1 collision moyenne par participant) tandis que le couplage RDM et baguette présentent des précisions similaires (aucune collision) et des temps de complétion similaires (respectivement de 24s et 30s en moyenne). Cependant, ces tâches sont avant tout des tâches de navigation de l'opérateur

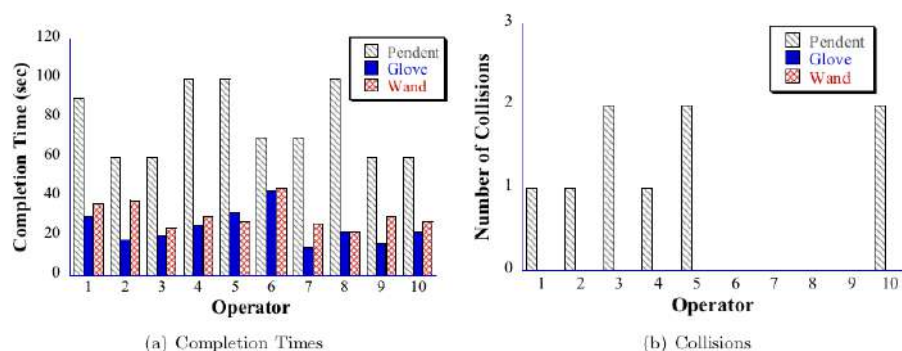


FIG. 3.2 – Comparaison des temps et nombre de collisions entre un couplage PV (Pendent), RDM (Glove) et Baguette Physique (Wand) pour le contrôle d’une grue de pont-roulant, pour chaque opérateur, extrait de [Peng].

dans l’espace, et la taille de la baguette utilisée est longue comparée à la taille de l’atelier et des obstacles à éviter, ce qui réduit a priori la maniabilité. Même si les résultats présentés par Peng [43] sont prometteurs pour le couplage LV comparé au couplage PV, les différences de tâches et de mode de contrôle par rapport à notre cas d’étude ne nous permettent pas d’établir d’hypothèses quant au couplage avec un lien virtuel.

Dans la suite du chapitre, nous présentons deux expériences permettant de mieux caractériser le couplage LV. La première expérience vise à comparer le couplage LV au couplage RDM, considéré comme la référence de l’état de l’art. Les participants utilisent leur main pour téléopérer le robot dans cette expérience. Les résultats montrent des niveaux de performances très similaires entre les deux modes, ce qui nous permet de considérer le nouveau couplage LV comme d’un usage suffisamment intuitif et performant pour la poursuite des travaux. La deuxième expérience vise à évaluer si le couplage LV peut également fonctionner dans des conditions moins favorables, lorsque la partie du corps servant à piloter n’est plus la main mais le thorax. Comme la mobilité du thorax est limitée, on donne également aux utilisateurs la possibilité de déformer le lien. On compare donc le couplage LV à la commande PV (grâce à un joystick manuel à 6 DdL) et la combinaison LV-PV simultanée, aussi appelée LVR. Les résultats montrent que, dans une large mesure, l’utilisation des mouvements du corps est préférée par les sujets en comparaison au recours au joystick, ce qui qualifie la commande LV comme une solution possible pour une téléopération sans les mains.

3.1 Comparaison des couplages RDM vs LV

Dans ”A comparative study between a virtual wand and a one-to-one approach for the teleoperation of a nearby robotic manipulator” (Annexe 2), nous comparons l’influence du couplage Lien Virtuel (LV) par rapport au couplage Reproduction de Mouvement (RDM), étudiant ainsi les caractéristiques du couplage LV rapportés au couplage de téléopération standard qui, dans un environnement adapté, est le plus performant de la littérature.

Des tâches d’atteinte de cible sont réalisées, en utilisant la main comme effecteur E_H

de téléopération. La main permet un bon contrôle, ainsi qu'un espace de travail grand, à la fois en translation et en rotation. Elle est donc a priori adaptée pour une utilisation efficace des deux couplages.

Afin d'avoir une comparaison équivalente du mouvement humain, les cibles sont créées pour que les déplacements de main soient identiques entre les deux couplages (et donc des déplacements de l'effecteur robotique différents). C'est-à-dire que, pour chaque cible, la position initiale et finale de la main sont les mêmes entre les deux couplages RDM et LV. Cependant, la trajectoire entre ces deux positions peut tout à fait varier au gré du participant selon les couplages.

Pour chaque couplage, 7 essais de 30 cibles ont été effectués par 20 participants. Sur ces essais, deux (4e et 6e) sont effectués sans retour visuel de l'effecteur désiré E_R^* par réalité augmentée. Cette absence de retour visuel virtuel oblige l'utilisateur à utiliser la position du robot réel comme seul retour visuel, ce qui induit un retard dans la boucle de contrôle (dû à la dynamique lente du bras Kinova).

3.1.1 Résultats RDM vs LV

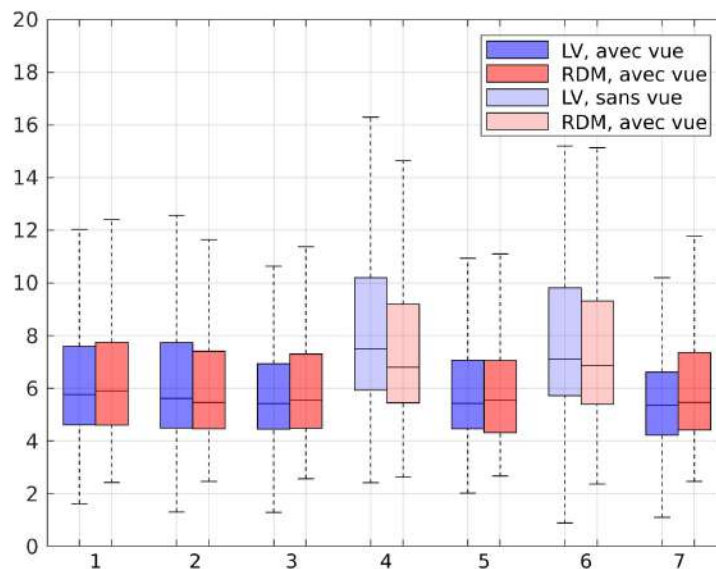


FIG. 3.3 – Distribution du temps de réalisation par cible, par mode de couplage, et pour chaque essai.

Les performances entre les deux modes de couplage se révèlent identiques, autant pour la durée Fig. 3.3 que pour la précision Fig. 3.4 (évaluée par le dépassement). L'absence de visualisation a entraîné une augmentation similaire du dépassement et du temps de réalisation dans les deux couplages. Nous pensons que cette augmentation du temps indique une intégration similaire des deux couplages en présence de retard qui est connu pour affecter significativement les performances des utilisateurs lors d'une téléopération en position [22].

Dans les deux modes de couplage, on peut également étudier le mouvement de la main en position et en orientation en fonction du temps (Fig. 3.5 et 3.6). On observe une décomposition de la tâche en un premier mouvement balistique suivi d'un mouvement

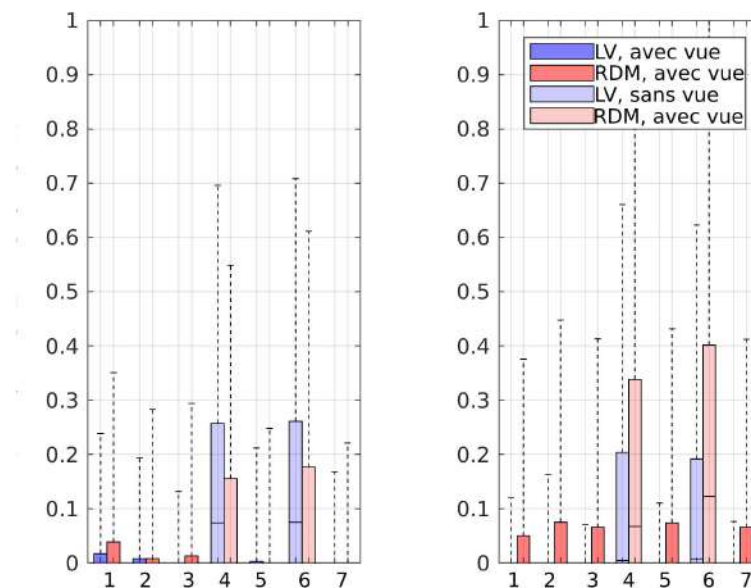


FIG. 3.4 – Distribution du dépassement pour chaque mode de couplage, durant chaque essai, en position et en orientation.

d'ajustement. Cette phase d'ajustement n'est pas visible sur la courbe en position, mais sur la courbe en vitesse où l'on observe une médiane de la vitesse nulle mais avec une grande variabilité, suggérant des ajustements dans les deux sens (vitesse négative = correction d'un dépassement; vitesse positive = correction d'une sous-estimation), aussi bien en translation qu'en rotation. Dans les deux couplages, ces phases sont de durées similaires et avec des profils similaires.

Enfin, plutôt que d'examiner la position et l'orientation en fonction du temps, on peut également étudier l'un en fonction de l'autre. Notamment, dans la littérature, Torres [39] étudie la relation entre l'erreur en position et l'erreur en rotation au cours du temps pour des tâches de la main à 6 DdL. Torres observe que, pour des mouvements de main, lors de la phase balistique (normalisée en durée et en amplitude), l'erreur en orientation en fonction de l'erreur en position suit une relation linéaire. On propose (Fig.3.7) d'afficher l'erreur en orientation en fonction de l'erreur en position de la main, lors de la phase balistique que l'on a normalisée en amplitude et en durée. On affiche la courbe moyennée pour tous les participants (en gras) et la courbe médiane pour chaque participant (claire) et on cherche à observer si, de nouveau, on retrouve la linéarité décrite par Torres, cette fois-ci lors d'une tâche de téléopération. Afin de comparer, on affiche également ces courbes non sur la main mais sur l'effecteur désiré (Fig.3.8) : pour le couplage RDM, ces courbes sont identiques, puisque les déplacements de l'effecteur désirés sont identiques à ceux de la main; pour le couplage LV, les courbes de l'effecteur désirés diffèrent cependant des courbes de la main.

On observe au niveau de la main une relation quasi-linéaire entre l'erreur position et rotation lors de la phase balistique, confirmant les observations de Torres dans un cadre de téléopération. Comparativement, lorsque l'on exprime cette relation au niveau de la pointe du lien virtuel, on observe clairement que la courbe s'éloigne de la droite ($y=x$) et donc de l'invariant de linéarité de Torres. Ce comportement suggère que les participants

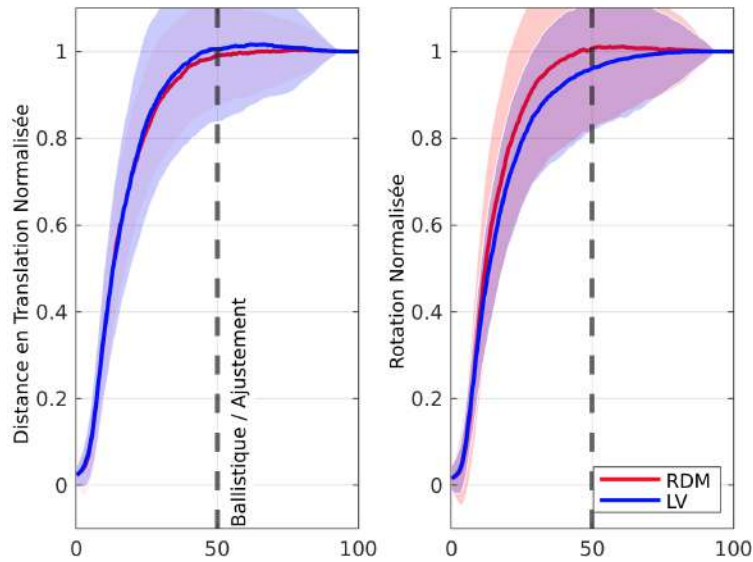


FIG. 3.5 – Trajectoire médiane de la main, normalisée en temps et en amplitude, en translation (à gauche) et en rotation (à droite). La zone claire indique la déviation standard de la courbe. La ligne en pointillés la séparation entre la phase balistique et la phase d’ajustement.

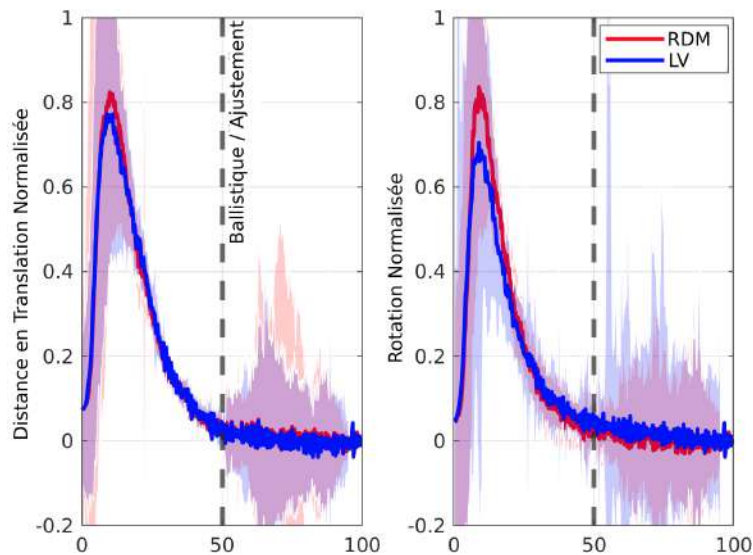


FIG. 3.6 – Vitesse médiane de la main, normalisée en temps et en amplitude, en translation (à gauche) et en rotation (à droite). La zone claire indique la déviation standard de la courbe. La ligne en pointillés la séparation entre la phase balistique et la phase d’ajustement.

coordonnent en effet leur main et non l’effecteur du lien virtuel. On cependant pourrait se demander si, avec le temps, cette relation tendrait à s’observer non plus sur la main mais à l’extrémité du lien. Des protocoles et des mesures sur le long terme pourraient ici être mis en place afin d’observer si une forme d’expertise peut conduire à un déplacement

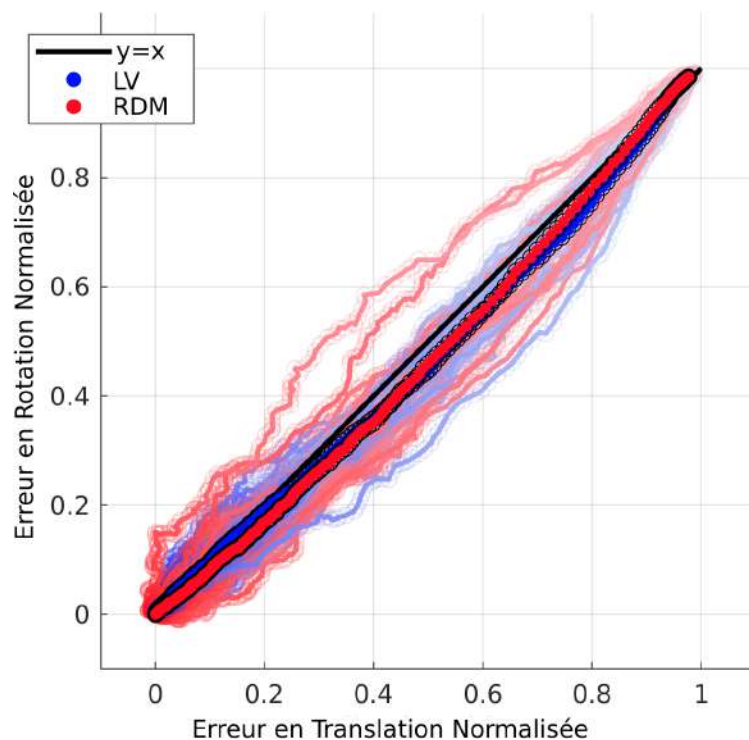


FIG. 3.7 – Courbe médiane de l'erreur en orientation en fonction de l'erreur en position, moyennée sur tous les participants (en gras) et par participant (en clair). On s'attend à observer des trajectoires linéaires [39], autour de la droite noire $y=x$.

du point d'action vers l'extrémité de l'outil lien virtuel.

Enfin, comme présenté dans l'annexe 2, aucune différence significative d'appréciation n'a été observée dans les questionnaires. Cette cohérence globale soutient l'idée que le type de couplage n'a pas d'impact significatif sur la tâche, et que les participants ont généralement perçu les deux modes de manière positive selon tous les critères.

3.1.2 Conclusion sur la comparaison RDM vs LV

Tous ces résultats suggèrent ainsi que le choix du couplage RDM ou LV, dans un cadre général de manipulation par la main - explorant diverses translations et orientations -, ne semble pas générer de comportements distincts chez les participants. Les performances et les profils de trajectoires de la main sont très similaires pour les deux couplages.

Cependant, les limitations intrinsèques de chaque couplage (translations limitées pour le couplage RDM, et rotation contraintes pour le couplage LV) nous amènent à envisager des scénarios dans lesquels le choix de couplage pourrait en effet présenter un avantage ou un désavantage. Dans les cas où la tâche nécessite des translations importantes avec des rotations minimales, le couplage LV pourrait s'avérer avantageux, notamment lors d'une téléopération effectuée par une partie du corps avec un espace de rotations important et un espace de translations limités (comme le thorax ou la tête) et inversement pour le couplage RDM.

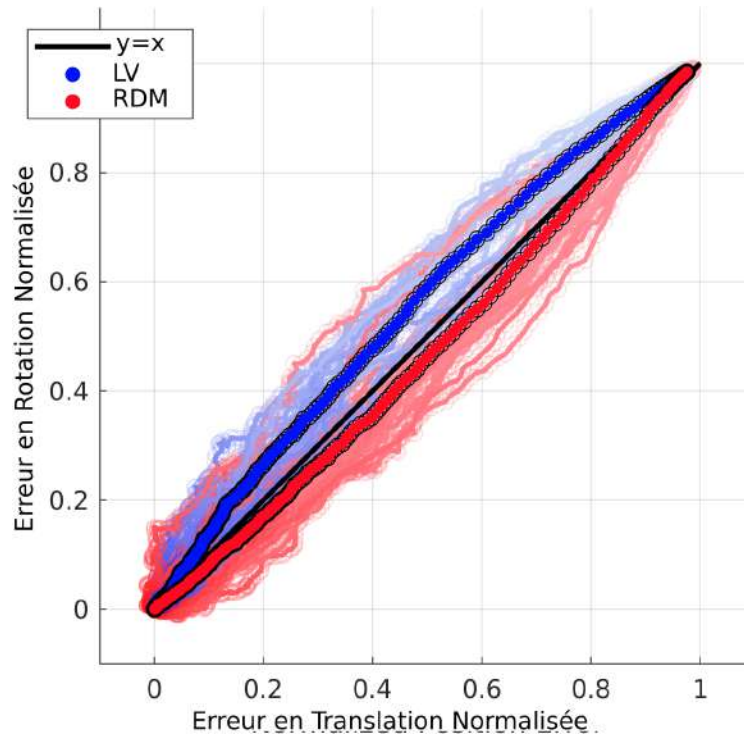


FIG. 3.8 – Courbe médiane de l’erreur en orientation en fonction de l’erreur en position, moyennée sur tous les participants (en gras) et par participant (en clair). On s’attend à observer des trajectoires linéaires [39], autour par la droite noire $y=x$.

3.2 Utilisation d’une partie du corps proximal : comparaison PV, LV et LVR

Afin d’étudier l’utilisation du couplage lien virtuel (LV) avec une partie proximale du corps, nous proposons dans ”Hands free teleoperation of a nearby manipulator through a virtual body to robot link” et ”6DoF control of an assistive manipulator through a virtual body-to-robot link” (Annexe 3 et 4), de comparer le couplage LV basé thorax à une commande position-vitesse (PV) de type joystick (cf. Fig. 2.3). Le thorax, par son amplitude de translation limitée, notamment haut-bas (flexion de genou ou extension de cheville pour un sujet typique debout) ne permet pas une utilisation facile du couplage RDM qui est donc ici exclu. Nous étudions également l’utilisation simultanée des deux, c’est-à-dire l’utilisation d’un lien virtuel reconfigurable (LVR).

Comme dans l’étude RDM vs LV, nous proposons une tâche d’atteinte de cibles :

- soit à 3 DdL, c’est-à-dire uniquement en translation (l’effecteur du robot étant maintenu à orientation constante), favorisant a priori le couplage LV ;
- soit à 6 DdL, où le couplage LV, de par l’effet de bras de levier, est plus demandeur sur le plan physique.

Les utilisateurs effectuent pour chaque tâche des essais d’atteinte de 30 cibles selon l’ordre de passage suivant : PV, LV, LVR, PV, LV, LVR, et enfin PV. Contrairement à l’expérience précédente, puisque l’on étudie ici un couplage position-vitesse comparativement à un

couplage position-position, les cibles sont identiques pour chacun des sept essais.

3.2.1 Résultats PV, LV et LVR

TAB. 3.1 – Temps moyen par cible, tous essais confondus pour chaque mode de couplage

Temps moyen par cible en s			
Couplage	PV	LV	LVR
Temps 3 DdL	6.5	5.8	6.7
Temps 6 DdL	9.9	7.0	8.6

Dans le cas à 3 DdL, le couplage LV s'est révélée légèrement plus performant (environ 11% plus rapide) que le couplage vitesse Tab.3.1 et ce malgré l'utilisation du thorax pour LV et de la main pour PV. Ces observations rejoignent celles de [22] et [41] mais sont ici généralisées à une autre partie du corps que la main et un plus grand nombre de degrés de liberté. De plus, le temps de complétion de la tâche avec couplage LVR est similaire au temps de complétion de la tâche avec couplage PV. L'utilisation couplée des deux modes n'allonge donc pas le temps de complétion (par rapport au mode PV, le plus lent des deux). Il est à noter que le gain en vitesse étant un facteur important pour les performances du couplage PV, chaque participant effectuait quelques essais de réglage afin de choisir un gain qu'il considérait comme le meilleur compromis entre précision et vitesse d'exécution.

Le couplage LV a été décrit dans les questionnaires comme fournissant une meilleure sensation d'extension de soi. D'autres expériences pourraient être menées afin d'explorer plus en détail cette question de l'intégration dans le schéma corporel. Cependant, la tâche est en contrepartie plus éprouvante physiquement, ce qui a été noté dans les questionnaires, sans pour autant que l'on observe une augmentation de l'effort cognitif estimé par les participants.

Lors d'une tâche à 6 DdL, le bras de levier rendant les orientations plus difficiles, on pourrait s'attendre à une dégradation significative des performances du couplage LV. La tâche est physiquement plus éprouvante (selon les réponses aux questionnaires), elle est cependant facilement généralisée par les utilisateurs qui montrent une faible augmentation du temps de complétion entre la tâche à 3 DdL et à 6 DdL (+1.1s, c.a.d +16% d'augmentation) comparativement à l'augmentation du temps de complétion du couplage vitesse (+3.4s, c.a.d +34%) Tab.3.1. Si ces résultats sont affectés par la difficulté d'utilisation de l'interface SpaceMouse à 6 DdL (notamment en raison de la difficulté à découpler translations et rotations), ils démontrent une généralisation aisée du couplage LV de 3 à 6 DdL. Cette généralisation suggère une bonne intégration du lien rigide LV pour des tâches de pointage et d'atteinte de cible, sans entraînement, tel que déjà observée par Maravita [9].

On analyse également les profils de trajectoire lors de l'utilisation du couplage LVR où les deux commandes peuvent être simultanément utilisées. On observe deux phases (comme dans la comparaison entre le couplage RDM et LV utilisés à la main) : une phase balistique et d'une phase d'ajustement. Lors de la phase balistique, les participants font une utilisation exclusive du couplage LV (c.à.d que le joystick n'est pas utilisé), et une utilisation simultanée des deux couplages LV et PV lors de la phase d'ajustement Fig. 3.9.

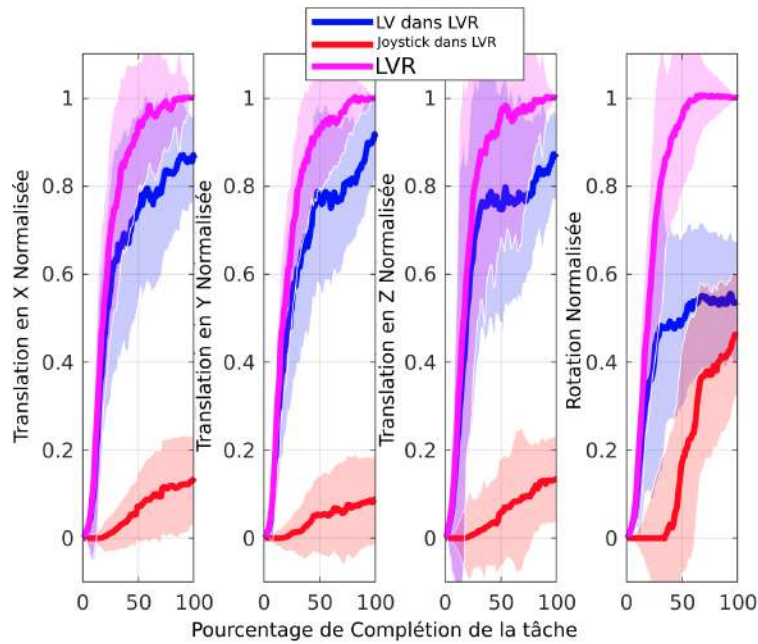


FIG. 3.9 – Courbe médianes en X,Y,Z et en rotation dans le mode hybride, avec la distribution de la tâche effectuée par les mouvements du buste et du joystick.

Cette phase balistique semble attester d'une propension naturelle à faire appel au corps, et donc au couplage LV (position-position) dans un premier temps, jusqu'à ce que le coût physique de cette action devienne important et que le couplage PV ne soit alors préférable pour terminer le mouvement.

Considérant la totalité du mouvement, le couplage LV réalise en moyenne environ 80% de la tâche en translation, contre 20% pour le couplage PV, mais seulement 50% de la tâche en rotation. Cette disparité atteste une difficulté prononcée à générer des rotations de l'effecteur par le couplage LV, et la nécessité du couplage PV pour la réalisation des tâches les plus difficiles au niveau de l'orientation désirée.

Enfin, dans la tâche à 6 DdL, on étudie, de même que dans la section RDM vs LV, la coordination rotation/position, c'est-à-dire l'erreur en rotation normalisée en fonction de l'erreur en position normalisée. Contrairement au couplage RDM ou LV de la main, on compare ici ces courbes pour l'effecteur robotique désiré E_R^* , puisqu'on ne peut pas faire cette étude pour E_H ni avec le joystick ni le couplage PV. On utilise également ici la totalité du mouvement, et non la phase balistique seule, de nouveau parce que, dans le couplage PV, cette séparation entre phase balistique et phase d'ajustement est moins nette. La médiane sur tous les participants est présentée Fig. 3.10, et la médiane par participants Fig. 3.11.

On note que, en moyenne sur tous les participants, cette courbe de coordination se situe légèrement au-dessus de la courbe $y=x$ pour le couplage LV (ce qui avait déjà été observé dans le cadre du couplage LV à la main Fig.3.8), et que les courbes des couplages PV et LVR sont également relativement proches de la droite $y=x$, ce qui semble témoigner d'une bonne coordination. Si l'on étudie cependant ce tracé par participant, on observe une importante dispersion symétrique des participants autour de l'axe $y=x$ dans le couplage PV. Cette symétrie de la dispersion médiane suggère que chaque utilisateur a une

stratégie préférée (ou qu'il maîtrise mieux) qui est souvent sous-optimale. La dispersion par participant dans le couplage LV est moins importante (et toujours légèrement au-dessus de $y=x$) ce qui témoigne d'une bonne coordination de tous les participants.

Dans le couplage LVR, on peut également décomposer la course totale de l'effecteur selon un terme dû aux mouvements de thorax et un terme dû aux activations du joystick. Cette analyse des comportements individuels (Fig. 3.11) révèle une grande variété des stratégies. Cette variété des "mouvements internes" suggère que le couplage LVR offre une personnalisation, avec la possibilité pour chaque opérateur de choisir une répartition entre LV et PV qui lui convient le mieux et lui semble la plus équilibrée, en conservant un bon compromis entre les performances et le coût physique des couplages.

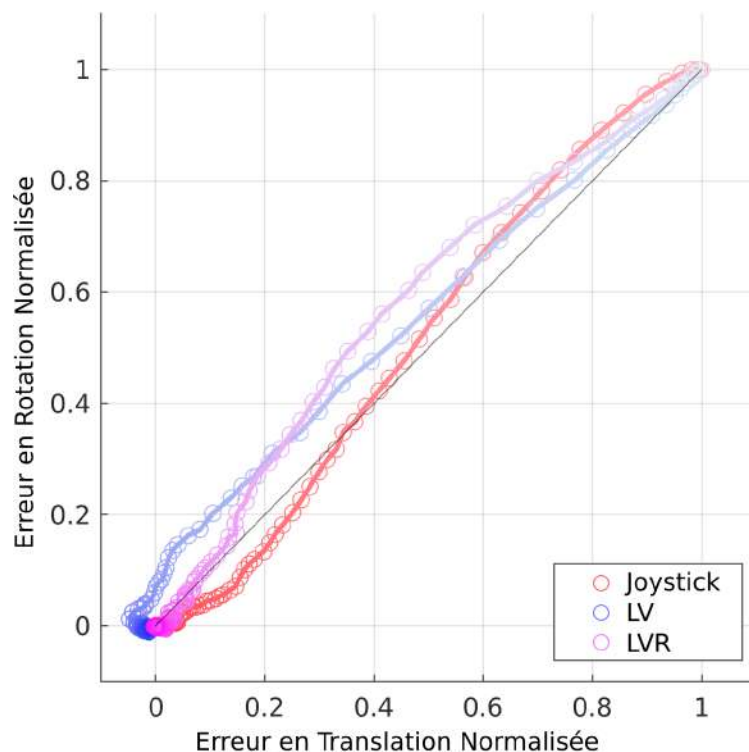


FIG. 3.10 – Coordination spatiale moyennée sur tous les participants pour chaque mode de couplage PV, LV et LVR

3.2.2 Conclusion sur la comparaison entre les couplages LV, PV et LVR

Après une étude comparative du couplage LV et RDM, identiques lorsque utilisés à la main, nous avons ici comparé ici le couplage LV utilisé avec le thorax et PV utilisé à la main. On trouve dans la littérature un certain nombre de références qui ont établi que le couplage RDM est généralement plus rapide et préféré par les utilisateurs comparé au couplage PV. Nous retrouvons ici des résultats similaires, avec un couplage LV plus rapide que le couplage PV malgré un effort physique plus important lié au choix du thorax pour E_H . L'étude du couplage LVR nous montre également que le couplage LV est systématiquement appelé avant le couplage PV, suggérant une intuitivité naturelle du couplage position-position par rapport au couplage position-vitesse. Cependant, l'utilisation

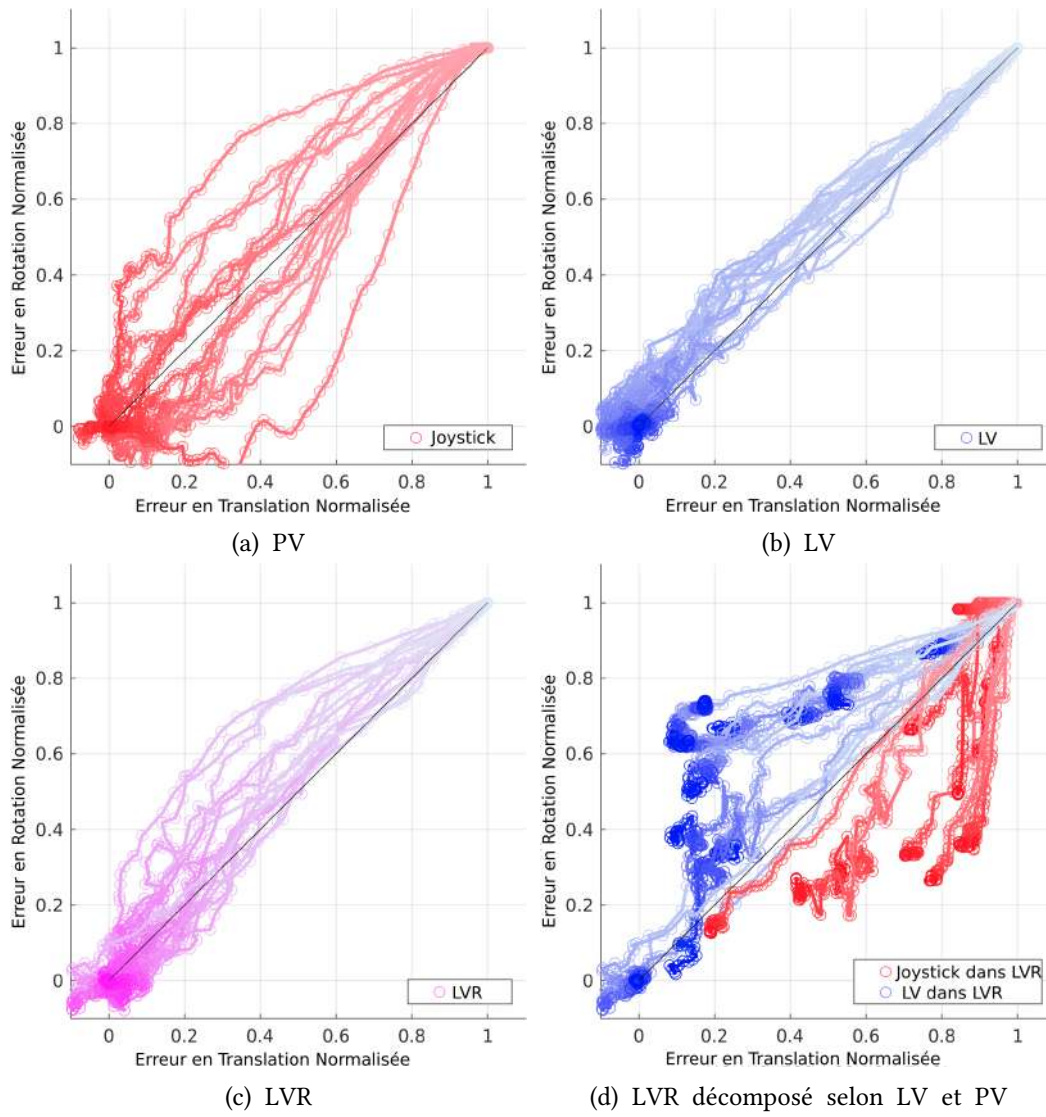


FIG. 3.11 – Coordination spatiale par participants pour chaque mode de couplage (avec décomposition dans le cas hybride)

du couplage PV en fin de mouvement suggère qu'il reste essentiel d'intégrer un terme de vitesse afin de pouvoir atteindre des espaces de travaux plus grands, notamment en rotation où le bras de levier du couplage LV empêche de grandes rotations.

3.2.3 Peut-on anticiper le terme de vitesse dans le couplage LVR?

Avec le couplage LVR, tous les participants exhibent une phase balistique suivie d'une phase d'ajustement. La phase balistique du mouvement est toujours effectuée avec le couplage LV seul, y compris pour les rotations de l'effecteur, qui sont pourtant plus physiques et difficiles pour l'opérateur (et qui, a priori, ne résulte pas d'une coordination oeil-corps par exemple). Cette observation est renforcée lorsque l'on considère la quantité de complétion de la tâche en rotation en fonction de l'angle total réalisé, présenté Fig. 3.12 : pour de petits angles (entre 2 et 5°) seul LV est utilisé sur tout le mouvement; pour des angles moyens (entre 5 et 20°) le couplage LV démarre en premier, effectuant 50% de la tâche, avant que le couplage PV ne soit ensuite activé pour effectuer les 50 % restants; pour des grands angles (supérieurs à 20°) le couplage LV effectue seulement 20% de la tâche puis le PV les 80% restant. Quelque soit la proportion du mouvement effectuée par le couplage LV, on note donc que celui-ci démarre systématiquement avant couplage PV. Cette séquentialité entre LV et PV suggère que l'on pourrait, à partir du mouvement dû au couplage LV, distinguer quand l'opérateur souhaite activer le couplage PV. On pourrait ainsi étudier, quand il s'écarte de sa zone de confort, s'il souhaite tout de même poursuivre son mouvement. Cette interprétation du mouvement du thorax permettrait possiblement de générer une reconfiguration du lien virtuel (et donc la quantité de mouvement du couplage PV) sans avoir à utiliser de périphérique manuel supplémentaire (joystick). C'est ce que nous étudions au Chapitre 4.

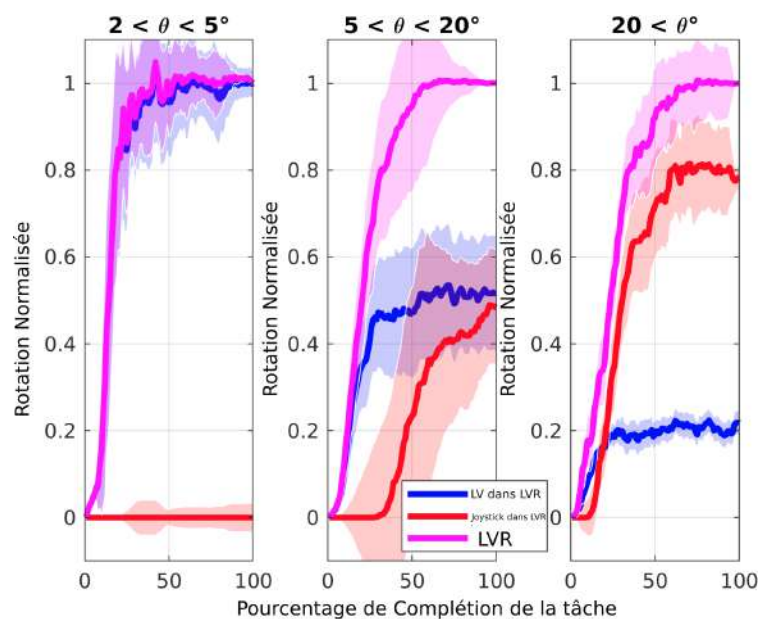


FIG. 3.12 – Courbe médianes en rotation selon la quantité de rotation θ demandée dans le mode LVR, avec la distribution de la tâche effectuée par les mouvements du buste LV et du joystick PV.

Chapitre 4

Reconfiguration automatique du Lien Virtuel : le CCC dans un cadre général de robotique (dé)portée

A la lumière des résultats des chapitres précédents, il apparaît que le couplage position-position est préféré pour un espace de travail restreint, mais que le couplage position-vitesse (PV) reste nécessaire pour effectuer de grands déplacements (en particulier de grandes réorientations de l'effecteur). D'où l'intérêt d'un couplage par Lien Virtuel Reconfigurable (LVR) qui combine les deux. Cependant, dans le couplage LVR, la gestion de la reconfiguration par un périphérique secondaire (joystick) nécessite de gérer simultanément deux sources de mouvement distinctes : les mouvements du corps où est attachée la base du lien, et les mouvements pour piloter ce périphérique secondaire. Si dans notre évaluation nous n'avons pas mesuré d'augmentation significative du coût cognitif perçu, on sait, dans des cas de commande plus complexes que cette multiplicité peut générer une surcharge cognitive, menant à une sur ou sous-utilisation d'une des sources de mouvement. C'est le cas par exemple pour la commande de prothèses qui mobilise à la fois des mouvements du corps (où est fixée la base de la prothèse) et des contractions musculaires (signaux EMG) [44]. Or, comme il a été observé dans la comparaison LV vs PV vs LVR, le mouvement du corps démarre systématiquement avant l'activation du joystick secondaire. Ceci ouvre la possibilité de générer des vitesses de reconfiguration du Lien Virtuel (LV) à partir de l'observation des mouvements du corps où est fixée la base du lien virtuel \mathcal{F}_H .

Dominjon [30] (Fig.4.3), dans un système de téléopération à distance utilisant une interface Haption Virtuose 6 DdL, propose de commuter entre le couplage RDM autour d'un point de repos (le point central de son espace de travail), et le couplage PV lorsque l'opérateur s'en éloigne au-delà d'un certain rayon. Ce système alterne ainsi entre le couplage RDM pour de faibles déplacements, et le couplage PV quand la main de l'opérateur se rapproche des limites de l'espace de travail. Pour ce faire, une force élastique tend à ramener l'utilisateur à son point de repos lorsqu'il s'en éloigne de façon importante. Cette méthode se montre efficace comparée aux traditionnelles méthodes de pompage ou de mise à l'échelle [30]. Dans notre couplage LVR, cette commutation nécessiterait cependant de temporairement briser le lien virtuel, puis de le reformer lorsque l'utilisateur retourne dans sa zone initiale. Cette rupture du lien pourrait a priori créer des transitions complexes et des difficultés pour l'utilisateur.

Legrand [45] propose une méthode de contrôle d'articulations de prothèse de bras qui, lorsque l'utilisateur exhibe des compensations posturales (c'est-à-dire dévie d'une posture de référence jugée ergonomique), génère des vitesses des articulations prothétiques. Cette commande, appelée annulation des mouvements compensatoires, ou Compensation

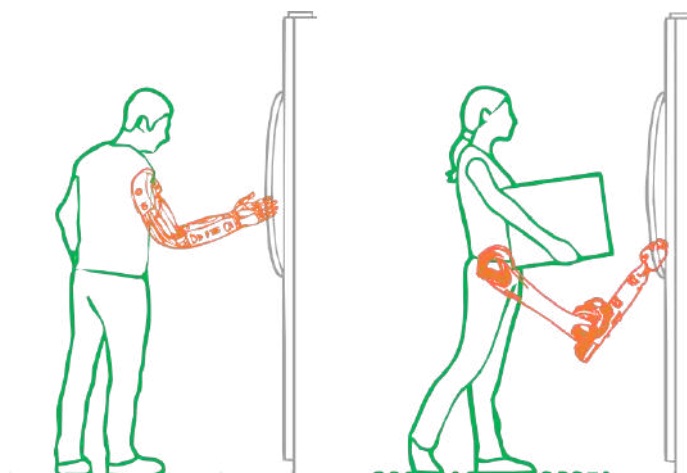


FIG. 4.1 – Exemple de robot porté : en vert, l’opérateur humain qui doit gérer ses mouvements (c.à.d les articulations proximales du système global) et en orange le système robotique porté, dont les articulations distales sont généralement contrôlées par un signal physiologique secondaire (joystick, EMG, EEG, etc.).

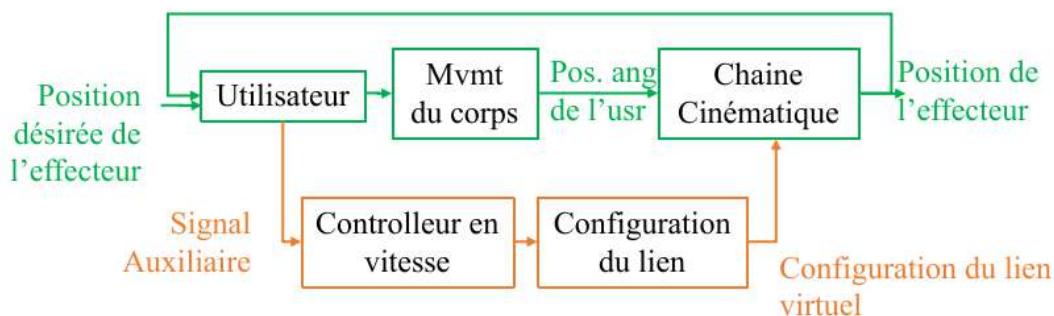


FIG. 4.2 – Schéma de commande LVR pour un robot porté avec mise en série des articulations humaines (proximales) et des articulations robotisées du lien (distales). La reconfiguration du lien est pilotée par une entrée auxiliaire (tel qu’un joystick) : la boucle de contrôle moteur de l’opérateur (en vert) et la boucle du périphérique auxiliaire (en orange) sont ainsi gérées parallèlement par l’utilisateur, qui doit coordonner les mouvements de son corps et la génération de ces signaux auxiliaires.

Cancellation Control (CCC), permet de générer des vitesses additionnelles d’un robot porté sans utilisation de signaux auxiliaires (EMG, EEG, joysticks) mais uniquement par l’observation de la posture actuelle de l’utilisateur et l’estimation d’une posture ”de repos”. Cette méthode, appliquée à un lien virtuel, ressemble à celle de Dominjon; elle ne commute cependant pas entre les deux couplages, mais les superpose, ce qui permet d’éviter toute rupture du lien virtuel.

Afin d’adapter l’approche CCC à notre couplage LV(R), on note tout d’abord que l’écriture cinématique d’un système Opérateur + Prothèse est identique à celle de l’écriture du lien

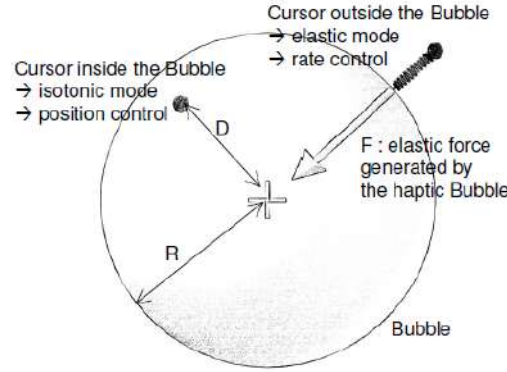


FIG. 4.3 – Image du "Bubble" pour la téléopération [30] : lorsqu'un utilisateur se situe à l'intérieur d'une bulle, la téléopération est effectuée par le couplage RDM. Dès lors que l'utilisateur sort de cette "bulle", le couplage devient PV avec une force élastique qui tend à ramener l'utilisateur dans sa "bulle" initiale grâce à une interface à retour d'effort.

reconfigurable lors du couplage LVR (Eq. 2.14), avec la mise en série de l'humain et du système robotique.

$$\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t) = \mathbf{T}_{W \rightarrow E_H}(t) \mathbf{T}_{E_H(t) \rightarrow E_R^*}(t) \quad (4.1)$$

où E_H correspond au point de fixation de la prothèse, ou du lien virtuel, et E_R^* à la main de la prothèse, ou à l'effecteur du lien virtuel. La différence étant que la prothèse est réelle et que le lien est virtuel, donc sans poids.

Legrand [35] propose une formulation du CCC qui est

1. construite autour d'une posture de référence, c'est-à-dire que la posture de repos est constante (par exemple qui maintient le dos droit). Or, en pratique, il est difficile de distinguer mouvements fonctionnels et compensatoires (par exemple, se pencher en avant pour compenser la mauvaise posture de la prothèse, vs se pencher pour ramasser un objet par terre ou éloigné);
2. spécifiquement écrite pour la commande de prothèse.

Nous proposons donc dans la section suivante une formulation généralisée du CCC, pour tout couplage de deux système montés en série (c'est-à-dire de tout robot réel porté, ou tout robot virtuel porté), et sous la forme d'une commande optimale qui minimise une fonction de coût quelconque (et non nécessairement la distance à une posture de référence).

4.1 Formulation généralisée du CCC sous forme de contrôle optimal

4.1.1 Cinématique

On considère ici un robot (réel ou virtuel) connecté en série à l'utilisateur. On note dans cette section l'opérateur comme étant le système proximal \mathcal{H} de configuration angulaire

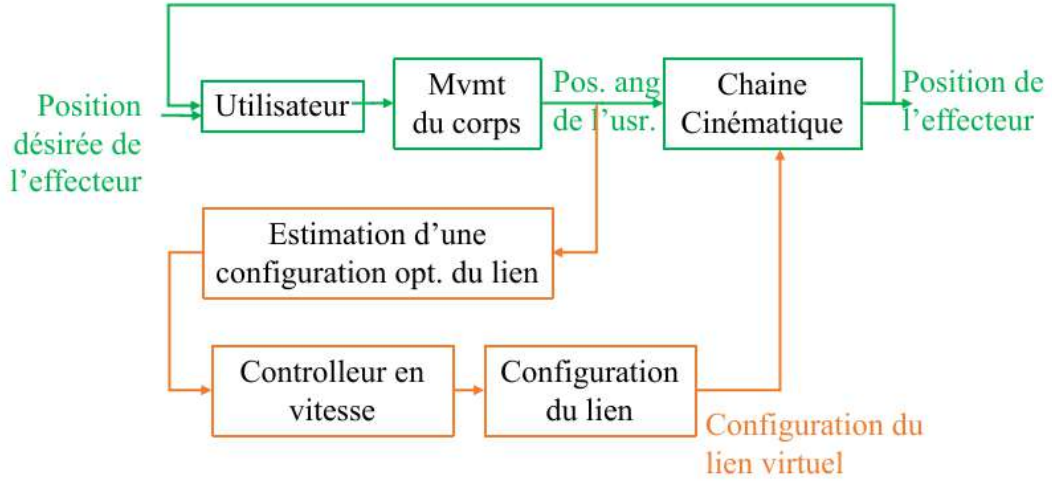


FIG. 4.4 – Schéma de commande du lien virtuel avec CCC (inspiré de la thèse de Legrand [35] : les vitesses articulaires du robot porté sont générées à partir de 1. l'observation de la posture de l'opérateur; 2. l'estimation d'une posture optimale plus confortable; 3. l'asservissement en boucle fermée du lien reconfigurable. La boucle de commande du lien (orange) est désormais fermée et asservie à partir de la posture courante de l'opérateur, supprimant pour ce dernier la nécessité de générer un signal auxiliaire.

$\mathbf{q}_H \in \mathbb{R}^{n_H}$ et de configuration opérationnelle entre sa base (pieds si debout, hanches si assis, etc.) et la partie distale de son corps où est reliée le robot (thorax, tête, main) comme :

$$\mathbf{x}_{E_H} = \mathbf{f}_H(\mathbf{q}_H) . \quad (4.2)$$

où $\mathbf{f}_H(\cdot)$ le modèle géométrique direct de l'opérateur

Le système robotique porté \mathcal{R} possède de la même manière une configuration angulaire $\mathbf{q}_R \in \mathbb{R}^{n_R}$ et une configuration opérationnelle de sa base à son effecteur :

$$\mathbf{x}_{E_R} = \mathbf{f}(\mathbf{q}_R) , \quad (4.3)$$

comme précédemment décrit (cf Eq.2.1).

La base de \mathcal{R} correspond à l'effecteur de \mathcal{H} , et la cinématique directe du système global s'écrit :

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{q}) = \mathbf{f} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{q}_H \\ \mathbf{q}_R \end{bmatrix} \right) = \mathbf{x}_{E_H} \circ \mathbf{x}_{E_R} = \mathbf{f}_H(\mathbf{q}_H) \circ \mathbf{f}_R(\mathbf{q}_R) , \quad (4.4)$$

où \circ est la composition dans l'espace opérationnel (c'est-à-dire le produit dans le cas de matrices de transformations) et $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{n_x}$, avec $n_x = 3$ ou 6.

Enfin, la transmission directe des vitesses s'écrit :

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}_{\mathbf{x}|\mathbf{q}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_{\mathbf{x}|\mathbf{q}_H}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}_H + \mathbf{J}_{\mathbf{x}|\mathbf{q}_R}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}_R . \quad (4.5)$$

On suppose par la suite que $n_H \geq n_x$, et $\mathbf{J}_{\mathbf{x}|\mathbf{q}_H}$ est de rang n_x , c'est-à-dire que l'opérateur \mathcal{H} peut réaliser la tâche avec un effecteur robotique rigide, en n'utilisant que ses propres articulations, le système robotique \mathcal{R} apportant une redondance supplémentaire.

4.1.2 Hypothèses sur le système proximal

Afin de dériver la formulation d'un contrôleur dans un cadre généralisé, il nous faut faire des hypothèses sur le système proximal, c'est-à-dire l'opérateur. On suppose premièrement que l'opérateur souhaite atteindre un but inconnu (pour l'effecteur robot) \mathbf{x}_d . On suppose ensuite que le robot distal est lent. Il s'agit d'une hypothèse quasi-statique selon laquelle l'utilisateur, pour atteindre son but, considère à tout instant que le robot est rigide, comme illustré sur la Figure 4.5 schéma 2.

A partir de cette hypothèse, on considère un modèle de Spatial Trajectory Formulation with Direction Mapping [46] pour un opérateur manipulant un objet rigide. Dans ce modèle, l'utilisateur calcule à chaque instant une direction spatiale de sa main qui permet de minimiser une erreur de tâche (l'effecteur de l'outil) dans l'espace opérationnel. Cette direction spatiale est ensuite transformée en incréments angulaires ε_{q_H} . Ces incréments angulaires sont calculés afin de permettre la réalisation de la tâche, et la redondance cinématique est résolue par la minimisation d'une fonction de coût c_H (inconnue). En supposant que l'utilisateur peut toujours atteindre son but même si l'effecteur est rigide, on écrit :

$$\varepsilon_{q_H} = \underset{\varepsilon}{\operatorname{argmin}} c_H(\mathbf{q}_H + \varepsilon) \quad \text{t.q.} \quad \mathbf{x}_d = \mathbf{f} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{q}_H \\ \mathbf{q}_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \right) , \quad (4.6)$$

On notera ici que l'on suppose que l'opérateur estime correctement la position de l'effecteur robotisé \mathbf{x} , ce qui s'appuie sur l'observation que, même lorsque l'utilisateur ne connaît pas la configuration angulaire q_R , il peut estimer la position de l'effecteur par ses retours sensoriels, comme la vue.

4.1.3 Contrôleur du robot reconfigurable

Afin de dériver le modèle du contrôleur robotisé, on réutilise l'hypothèse quasi-statique selon laquelle l'utilisateur atteint son but (ou du moins qu'il a atteint un but intermédiaire) sans que le robot ne se soit reconfiguré. L'erreur spatiale de l'effecteur étant alors nulle, on estime un incrément $\varepsilon_{\mathbf{q}}$ de la posture angulaire qui minimise cette fois-ci une fonction de coût posturale c_R sur le système global (opérateur + robot), illustré Fig.4.5 schéma 3 :

$$\varepsilon_{\mathbf{q}} = \underset{\varepsilon}{\operatorname{argmin}} c_R(\mathbf{q} + \varepsilon) \quad \text{t.q.} \quad \mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{q} + \varepsilon) , \quad (4.7)$$

où c_R une fonction de coût postural pour le système entier.

La solution de l'équation Eq. (4.7) permet d'obtenir une configuration optimale du système global $\varepsilon_{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \hat{\varepsilon}_{q_H} \\ \varepsilon_{q_R} \end{bmatrix}$ où $\hat{\varepsilon}_{q_H}$ une estimation de l'incrément angulaire optimal de l'opérateur selon c_R et ε_{q_R} celui du lien reconfigurable, utilisé pour asservir le lien. $\hat{\varepsilon}_{q_H}$ correspond à ce que le robot estime être la compensation de l'erreur de positionnement ε_{q_R} , mais cette erreur n'est pas explicitement utilisé dans la commande du robot.

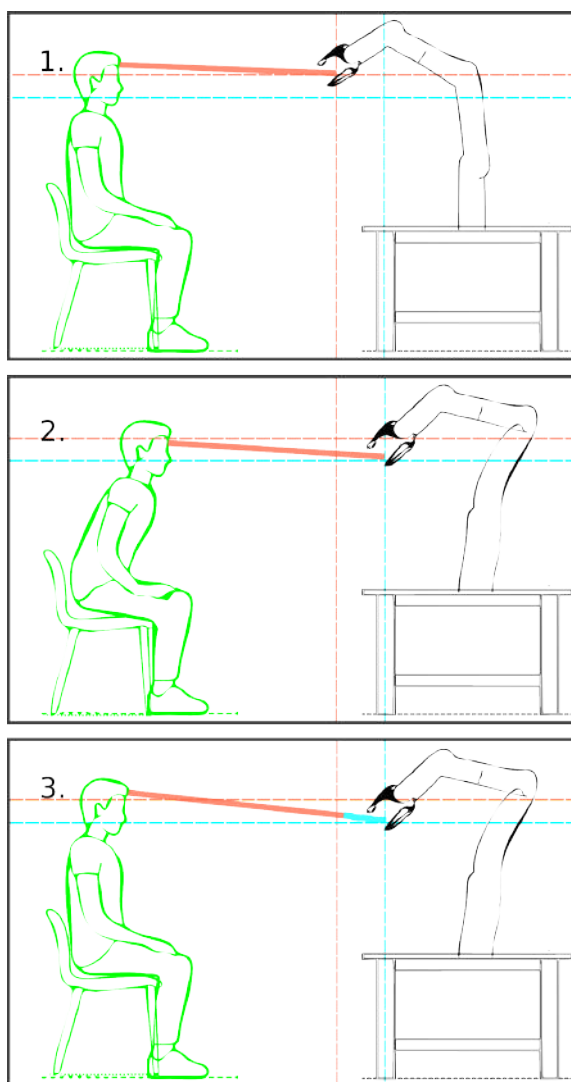


FIG. 4.5 – Hypothèse quasi-statique dans un cas où opérateur (vert) et LVR (orange) sont reliés au niveau de la tête. 1. L’opérateur commence dans une position confortable mais souhaite que le robot atteigne une position plus éloignée et plus basse. 2. L’opérateur se penche en avant (tête penchée pour aller plus bas, et buste vers l’avant pour avancer) afin d’atteindre son nouveau but désiré avec le lien rigide. C’est l’hypothèse quasi-statique : l’opérateur est capable d’atteindre un nouveau but malgré que le lien soit de configuration fixe. 3. Le lien devrait se reconfigurer avec un incrément (cyan) permettant à l’opérateur de revenir à une posture confortable (tête penchée mais buste droit) tout en maintenant son nouveau but.

Afin d’implémenter le contrôleur, similairement à Legrand, on utilise un simple correcteur proportionnel :

$$\dot{\mathbf{q}}_{R^*} = \lambda \varepsilon_{\mathbf{q}_R} , \quad (4.8)$$

λ le gain positif du contrôleur et $\dot{\mathbf{q}}_{R^*}$ la vitesse de reconfiguration angulaire désirée du

lien. On étudiera Section 4.3 l'influence de λ sur la stabilité globale du système.

4.1.4 Point d'équilibre

On suppose dans un premier temps que le système est stable. On étudie alors la position d'équilibre \mathbf{x}_{eq} pour un but désirée \mathbf{x}_d .

On note la configuration angulaire à l'équilibre : $\mathbf{q}_{eq} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{H,eq} \\ \mathbf{q}_{R,eq} \end{bmatrix}$.

Le système ayant convergé, on peut intégrer les incréments définis dans Eq. (4.6) et Eq. (4.7) :

$$\mathbf{q}_{H,eq} = \underset{\mathbf{q}_H}{\operatorname{argmin}} c_H(\mathbf{q}_H) \text{ et } \mathbf{x}_d = \mathbf{f} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{q}_{H,eq} \\ \mathbf{q}_{R,eq} \end{bmatrix} \right) \quad (4.9)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{q}}_{H,eq} \\ \mathbf{q}_{R,eq} \end{bmatrix} = \underset{\mathbf{q}}{\operatorname{argmin}} c_R(\mathbf{q}) \text{ et } \mathbf{x} = \mathbf{f} \left(\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{q}}_{H,eq} \\ \mathbf{q}_{R,eq} \end{bmatrix} \right) \quad (4.10)$$

avec $\hat{\mathbf{q}}_{H,eq}$ la configuration optimale de l'opérateur estimée par la fonction de coût c_H .

L'équation Eq. (4.9) assure alors que le but \mathbf{x}_d est atteint pour une configuration angulaire du lien $\mathbf{q}_{R,eq}$. On peut donc remplacer dans Eq. (4.10) $\mathbf{x} = \mathbf{x}_d$. En combinant les contraintes cinématiques de Eq. (4.9) et de Eq. (4.10) on obtient :

$$\mathbf{f} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{q}_{H,eq} \\ \mathbf{q}_{R,eq} \end{bmatrix} \right) = \mathbf{f} \left(\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{q}}_{H,eq} \\ \mathbf{q}_{R,eq} \end{bmatrix} \right) = \mathbf{x}_d, \quad (4.11)$$

Eq. (4.9) et Eq. (4.10) partagent ainsi une même configuration de l'effecteur, et une même configuration angulaire du lien $\mathbf{q}_{R,eq}$, mais peuvent avoir différentes postures de l'opérateur $\mathbf{q}_{H,eq}$ et $\hat{\mathbf{q}}_{H,eq}$ qui dépendent respectivement de c_H et c_R .

En d'autres termes, c_R détermine une configuration optimale du lien $\mathbf{q}_{R,eq}$ pour une position de l'effecteur tandis que c_H résout ensuite la posture optimale $\mathbf{q}_{H,eq}$ pour un outil rigide de configuration $\mathbf{x}_{R,eq} = \mathbf{f}_R(\mathbf{q}_{R,eq})$:

$$\mathbf{q}_{H,eq} = \underset{\mathbf{q}_H}{\operatorname{argmin}} c_H(\mathbf{q}_H) \text{ s.t } \mathbf{x}_d = \mathbf{f}_H(\mathbf{q}_H) \circ \mathbf{f}_R(\mathbf{q}_{R,eq}) \quad (4.12)$$

Le choix de c_R apparaît donc crucial, et idéalement il s'agirait de choisir $c_H = c_R$ mais cette dernière est inconnue. Cependant, même si $c_H \neq c_R$, l'atteinte du but x_d est robuste au choix de la fonction c_R , qui peut donc permettre d'atteindre une posture relativement confortable pour l'utilisateur sans être l'exact optimum global. Sa détermination est liée à des considérations relevant du domaine du contrôle moteur, et reste encore la difficulté majeure afin d'implémenter ce mode dans un cadre général avec des tâches variées et inconnues.

4.2 Résolution de l'équation d'optimalité du contrôleur

Contrairement à Legrand [35], où la posture $\hat{\mathbf{q}}_{p,eq}$ était constante et égale à une posture de référence préalablement déterminée (par exemple, dos vertical de l'opérateur alors qu'a priori le dos participe en partie à la tâche), la résolution de Eq. (4.10), dans ce cadre général, n'est pas analytique. Nous avons proposé dans "Computing the positioning error

of an upper arm robotic prosthesis from the observation of its wearer's posture" (Annexe 6) un algorithme de résolution pour toute fonction de coût c_H localement dérivable. En utilisant une descente de gradient dans l'espace nul, nous proposons de trouver un minimum local de c_H qui satisfait, à chaque pas de l'algorithme, le respect de la position de l'effecteur \mathbf{x} (égal à sa position actuellement mesurée) :

$$\begin{array}{l}
 \text{INITIALIZATION} \\
 \mathbf{q}_{eq} \leftarrow \mathbf{q} \\
 \delta \leftarrow \infty \\
 \text{ITERATIVE LOOP} \\
 \text{while } \|\delta\| > \tau, \\
 \quad \delta \leftarrow \mathbf{J}^\dagger(\mathbf{q}) [\mathbf{f}(\mathbf{q}) - \mathbf{f}(\mathbf{q}_{eq})] \\
 \quad \quad - [\mathbf{I} - \mathbf{J}^\dagger(\mathbf{q})\mathbf{J}(\mathbf{q})] \text{grad } c_H(\mathbf{q}) \\
 \quad \mathbf{q}_{eq} \leftarrow \mathbf{q}_{eq} + \delta \\
 \text{end while}
 \end{array} \tag{4.13}$$

Chaque incrément δ de l'algorithme se compose de deux termes : le terme $\mathbf{J}^\dagger(\mathbf{q}) [\mathbf{f}(\mathbf{q}) - \mathbf{f}(\mathbf{q}_{eq})]$, qui garantit une cinématique directe constante du système global, et donc le respect de $\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{q}_{eq})$ dans Eq. (4.7); et la descente de gradient sur l'espace nul $[\mathbf{I} - \mathbf{J}^\dagger(\mathbf{q})\mathbf{J}(\mathbf{q})] \text{grad } c_H(\mathbf{q})$ qui minimise localement c_H . La convergence est considérée obtenue quand la norme de δ est comprise sous un seuil τ (notre critère d'arrêt).

On notera que cet algorithme converge vers un minimum local et non global. Si ce comportement est en général indésirable pour la résolution d'une équation d'optimalité, il permet ici de garantir que la posture optimale se situe relativement proche de la posture de départ, notamment pour l'opérateur, qui ne souhaite pas effectuer de trop grandes reconfigurations posturales.

Afin d'évaluer cet algorithme de résolution, dans le cadre d'une fonction de coût sans résolution analytique, nous proposons l'étude d'une tâche d'atteinte de cibles, effectuées à la main. Les participants sont assis et doivent atteindre cible. Dans un premier temps, cette cible est atteinte sans instruction particulière (cette posture qu'ils adoptent est alors considérée comme une posture de référence que l'on souhaite estimer). Dans un second temps, cette même cible est atteinte avec un angle de coude et un angle de prono-supination contraints (posture initiale pour notre algorithme d'optimisation). Le coude et le poignet sont ici considérés comme les actionneur robotiques que l'on souhaiterait idéalement commander. Le vecteur angulaire \mathbf{q} est de dimension 9, avec \mathbf{q}_H de dimension 7 (3 DdL pour les hanches et le tronc, 1 DdL pour l'omoplate, 3 DdL pour l'épaule) et \mathbf{q}_R de dimension 2 (coude et prono-supination).

Dans notre modèle cinématique, q_1 et q_3 correspondent à une torsion des hanches et de l'axe des épaules (généralement compensatoires, mais parfois utile pour des cibles excentrées), q_2 à se pencher en avant ou en arrière (a priori le plus inconfortable), q_4 a un mouvement d'omoplate, q_5 , q_6 et q_7 aux mouvements d'épaule, q_8 à la flexion du coude, et enfin q_9 à la prono-supination du poignet.

La fonction de coût c_R est construite comme une fonction ergonomique continue, qui évalue les compensations du sujet, avec une pondération plus importante sur les articulations critiques comme le dos :

$$c_H(\mathbf{q} - \mathbf{q}_d) = \|\mathbf{Z}(\mathbf{w}^T(\mathbf{q} - \mathbf{q}_d))\|_2^2, \tag{4.14}$$



FIG. 4.6 – Capture des postures via Kinect de Microsoft. Le sujet visualise des cibles qu'il doit atteindre, d'abord librement, puis avec des instructions contraignant ses angles de coude et de poignet.

où $\mathbf{w} \in \mathbb{R}_+^{n_H \times 1}$ un vecteur de poids positifs et \mathbf{Z} une fonction de zone morte selon chaque composante \mathbf{q} , c'est-à-dire :

$$Z_i(\mathbf{q} - \mathbf{q}_d) = \begin{cases} q_i - q_{d,i} + z_i & \text{si } q_i - q_{d,i} > +z_i \\ q_i - q_{d,i} - z_i & \text{si } q_i - q_{d,i} < -z_i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

La composante i du gradient $\mathbf{g} = \text{grad}(c_R)$ s'écrivant :

$$g_i(\mathbf{q} - \mathbf{q}_d) = \begin{cases} 2w_i(q_i - q_{d,i} + z_i) & \text{if } q_i - q_{d,i} > +z_i \\ 2w_i(q_i - q_{d,i} - z_i) & \text{if } q_i - q_{d,i} < -z_i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Les angles désirés \mathbf{q}_d et la zone morte \mathbf{Z} ont été choisis selon le score ergonomique RULA [47] (le RULA étant un score discret) Tab.4.1.

Art.	Angle désiré			
	Tronc _{1,3}	Tronc ₂	Omoplate	Coude
q_d	0	$\overline{q_{nat,T}}$	$\overline{q_{nat,B}}$	80°
Z	0	0	0	±20°

TAB. 4.1 – Angles désirés en ° dans la fonction de coût c_R

où $\overline{q_{nat,T}}$ et $\overline{q_{nat,B}}$ des angles moyens, mesurés sur toutes les postures naturelles des

participants (notamment parce que la Kinect mesure avec un offset souvent important le centre des hanches et des épaules, mais aussi parce que chaque participant a une posture "confortable" différente).

Les poids de \mathbf{w} ont été choisis afin de donner un grand poids aux articulations généralement compensatoires (le tronc, notamment le fait de se pencher, ainsi que l'omoplate et le coude en dehors de la zone morte) et aucune importance aux articulations fonctionnelles (ici l'épaule et le poignet sont a priori toujours fonctionnelles) :

Poids par articulation						
Art.	Tronc _{1,3}	Tronc ₂	Omoplate	Epaule _{1,2,3}	Coude	Poignet
W	100	300	100	0	10	0

TAB. 4.2 – Poids pour chaque articulation dans la fonction de coût c_R

On notera que les poids n'ont pas ici été optimisés, mais réglés de façon heuristique. Déterminer une bonne fonction c_R de coût nécessiterait probablement, dans d'application personnalisée, une modélisation plus poussée voire une collecte de données.

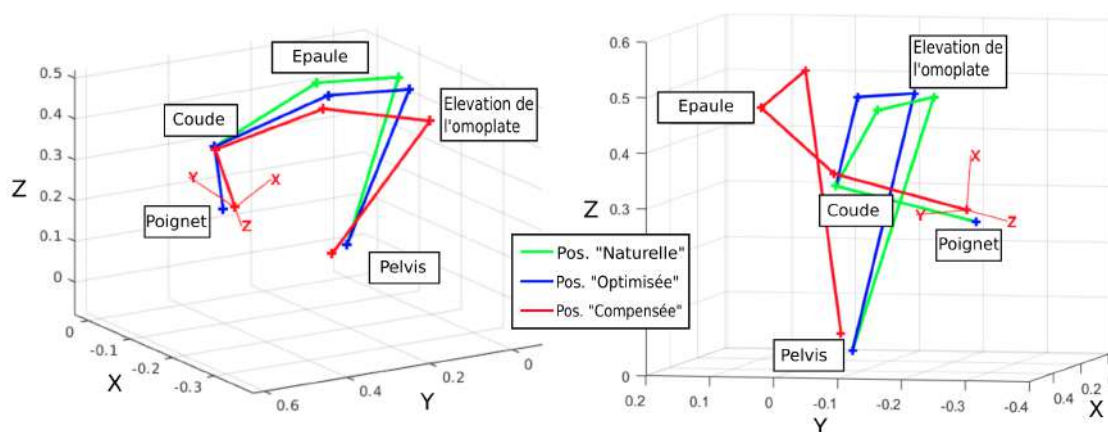


FIG. 4.7 – Exemple de deux postures estimées (en bleu) à partir des postures compensatoires (en rouge), la posture libre étant superposée (en vert). Contrairement à [Legrand] où la posture optimale supposait que les mouvements de tronc étaient toujours compensatoires, l'on converge ici vers des postures optimales où les angles des articulations distales (comme le dos) ne sont pas constants.

Deux exemples de postures optimisées, et leur références, sont montrées Fig. 4.7. Quinze participants ont chacun atteint 18 cibles. Chaque cible a été atteinte une première fois librement, puis une seconde fois en imposant une contrainte de coude ou de poignet (correspondant à un robot dans une posture indésirable). Nous avons donc enregistré 270 couples de postures, chaque couple étant composé d'une posture sous-optimale pour les 7 articulations, compte-tenu des contraintes imposées sur les deux dernières, et d'une posture "confortable". A chacun de ces couples ont associé une posture optimale selon notre algorithme. L'écart quadratique moyen (RMSE) avant et après optimisation est présentée Tab. 4.3.

L'erreur après optimisation en fonction de l'erreur avant optimisation pour chaque point est également affichée Fig. 4.8. Sur les 270 postures, 4 ont été mal estimées,

TAB. 4.3 – RMSE de l'erreur absolue en ° par articulation

Art.	RMSE de l'erreur absolue en °			
	Tronc ₂	Omoplate	Coude	Poignet
Libre/Compensée	10.3	8.4	26.4	12.8
Libre/Optimisée	2.6	3.7	4.6	3.4

mais correspondent toutes à des erreurs avant optimisations très faibles, et l'erreur après estimation a été augmentée de 7° maximum (sur la somme totale des 7 articulations). Au contraire, tous les points avec des grandes erreurs avant optimisation ont vu leur erreur significativement diminuer, suggérant que l'algorithme pourrait en effet correctement estimer une mauvaise posture, et proposer une correction appropriée dans des scénarios complexes à plusieurs degrés de liberté robotique.



FIG. 4.8 – Erreur après optimisation en fonction de l'erreur avant optimisation. Un point en dessous de la droite $y=x$ (zone verte) signifie une amélioration posturale proche de la posture libre, tandis qu'un point au-dessus (zone rouge) signifie l'estimation d'une posture erronée.

Ces résultats suggèrent que : 1. on est capable d'estimer une posture optimale à partir d'une fonction de coût dérivable (contrairement à la posture de référence employée dans la thèse de Legrand) et 2. l'algorithme proposé permet de résoudre l'équation d'optimalité Eq.(4.10). Cependant, afin d'évaluer notre algorithme, nous l'avons ici testé sur des données

sans système robotique (lien virtuel ou prothèse) puisqu'il aurait été impossible d'obtenir une posture libre (ou naturelle) qui ne soit pas dépendante de l'interface de commande (comme un joystick). Il faudrait, dans un second temps, appliquer cet algorithme sur un système Opérateur + Robot. On notera enfin que la fonction de coût c_R proposée a été déterminée avec des poids choisis à partir de connaissances a priori sur l'ergonomie; or, on pourrait imaginer préalablement récolter des données sur un participant afin d'évaluer une fonction de coût qui reflète au mieux ses mobilités. L'algorithme proposé ici, s'il permet donc d'évaluer rapidement le déplacement optimal ε_{q_R} pour une fonction de coût donnée, devra donc encore être évalué avec un robot, et ceci devra probablement être fait avec une fonction de coût personnalisée pour l'opérateur.

4.3 Analyse de la stabilité du CCC appliqué au couplage LV

Après avoir proposé une résolution de la posture optimale, c'est-à-dire l'équilibre statique que l'on souhaiterait atteindre, nous avons également souhaité étudier la dynamique et la stabilité du CCC appliqué à un LV(R) (présentés dans "Posture-based hybrid position/velocity of a nearby robot", Annexe 5). En effet, nous avons montré dans la Sec.4.1.4 l'existence d'un point d'équilibre, sous condition de stabilité; mais cette stabilité n'est pas garantie. Afin d'étudier la dynamique dans un cas simple, on propose d'utiliser un système extensible (effecteur à 1 DdL) contrôlé par 2 liaisons prismatiques, l'un actionné par la main de l'utilisateur et l'autre commandé par le CCC, cf. Fig.4.9. Le lien prismatique manipulé par l'utilisateur est muni de deux ressorts générant une force élastique lorsque $q_H \neq 0$. On suppose que l'utilisation du système a intérêt à minimiser cette force, ce qui se traduit par une fonction de coût :

$$c_H(q_H) = \|q_H\|^2, \quad (4.15)$$

où q_H la distance parcourue par le lien prismatique par rapport à sa position de repos.

Cette fonction de coût c_H est ici artificiellement générée, mais correspondrait à des mouvements ardues de l'utilisateur (soit par manque de mobilité, soit dans le cas de mouvements amples). On note par ailleurs que ces ressorts permettent à l'utilisateur de facilement revenir à son point de repos (de même que dans Dominjon [30]). L'existence même d'un tel point de repos dans un cadre général sera discuté dans Chap.6.

La fonction de coût c_R a été choisie afin de minimiser le déplacement de l'utilisateur autour de ce point de repos, à une zone morte près permettant d'éliminer les effets du bruit de mesure et des tremblements de l'utilisateur :

$$c_R(\mathbf{q}) = \|Z(q_R)\|^2, \quad (4.16)$$

avec $Z(\cdot)$ une fonction zone morte de $\pm 1\text{mm}$ autour de 0. On note ici que la zone-morte correspond à une région d'équilibre (Eq. 4.11) où c_H et c_R comportent différents optimums ($q_H = 0$ et $|q_H| \in Z$ respectivement).

On en déduit la loi de commande en vitesse dérivée de Eq. 4.8 :

$$q_{R^*} = \begin{cases} \lambda(q_R - Z) & \text{if } q_R > z \\ \lambda(q_R + Z) & \text{if } q_R < -z \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}, \quad (4.17)$$

où $z > 0$ est la largeur de la zone morte, égale à 1mm.

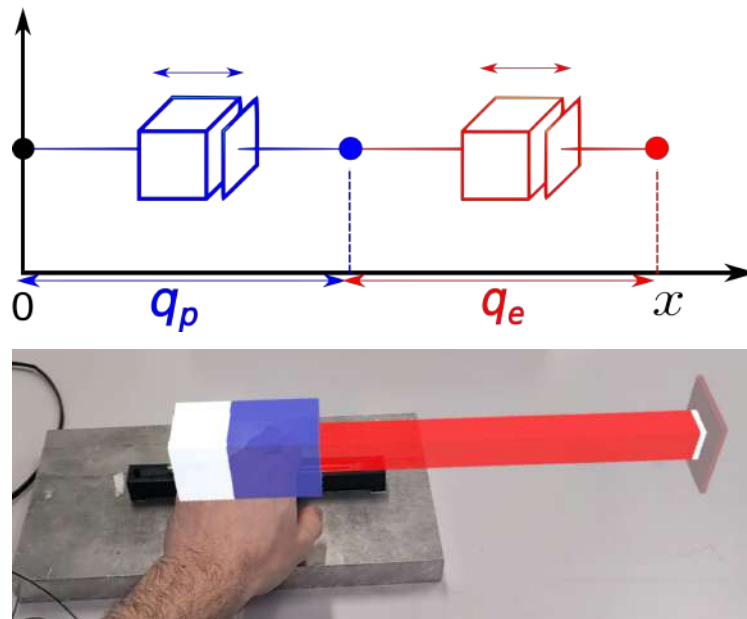


FIG. 4.9 – Modèle cinématique (haut) et vue à la première personne dans le casque de réalité augmentée du lien reconfigurable (bas). L'articulation proximale (bleue) est contrôlée via une interface tangible. Le lien reconfigurable (rouge) est contrôlée par le CCC généralisé. La partie blanche (gauche) est fixe et représente la base fixée à la table tandis que les articulations proximale et distale sont deux liens prismatiques. Les cibles à atteindre sont représentées par un carré clair (à droite) que doit atteindre l'effecteur (pointe blanche à droite).

Afin d'évaluer les critères de stabilité, de rapidité et de précision du couplage, nous proposons une tâche d'atteinte de cibles. Douze participants ont atteint 20 cibles pour des gains λ valant successivement 0, 1, 2, 4, 8, 16 et 32.

On montre Fig. 4.11 les trajectoires moyennes pour un seul sujet représentatif.

Pour un gain nul, le lien virtuel est rigide, et toute la trajectoire de l'effecteur est donc réalisée avec la main du sujet, en échange d'un coût énergétique important puisque l'utilisateur doit forcer sur les ressorts, ce qui provoque de légers tremblements en fin de mouvement. De 1 à 4, l'utilisateur génère des trajectoires lisses de l'effecteur, avec un mouvement de main dont l'amplitude réduit progressivement. Cependant, à $\lambda = 8$, on observe l'apparition d'un dépassement, et à 16 d'un comportement oscillatoire. A 32, l'utilisateur change de stratégie, non plus avec une trajectoire de main en cloche, mais sous la forme d'impulsion qui dépasse pendant un instant très court la zone-morte, menant à un comportement non contrôlé de l'effecteur qui est trop rapide pour son utilisateur.

On notera ici que la bande passante du mouvement humain est comprise entre environ 2Hz et 5Hz, soit une fréquence de coupure ω_c entre 12.6 to 31.4 rad/s [48]. Or on observe une dégradation des trajectoires lorsque λ se rapproche de $12s^{-1}$ et un comportement oscillatoire lorsque λ dépasse cette valeur. Cette observation rejoint donc l'hypothèse quasi-statique effectuée précédemment : dès que la reconfiguration du LV devient plus rapide que l'utilisateur, ce dernier en perd le contrôle.

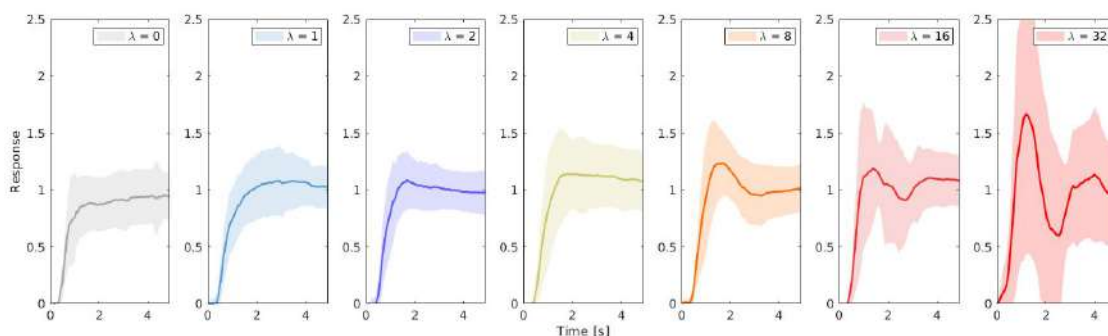


FIG. 4.10 – Trajectoire normalisée de l'effecteur $x(t)$ et de la main ($q_H(t)$, bas) pour les 20 répétitions pour chaque gain λ (0,1,2,4,8,16 et 32) pour un sujet représentatif. La zone claire indique la déviation standard autour de la moyenne. La ligne pointillée est équivalente à la zone-morte.

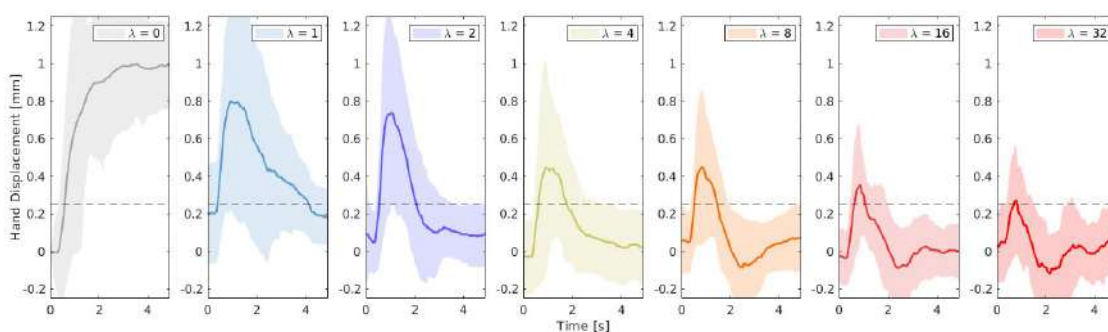


FIG. 4.11 – Trajectoire normalisée de l'effecteur de la main $q_H(t)$ pour les 20 répétitions pour chaque gain λ pour un sujet représentatif.

Enfin, sur tous les sujets, nous avons aussi évalué plusieurs critères, dont le temps de réponse à 66% (maximisé à 5s, le temps maximal alloué par cible), le dépassement ou le chemin parcouru par la main et l'intégrale du carré de la position de la main, équivalent au coût énergétique c_H intégré sur toute la trajectoire Tab.4.4.

TAB. 4.4 – Caractéristiques moyennes des trajectoires de l'effecteur en fonction de λ , moyenné sur tous les participants

Métriques de performances							
λ	0	1	2	4	8	16	32
Temps 66%	2.00	2.33	2.04	2.10	2.37	2.57	3.15
Dépassement	0.20	0.42	0.45	0.42	0.56	0.68	0.98
Chemin	0.75	0.79	0.76	0.66	0.59	0.72	0.73
Énergie	27.0	0.32	0.17	0.10	0.07	0.05	0.04

Ces performances rejoignent l'analyse faite sur les trajectoires d'un seul sujet, avec un λ optimal qui doit garantir que la reconfiguration est suffisamment lente pour garantir la stabilité, et le bon contrôle de l'utilisateur, mais suffisamment rapide afin d'éviter des

mouvements trop amples de l'utilisateur en dehors de la zone morte.

Maintenant que l'on sait dans quelle gamme nous devons régler λ , il faut tester ce couplage avec une partie du corps proximale, comme le thorax ou la tête, où le LVR semble le plus adapté, et pour une tâche à plus de degrés de liberté (par exemple, pour un lien extensible, une tâche à 3 DdL et un CCC qui permettrait d'étendre ou de raccourcir le lien). On notera cependant que les ressorts de l'interface permettraient ici à l'utilisateur de revenir facilement à sa posture initiale, et leur absence pourrait amener l'opérateur à reconfigurer le lien par inadvertance (lorsque l'algorithme identifie une compensation mais que ce déplacement est en réalité fonctionnel). On propose donc dans la section suivante de transférer le couplage LVR avec CCC dans une tâche d'atteinte de cibles avec la tête afin d'en évaluer les performances dans un cadre plus général.

4.4 Intégration du CCC dans une tâche LVR à 3 DdL de tête

4.4.1 Protocole

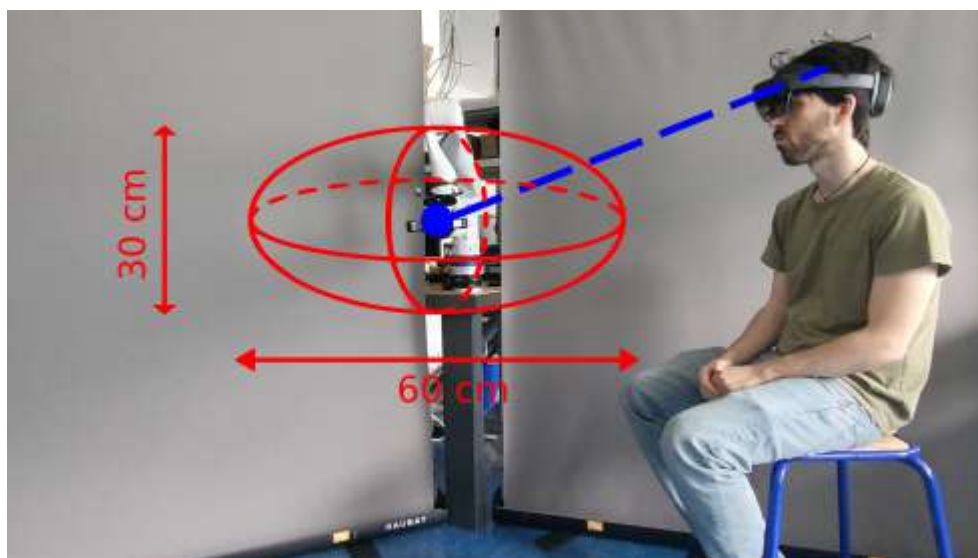


FIG. 4.12 – Le lien virtuel (bleu, d'effecteur une sphère bleue) est ici attaché à la tête, et le CCC est activé selon la longueur du lien. La tâche consiste en l'atteinte de cibles réparties sur une ellipsoïde de petit axe 30 cm (hauteur et largeur) et grand axe 60 cm (profondeur par rapport au sujet). La tâche est uniquement réalisée en translation, l'orientation de l'effecteur robotisé étant maintenue constante durant toute la durée de la tâche.

Dans cette section, nous considérons une tâche d'atteinte de cible en translation (l'orientation du robot étant maintenue constante). 32 cibles ont été disposées sur une ellipsoïde, d'axe principal 60cm et de semi-axes 15cm. Le sujet est orienté le buste perpendiculaire à l'axe principal. Le couplage LVR est effectué à la tête, et la longueur de la baguette est désormais variable à partir d'une formulation de CCC à un 1 DdL :

$$\dot{l} = \lambda Z(x) , \quad (4.18)$$



FIG. 4.13 – La visualisation depuis le casque : le lien virtuel (en bleu), son effecteur (sphère bleue), l'effecteur réel du robot (sphère orange) et la cible à atteindre (sphère rouge).

où λ est le gain du CCC, ici égal à 4 (choisi par rapport à l'expérience précédente d'étude de stabilité), $Z(\cdot)$ une zone morte de plus ou moins 5cm, et x la translation de la tête selon l'axe de la baguette (par rapport à un zéro correspondant à la position initiale de repos), c'est-à-dire les mouvements de tête dus aux mouvements de nuque et de buste, supposés compensatoires. Ainsi, l'équation cinématique du système humain + lien s'écrit :

$$\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t) = \mathbf{T}_{W \rightarrow E_H}(t) \mathbf{T}_{E_H(t) \rightarrow E_R^*}(t) \quad (4.19)$$

où $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_H}(t)$ correspond aux mouvements de tête (orientation et translation) et $\mathbf{T}_{E_H(t) \rightarrow E_R^*}(t)$ un lien de longueur l variable selon l'équation précédente.

Quatre essais de 64 cibles (dont 32 sont le centre de l'ellipsoïde, et 32 réparties sur sa surface, comme les expériences précédentes des couplages RDM, PV et LV) ont été effectuées. Chaque cible est validée après que l'effecteur du robot réel se soit stabilisé au moins une seconde à l'intérieur d'une sphère centrée sur l'objectif et de diamètre de tolérance 3cm.

Nous présentons ici les résultats de temps par cible Fig. 4.15, des trajectoires des mouvements de la tête en translation x Fig. 4.17 et les courbes de distribution de la tâche en fonction du temps Fig. 4.16 selon trois termes :

- le déplacement de l'effecteur dû aux rotations de la tête, et donc à l'effet de bras de levier, ce qui correspond majoritairement à des déplacements horizontaux et verticaux dans le repère du participants;
 - le déplacement de l'effecteur dû aux translations de la tête (uniquement selon la profondeur par rapport au repère tête du participant);
 - le déplacement de l'effecteur dû aux changements de longueur de la baguette de la tête (uniquement selon la profondeur par rapport au repère tête du participant);
- ainsi que la trajectoire totale de l'effecteur virtuel qui est la somme des trois termes précédents.

Trois catégories de cible ont été considérées :

- les 25% de cibles les plus proches, c'est-à-dire qui correspondent à des distances parcourues inférieures à 16 cm, et donc avec peu ou aucune translation de la tête;
- les 25% de cibles les plus lointaines, distances supérieures à 25 cm, et donc aux extrémités de l'ellipsoïde, nécessitant une reconfiguration importante du lien;
- les autres cibles, dont la répartition entre profondeur et déplacements latéraux et verticaux sont à peu près équivalents.



FIG. 4.14 – Un exemple de reconfiguration du lien : pour des positions très similaires du sujet, deux cibles distinctes sont atteintes, grâce à l'allongement (en rouge) du lien virtuel initial (en bleu).

4.4.2 Analyse des résultats pour un sujet entraîné

Les résultats d'un sujet (très habitué au système, car c'est l'auteur de cette thèse) sont présentés ci-dessous.

On observe que le temps par cible est de l'ordre de 3s pour les cibles proches, et augmente avec la distance. En effet, le CCC possède une dynamique plus lente que celle du mouvement humain. Le terme intégrateur étant lent, le temps de réalisation augmente donc.

Sur la trajectoire totale, on note un faible dépassement. Cela repose notamment sur le fait que le sujet connaissait déjà le système, et les profils de trajectoires sont ainsi similaires pour tout type de cible, là où le CCC engendrait généralement un léger dépassement chez des sujets naïfs.

On peut également observer que les translations de la tête, à l'origine de l'action du CCC, démarrent systématiquement après les rotations de la tête. Cela rejoint les observations de l'expérience LVR buste + joystick, où une première phase balistique était toujours effectuée avec les mouvements du buste seul tandis que le joystick n'était activé que dans un second temps. L'utilisateur ici sépare donc son mouvement en deux phases, d'abord le mouvement en position du couplage LV, puis la reconfiguration du lien. Enfin, on

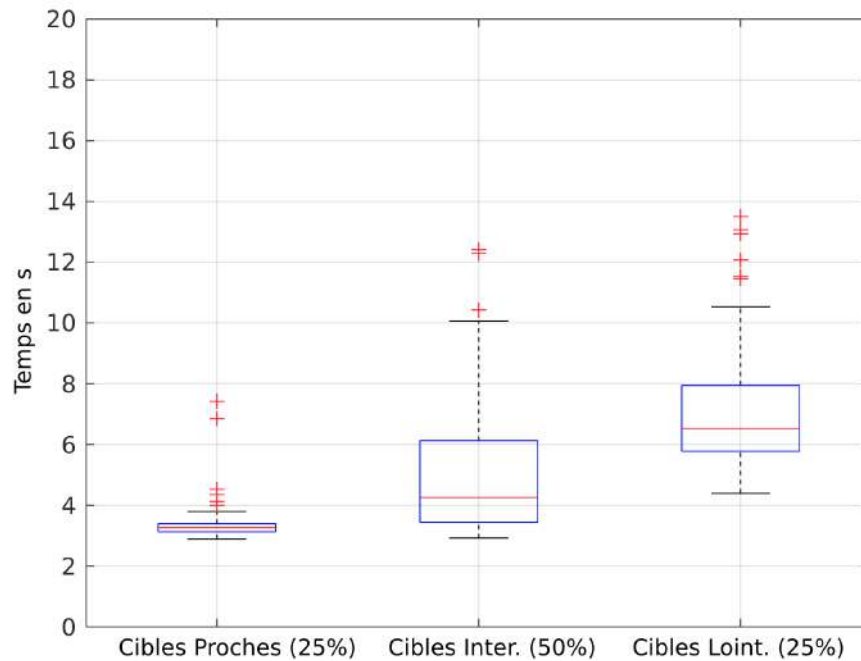


FIG. 4.15 – Temps par cible, catégorisé selon la distance de la cible.

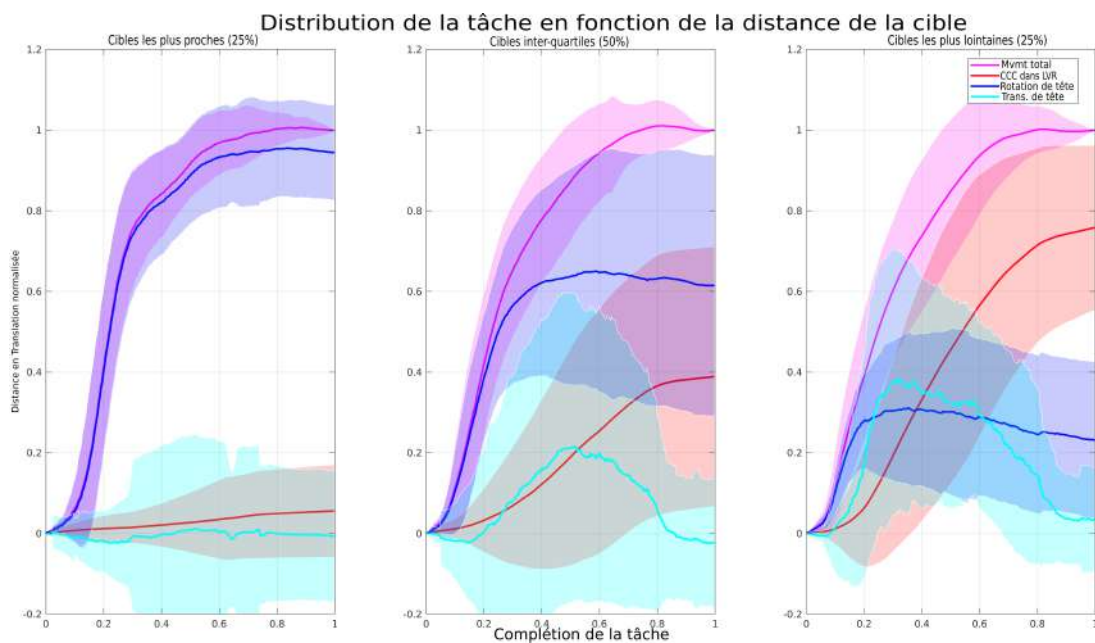


FIG. 4.16 – Trajectoires moyennes de l'effecteur (magenta), et des distributions de tâche dues aux mouvements de rotation de la tête (bleu), de translation de la tête (bleu clair) et de la reconfiguration du lien par le CCC (rouge), catégorisés selon la distance de la cible.

observe que l'amplitude de la reconfiguration du CCC est d'un facteur 2 par rapport aux mouvements de translations de la tête.

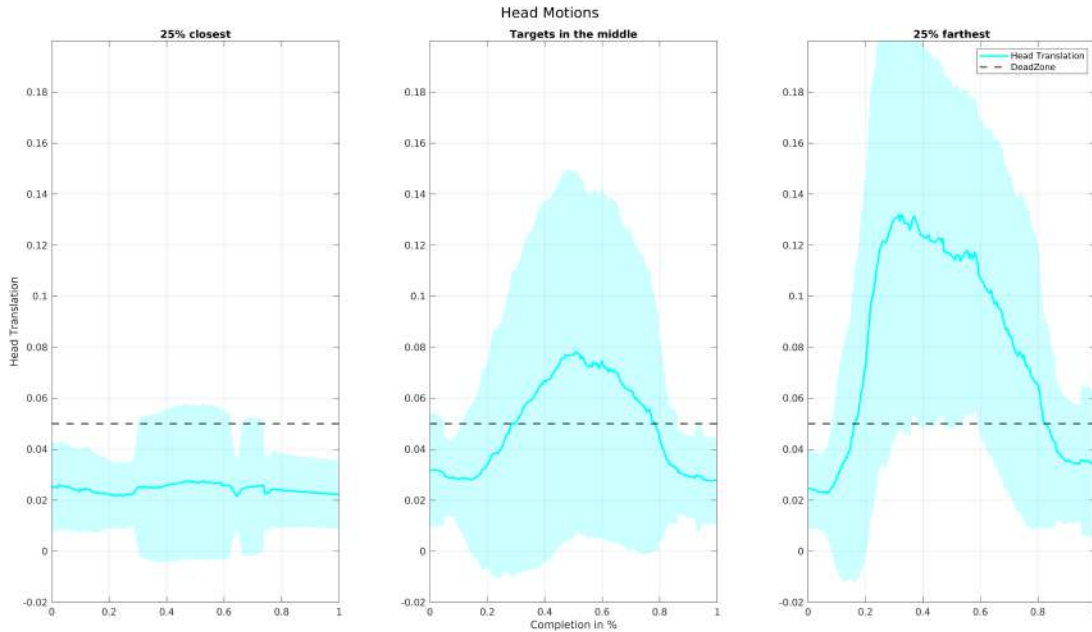


FIG. 4.17 – Translations de la tête (bleu), et zone morte de déclenchement du CCC.

Si l'on observe les mouvements de tête non normalisés, on note ainsi, pour les cibles les plus éloignées, des déplacements d'environ 10cm d'amplitude (donc des reconfigurations de la longueur du lien d'environ 20cm). Cependant, on observe que le participants ne revient jamais exactement à son point "zéro" mais quelque part au sein de la zone morte. Cela laisse supposer que de la zone est peut-être trop grande, ou du moins que le participant revient toujours vers sa limite afin, à la prochaine cible, de limiter son déplacement. Il s'agirait donc désormais de trouver une fonction de coût plus adaptée qu'un écart à une posture de référence fixe.

4.5 Conclusion sur le CCC généralisé

Dans ce chapitre, nous avons proposé la généralisation d'une méthode existante, l'annulation de mouvements compensatoires (ou Compensation Cancellation Control, CCC) à tout type de robot reconfigurable porté, qu'il soit réel ou, dans le cas du couplage LVR, virtuel. La formulation existante ne considérait également qu'une posture de référence unique afin de détecter les mouvements compensatoires, et nous avons généralisé cette formulation à toute fonction de coût dérivable. Cependant, déterminer une telle fonction de coût reste encore un des défis majeurs de cette approche. Enfin, l'implémentation de cette méthode (une fois la fonction de coût choisie) ne nécessitant le réglage que d'un unique gain scalaire, nous avons analysé la stabilité et les performances de cette méthode pour différents gains, d'abord dans le cadre d'un LVR à la main (tâche à 1 DdL), puis de tête (tâche à 3 DdL, avec CCC selon 1 DdL). Il nous faudrait désormais étendre ces observations à une tâche à 6 DdL, avec une reconfiguration du CCC selon 3 ou 4 DdL (longueur du lien et orientation de l'effecteur, qui sont les mouvements les plus difficiles pour les participants).

Chapitre 5

Observations et activités complémentaires

Nous proposons dans ce dernier chapitre des observations de toutes les interactions, expérimentations et entraînements qui, pour des raisons autant pratiques que réglementaires (jeunes publics ou données sensibles par exemple) n'ont fait l'objet de collectes de données quantifiées sans protocole validé par le Comité d'Éthique et de la Recherche. Ce chapitre, s'il n'a pas vocation de faire l'objet d'une publication scientifique extérieure à ce manuscrit, tente de reconstruire nos *pensées de terrain*, nos sources de réflexions qui nous permettent aujourd'hui d'envisager les applications lointaines et *hors les murs* de ce système, et le chemin qu'il nous reste à parcourir, les frontières qu'il nous faut encore dépasser.

5.1 De l'enfant naïf au professeur émérite, du mouvement tenu à la danse *de couple* : une exploration impromptue du couplage LV

5.1.1 De 7 à 77 ans : une collection de participants

Il y a désormais trois ans, lorsqu'une première version du système et du couplage lien virtuel (LV) a été développée, nous avons monté une plateforme de démonstration. Celle-ci consistait en un simple un marqueur Optitrack posé sur la tête (soit directement sur le casque AR, voir Fig.5.2, soit sur une casquette, et donc sans retour visuel du lien, voir Fig.5.1) qui permettait, assis, de contrôler l'effecteur du bras robot Kinova, généralement pour effectuer une tâche de saisie et de déplacement d'objets, tel que des feutres ou des gobelets qui sont facilement saisis par la pince Robotiq. Plus d'une centaine de personnes ont ainsi essayé le couplage Lien Virtuel (LV) attaché à la tête, que ce soit lors de portes ouvertes du laboratoire, de visites ou de séminaires.

La démonstration sans casque AR a notamment été réalisée par le *grand public*, naïf et sans connaissance du système, aussi bien enfants que adultes. Le concept de lien virtuel (LV) leur était brièvement expliqué, et il était demandé aux participants de "bouger lentement", notamment à cause de la dynamique lente du bras Kinova (qui était d'autant plus réduite pour des questions de sécurité), un mouvement trop rapide de l'utilisateur amenant des retards de la commande en position et des mouvements brusques du robot. Un grand nombre de participants ont réussi, après une ou deux minutes (souvent, même, au premier essai), à déplacer successivement des feutres dans différents gobelets, et le système s'est montré intuitif pour la plupart d'entre eux, notamment sur les déplacements horizontaux et verticaux (générés par des rotations de la tête). Certains participants inversaient cependant mouvements avant/arrière (pencher le buste et étirer la nuque), avançant vers le robot pour l'amener vers eux et inversement. Cette confusion pourrait provenir de la position du participant, face au robot, en miroir. Des participants étaient aussi frustrés par la



FIG. 5.1 – Un visiteur lors de la fête de la science (portes ouvertes du laboratoire) : un marqueur Optitrack sur la casquette permet de détecter les mouvements de tête, et le robot, posé en face du participant, est piloté via le couplage LV lié à la tête. La tâche proposée consistait à saisir et déplacer des feutres dans plusieurs verres, la pince étant activée ici par une pédale de pied (signal binaire, chaque clic ouvrant ou fermant la pince). Par souci de mise en place (batterie, fragilité), le casque AR n'était ici pas utilisé.



FIG. 5.2 – La même expérience avec le casque AR Hololens 2, proposée cette fois-ci lors d'un workshop ICRA 2023 à Londres : "The robotics and neuroscience of supernumerary limbs". Harry Asada, professeur émérite et l'un des premiers chercheurs en robotique à avoir proposé des membres surnuméraires, tente ici l'expérience.

lenteur du robot et son retard, notamment les enfants (mais aussi certains adultes), ce qui les amenaient à d'autant plus "tirer" le robot, tournant d'autant plus la tête et créant d'importants dépassements. Enfin, il arrivait régulièrement que des participants détournent la tête (vers un ami ou un parent qui les appelait ou vers le sol lorsqu'un feutre

tombait de la table) sans réaliser que le lien virtuel était toujours actif, entraînant donc involontairement le robot avec eux.

Ces observations nous ont conforté dans l'idée d'une certaine intuitivité du couplage LV, avec une prise en main quasi-immédiate de participants d'âge varié, et ce malgré la non-visualisation du lien, les participants intégrant et "devinant" facilement le comportement du robot en fonction de leur mouvement. Contrôler un outil rigide, même invisible, relève finalement de savoirs pratiques déjà acquis de tous. Ces démonstrations nous ont cependant aussi appris que :

1. le retard du robot était frustrant pour une grande partie des utilisateurs, conduisant à des mouvements exagérés et des dépassements en position de l'effecteur du robot;
2. il faudrait un mécanisme permettant de "détacher" automatiquement le lien virtuel du participant lorsque le mouvement de la tête ne correspond pas à une instruction volontaire de déplacement. On pourrait par exemple utiliser le regard comme confirmation que l'utilisateur vise effectivement à contrôler le robot (et non regarder une personne qui l'interpelle ou objet qui tombe), ou détacher le lien lorsque la position désirée et la position actuelle sont trop distantes.

La démonstration avec casque AR a quant à elle été réalisée par des visiteurs internes ou externes à l'ISIR, souvent d'autres chercheurs en robotique, ou lors de démonstrations externes comme au workshop ICRA 2023 "The robotics and neuroscience of supernumerary limbs". De même qu'avec le grand public, ces participants ont pu facilement commander le robot, et les retours sur la facilité du couplage ont globalement tous été positifs. Cependant, selon les spécialités de chacun, les retours concernant les perspectives et les améliorations du système ont été diverses. Plusieurs personnes ont noté la difficulté de la manipulation d'objet, notamment lors d'un contact de l'effecteur robotisé avec l'environnement, et l'absence de retour haptique (Kenneth Salisbury, Allison Okamura). Une partie de l'interaction avec l'environnement pourrait cependant être réglée par une commande en couple du robot, avec un comportement plus compliant et stable lors de la détection d'une force extérieure appliquée sur le robot. D'autres participants ont été gênés par la visualisation du lien, préférant se concentrer directement sur le robot malgré son retard (Tamar Makin). Si la visualisation du lien permet de facilement comprendre sa géométrie, elle peut en effet être un élément visuel gênant, et la représentation du lien dans le casque est encore très basique, un simple cylindre avec un effecteur cubique.

Ces observations nous ont ainsi questionné sur : 1. la représentation du lien, qu'elle soit visuelle, via la réalité augmentée, mais aussi tactile, tangible : comment permettre une intégration plus aisée du lien, du robot, pour les participants? Si cette question reste vitale pour la prise en main du robot, il faut cependant se souvenir que des utilisateurs quotidiens comme Noémie Nauleau ou Johann Chaulet (d'un bras Kinova monté sur fauteuil, avec commande par un joystick 2 DdL) ont acquis, malgré une interface peu intuitive et délicate, une véritable expertise de manipulation de leur bras robotisé. Ces questions de représentations, de visualisation, doivent donc plutôt être posées dans un cadre d'entraînement, de familiarisation, et la réponse à ces questions différera probablement pour un usage long terme où le minimalisme (et l'absence de casque AR?) pourrait sembler préférable. Et 2. si le lien permet de facilement positionner l'effecteur robotique dans une certaine zone, la manipulation fine ou la précision peuvent être délicats. Et l'on touche ici probablement aux limites d'une commande 100% volontaire, sans automatisation. Ceci est d'autant plus net avec l'utilisation de la tête ou du buste (et contrairement aux mains) qui présentent une gamme de mouvements limités et une faible redondance. La commande

volontaire, si elle permet de grossièrement positionner le robot, n'est probablement pas une solution finale pour toutes les tâches d'assistance, mais elle permet d'orienter, de guider le robot qui, automatiquement, pourrait aider le participant à terminer la tâche une fois celle-ci détectée, "comprise" (par exemple "attraper l'objet devant soi" plutôt qu'attraper tel ou tel objet, ce qui est aujourd'hui une limite dans des systèmes plus automatisés, tels ceux qui utilisent uniquement le regard [49]).

5.1.2 Découverte du LVR avec deux participantes en situation de handicap

Nous avons également reçu deux personnes en situation de handicap afin de tester le système et le couplage LV et LVR-CCC (lien virtuel reconfigurable avec annulation de compensations). La première était atteinte d'une amyotrophie spinale et la seconde d'un syndrome locked-in partiel. Toutes deux présentaient de faibles mouvements de tête, notamment en translations (moins de 2 cm de débattement total), et pilotaient leur fauteuil quotidiennement à l'aide d'un joystick (de main et de bouche respectivement). La première participante possédait également un bras Jaco de Kinova qu'elle pilotait quotidiennement avec son joystick de main. Nous leur avons fait essayer le couplage LV afin de commander un bras Kinova posé sur une table à proximité, le gripper étant piloté par la voix (et une personne extérieure qui activait la pince à leur signal). Les sessions ont duré moins de trente minutes et les données n'ont pas été enregistrées, notre demande au comité d'éthique et de la recherche n'incluant pas un accord d'enregistrement pour les données sensibles, qui relèveraient d'un comité de protection des personnes concernant les personnes en situation de handicap.

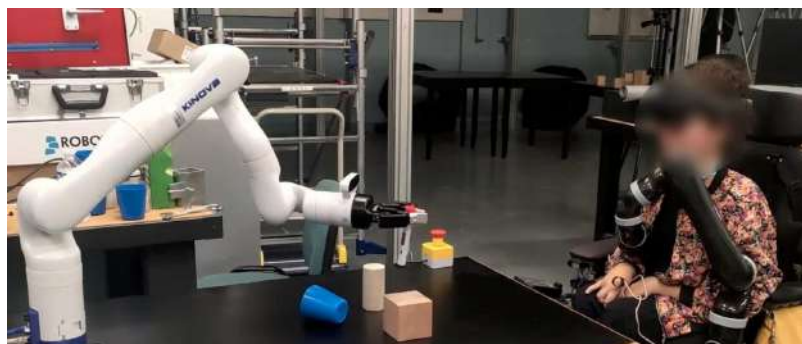


FIG. 5.3 – Première participante en train d'utiliser le système avec un couplage LV.

Sans entraînement, avec le couplage LV (rigide), les participantes ont toutes deux réussi à effectuer des tâches de saisie et de déplacement d'objets (stylos et verres en plastiques) après quelques minutes, sur des courses verticales et horizontales (en utilisant des rotations de tête) de plusieurs dizaines de centimètres grâce au bras de levier du lien. Cependant, de par les translations limitées de leur tête, elles ne pouvaient faire avancer ou reculer l'effecteur robotisé. Nous leur avons ensuite fait essayer le mode LVR-CCC afin de pouvoir étendre et raccourcir le lien, avec une reconfiguration du lien proportionnelle aux déplacements de la tête :

$$i = \begin{cases} \lambda \text{sign}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_r) \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_r - z\| & \text{si } \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_r\| > +z \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.1)$$

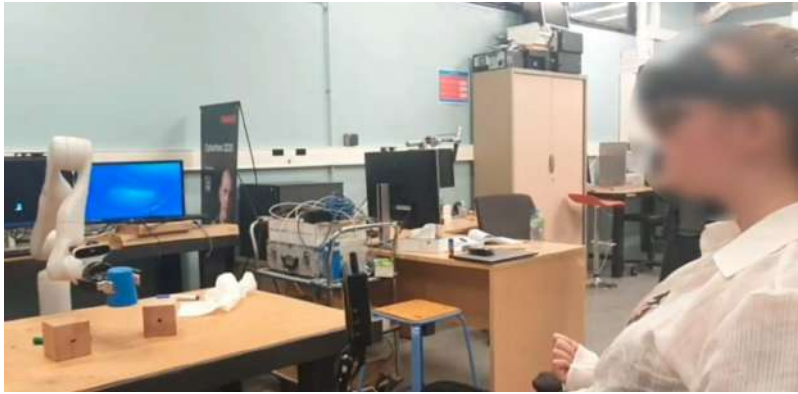


FIG. 5.4 – Seconde participante en train d'utiliser le système avec un couplage LV.

où l est la longueur du lien, z une valeur de zone morte, λ le gain de la commande, et $\mathbf{x} - \mathbf{x}_r$ le déplacement de la tête selon l'axe du lien par rapport à une position initiale de repos \mathbf{x}_r .

Les zones mortes ont été réglées à quelques millimètres et le gain λ à 20, selon les préférences des participantes, soit 5 à 10 fois plus élevés que dans l'étude avec des personnes valides (cet écart s'expliquant par les débattements des participants : du l'ordre du millimètre pour ces participantes en situation de handicap, contre plusieurs centimètres pour les personnes valides, pour des déplacements désirés du robot du même ordre de grandeur). Si le gain est aisé à régler et nécessite peu d'essais, on notera donc ici que son réglage doit être individualisé, contrairement aux personnes typiques qui pouvaient toutes utiliser un même gain et obtenir de bonnes performances.

Cependant, plusieurs soucis ont émergé : d'une part, le boîtier du casque Hololens empêchait les participantes de reposer leur tête sur l'appui tête de leur fauteuil, les fatigant rapidement, et les empêchant de reculer de manière efficace. Plutôt que d'utiliser ici la position, on pourrait par exemple inclure un capteur de pression dans l'appui tête, utilisant ainsi la force appliquée pour étendre le lien ou le raccourcir. Cela permettrait de maintenir la tête sur l'appui tête, sans contraindre ses orientations, qui étaient plus aisées à contrôler pour les participantes. Il faut donc instrumenter avec plus d'adéquation le système pour chaque participant.

Ensuite, les participantes avaient des difficultés à retrouver leur position initiale de repos \mathbf{x}_r , conduisant à une difficulté à arrêter la commande. Il faudrait donc pouvoir identifier, non une posture de repos, mais plutôt détecter l'intention des utilisateurs de rester ou non à leur position courante. Émerge ici la difficulté d'identifier une fonction de coût c_R de la formulation CCC. De plus, la formulation généralisée du CCC calcule un déplacement optimal du lien $\varepsilon_{\mathbf{q}}$ et non une posture optimale \mathbf{q} , c'est-à-dire un déplacement sur un horizon de temps, en fonction de la posture initiale, et non une posture fixe. Or la fonction de coût proposée ici est formulée comme une posture et non de déplacement (de nouveau : comment trouver cette fonction?). On notera que cet inconvénient, malgré une formulation de commande similaire, n'apparaissait pas Sec. 4.3 grâce aux ressorts de l'interface qui permettaient aux utilisateurs de facilement retrouver leur position d'équilibre. On pourrait donc soit reformuler la fonction de coût, soit réactualiser dynamiquement la position de repos (par exemple en utilisant la mesure courante de la position et un filtre passe-bas avec une fréquence de coupure adaptée), soit fournir un retour haptique, similaire à cet

effet élastique.

Enfin, les participantes ont fait part de leur volonté de mixer ce couplage LV avec d'autres commandes dont ils avaient l'habitude : le joystick, pour la première participante, qui l'utilise au quotidien avec son propre bras robotisé, et le regard pour la seconde qui utilise une tablette avec capteur de regard pour communiquer. Il s'agit donc de proposer une offre de commandes variées, permettant à chacun de choisir un panel de capteurs et de commandes selon les tâches.

Si ces essais ont été courts, ils ont été riches en apprentissage : d'une part, le couplage LV a été utilisé avec succès pour des tâches simples, mais la reconfiguration du lien est toujours en développement et la commande CCC encore naissante ; d'autre part, l'intégration du système reste encore critique pour le confort et l'acceptation des utilisateurs.

5.1.3 *Du couplage série au couplage parallèle, le bras robotique comme partenaire de danse?*

Dans le cadre du projet européen NIMA (Non-invasive Interface for Movement Augmentation), une plateforme de "membre surnuméraire robotisé", c'est-à-dire du bras Kinova porté sur une veste, a également été développée, afin d'envisager des manipulations "à trois mains". Ces troisièmes bras portés sont généralement commandé automatiquement [50], ou par un opérateur externe [51], bien qu'il existe quelques exemples de commandes volontaires, limités à un ou deux degrés de liberté [52] en utilisant des signaux souvent discrets ou de faible résolution, et avec des dynamiques lentes.

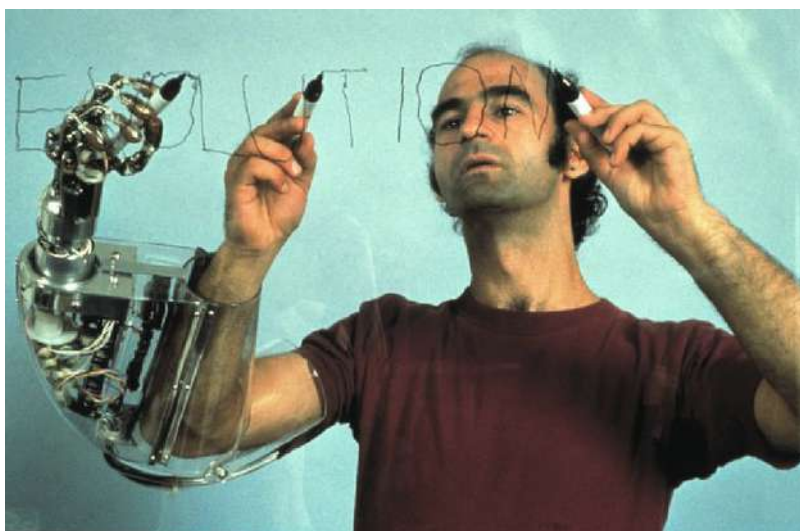


FIG. 5.5 - "Third Arm" de Stelarc lors d'une tâche d'écriture à trois mains (Maki Gallery, Tokyo, 1982). Photographie par Keisuke Oki.

Dans ce cadre de robot porté, nous avons essayé d'utiliser le couplage LV, de tête ou avec une autre main, afin de contrôler le bras robotisé. En 2022, nous recevons ensuite une visite de l'artiste performeur australien Stelarc. En 1980, en partenariat avec l'université de Waseda, Stelarc avait déjà porté une troisième main, avec rotation de poignet et doigts pliables qui lui avait permis d'écrire à trois mains lors de performances (voir Fig.5.5).

Si les attentes de Stelarc ne sont pas celles de chercheurs (là où le bras Kinova est



FIG. 5.6 – Stelarc, avec le bras Kinova porté sur une veste. Un couplage LV est établi entre son poignet gauche et l'effecteur robotisé.

léger et facile d'utilisation, il est pour lui trop silencieux, trop inorganique, lisse) nous lui avons fait essayer la plateforme de veste et de membre surnuméraire avec le robot porté. L'effecteur était piloté par couplage LV avec une autre de ses mains, créant un lien rigide (avec un délai) entre sa main et la "main robotisée". Il en a émergé un mouvement parfois incontrôlé, le robot étant parfois trop lent par rapport aux mouvements de Stelarc, qui s'amusait à donner des à-coups de sa main, afin de pousser les limites du robot et du couplage; mais aussi et souvent un mouvement synchronisé, à la frontière de la danse, ou du moins d'une forme de danse à trois mains.

J'ai interviewé Stelarc à l'occasion d'une de nos rencontres, et de lui ai posé des questions concernant son ressenti vis-à-vis de la commande.

A : What were you impressions regarding the system, what did you think about it?

STELARC : The Kinova arm was very heavy, but I could manage it and it was a really interesting experience to be able to quite sensitively control the arm. Few times I over-reached, but I liked the ability, especially performatively, to be able to manipulate the Kinova arm with my arm gestures. The interface was very user-friendly. And it didn't take long to get use to it. After a short time, I could change the direction of the arm, open and shut the manipulator.

A : During my thesis, I was interested into studying the impact of our motions on the robot's motions. And I was interested into synchrony, or maybe asynchrony

also. In your work, do you prefer to have such synchrony, or do you prefer that the robot moves more independently? How does synchrony or asynchrony impact your relation to the robot?

STELARC : Firstly, I certainly thought it was very intimate the user interface with the robot, and you're looking at your extra arm but you can delicately and synchronously interface with it. I find this interesting performatively. But my performances are not about who is in control. So I like to problematize the relationship with the body and, in this case, the extra arm. For me, sometimes, the motions synchronicity generates a feeling of intimate connection, where you start to accept the extra-arm as your own, as part of your body. Other times, I like the arm to have a kind of mind of its own, to be semi-autonomous. That's the contrast in the performance. But certainly, when you generates a synchronicity, there is no kind of hierarchy of the human. My approach is kind of flat-enology, where the human, the robot, the program have equal status.

Si cette performance impromptue de l'artiste apparaît davantage comme une expérience insolite dans le cadre de cette thèse, cet aspect de synchronie de la danse, du mouvement, questionne à quel point le troisième bras peut incarner le corps, s'intégrer au corps. Par le passé, l'expérience de la "rubber hand illusion" a démontré qu'une main statique pouvait être intégrée dans le schéma corporel [53]. Cette incorporation est par ailleurs robuste à la réalité virtuelle, à différentes représentations de la main, y compris robotisées [54]), et est renforcée par des synchronies, telle qu'une pulsation lumineuse en rythme avec le battement du cœur des participants [55], mais est brisée par la mise en mouvement de la main réelle et l'immobilité de la troisième main. Ici, le couplage LV crée une forme de synchronie du mouvement, de rythme, de "danse", et, dans ce cadre de membre surnuméraire, il pourrait être intéressant d'étudier comment un tel couplage LV, - voire le couplage RDM - pourrait amener ou faire croître cette sensation d'intégration corporelle du troisième bras (qui est par exemple déjà "ressenti", par un retour tangible au niveau de la base de fixation dans sa veste de port) par rapport à une commande position-vitesse de type joystick.

5.2 Un mois d'entraînement : la pratique quotidienne d'une commande en vitesse

En mai-juin 2024, Nolann Duriez, stagiaire de l'équipe encadré par Guillaume Morel (directeur de cette thèse) et Robin Gibaud (ingénieur au laboratoire), s'est entraîné quotidiennement avec le bras Kinova et une commande en vitesse. Nolann se déplace en fauteuil roulant électrique, via un joystick à 2 DdL. Nous avons accroché le bras Kinova sur le côté de son fauteuil. Les commandes en vitesse du bras étaient générées par Nolann de manière volontaire, via une tablette tactile et un ensemble de sliders qui lui permettaient de contrôler les translations et orientations de l'effecteur, soit de manière découplée, soit de manière couplée (vitesses en orientations proportionnelles à celles en translations) selon les tâches (voir Fig.5.8).

Pendant quatre semaines, tous les matins (environ 3h/jour), Nolann s'est entraîné avec le bras robotisé et l'interface afin d'effectuer des tâches du Cybathlon, une compétition internationale organisée par l'ETH Zurich, dont l'une des épreuves est la course "Assistant

Robot Race”¹. Cette épreuve se constitue de 10 tâches inspirées du quotidien (pendre une serviette, attraper du sel, ouvrir une porte) et qui doivent être exécutées avec le bras robotisé. L'une de ces tâches est montrée Fig. 5.7.



FIG. 5.7 – Nolann, s'entraîne ici à une des tâches du Cybathlon : attraper une serviette et la pendre sur un montant. Le bras Kinova est fixé sur le flanc de son fauteuil et piloté par la tablette posée sur ses genoux.

Pendant ces quatre semaines, il a été impressionnant d'observer les progrès de Nolann, et ce malgré la simplicité de la commande (aucune gestion des efforts lors de contact avec l'environnement par exemple). Pour la plupart des tâches, Nolann a par exemple divisé son temps par deux entre son premier et son meilleur essai (voir Fig.5.9). Surtout, au lieu d'utiliser le robot seul, il couplait les mouvements de son fauteuil à ceux du robot afin d'optimiser la vitesse de ses déplacements (par exemple son fauteuil selon le plan horizontal, et le robot pour les déplacements verticaux). Ce progrès m'a rappelé la phrase de Johann Chaulet que j'ai déjà citée dans le Chapitre 1 de cette thèse :

Après deux semaines passées avec Jack, je ne cesse, jour après jour, d'être surpris par tout ce à quoi il me donne accès.

(Johann Chaulet, décembre 2020)

La rapidité du progrès de Nolann nous a, je pense, tous impressionné au laboratoire. Si par nos discussions avec Johann Chaulet ou Noémie Noleau, nous avons déjà une idée des opportunités qu'ouvrent la commande volontaire (bien que parfois imparfaite et contre-intuitive, comme celle en vitesse mise ici en place), cette dernière peut être apprivoisée, et, pour la première fois, nous avons été témoins de cet apprivoisement, de la rapidité d'adaptation de Nolann avec le robot. Il m'est ici difficile d'illustrer cette progression de quatre semaines, mais les mouvements lents et saccadés du robot (voire parfois dans la mauvaise direction) sont peu à peu devenus rapides, fluides et optimisés et Nolann était capable à la fin de son stage de répéter toutes les tâches du Cybathlon avec consistance.

Pour son dernier jour, nous sommes sortis "hors les murs", afin d'observer les capacités de Nolann avec le robot dans une tâche qu'il n'avait jamais réalisée, et un environnement

¹<https://cybathlon.ethz.ch/en/event/disciplines/rob>

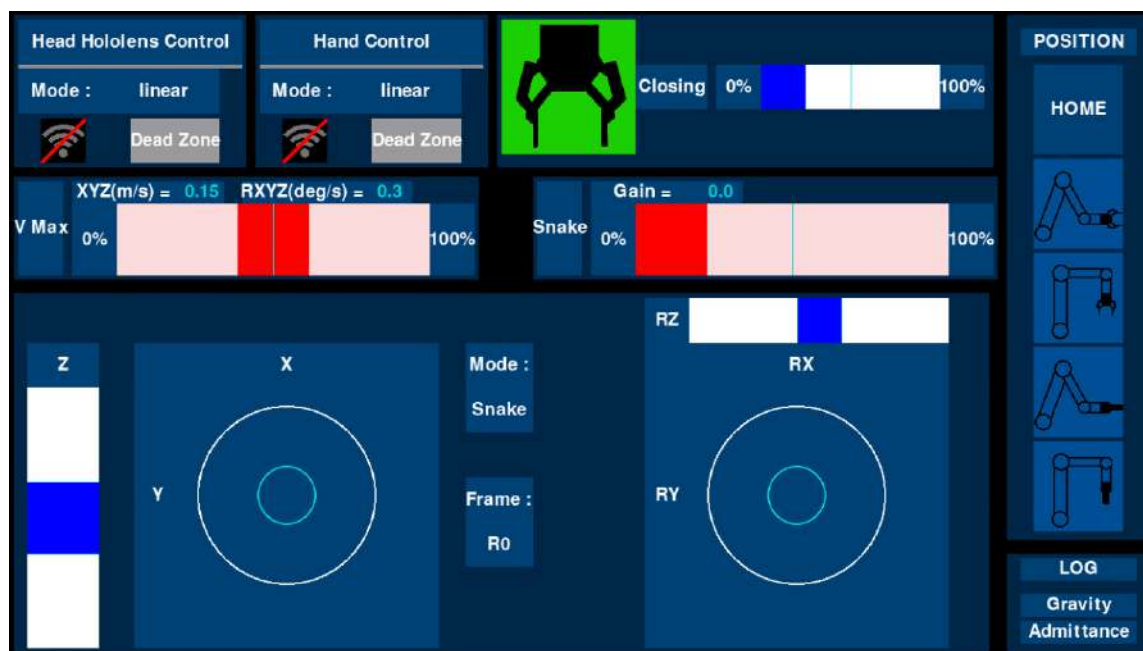


FIG. 5.8 – L’interface tactile dont s’est servi Nolann : la partie supérieure sert à ouvrir et fermer la pince robotisée (les autres modes, Head et Hand n’ont pas été utilisés). Au milieu, des sliders permettent de régler la vitesse maximale ainsi que le couplage entre rotations et translations, ou ”Snake”, mode serpent où la vitesse en rotation est proportionnelle à la vitesse en translation, couplant les deux. Les sliders du bas permettent de contrôler les trois translations et orientations, soient dans le repère R_0 , la base du robot, soit dans le repère R_7 de l’effecteur (septième articulation). Enfin, à droite, cinq postures peuvent être enregistrées, permettant de facilement revenir à des postures standards et souvent utilisées. Cette interface a été développée par Robin Gibaud.

non contrôlé. Nous nous sommes rendus au supermarché, à côté de l’université. Nolann a alors souhaité que nous ne l’aidions pas, et nous l’avons observé ”faire ses courses” pour déjeuner. Si dans un premier temps, l’usage du robot a été celui auquel l’on s’attendait, notamment pour attraper des items comme illustré Fig.5.10, tâches similaires à celles du Cybathlon (attraper une pomme, une brosse à dents, une assiette) et auxquelles il s’était entraîné, il s’est aussi servi du robot comme d’un ”troisième bras”. Nolann est en effet capable de saisir certains objets proches de lui, il a donc utilisé le Kinova pour tenir une anse de son sac de course, tenant l’autre anse avec son bras gauche et insérant les objets dans le sac avec son bras droit (voir Fig.5.11). Une fois ses mains occupées, Nolann ne pouvait cependant plus actionner le robot via la tablette et était donc forcé de ”compenser”, adaptant des postures peu confortables afin d’attraper les items ou de les reposer dans son sac. Ici, donc, la commande volontaire atteint ses limites, et il faudrait automatiser certains mouvements du robot afin de s’adapter aux postures de l’utilisateur, en cherchant à les rendre plus confortables.

Cette dernière sortie, bien sûr, nous a aussi montré tout ce que le robot est incapable de faire. Nolann n’a pas exemple pas pu ouvrir les portes réfrigérées du rayon frais (la

Epreuve	Nombre d'essais	Temps initial	Record
Mailbox	0
Toothbrush	18	1min 26s	33s
Pick-up	31	51s	22s
Scarf	27	35s	25s
Eating	21	54s	30s
Crowd	0
Spice-up	19	2min 15s	50s
Door	8	2min 30s	2min
Touchscreen	7	27s
Dishwasher	17	2min 19s	1min 18s
Nombre d'essais total :	148	Chrono absolu théorique :	395s = 6min 35s

FIG. 5.9 – Les temps et le nombre d'essais effectués par Nolann selon chaque tâche du Cybathlon (extrait du rapport de stage de Nolann Duriez).



FIG. 5.10 – Nolann attrape un item dans un rayon du supermarché (le bouton d'arrêt d'urgence n'a pas été actionné ce jour-là, et Nolann était le seul à ne pas être stressé sur cette photo).

faute à la fois à un gripper inadapté, mais aussi à la difficulté de coupler translations et rotations lors de l'ouverture d'une porte) et il a fallu environ 30 minutes pour acheter 3

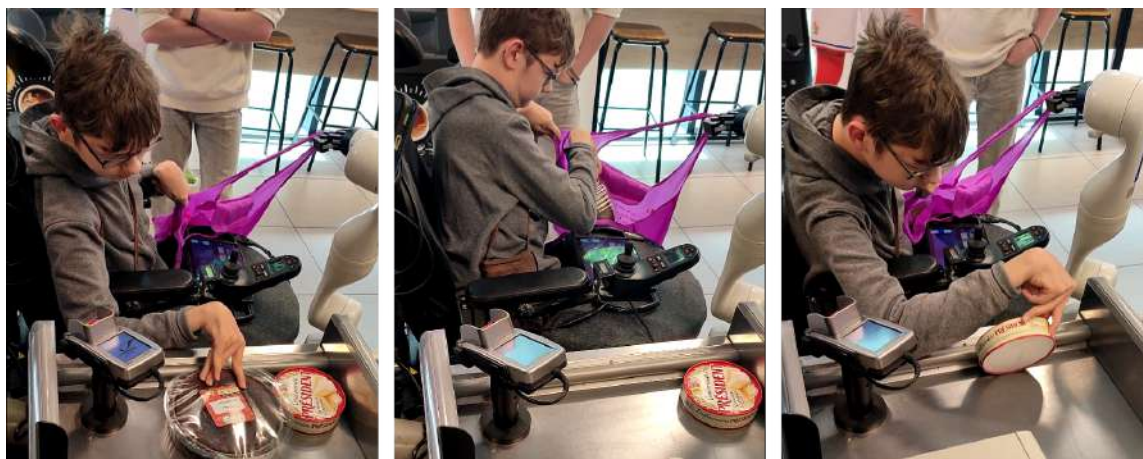


FIG. 5.11 – Nolann se sert du Kinova comme d'un troisième bras afin de mettre ses items dans un sac. Cependant, il ne peut plus actionner le bras via la tablette tactile sur ses genoux, l'obligeant à adapter des positions peu confortables alors que le robot reste immobile.

items et passer en caisse. Je cite également le rapport de Nolann sur la difficulté d'utiliser la tablette qui le force à "regarder la pince et l'interface en même temps", nécessitant une bonne connaissance de l'interface, mais également sur la difficulté d'être précis alors que, depuis son fauteuil, le robot le gêne parfois pour voir l'objet qu'il souhaite atteindre, ce qu'il décrit comme des soucis de "gêne / visibilité / encombrement". Si le lien virtuel résout ce premier point, le deuxième point ne pourrait-être résolu que par un bras robot déporté à plus grande distance de l'utilisateur, voire sur une base mobile indépendante (en plaçant le robot face ou sur une table de l'utilisateur, nous n'avions par exemple par encore rencontré ce soucis de visibilité, qui est d'autant plus renforcé par la difficulté pour Nolann de changer sa posture pour mieux voir l'effecteur du robot).

Il y a donc encore de nombreux enjeux concernant la charge cognitive (regarder le robot et l'interface simultanément), la plateforme robotisée demandant une attention visuelle et une concentration décuplées, mais aussi la charge physique, notamment lors des manipulations à trois mains. Cependant, on notera qu'après quatre semaines Nolann était capable de coordonner les mouvements de son fauteuil et ceux du robot sur des tâches du Cybathlon qu'il connaissait déjà, démontrant une faculté de coordination entre les mouvements intuitifs de son fauteuil, et ces "nouveaux" mouvements du bras robotisé.

5.3 Trois ans d'entraînement : retour personnel sur l'apprentissage du CCC et l'exploration d'une *troisième main*

Lors de ces dernières années, j'ai également moi-même utilisé le couplage de lien virtuel de manière répétée, avec la main, la tête ou le thorax pendant de nombreuses séances de développement et de mise au point du système. Je pense que, tant que l'espace d'atteinte est adapté à l'espace de travail (ou que la configuration du lien virtuel est adaptée à l'espace de travail), il m'est rapidement possible d'atteindre une certaine précision et

dextérité avec le couplage, notamment pour le positionnement d'objets. Avec un couplage de tête, et la pince Robotiq, il m'est par exemple devenu aisé de réaliser une pyramide de gobelets ou des tâches d'insertion. Cependant, avec le temps, j'ai eu tendance à préférer l'utilisation du système sans casque de réalité augmentée. Ayant intégré les dynamiques lentes du Kinova, et le retard entre ses mouvements et les miens, le retour visuel du casque m'est au fil du temps apparu davantage comme une gêne qu'une aide, notamment pour correctement visualiser la pince lors de saisie. Ces préférences peuvent être personnelles, liées à la simplicité du retour visuel que nous avons implémenté, mais, là où la réalité augmentée est un outil très puissant pour apprendre à maîtriser le système, le comprendre, s'entraîner (ne serait-ce que s'entraîner avec le lien virtuel seul, sans robot), avec le temps et l'apprentissage, cela m'a semblé devenir une charge cognitive plus qu'une aide.



FIG. 5.12 – Une pyramide de gobelets réalisée avec le couplage LVR-CCC par un utilisateur "expert".

La commande CCC quand a elle, notamment à un degré de liberté, peut aussi être apprivoisée assez rapidement, évitant la plupart des dépassements observés chez des participants naïfs. Cependant, avec une fonction de coût basée sur une posture de référence, il m'arrive encore et toujours de perdre cette dernière et donc de dériver. Là où il est aisé de "relâcher" un joystick afin d'arrêter une commande en vitesse, l'absence d'un retour tangible permettant de percevoir le point neutre dans la commande CCC empêche d'effectuer un tel "relâchement" et de laisser le système se guider automatiquement vers son point d'immobilité. Malgré l'entraînement, cette perte de repère (qui peut-être causée par une perturbation dans l'environnement, ou simplement une inattention) n'est donc pas seulement rencontrée chez les utilisateurs naïfs mais subsiste également avec l'utilisateur plus "expert" que je suis.

Dans le cadre du projet européen NIMA, nous avons aussi exploré le couplage LV de thorax, et notamment des tâches dites "à trois mains" : se servir du bras robotique comme support, le faire attraper un objet pendant les deux mains sont occupées, etc. Malgré une utilisation des trois mains, je suis encore incapable de les utiliser simultanément, découplant

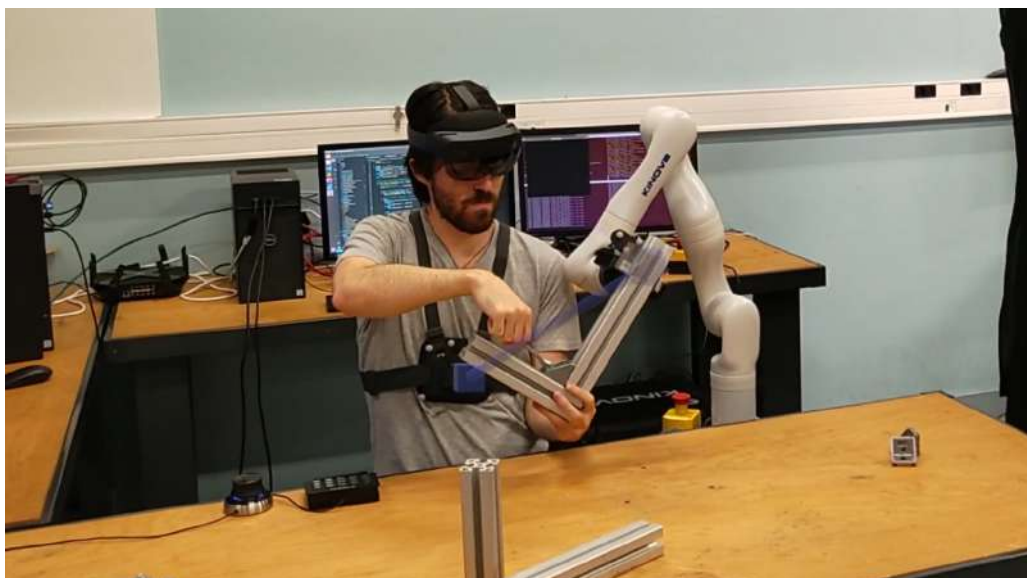


FIG. 5.13 – Une tâche "à trois mains" avec couplage LV : le robot maintient une pièce large et encombrante, conjointement avec l'utilisateur qui vient y visser une autre pièce.

généralement mes deux mains de cette troisième main virtuelle, la "lançant" généralement avec mon thorax afin d'intégrer le retard, et y revenant a posteriori, une fois que le robot réel a atteint la cible. Le manque de dynamisme du bras Kinova est donc probablement un frein au développement de tâches à trois mains, surtout avec les mouvements d'une personne typique alors que sa vitesse est plus adaptée à des personnes à mobilité réduite. Cependant, s'il faudrait bien sûr un entraînement intensif et prolongé afin de vraiment évaluer cette capacité à la tri-manipulation, je pense que le couplage LV, dans un tel cas de "troisième main", permet de fournir de bonnes indications quand à la direction que le robot doit suivre, par un système simple, intuitif et facile à apprendre, mais qu'une automatisation partielle de la tâche reste ici vitale afin de libérer la charge cognitive (notamment la saisie). Bien sûr, il faudrait utiliser le système lors d'un apprentissage quotidien et intensif pour conclure sur ces aspects, et des recherches sur des sixièmes doigts robotisés ont montré que des utilisateurs quotidiens pouvaient facilement intégrer une telle prothèse [56].

Il est aussi évident qu'il y a encore aujourd'hui un "manque" de tâches réelles qu'un tel troisième bras pourrait effectuer malgré un nombre extensif de systèmes développés ces dernières années [57, 58]. Sous une des vidéos de sa chaîne Youtube, Johann Chaulet écrivait par ailleurs :

L'occasion de partager avec vous un usage inattendu de Jack. Alors que nous étions en train de discuter face-à-face dans la cuisine Déborah et moi, j'aperçois, qui se balance entre nous deux, la sangle au moyen de laquelle je fixe habituellement mon appareil photo [...] Je lui demande de glisser ma main dans la sangle et, quelques secondes plus tard, Jack soulève délicatement ma main [...] De bras robotisé Jack est soudain devenu un véritable exosquelette. [...] NB : cet usage du bras robotisé est assez formellement déconseillé par le

fabricant.

(Johann Chaulet, mai 2022)

et cette citation souligne que l'ambiguïté de l'usage d'une nouvelle technologie se résout avant tout par la pratique (plus que la pensée). Si le design de ces membres surnuméraires (portés, ou déportés) n'a cessé d'évoluer, de se démultiplier, leur usage n'en reste pas moins encore très limité, voire inexistant tant ces systèmes restent des "aliens" du paysage industriel actuel. Et l'avancée des commandes de ces derniers viendraient aussi de l'avancée de leur usage, même sommaire, même via de simples joysticks comme en utilise Johann Chaulet, et qui permettraient de définir plus clairement les besoins de commande de ces systèmes, et donc les caractéristiques nécessaires de leur commande. J'ai par exemple trouvé dans la littérature qu'il existe un grand nombre de système "à trois mains", et un intérêt croissant pour ces systèmes, mais encore peu de tâches.

En conclusion, je soulignerais cependant que le but du couplage LV, de même que de la commande volontaire, n'est pas de remplacer les autres couplages, les autres commandes, mais de proposer une alternative qui, dans certaines situations, selon les parties du corps ou les tâches, permettra d'obtenir une interaction intuitive et efficace. Le couplage LV, bien sûr, est incapable de résoudre des tâches de la téléopération à distance - pour un bras robotisé sur fauteuil, attraper un objet dans une étagère en hauteur, invisible à l'oeil de l'utilisateur. De même, un utilisateur sans mobilité ne pourra utiliser ce couplage, contrairement à une commande basée regard. Mais les performances, l'intuitivité et la facilité d'usage de ce couplage me laisse penser qu'il pourra être utile dans certains scénarios d'assistance, et qu'il est une alternative au couplage RDM, standard de la littérature en téléopération. Toutes les démonstrations ont par ailleurs été ici présentées sans interface tangible (via motion capture) mais pourraient être implémentées avec une interface physique, comme un bras robotique Virtuouse de Haption [26], un support de bras Orthopus² ou une interface instrumentée plus légère, ce qui permettrait de s'émanciper à la fois de la capture de mouvement et du casque de réalité virtuelle, mais aussi d'introduire une force élastique permettant de revenir à des positions de repos dans le cas du CCC (comme dans Dominjon [59] qui a montré qu'une la force élastique qui ramenait l'utilisateur à son point neutre permet d'améliorer une commande RDM avec ajout PV).

²<https://orthopus.com/fr/orthopus-partner/>

Chapitre 6

Conclusion et perspectives

6.1 Principaux résultats obtenus

La démocratisation des robots collaboratifs, capables de cohabiter avec l'humain, a ouvert de nombreux pans d'applications pour l'assistance, que ce soit dans l'industrie ou dans le domaine médical. Si l'automatisation grandissante de ces robots a permis de les spécialiser efficacement dans des tâches précises, la généralisation de ces commandes automatisées à plusieurs tâches, ou à des tâches inconnues, demeure encore un défi. Au contraire, la commande volontaire, c'est-à-dire générée à partir de signaux d'entrée fournis par l'utilisateur, permet (sous condition d'une interface humain-machine adaptée, voire d'une expertise de l'utilisateur) de résoudre ces tâches en contrepartie d'une attention et d'un effort cognitif de l'utilisateur.

Nous avons présenté au **Chapitre 1** un ensemble des commandes volontaires existantes, notamment de type position-vitesse (PV) qui, bien que aisées à implémenter, sont souvent peu intuitives et peu performantes pour des utilisateurs novices; et position-position, par reproduction de mouvement (RDM), qui sont intuitives, mais présentent généralement un grand espace de travail en orientations pour un espace de travail en translations limité. Nous avons proposé un nouveau couplage, dit de lien virtuel (LV), un couplage de type position-position qui s'appuie sur les acquis de manipulation d'outil rigides et qui, au contraire du couplage RDM, par un effet de bras de levier, permet une grande amplitude de translations pour une amplitude de rotations de l'effecteur restreinte.

Nous avons détaillé au **Chapitre 2** l'implémentation des différents couplages, et nous avons également introduit un couplage de lien virtuel reconfigurable (LVR) qui permet en temps réel de modifier la géométrie du lien virtuel, en utilisant par exemple une entrée secondaire de type position-vitesse comme un joystick. Ces couplages ont été implémentés sur un bras Kinova Gen3 Lite, monté sur diverses plateformes (tables, fauteuil roulant, porté sur une veste) en utilisant un système de capture de mouvements Optitrack et un casque de réalité augmentée Hololens 2.

Au **Chapitre 3** nous avons comparé ce nouveau couplage LV aux couplages RDM et PV, déjà connus et observés dans la littérature. Nous avons obtenu, pour un couplage à la main des sujets, des performances et préférences d'utilisation similaires entre le couplage LV et RDM, ce dernier étant le couplage le plus performant de l'état de l'art. Nous avons ensuite étudié l'extension du couplage LV utilisé avec le thorax (donc en libérant les mains du sujet), et ce dernier s'est révélé plus rapide que le couplage PV (de main), en contrepartie d'un effort physique augmenté. Nous avons également étudié le couplage LVR (LV + joystick de main) et observé que le couplage LV réalisait une part plus importante du mouvement pour des tâches de faible amplitude, mais surtout que les mouvements du thorax (LV) démarraient systématiquement avant ceux du joystick (PV), suggérant une

intuitivité naturelle à faire appel au couplage position par rapport au couplage vitesse.

Si le couplage PV est nécessaire pour la réalisation de tâches amples ou ardues, l'activation prioritaire du couplage LV suggère que l'on peut anticiper le mouvement dû au couplage PV à partir de celui du couplage LV. Au **Chapitre 4** nous avons proposé d'utiliser une commande d'annulation de compensations (CCC) [45], introduite initialement pour la commande d'une prothèse de membre supérieur, et de l'intégrer au couplage LVR. Nous avons généralisé cette commande pour l'adapter à notre utilisation d'un lien virtuel, et en utilisant non une posture de référence mais une fonction de coût quelconque, par exemple basée sur l'ergonomie et les risques posturaux. Nous avons également étudié la stabilité et les performances de cette commande dans un cadre restreint de lien à un degré de liberté, et observé l'utilisation d'un tel lien extensible pour une tâche à 3 degrés de liberté effectué avec la tête.

Enfin, dans un dernier temps, nous avons recensé au **Chapitre 5** l'ensemble des interactions entre des publics externes et la plateforme de couplage LV et CCC. Nous avons observé que le lien LV était intuitif pour diverses publics de tout âge, y compris pour des personnes en situation de handicap, tant que l'espace de la tâche était adapté à l'espace de travail de l'utilisateur (mouvements avant/arrière et rotations limités). Lors de l'utilisation du CCC, permettant en théorie l'augmentation de l'espace de travail, nous avons cependant observé que les participants présentaient des difficultés à revenir à leur posture de référence, suggérant la nécessité d'un modèle plus avancé de l'utilisateur, et/ou d'une meilleure instrumentation.

6.2 Perspectives

6.2.1 Développement d'un environnement écologique du Lien Virtuel

Dans toutes les expériences présentées dans ce manuscrit, les mouvements de l'utilisateur, permettant les couplages en position, étaient capturés en utilisant un système de caméras Optitrack, et le robot Kinova était généralement posé sur une table. Afin d'obtenir une plateforme portable, il conviendrait premièrement de monter le robot sur une base mobile, qu'elle soit robotisée ou non. Ensuite, afin de s'émanciper des systèmes de caméra Optitrack fixe, il faudrait pouvoir capturer le mouvement de l'utilisateur avec un système embarqué sur la plateforme.

Pour les mouvements de tête ou de buste, un exemple a déjà présenté dans une vidéo¹ où nous avons directement utiliser le casque de réalité augmenté Hololens 2, qui est équipé de caméras et de centrales inertielles, permettant de se repérer dans l'espace. Couplé à des centrales inertielles supplémentaires, ce système permet de capturer le haut du corps de l'utilisateur. Depuis quelques mois, il existe également des capteurs de technologie similaire, comme les Ultimate Tracker HTC Vive² qui, avec un encombrement réduit, permettent de capturer le mouvement des utilisateurs par la fusion de SLAM visuel et de centrales inertielles.

Pour des postes de travail fixe ou sur base mobile, il serait aussi possible d'utiliser des interfaces tangibles, tel que des robots Haption [26], déjà utilisés dans la téléopération, ou des structures de robots assistants tel que le Partner de Orthopus³, développé pour

¹<https://www.youtube.com/watch?v=Eg wz T784Fws>

²<https://www.vive.com/fr/accessory/vive-ultimate-tracker/>

³<https://orthopus.com/fr/orthopus-partner/>

supporter le poids du bras d'un patient qui possède une certaine mobilité mais peu de force. Le robot sert alors d'interface passive, qui capture les mouvements de l'utilisateur, mais pourrait également être utilisé activement, notamment lors de l'utilisation du CCC afin de ramener l'utilisateur vers une posture confortable tout en générant le couplage position-vitesse adapté [59].

Enfin, pour des personnes à mobilité réduite, le confort est une priorité, et il s'agirait avant tout d'instrumenter leurs solutions d'assistance, leurs fauteuils, et non de rajouter des interfaces supplémentaires. Par exemple, en incluant un capteur de force dans l'appui-tête pour les personnes dont la tête est en appui quasi-constant.

On pourra par ailleurs noter que le lien virtuel empêche, comme dans un système de téléopération à distance, tout ressenti de la force exercée par le robot réel sur l'environnement. Si dans ce cadre péri-personnel la vue joue un rôle crucial, il pourrait être nécessaire, dans certaines situations, de faire ressentir à l'utilisateur la force appliquée, par un retour artificiel visuel (par exemple, dans le cadre de l'utilisation d'un casque AR, directement dans le casque) ou haptique. De même, il arrivera parfois que l'utilisateur puisse ne pas voir l'effecteur du robot, notamment dans certaines tâches d'assistance pour des personnes à mobilité réduite (attraper un objet dans une étagère en hauteur notamment) et un retour caméra de l'effecteur serait alors nécessaire, que ce soit pour un couplage en position ou en vitesse. Enfin, lors de l'utilisation du CCC, des retours visuels pourraient être ajoutés afin de notifier l'utilisateur de l'action de la commande en vitesse, particulièrement lors de la prise en main du système.

6.2.2 Comprendre le mouvement humain pour généraliser le CCC

Si nous avons généralisé la formulation du Compensation Cancellation Control (CCC), incluant une fonction de coût quelconque afin de détecter les mouvements compensatoires, déterminer une telle fonction de coût demeure encore un frein à l'implémentation de cette méthode. Jusqu'à présent, tous les essais dynamiques ont été implémentés avec une posture de référence constante, ce qui supposait que les participants retournaient naturellement autour d'une telle posture. Hors, notre nouvelle formulation du CCC a été exprimée non en termes de posture mais de déplacement optimal, ce qui suppose notamment de pouvoir séparer un mouvement fonctionnel d'un mouvement compensatoire.

Une première approche pourrait être d'utiliser une méthode d'apprentissage machine, basée sur un ensemble de données, tel que des machine à vecteurs de support [60]. Cependant, une telle méthode nécessite des données personnalisées et potentiellement difficile à enregistrer. Une autre méthode serait d'utiliser un modèle de corps humain, soit à partir de score ergonomique (ce que nous avons proposé et analysé en statique, mais pas encore en dynamique), soit à partir de modèles dynamiques plus complexes.

Une dernière méthode pourrait être de faire une analyse fréquentielle du mouvement humain, et de séparer les phases balistiques rapides, qui sont a priori fonctionnelles, des phases d'ajustement plus lentes, qui semblent relever d'ajustements potentiellement compensatoires.

Plus généralement, affiner cette formulation et déterminer des fonctions de coût appropriées semble fortement lié à l'analyse du mouvement humain et à la compréhension du contrôle moteur. A court terme, un des objectifs de cette méthode serait de réitérer les expériences précédentes à 6 DdL, avec un lien reconfigurable à 3 ou 4 DdL et une fonction de coût appropriée. A plus long terme, une telle formulation, ou du moins une

telle fonction de coût pourrait également être déterminée pour la manipulation à trois mains, et l'interaction du robot avec soi, le CCC n'ayant pas été abordé dans ce cadre.

6.2.3 Combiner la commande volontaire et automatisée

Au cours de ce manuscrit, nous n'avons présenté que la commande volontaire, soit en position, soit en vitesse. Si la commande volontaire permet de guider le robot de manière effective, de l'orienter, elle nécessite cependant une certaine expertise du système pour des tâches de manipulation précise et fine, que ce soit des tâches industrielles de haute qualification, ou certaines tâches de la vie quotidienne : saisir un objet fin, insérer une clef dans une serrure, etc. Au contraire, actuellement, l'automatisation excelle pour la gestion d'une tâche unique, mais ses performances se dégradent avec de la multiplication des tâches, particulièrement pour l'assistance [6]. Un robot tel que le Kinova étant muni d'une caméra RGB-D (couleur et profondeur) sur son effecteur, l'on pourrait naturellement envisager l'utilisation de cette dernière pour automatiser la saisie d'objet par exemple. La tâche automatisée ne serait plus alors : "attrape tel objet situé là", mais "attrape l'objet devant toi", la phase d'approche étant générée par la commande volontaire.

L'on pourrait également utiliser la commande volontaire pour entraîner le manipulateur par démonstration. Il existe aujourd'hui des méthodes d'apprentissage par démonstration qui nécessitent peu d'exemples [61], et des systèmes commercialisés de téléopération pour la démonstration commencent à émerger, comme le système de Nordbo⁴. L'utilisateur n'aurait alors plus besoin de réussir une tâche difficile (que ce soit sur le plan moteur - précision requise par exemple - ou cognitif) quotidiennement mais, seulement à quelques reprises, permettant d'entraîner le robot, le personnalisant, développant de manière continue un environnement apprenant, ce qui permettrait une évolution constante adaptée aux besoins de chaque utilisateur avec un seul et même système générique.

De la même manière que tel couplage est plus adapté à telle tâche, ici il s'agit d'adapter la part de commande volontaire et la part de commande automatisée à chaque utilisateur et chaque besoin. Sur une chaîne de production, cela permettrait d'avoir un seul bras robot, par exemple sur une base mobile, pouvant être déplacé et ré-adapté chaque jour aux nouveaux besoins de production, réduisant ainsi les coûts tout en conservant une certaine efficacité. Dans l'assistance au handicap, cela permettrait aux utilisateurs de constamment ré-adapter leurs robots à leurs besoins.

6.3 Bilan

Les principales contributions de ce travail sont un nouveau mode de couplage, le Lien Virtuel, et son couplage hybride avec une commande en vitesse, le Lien Virtuel Reconfigurable. Nous avons analysé leurs caractéristiques, leurs performances qui se sont révélées équivalentes à celles de couplages connus de la littérature. Cependant, malgré la taille restreinte des échantillons d'utilisateurs, dans le mode Reconfigurable, nous avons noté une grande disparité dans l'usage des différentes sources de mouvements, comme observé dans les coordinations entre l'usage des mouvements du corps et du joystick Fig.3.11d. Je pense que ces observations sont en partie révélatrices de la nécessité de systèmes génériques, faciles à intégrer et permettant une intuitivité et des performances

⁴<https://www.youtube.com/watch?v=mymtq7Caeio>

à moindre coût, mais aussi et surtout d'une liberté de personnalisation de l'utilisateur, y compris sur des systèmes qui sont pourtant théoriquement simples. De la même manière que commande volontaire et commande automatisée ne sont pas antinomiques, et doivent coexister, il s'agit non pas de proposer un système unique qui répond à tout besoin, mais une base générique, écologique, proposant un vaste choix d'options que l'utilisateur pourra ensuite personnaliser, adapter, mélanger selon ses préférences et selon les tâches qu'il devra effectuer. De tels systèmes pourraient alors être transportés, réutilisés, reconfigurés voire partagés par plusieurs utilisateurs tout en permettant l'intuitivité et le confort. La personnalisation ne doit venir en amont, mais en aval, de l'utilisateur lui-même à qui il faut donc proposer des outils pour cela. Si nous n'avons ici proposé qu'un seul mode, que nous avons comparé à d'autres, et si l'interfaçage entre commande volontaire et automatique relève de travaux futurs, j'espère que c'est la direction que prendraient des recherches qui réutiliseront les travaux de cette thèse.

Bibliographie

- [1] “World Robotics 2023, IFR presentation,” 2023.
- [2] K. H. Tantawi, A. Sokolov, and O. Tantawi, “Advances in Industrial Robotics : From Industry 3.0 Automation to Industry 4.0 Collaboration.”
- [3] F. Sherwani, M. M. Asad, and B. Ibrahim, “Collaborative robots and industrial revolution 4.0 (ir 4.0),” pp. 1–5, 2020.
- [4] S. Lemonnier and J. Simonin, “Robots collaboratifs dans l’industrie française en 2021 : acceptation des opérateurs et points de vue d’industriels,” 2023.
- [5] “Obi User Manual,” Tech. Rep.
- [6] A. Shafti, P. Orlov, and A. A. Faisal, “Gaze-based, Context-aware Robotic System for Assisted Reaching and Grasping.”
- [7] D. Kuhner, L. D. J. Fiederer, J. Aldinger, F. Burget, M. Völker, R. T. Schirrmeister, C. Do, J. Boedecker, B. Nebel, T. Ball, and W. Burgard, “A service assistant combining autonomous robotics, flexible goal formulation, and deep-learning-based brain–computer interfacing,” *Robotics and Autonomous Systems*, 2019.
- [8] “Jaco® assistive robot User guide.” [Online]. Available : <https://assistive.kinovarobotics.com/uploads/EN-UG-007-Jaco-user-guide-R05.pdf>
- [9] A. Maravita and A. Iriki, “Tools for the body (schema),” *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 8, no. 2, pp. 79–86, Feb. 2004. [Online]. Available : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364661303003450>
- [10] M. Casadio, R. Ranganathan, and F. A. Mussa-Ivaldi, “The Body-Machine Interface : A New Perspective on an Old Theme,” *Journal of Motor Behavior*, vol. 44, no. 6, pp. 419–433, Nov. 2012. [Online]. Available : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00222895.2012.700968>
- [11] L. N. Andreasen Struijk, L. L. Egsgaard, R. Lontis, M. Gaihede, and B. Bentsen, “Wireless intraoral tongue control of an assistive robotic arm for individuals with tetraplegia,” *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 14, pp. 1–8, 2017.
- [12] W. Amanhoud, J. Hernandez Sanchez, M. Bouri, and A. Billard, “Contact-initiated shared control strategies for four-arm supernumerary manipulation with foot interfaces,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 40, no. 8-9, pp. 986–1014, Aug. 2021. [Online]. Available : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/02783649211017642>
- [13] M. Aljalal, S. Ibrahim, R. Djemal, and W. Ko, “Comprehensive review on brain-controlled mobile robots and robotic arms based on electroencephalography signals,” *Intelligent Service Robotics*, vol. 13, no. 4, pp. 539–563, 2020.
- [14] R. Gopura, D. Bandara, J. Gunasekara, and T. Jayawardane, “Recent trends in emg-based control methods for assistive robots,” *Electrodiagnosis in new frontiers of clinical research*, pp. 237–268, 2013.

- [15] F. Lopez, C. Reaño, A. Rosenqvist, M. Morris, and S. Tosunoglu, "FARA : Framing Assembly Robotic Arm System for Construction Sites," 2017.
- [16] A. Campeau-Lecours, U. Cote-Allard, D.-S. Vu, F. Routhier, B. Gosselin, and C. Gosselin, "Intuitive Adaptive Orientation Control for Enhanced Human–Robot Interaction," *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*.
- [17] L. Ramli, "Control strategies for crane systems : A comprehensive review," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017.
- [18] I. Rulik, S. H. Sunny, I. I. Zarif, B. Brahmi, S. I. Ahamed, K. Schultz, I. Wang, T. Leheng, J. P. Longxiang, and M. H. Rahman, "Control of a Wheelchair-Mounted 6DOF Assistive Robot With Chin and Finger Joysticks," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 9, 2022.
- [19] F. Rizzoglio, M. Giordano, F. A. Mussa-Ivaldi, and M. Casadio, "A Non-Linear Body Machine Interface for Controlling Assistive Robotic Arms," *IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING*, vol. 70, no. 7, 2023.
- [20] M. Macchini, F. Schiano, and D. Floreano, "Personalized Telerobotics by Fast Machine Learning of Body-Machine Interfaces," 2019.
- [21] S. Zhai, "Human Performance in Six Degree of Freedom Input Control," 1995.
- [22] R. C. Lincoln, "Visual tracking : III. The instrumental dimension of motion in relation to tracking accuracy." *Journal of Applied Psychology*, vol. 37, no. 6, pp. 489–493, Dec. 1953. [Online]. Available : <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/h0060608>
- [23] R. J. Jagacinski, D. W. Repperger, M. S. Moran, S. L. Ward, and B. Glass, "Fitts' Law and the Microstructure of Rapid Discrete Movements," *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, no. 6(2), pp. 309–320, 1980.
- [24] C. Freschi, V. Ferrari, F. Melfi, M. Ferrari, F. Mosca, and A. Cuschieri, "Technical review of the da Vinci surgical telemanipulator : Technical review of the da Vinci surgical telemanipulator," *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 9, no. 4, pp. 396–406, Dec. 2013. [Online]. Available : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rcs.1468>
- [25] E. J. L. Pulgarin, O. Tokatli, G. Burroughes, and G. Herrmann, "Assessing tele-manipulation systems using task performance for glovebox operations," *Frontiers in Robotics and AI*.
- [26] "Virtuose™ 6D RV - HAPTION SA." [Online]. Available : <https://www.haption.com/fr/products-fr/virtuose-6d-fr.html>
- [27] E. G. Johnsen and W. R. Corliss, *Human factors applications in teleoperator design and operation*. Wiley-Interscience New York, 1971.
- [28] A. Fischer and J. M. Vance, "PHANToM Haptic Device Implemented in a Projection Screen Virtual Environment."
- [29] J. Han and G.-H. Yang, "Improving Teleoperator Efficiency Using Position–Rate Hybrid Controllers and Task Decomposition," 2022.
- [30] L. Dominjon, A. Lecuyer, J. Burkhardt, G. Andrade-Barroso, and S. Richir, "The "Bubble" Technique : Interacting with Large Virtual Environments Using Haptic Devices with Limited Workspace," in *First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*. Pisa, Italy : IEEE, 2005, pp. 639–640. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/document/1407038/>

- [31] K. H. Jewell, "A custom-made head pointer for children," *The American Journal of Occupational Therapy*, vol. 43, no. 7, pp. 456–460, 1989.
- [32] "Headpointer - Handi Life Sport," Oct. 2017. [Online]. Available : <https://handilifesport.com/product/headpointer/>
- [33] H. Ro, S. Chae, I. Kim, J. Byun, Y. Yang, Y. Park, and T.-d. Han, "A Dynamic Depth-Variable Ray-Casting Interface for Object Manipulation in AR Environments."
- [34] Y. Lu and T. University, "Investigating Bubble Mechanism for Ray-Casting to Improve 3D Target Acquisition in Virtual Reality."
- [35] M. Legrand, "Upper limb prostheses control based on user's body compensations."
- [36] A. Palumbo, "Microsoft hololens 2 in medical and healthcare context : state of the art and future prospects," *Sensors*, vol. 22, no. 20, p. 7709, 2022.
- [37] J. S. Furtado, H. H. Liu, G. Lai, H. Lacheray, and J. Desouza-Coelho, "Comparative analysis of optitrack motion capture systems," in *Advances in Motion Sensing and Control for Robotic Applications : Selected Papers from the Symposium on Mechatronics, Robotics, and Control (SMRC'18)-CSME International Congress 2018, May 27-30, 2018 Toronto, Canada*. Springer, 2019, pp. 15–31.
- [38] "SpaceMouse Compact - Official 3Dconnexion UK store." [Online]. Available : <https://3dconnexion.com/us/product/spacemouse-compact/>
- [39] E. B. Torres and D. Zipser, "Simultaneous control of hand displacements and rotations in orientation-matching experiments," *Journal of Applied Physiology*, vol. 96, no. 5, pp. 1978–1987, May 2004. [Online]. Available : <https://www.physiology.org/doi/10.1152/jappphysiol.00872.2003>
- [40] H. Kroll', "A Theoretical Evaluation of Linearity."
- [41] Won Kim, F. Tendick, S. Ellis, and L. Stark, "A comparison of position and rate control for telemanipulations with consideration of manipulator system dynamics," *IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 3, no. 5, pp. 426–436, Oct. 1987. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/document/1087117/>
- [42] M. Couraud, "Etude du contrôle sensorimoteur dans un contexte artificiel simplifié en vue d'améliorer le contrôle des prothèses myoélectriques." 2018.
- [43] K. C. C. Peng and W. Singhose, "Crane control using machine vision and wand following." IEEE, 2009, pp. 1–6.
- [44] A. Hussaini, A. Zinck, and P. Kyberd, "Categorization of compensatory motions in transradial myoelectric prosthesis users," *Prosthetics & Orthotics International*, vol. 41, no. 3, pp. 286–293, Jun. 2017. [Online]. Available : <https://journals.lww.com/00006479-201741030-00009>
- [45] M. Legrand, N. Jarrasse, E. d. Montalivet, F. Richer, and G. Morel, "Closing the Loop Between Body Compensations and Upper Limb Prosthetic Movements : A Feasibility Study," *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, vol. 3, no. 1, pp. 230–240, Feb. 2021. [Online]. Available : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9311187/>
- [46] D. Bullock, S. Grossberg, and P. H. Guenther, "A Self-Organizing Neural Model of Motor Equivalent Reaching and Tool Use by a Multijoint Arm," vol. 5, no. 4, p. 28, 1993.

- [47] S. A. Ismail, S. B. M. Tamrin, and Z. Hashim, "The association between ergonomic risk factors, rula score, and musculoskeletal pain among school children : a preliminary result," *Global Journal of Health Science*, vol. 1, no. 2, p. 73, 2009.
- [48] J. C. Perry, J. Rosen, and S. Burns, "Upper-Limb Powered Exoskeleton Design," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 12, no. 4, pp. 408–417, Aug. 2007. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/document/4291584/>
- [49] A. Shafti, P. Orlov, and A. A. Faisal, "Gaze-based, context-aware robotic system for assisted reaching and grasping," in *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2019, pp. 863–869.
- [50] F. Parietti and H. Asada, "Supernumerary Robotic Limbs for Human Body Support," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 32, no. 2, pp. 301–311, Apr. 2016. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7410066/>
- [51] N. Yamamura, D. Uriu, M. Muramatsu, Y. Kamiyama, Z. Kashino, S. Sakamoto, N. Tanaka, T. Tanigawa, A. Onishi, S. Yoshida *et al.*, "Social digital cyborgs : The collaborative design process of jizai arms," in *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2023, pp. 1–19.
- [52] G. Dominijanni, D. L. Pinheiro, L. Pollina, B. Orset, M. Gini, E. Anselmino, C. Pierella, J. Olivier, S. Shokur, and S. Micera, "Human motor augmentation with an extra robotic arm without functional interference," *Science Robotics*, vol. 8, no. 85, p. eadh1438, 2023.
- [53] S. Golaszewski, C. Kremser, M. Wagner, S. Felber, F. Aichner, M. Dimitrijevic *et al.*, "Functional magnetic resonance imaging of the human motor cortex before and after whole-hand afferent electrical stimulation," *Scandinavian journal of rehabilitation medicine*, vol. 31, no. 3, pp. 165–173, 1999.
- [54] L. Lin, "Evaluating effects of character appearance on ownership and learning in virtual applications," Ph.D. dissertation, Clemson University, 2019.
- [55] K. Suzuki, S. N. Garfinkel, H. D. Critchley, and A. K. Seth, "Multisensory integration across exteroceptive and interoceptive domains modulates self-experience in the rubber-hand illusion," *Neuropsychologia*, vol. 51, no. 13, pp. 2909–2917, Nov. 2013. [Online]. Available : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0028393213002789>
- [56] P. Kieliba, D. Clode, R. O. Maimon-Mor, and T. R. Makin, "Robotic hand augmentation drives changes in neural body representation," *Science robotics*, vol. 6, no. 54, p. eabd7935, 2021.
- [57] B. Yang, J. Huang, X. Chen, C. Xiong, and Y. Hasegawa, "Supernumerary Robotic Limbs : A Review and Future Outlook," *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, vol. 3, no. 3, pp. 623–639, Aug. 2021. [Online]. Available : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9446590/>
- [58] D. Prattichizzo, M. Pozzi, T. Lisini Baldi, M. Malvezzi, I. Hussain, S. Rossi, and G. Salvietti, "Human augmentation by wearable supernumerary robotic limbs : review and perspectives," *Progress in Biomedical Engineering*, vol. 3, no. 4, p. 042005, Oct. 2021. [Online]. Available : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2516-1091/ac2294>
- [59] L. Dominjon, A. Lécuyer, J.-M. Burkhardt, and R. Simon, "A Comparison of Three Techniques to Interact in Large Virtual Environments Using Haptic Devices with Limited Workspace."

- [60] S. Cai, "Online compensation detecting for real-time reduction of compensatory motions during reaching : a pilot study with stroke survivors," 2020.
- [61] I. Havoutis and S. Calinon, "Learning from demonstration for semi-autonomous teleoperation," *Autonomous Robots*, vol. 43, pp. 713–726, 2019.

Annexes

A Practical Control Approach for Safe Collaborative Supernumerary Robotic Arms

Mahdi Khoramshahi, Alexis Pognant, Guillaume Morel and Nathanael Jarrassé

Abstract—Supernumerary robotic arms have high potential to increase human capacities to perform complicated tasks; e.g., having a third arm could increase the user’s strength, precision, reachability, and versatility. However, having a robotic manipulator working in an extreme proximity of the user raises new challenges in terms of safety; i.e., uncontrolled and hazardous collisions with the user’s body parts and the environment. In this work, we show that such safety considerations can be extracted from standardized norms and translated into kinematics constraints for the robot. Thus, we propose a quadratic programming approach to mid-level control of supernumerary arms in which the safety considerations are embedded as inequality constraints on the robot commanded joint velocities. Moreover, to obtain a safe physical interaction between the robot and its environment, we employ an admittance loop in our control architecture. We validate our approach in designing a safe supernumerary arm using the 7-Dof Kinova[®] Gen3 robot.

I. INTRODUCTION

The Supernumerary Robotic Limbs (SRL) are wearable manipulators with the aim to increase humans capacities to perform complex tasks through sensorimotor augmentation; i.e., to improve human strength, precision, versatility [1], grasping capacity [2], perception [3], etc. Such extra artificial degrees of freedom can be added to human body in several fashions: supernumerary arms [4], legs [5], fingers [6], tails [7], etc. These physical devices are intended to be lightweight with possibility to be interfaced with human motor control; for example through brain-machine interfaces [8]. The first generation of SRLs were mostly weight-supporting devices, but the field progresses toward versatile, autonomous, and assistive SRLs. Currently, SRLs are applicable to industrial settings such as assembly lines [4], health-care where SRLs provides assistance for people with disabilities [9], surgical robotics [10], and many other domains; see [11] for a recent review.

In this work, we are concerned with redundant supernumerary arms with the goal to improve the manipulability –in its broad sense– of the human user. However, having such “third arms” poses new challenges when a powerful device operates in extreme proximity of the human-user. The risk of physical impacts that can lead to injuries raises new safety issues for SRLs. Most often, these issues are addressed from a mechatronic point of view [12]; e.g., by considering backdrivable motor, serials

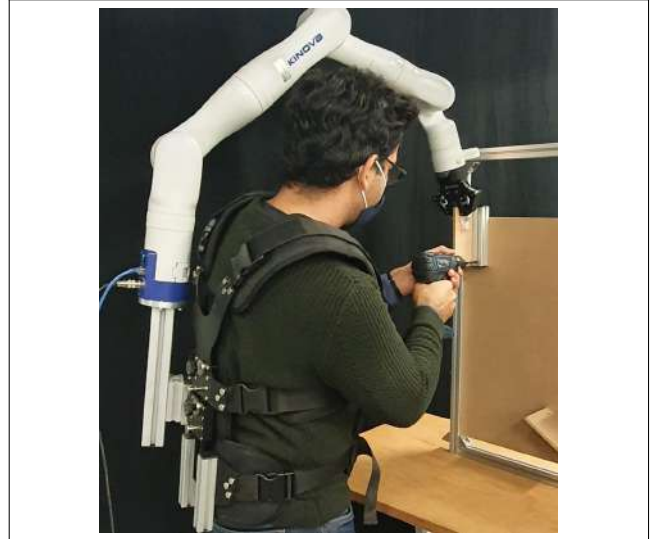


Fig. 1. Our robotic setup where the the Kinova[®] robot is worn using a vest. In this current setup, the power and controls are off-board.

elastic actuators, advance sensing of contact, emergency stops for the actuators, etc. There is also a growing interest in utilizing intrinsically safe structure such as soft materials for wearable robots [13], [14]. However, relying fully on mechatronics and soft materials can severely limits the strengths and efficacy of SRLs. On the other hand, the safety issues of SRLs are less addressed from the control point of view [11] while there is a lack for a safe control framework in this literature; for instance, solving the inverse kinematics (IK) in a safe manner to avoid hazardous collision with the user, or destabilizing the user stability. In this work, we address these safety issues by proposing a novel middle-level control framework based on Quadratic Programming (QP) for supernumerary robotic arms.

To better situate our contribution, we quickly review the literature on SRLs control at three different levels. At a **low-level**, the designers deal with sensing, actuation, and how each joint is controlled. This level is concerned with issues such as backdrivability [15], using hydraulic joints [16], torque control [17], [18], etc. **High-level** control is mostly concerned with interfacing the device with the user; a mechanism which allows the human to directly or indirectly control the SRL [19]. There are a myriad of approaches in the literature using electromyography (EMG) electrodes, joysticks, accelerometers, magnetometers, EEG signals [20],

This work is supported by H2020 FET NIMA project (899626).

All authors are with the Institute of Intelligent Systems and Robotics, Sorbonne Université, with CNRS UMR7222, and with INSERM U1150, Paris, France. khoramshahi@isir.upmc.fr

Wizardof-Oz [21], foot interfaces [22], [23], [24], sensorized gloves [25], switches [2]; see [11] for a recent review on such interfaces. This level extends to higher and cognitive level where the robot can recognize human intention and assist humans accordingly. For instance, in [26] the robot learns to assistance the human from demonstrations. **Mid-level** control transfers the human commands (or recognized intentions [27]) to an appropriate, safe, and effective behavior at the low level. At this level, different control objective might be considered such as reducing user-induced vibrations [28], using admittance control to compensate for human movement [12], impedance control to exert forces to the environment [29], body stabilization and support [4], [30], [18]. This level plays a crucial role when we move toward assistive and collaborative SRLs where the robot requires to have a higher degree of autonomy. In other words, versatility of SRLs requires higher robotics degrees of freedoms when some of which are controlled autonomously. Specifically in dealing with kinematically redundant arms, this level addresses the IK issues such as respecting joint limits, utilizing the null-space, controlling the posture, etc. Furthermore, we consider two safety considerations that are specific to supernumerary arms [19]. **First**, the working space of the robot (including both end-effector and the links/joints) should not overlap a lot with that of the user’s natural limbs, which helps to protect users’ safety. **Second**, the interaction forces between human and the robot should be limited as to avoid hazardous collision and impacts.

In this work, we consider a case in which the human-user provides input commands for the position of the end-effector (3 DoF) which leaves 4 DoF (out of 7) for the robot to satisfy the safety measures. In this manner, we reach an effective balance between the robot and the human autonomy. To answer safety issues at the mid-level, we propose to use QP to solve the IK where the safety considerations can be embedded as inequality constraints for the robot joint velocities. QP is commonly used in the literature to safely generate impact in the environment [31], collision-free path planning for robotic applications [32], full-body IK of a humanoid robot with high DoF [33] or as a fast way to solve IK (to avoid computing pseudo inverse) [34]. Moreover, QP approach is suitable for SRLs which requires reactive motion planning; i.e., the robot needs to continuously react to human inputs and the interaction forces. Furthermore, we consider an admittance control loop to safely react to interaction forces [35], [36]. Nevertheless, obtaining quantified safety measure for SRLs is a challenge as well since there is no standardized or conventional approach in the literature. In this work, we propose use the standardized ISO norms to extract inequality constraints for the QP solver. This enables our control architecture to provide a safe behavior for a supernumerary arm; i.e., to respect safety constraints on the workspace, the velocities, the interaction forces, and the impacts. To validate our approach, we use a commercial collaborative robot (Kinova[®]

Gen3 arm) which will be mounted on the back of the user.

II. METHOD

A. Robotic setup: hardware

The Kinova[®] Gen 3 Ultra lightweight robot L53 0007 is a CE marked arm which is designed according to major safety standards. It fulfils several directive and standards such as Machinery Directive 2006/42/EC and ISO 12100:2010. Its power adapter cable is fitted with an integrated emergency stop (E-stop) button which is located near the experimenter and can be used to shutdown the robot. In case of a shutdown, the robots falls slowly due to the regenerative brakes. An additional emergency stop is also placed serially on an extension of the power cable and is placed close to the robot operator. As illustrated in Fig. 1 the robot is mounted on the back of the user. Similar setups can be found in the literature [37], [12]. Robot intrinsic mechanical properties makes it suitable for cobotic applications [38]. Additionally, the native robot control library applies a number of different joint limits for safety purposes. This includes limits on joint position, speed, acceleration and torques. Gen3 also provide a low-level admittance control mode allowing a safe physical interaction with the environment. The Kinova[®] native control library also monitors the feedback of the internal sensors of the robotic arm, along with the heat of internal components and will provide warnings accordingly, or switch the robot to safe compliant state or off.

B. A safe mid-level controller

As stated before, the low-level control is provided by Kinova; i.e., a low-level joint velocity control. To simplify the high-level control, we use a 3D joystick to command a desired velocity for the end-effector. To ensure a safe robotic execution of the human-commanded task, our mid-level controller needs to satisfy several constraints which are extracted from standardized norms. For instance, while moving the end-effector based on human commands, the robot needs to stay in a safe/designated workspace and avoid high force exertion or high power impacts. To this end, we implemented a mid-level controller based on Quadratic programming as shown in Fig. 2. In this fashion, we solve the IK problem (converting human-user commands into proper joint velocities) while respecting different safety specifications. Given general safety specifications for pHRI and our specific scenarios, we compute a set of limits on different aspects of the robotic performance; i.e., workspace, joint positions, joint velocities, interaction forces, and mechanical power. These limits (along with the current robot’s state) are used to compute a set of constraints for the QP-solver. This process is repeated in each times steps given the updated measurements and user’s input which leads to a reactive behavior. Our mid-level controller is implemented in ROS [39] which runs at 40hz. In case of a hard collision, the control will be passed to the low-level admittance controller of the robot; i.e., the task and other ROS-dependent components will not affect the robot’s

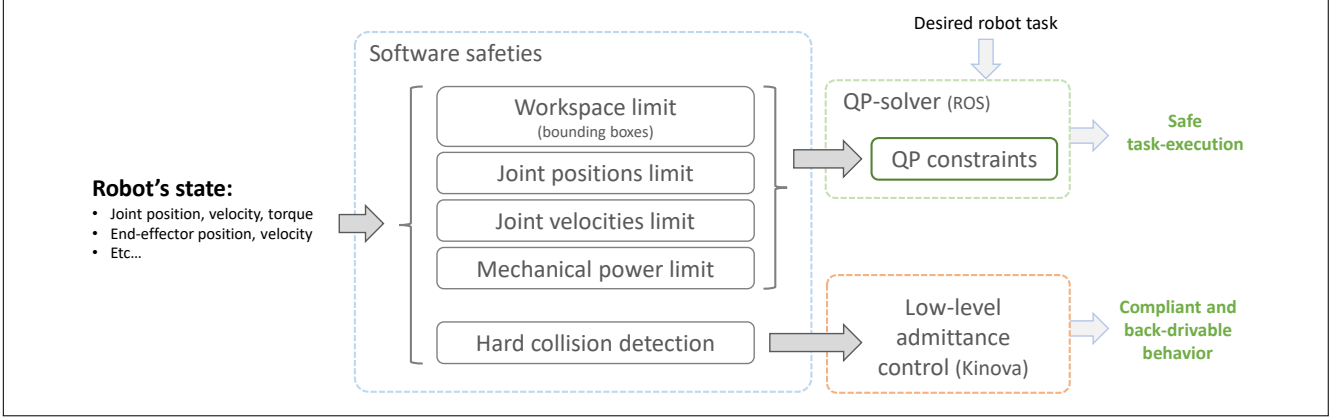


Fig. 2. Illustration of our control architecture for safe control of a supernumerary robotic arm.

behavior until the issue is resolved by the human-user.

C. Constrained inverse kinematics using QP

We use QP-based approach to solve the IK problem similar to [40]:

$$\begin{aligned}
 \min_{u, \delta} \quad & u^T W u + \delta^T Q \delta + g^T u \\
 \text{s.t.} \quad & J u + \delta = \dot{x}_d \\
 & u_{min} < u < u_{max} \\
 & \delta_{min} < \delta < \delta_{max} \\
 & b_{min} < A u < b_{max}
 \end{aligned} \quad (1)$$

where the QP decision variables $u \in \mathbb{R}^n$ represents the commanded joint velocities. W is a diagonal and positive semi-definite matrix which corresponds to the weights of the weighted pseudo inverse. We choose $W = \text{diag}([0.1, 1, 10, 10, 1, 1, 1])$ which is chosen experimentally. We choose high values for the 3rd and 4th joints as they affect the posture more than other joints. In the second term, $\delta \in \mathbb{R}^n$ is a slack variable with the associated weight matrix $Q \in \mathbb{R}^{n \times n} \succ 0$ which is defined in a manner that $\|Q\| \gg \|H\|$. For our implementation, we choose $Q = 1e8I_n$ where I_n is the identity matrix of size n . We use the linear part ($g \in \mathbb{R}^n$) to favor an upright posture ($q_2 = 0$) in the null-space by choosing $g = [0, k_n q_2, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ where q_2 is the position of second joint, and k_n is the null-space stiffness. The goal of QP is to follow the desired EE velocity ($\dot{x}_d \in \mathbb{R}^m$) while respecting the safety constraints. In the equality constraint represents the forward kinematics of the robot where J is the Jacobian matrix. It can be shown that neglecting the inequality constraints and the slack variables leads to the standard IK solution as:

$$\dot{u} = J^\# \dot{x}_d + (I - J^\# J) \dot{q}_n \quad (2)$$

where $J^\# = W^{-1} J^T (J W^{-1} J^T)^{-1}$ is the weighted Moore-Penrose pseudo-inverse and $\dot{q}_n = [0, -k_n q_2 / 2, 0, 0, 0, 0, 0]$ is the null-space velocity. In our control architecture, the desired velocity is computed as follows:

$$\dot{x}_d = \dot{x}_t + \dot{x}_a \quad (3)$$

Where \dot{x}_t is received from a high-level controller which generates task-related velocities; e.g., a simple control interface using joystick or gaze. The second term (\dot{x}_a) is generated by the admittance loop which handles the interaction forces with respect to soft and hard collisions.

The QP problem can be solved sequentially when the solution of each time step serves as the warm-start for the next one. For this purpose, we use qpOASES library [41]. Some of the main technical parameters are set as follows: terminal tolerance $1e-5$, bound tolerance $1e-5$, max iteration $1e3$.

D. Safety constraints for QP

In this section, we present how the safety measures for the robot are translated into the boundaries for the inequality constraints.

Velocity safety: ISO 10218-1:2011 [42] specifies that the maximum velocity of the robot end-effector should be 250 mm/s, to leave enough time to the operator to avoid or stop the robot. Therefore, we limit the commanded velocities for the EE at 0.2m/s. Furthermore, we limit the joint velocities at $\dot{q}_{max} = 0.3\text{rad/s}$ to have reasonable linear velocities for other robotic parts. This is a conservative value that is reached experimentally. The QP inequality constraints for our decision variable constraints the joints velocities as follows:

$$-\dot{q}_{max} \leq u \leq \dot{q}_{max} \quad (4)$$

Angular position safeties: In order to take into account the mechanical limits of the robot, especially joint limits, we need to add angular position limits. However, as our command work is a velocity command, we need to express joints limits as velocity limits. To do so, we can set the following limits:

$$\frac{q_{min} - q}{p \Delta T} < u < \frac{q_{max} - q}{p \Delta T} \quad (5)$$

where q_{min} and $q_{max} \in \mathbb{R}^n$ are the angular joint limits, and ΔT is the control loop rate. $p > 1$ serves as

a conservative factor; i.e., the robot will not violate the constraint even if the robot keeps the same velocity over the next p time steps. Therefore, the higher p , the slower the joints moves when it gets close to its limits. We choose $p = 2$. The joint limits are experimentally set to $q_{min} = [-\infty, -120, -\infty, -120, -\infty, -120, -\infty]$ and $q_{max} = [\infty, 120, \infty, 120, \infty, 120, \infty]$ where ∞ refers to the fully-rotational joints. The inequalities in Eq. 4 and 5 lead to the following QP constraints:

$$\begin{cases} u_{min} = \max\{-\dot{q}_{max}, (q_{min} - q)/p\Delta T\} \\ u_{max} = \min\{\dot{q}_{max}, (q_{max} - q)/p\Delta T\} \end{cases} \quad (6)$$

Power safety: Average power consumption of Kinova® (45W [38]) respects ISO norms which defines 80W as the limit for cobots [42]. Furthermore, given the power at the end-effector as $\tau^T u$, we consider the following inequality constraint:

$$-P_{max} < \tau^T u < P_{max} \quad (7)$$

with $P_{max} = 4W$. This threshold is chosen experimentally by observing the value of $\tau^T u$ when the robot is operating satisfactorily. It is important to note that here we use the current torque measurement to estimate the power at the next time-step; i.e., assuming slow dynamic for interaction forces. In other words, the robot regulates its velocities based on the measured interaction forces. Moreover, we only limit the projected power at the end-effector and not for any other specific point on the robot body. Nevertheless, this is not a safety issue since there are other constraints at the joint-level.

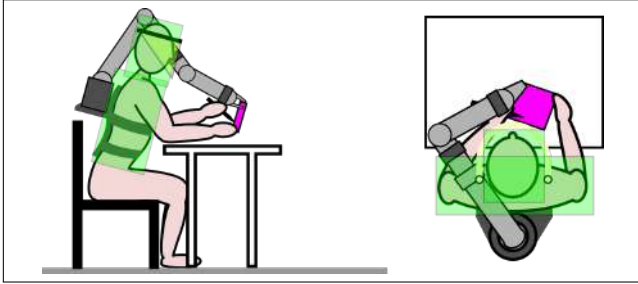


Fig. 3. View of the head and torso bounding boxes (in transparent green color) which are defined in the frame of the robotic arm base, i.e. the operator trunk.

Workspace safety: To avoid the collision between the wearable robot and its user, we model the human torso and head using bounding boxes as illustrated in Fig. 3. Here, we only consider collision avoidance with the user's head and torso. In other words we allow physical interaction of the robot with user's arms where its safety is handled via other parts of our mid-level controller. Using the QP constraints, we limit the robot' joints from entering these volumes. To this end, each bounding box is defined as a set of points $(X_{min}, X_{max}, Y_{min}, Y_{max}, Z_{min}, Z_{max})$ in the base frame. Here we assume that the user torso and head movement with respect to the base of the robot is negligible considering a

conservative choice for the size of the bounding boxes. We constraint the Cartesian velocity of each joint as follows:

$$\begin{cases} x_i + \dot{x}_i k \Delta t > x_i^+ & \text{if } x_i > x_i^+ \\ x_i + \dot{x}_i k \Delta t < x_i^- & \text{if } x_i < x_i^- \end{cases} \quad (8)$$

where x_i and $\dot{x}_i \in \mathbb{R}$ for $i = 1 \dots n$ are the position and velocity of the i th joint of the robot. The upper and lower boundaries x_i^+ and $x_i^- \in \mathbb{R}^3$ are computed by aggregating the two bounding boxes. These constraints can be written as

$$\begin{cases} J_i u > (x_i^+ - x_i)/(k\Delta t) & \text{if } x_i > x_i^+ \\ J_i u < (x_i^- - x_i)/(k\Delta t) & \text{if } x_i < x_i^- \end{cases} \quad (9)$$

where $J_i \in \mathbb{R}^{n \times 3}$ for $i = 1 \dots n$ are the the partial Jacobians. These constraints are then added to the QP solver as a part of the A matrix; 3 constraints per joints. Furthermore, to have a Conservative and damped behavior near the bounding boxes, we choose $k = 20$.

The inequalities in Eq. 7 and 9 lead to construction of the $A \in \mathbb{R}^{4n \times n}$ matrix and the corresponding boundaries for b_{min} and $b_{max} \in \mathbb{R}^{4n}$.

$$A = \begin{bmatrix} \tau^T \\ J_1 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix}, \quad b_{min} = \begin{bmatrix} -P_{min} \\ \Gamma(x_1^+ - x_1)/(k\Delta t) \\ \vdots \\ \Gamma(x_n^+ - x_n)/(k\Delta t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Where the switching function $\Gamma(x) = x$ for $x < 0$ and a large values otherwise in order to rend the constraint void. The computation for b_{max} is done similarly.

Collision safety: In order to provide a safe and versatile interaction with the environment, we handle the collisions at two level; namely "soft" and "hard" collisoins. Unlike the previous safety factors that were handled by the QP solver, the collision safety is handled by the admittance loop. Soft collision is concerned with interaction forces that we expect from a safe physical interaction with the environment and humans; e.g., the human pushes the robot or when the robot physically manipulates an object. For this purpose we use the following admittance feedback loop.

$$\dot{x}_a = \alpha J^\dagger \Phi(\tau - \tau_g, \tau_{soft}) \quad (11)$$

where Φ is deadzone function which is applied element-wise as follows:

$$\Phi_i(\tau, \tau') = \begin{cases} \tau_i - \tau'_i & \text{if } \tau'_i < \tau_i \\ 0 & \text{if } -\tau'_i < \tau_i < \tau'_i \\ \tau_i + \tau'_i & \text{if } \tau_i < -\tau'_i \end{cases} \quad (12)$$

where $\tau' \in \mathbb{R}^n$ is an arbitrary vector with positive values. In our case, we choose $\tau_{soft} = [8, 6, 6, 6, 4, 4, 2]Nm$ which acts as the threshold below which no collision is detected. Moreover, τ_g is estimated gravity effect and the measured torque on the i th joint respectively. J^\dagger is the pseudo-inverse of the Jacobian. Here, α is the admittance gain that controls

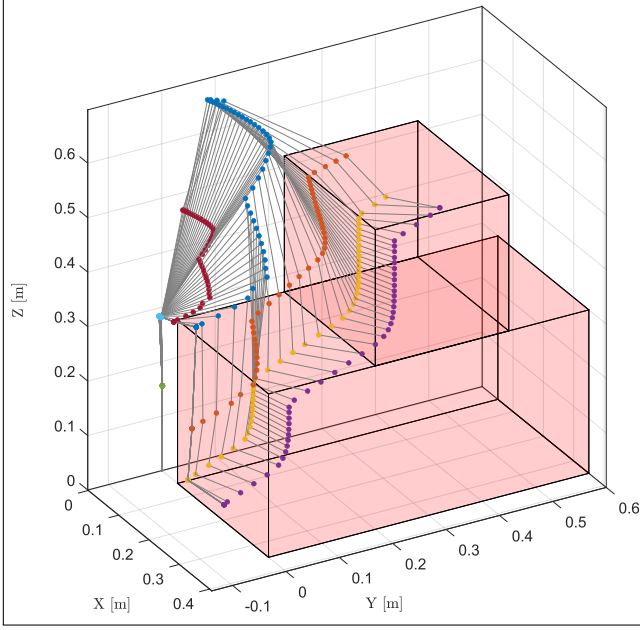


Fig. 4. The result of robot motion planning in avoiding the designated bounding boxes while following the desired end-effector velocities.

the behavior of the response (response time, stability and oscillations); i.e., higher/lower α leads to lower/higher damping behavior. Therefore, in case of a detection, this admittance rule moves the end-effector based on the interaction forces. This admittance loop also allows the user to indirectly control for the interaction forces through \dot{x}_t .

$$\begin{cases} F = K_v(\dot{x}_t + \dot{x}_a) \\ \dot{x} = \alpha F \end{cases} \quad (13)$$

This leads to

$$F = \frac{1}{1/K_v - \alpha} \dot{x}_t \quad (14)$$

where K_v is the forward gain imposed by the velocity controller. There, given high values for K_v , in interaction with environment, $-\dot{x}_t/\alpha$ can be applied to the environment. However, this relation is only valid in steady state while during the transient phases these forces can be much higher, depending on the inertia and velocity of the robot. Therefore, it is crucial to consider a "hard" collision mode.

Hard collision: this mode classifies the abnormal collisions which might harm the human (or the robot). Such collisions are recognised by a higher level of force/torque (compared to the soft one). The implemented strategy is to stop the task (ignoring the desired end-effector motion) and render the robot fully compliant. To detect hard collisions, at each time step, we check if any joint satisfies the following criterion:

$$|\tau - \tau_g| > \tau_{hard} \quad (15)$$

with $\tau_{hard} = [40, 40, 40, 40, 40, 40, 40] Nm$. Therefore, in case of a detection, we stop sending joint-velocity commands to the robot and switch the compliant mode implemented by

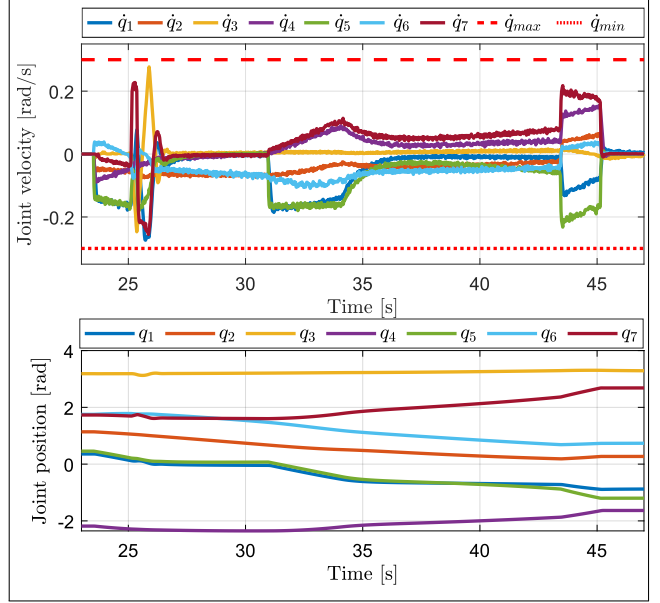


Fig. 5. The corresponding joints position and velocity where the robot follows the the desired end-effector velocities.

Kinova[®] on the robot. The robot stays in this mode until the user specifies otherwise manually.

III. RESULTS

To validate our control architecture, we present two experimental scenarios. In the first scenario, we test the robot motion-planning in its joint space. To do this, we send a constant velocity for the end-effector ($\dot{x}_t = [0, .05, .02]$) while we expect the robot to avoid the bounding boxes and joint position and velocity limits. These results are illustrated in Fig. 4 with its corresponding joint position and velocity in Fig. 5. Given our choice for the slack variable, the robot is allowed to slightly deviate from the the straight line in order to execute the task. Let us note that without the slack variable, the robot stalls when there is no solution for the QP problem. The size of the slack variable controls how much the robot's end-effector velocity can deviate from the desired one. This figure also shows that not only the end-effector but also all joints avoid penetrating into the bounding boxes. Such behavior allows the user to easily move the robot's end-effector around (via any arbitrary interface) without being worried about robot's configuration and collision. In other words, the user is not required to 1) control all the joint individually, or 2) send precise commands to the end-effector. Furthermore, Fig. 5 illustrate other safety constraints were respected as well; i.e., joint velocities remain in the safe zone, and joint position limits are respected.

In the second experiment, we test the robot behavior in terms of physical interaction with the environment. To this end, we put the robot's end-effector in physical contact with an external force sensor while we send different desired end-effector velocities to the robot. This result is depicted

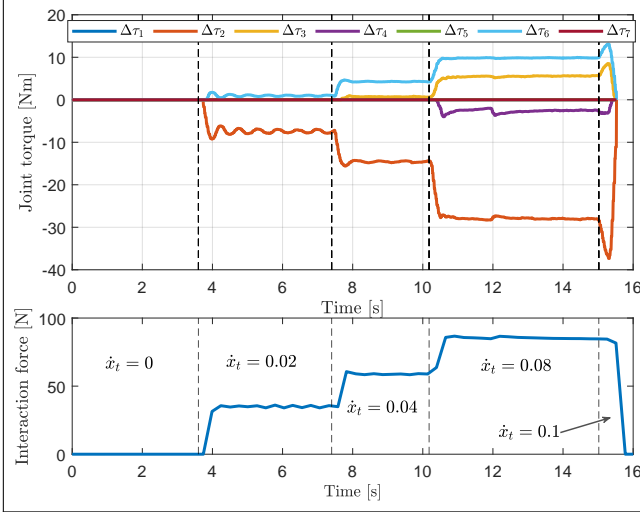


Fig. 6. The resulted behavior with respect to interaction forces. High interaction forces are recognized as hard collisions where the robot ignore the task and switches to a low-level admittance control.

in Fig.6 where we slowly increase the desired end-effector velocity (\dot{x}_t from 0 to 0.2m/s). This increase in the desired velocity leads to an increase in the interaction forces between the robot and the environment. After a certain threshold around $F = 90\text{N}$ which depends on τ_{hard} and robot's configuration) the robot detects a hard collision and switches to the low-level admittance control which ignores the desired task. Thus the interaction forces disappear and the robot become compliant which allows the user to move the robot freely.

In the third experiment, we test the effect of impacts; i.e., the robot follows a constant desired velocity and collides with a hard surface. These results are illustrated in Fig. 7 which shows that a similar safety behavior to the previous figure is obtained; i.e., colliding with higher interaction forces triggers the low-level admittance control. The other subplot shows the project power at the end-effector ($\tau^T \dot{q}$). We can see that before collision, this power remains inside the designated boundaries. The behavior of such power exchanges with the environment after the collision depends on the control mode. For the collisions with higher velocities ($\dot{x}_d = 0.15$ and 0.2), the low-level admittance control is triggered. We can see that this low-level controller is not constraining the power, however, providing a passive interaction with the environment. However, operating the robot using the QP is a safe range of velocities and interaction forces provide a satisfactory post-collision behavior.

IV. CONCLUSION

In this work, we presented a mid-level control strategy for a safe supernumerary robotic arm. We formulated our control as a constrained inverse kinematic problem which can be solved using Quadratic programming. We focused

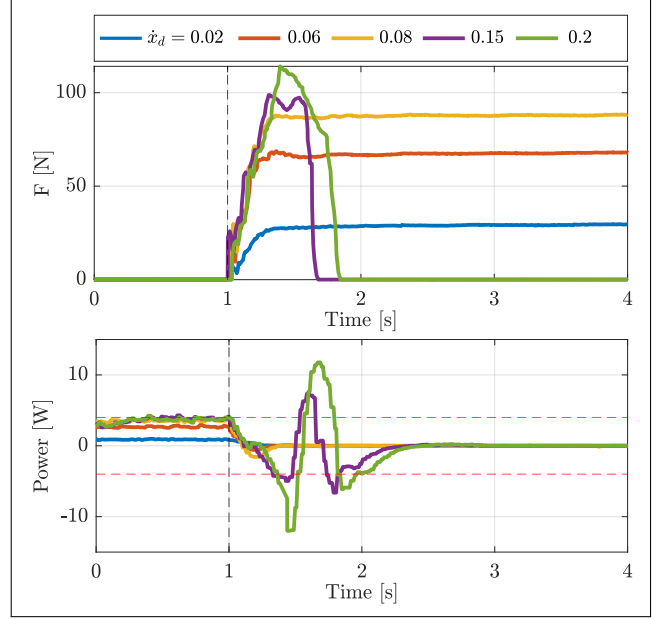


Fig. 7. The result of impacts when the robot collide with the environment at different speed. Higher velocities results in higher forces at the impact which is detected as hard collision and trigger the low-level admittance control. The plot of the power shows that this value remains in the boundaries before we switch to low-level admittance.

on two main safety consideration: workspace safety and interaction safety. These considerations were translated to inequality constraints for the QP problem; i.e., constraints on the commanded joint velocities. Upper/lower bounds of these constraints were extracted based on standardized safety norms. We experimentally validated our approach in a controlled laboratory environment. Our results show that such QP problem can be effectively solved which leads to a safe robotic behavior.

As a preliminary work, we only focused on the main formulation and validation of the constrained inverse kinematics for SRLs. However, there are several limitations and possible research lines for future work. For instance, in this work, we did not track the human body parts; we only assumed conservative bounding boxes for the head and the torso while ignoring the arms. Tracking body parts can lead to less conservative (yet safer) behaviors. Furthermore, such information can be used to recognize human activity and provide higher level of assistance. Our goal in this work was to avoid relying on richer signals and exploit robot's measurements; since adding an extra equipment brings its reliability issues as well. Above all, as designers, we need to find a trade-off between safety and versatility. For example, in our case, we allow the QP solver to collide the robot with environment. However, in case of a hard collision, we switch the controller to a low-level admittance mode. Such approaches seems intuitive, however, needs extensive analysis and validation in terms of risk management. In this work, we only tested our final system in an controlled environment and more test is needed with naive user in

ecological environment. This is challenging task since there is no standard testing scenario and conventional metrics especially for safety of SRLs. It is also important to obtain the subjective evaluation of the users since the ultimate goal is to design useful and safe robots.

To validate our approach we used a cobot which often used as a fixed-based robot. In other words, this robot is not designed to be worn and used as supernumerary arm; i.e., given its high weight (8.3kg), large volume, off-board controller, lack of serial elasticity, lack of low-level torque or impedance control, etc. Nevertheless, our control framework is independent of the robot choice which can be applied to any robotic manipulator with any certain level of sensing and actuation. In other words, the choice of the robot (and its mechanical design) only impacts the final robotic behavior, and the resulting safety due to QP formulation remains intact. For instance, using a impedance control would lead to a more effective physical interaction with environment compared to the admittance control [43]. Moreover, using series elasticity [17] would be reasonable approach where we can slightly sacrifice our tracking precision for a higher level of safety and a seamless physical interaction. We designed our robotic setup as a part of the European project NIMA [44]. In our future work, we will investigate the performance of our mid-level controller in conjunction with “brain-robot interfaces” [8] as the high-level controller to perform manipulation tasks .

REFERENCES

- [1] D. Gopinath and G. Weinberg, “A generative physical model approach for enhancing the stroke palette for robotic drummers,” *Robotics and autonomous systems*, vol. 86, pp. 207–215, 2016.
- [2] I. Hussain, G. Salvietti, L. Meli, C. Pacchierotti, D. Cioncoloni, S. Rossi, and D. Prattichizzo, “Using the robotic sixth finger and vibrotactile feedback for grasp compensation in chronic stroke patients,” in *2015 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*. IEEE, 2015, pp. 67–72.
- [3] W. Wang, Y. Liu, Z. Li, Z. Wang, F. He, D. Ming, and D. Yang, “Building multi-modal sensory feedback pathways for srl with the aim of sensory enhancement via bci,” in *2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (Robio)*. IEEE, 2019, pp. 2439–2444.
- [4] F. Parietti and H. H. Asada, “Supernumerary robotic limbs for aircraft fuselage assembly: body stabilization and guidance by bracing,” in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2014, pp. 1176–1183.
- [5] F. Parietti, K. C. Chan, B. Hunter, and H. H. Asada, “Design and control of supernumerary robotic limbs for balance augmentation,” in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2015, pp. 5010–5017.
- [6] I. Hussain, G. Salvietti, G. Spagnoletti, M. Malvezzi, D. Cioncoloni, S. Rossi, and D. Prattichizzo, “A soft supernumerary robotic finger and mobile arm support for grasping compensation and hemiparetic upper limb rehabilitation,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 93, pp. 1–12, 2017.
- [7] H. Xie, K. Mitsuhashi, and T. Torii, “Augmenting human with a tail,” in *Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019*, 2019, pp. 1–7.
- [8] J. Eden, M. Bräcklein, J. Ibáñez, D. Y. Barsakcioglu, G. Di Pino, D. Farina, E. Burdet, and C. Mehring, “Principles of human movement augmentation and the challenges in making it a reality,” *Nature Communications*, vol. 13, no. 1, pp. 1–13, 2022.
- [9] L. Masia, I. Hussain, M. Xiloyannis, C. Pacchierotti, L. Cappello, M. Malvezzi, G. Spagnoletti, C. Antuvan, D. Khanh, M. Pozzi *et al.*, “Soft wearable assistive robotics: exosuits and supernumerary limbs,” 2018.
- [10] E. Abdi, E. Burdet, M. Bouri, and H. Bleuler, “Control of a supernumerary robotic hand by foot: An experimental study in virtual reality,” *PLoS one*, vol. 10, no. 7, p. e0134501, 2015.
- [11] D. Prattichizzo, M. Pozzi, T. L. Baldi, M. Malvezzi, I. Hussain, S. Rossi, and G. Salvietti, “Human augmentation by wearable supernumerary robotic limbs: review and perspectives,” *Progress in Biomedical Engineering*, vol. 3, no. 4, p. 042005, 2021.
- [12] L. L. Z. Bright, “Supernumerary robotic limbs for human augmentation in overhead assembly tasks,” Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2017.
- [13] C. Walsh, “Human-in-the-loop development of soft wearable robots,” *Nature Reviews Materials*, vol. 3, no. 6, pp. 78–80, 2018.
- [14] P. H. Nguyen, I. I. Mohd, C. Sparks, F. L. Arellano, W. Zhang, and P. Polygerinos, “Fabric soft poly-limbs for physical assistance of daily living tasks,” in *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2019, pp. 8429–8435.
- [15] C. Véronneau, J. Denis, L.-P. Lebel, M. Denninger, V. Blanchard, A. Girard, and J.-S. Plante, “Multifunctional remotely actuated 3-dof supernumerary robotic arm based on magnetorheological clutches and hydrostatic transmission lines,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 2546–2553, 2020.
- [16] C. Semini, J. Goldsmith, D. Manfredi, F. Calignano, E. P. Ambrosio, J. Pakkanen, and D. G. Caldwell, “Additive manufacturing for agile legged robots with hydraulic actuation,” in *2015 International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*. IEEE, 2015, pp. 123–129.
- [17] C. Davenport, F. Parietti, and H. H. Asada, “Design and biomechanical analysis of supernumerary robotic limbs,” in *Dynamic Systems and Control Conference*, vol. 45295. American Society of Mechanical Engineers, 2012, pp. 787–793.
- [18] D. A. Kurek and H. H. Asada, “The mantisbot: Design and impedance control of supernumerary robotic limbs for near-ground work,” in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2017, pp. 5942–5947.
- [19] B. Yang, J. Huang, X. Chen, C. Xiong, and Y. Hasegawa, “Supernumerary robotic limbs: A review and future outlook,” *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 2021.
- [20] C. Penalzoza, D. Hernandez-Carmona, and S. Nishio, “Towards intelligent brain-controlled body augmentation robotic limbs,” in *2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. IEEE, 2018, pp. 1011–1015.
- [21] V. Vatsal and G. Hoffman, “Design and analysis of a wearable robotic forearm,” in *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2018, pp. 5489–5496.
- [22] T. Sasaki, M. Y. Sarajji, C. L. Fernando, K. Minamizawa, and M. Inami, “Metalimbs: multiple arms interaction metamorphism,” in *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*, 2017, pp. 1–2.
- [23] A. Kojima, H. Yamazoe, M. G. Chung, and J.-H. Lee, “Control of wearable robot arm with hybrid actuation system,” in *2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. IEEE, 2017, pp. 1022–1027.
- [24] M. Y. Sarajji, T. Sasaki, K. Kunze, K. Minamizawa, and M. Inami, “Metaarms: Body remapping using feet-controlled artificial arms,” in *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2018, pp. 65–74.
- [25] J. Guggenheim, R. Hoffman, H. Song, and H. H. Asada, “Leveraging the human operator in the design and control of supernumerary robotic limbs,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 2177–2184, 2020.
- [26] B. L. Bonilla and H. H. Asada, “A robot on the shoulder: Coordinated human-wearable robot control using coloured petri nets and partial least squares predictions,” in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2014, pp. 119–125.
- [27] F. Y. Wu and H. H. Asada, “Implicit and intuitive grasp posture control for wearable robotic fingers: a data-driven method using partial least squares,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 32, no. 1, pp. 176–186, 2016.
- [28] R. Khodambashi, G. Weinberg, W. Singhose, S. Rishmawi, V. Murali, and E. Kim, “User oriented assessment of vibration suppression by command shaping in a supernumerary wearable robotic arm,” in *2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*. IEEE, 2016, pp. 1067–1072.

- [29] C. Véronneau, J. Denis, L.-P. Lebel, M. Denninger, J.-S. Plante, and A. Girard, "A lightweight force-controllable wearable arm based on magnetorheological-hydrostatic actuators," in *2019 international conference on robotics and automation (ICRA)*. IEEE, 2019, pp. 4018–4024.
- [30] F. Parietti and H. Asada, "Supernumerary robotic limbs for human body support," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 32, no. 2, pp. 301–311, 2016.
- [31] Y. Wang, N. Dehio, A. Tanguy, and A. Kheddar, "Impact-aware task-space quadratic-programming control," *arXiv preprint arXiv:2006.01987*, 2020.
- [32] Z. Wang, G. Li, H. Jiang, Q. Chen, and H. Zhang, "Collision-free navigation of autonomous vehicles using convex quadratic programming-based model predictive control," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 23, no. 3, pp. 1103–1113, 2018.
- [33] S. Feng, E. Whitman, X. Xinjilefu, and C. G. Atkeson, "Optimization based full body control for the atlas robot," in *2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. IEEE, 2014, pp. 120–127.
- [34] A. Escande, N. Mansard, and P.-B. Wieber, "Fast resolution of hierarchized inverse kinematics with inequality constraints," in *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2010, pp. 3733–3738.
- [35] V. Duchaine and C. Gosselin, "Safe, stable and intuitive control for physical human-robot interaction," in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2009, pp. 3383–3388.
- [36] A. Q. Keemink, H. van der Kooij, and A. H. Stienen, "Admittance control for physical human–robot interaction," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 37, no. 11, pp. 1421–1444, 2018.
- [37] A. S. Ciullo, M. G. Catalano, A. Bicchi, and A. Ajoudani, "A supernumerary soft robotic hand-arm system for improving worker ergonomics," in *International Symposium on Wearable Robotics*. Springer, 2018, pp. 520–524.
- [38] Kinova. User guide: Kinova gen 3. [Online]. Available: <https://www.kinovarobotics.com/product/gen3-robots>
- [39] Stanford Artificial Intelligence Laboratory et al., "Robotic operating system." [Online]. Available: <https://www.ros.org>
- [40] W. Suleiman, "On inverse kinematics with inequality constraints: new insights into minimum jerk trajectory generation," *Advanced Robotics*, vol. 30, no. 17-18, pp. 1164–1172, 2016.
- [41] H. J. Ferreau, C. Kirches, A. Potschka, H. G. Bock, and M. Diehl, "qpOASES: A parametric active-set algorithm for quadratic programming," *Mathematical Programming Computation*, vol. 6, no. 4, pp. 327–363, 2014.
- [42] "ISO 10218-1&2:2011, Safety requirements for industrial robots," International Organization for Standardization, Standard, 2011.
- [43] C. Ott, R. Mukherjee, and Y. Nakamura, "Unified impedance and admittance control," in *2010 IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE, 2010, pp. 554–561.
- [44] EU. Nima project. [Online]. Available: <https://nima-project.eu/>

Teleoperation of a robotic manipulator in peri-personal space: a virtual wand approach

Alexis Poignant¹, Guillaume Morel¹, Nathanaël Jarrassé^{1,2}

Abstract—The paper deals with the well-known problem of teleoperating a robotic arm along six degrees of freedom. The prevailing and most effective approach to this problem involves a direct position-to-position mapping, imposing robotic end-effector movements that mirrors those of the user, Fig. 1-top. In the particular case where the robot stands near the operator, there are alternatives to this approach. Drawing inspiration from head pointers utilized in the 1980s, originally designed to enable drawing with limited head motions for tetraplegic individuals, we propose a "virtual wand" mapping. It employs a virtual rigid linkage between the hand and the robot's end-effector, Fig. 1-bottom. With this approach, rotations produce amplified translations through a lever arm, creating a "rotation-to-position" coupling. This approach expands the translation workspace at the expense of a reduced rotation space.

We compare the virtual wand approach to the one-to-one position mapping through the realization of 6-DoF reaching tasks. Results indicate that the two different mappings perform comparably well, are equally well-received by users, and exhibit similar motor control behaviors. Nevertheless, the virtual wand mapping is anticipated to outperform in tasks characterized by large translations and minimal effector rotations, whereas direct mapping is expected to demonstrate advantages in large rotations with minimal translations. These results pave the way for new interactions and interfaces, particularly in disability assistance utilizing head movements (instead of hands). Leveraging body parts with substantial rotations could enable the accomplishment of tasks previously deemed infeasible with standard direct coupling interfaces.

Index Terms—Telerobotics and Teleoperation

I. INTRODUCTION

Over the past decade, the democratisation of 6 and 7 Degrees of Freedom (DoF) robotic manipulators has significantly increased their use in collaborative industrial and assistive applications [1]. Despite these developments, controlling 6 DoF displacements (3 translations and 3 rotations) remains a challenge due to the need of 6-DoF interfaces, especially for position-position control. This paper concentrates on addressing the control issues associated with such robots in close proximity. This specific operational scenario is commonly encountered in enclosed-robot environments and for tasks requiring assistive functionality. For example, assisting individuals with restricted hand mobility [2] [3] [4], or industrial operators with occupied hands, such as in 3-hands soldering of large parts [5]. It can also be found in environments with nuclear or chemical hazards, which may require manipulation through a glove-box [6].

In such scenario, the operational distance being short, it allows for direct visual feedback from the robot, as opposed



Fig. 1: A comparison of the one-to-one direct mapping (top) and wand (bottom) between a start (lighter) and an end (darker) configuration. In the wand mapping, rotations of the hand produces amplified translations coupled with rotations of the end-effector, while one-to-one direct mapping decouples translations and rotations of the end-effector.

to relying solely on a screen. This not only provides a clearer view of the environment but also diminishes the reliance on artificial haptic feedback and reduces the delay between the robot's actions and the user's responses. It also increases the potential feelings of embodiment of the robot for the user, as the proximity of the robot increases visual but also sound or proprioceptive-based feedback.

Existing literature emphasizes that, in such scenarios, position-to-position control tends to yield superior performance and user preference over position-to-velocity control [7], [8] such as joysticks. However, implementing a position-position control is challenging for two primary reasons.

¹Sorbonne Université, CNRS, INSERM, Institute for Intelligent Systems and Robotics (ISIR), Paris, France.

²Email: jarrassé@isir.upmc.fr

First, there is a deficiency of position-to-position interfaces, which are often large [9], and second, the direct one-to-one mapping of a user’s body part to the robotic end-effector is restricted by the user’s range of motion. For instance, if the robot’s end-effector displaces by one meter, the user’s corresponding body part would also have to move one meter, limiting practicality. Conversely, direct mapping proves highly effective for rotational displacements around a fixed point. To overcome the translational limitations in the task space, position-control interfaces often incorporate clutching mechanisms [10] (such as on Intuitive Surgical Da Vinci Robot [11]). This allows users to temporarily disengage from the robot, return to their initial position, and then re-engage with the manipulator. Alternatively, scaling can be employed [10], but this approach usually sacrifices precision and noise-sensitivity. However, addressing these challenges remains needed to enhance the usability and effectiveness of position controlled 6 DoF robotic manipulators.

In this paper, we propose an alternative mapping approach, specifically employing a lever, or a fixed-length “wand”, to transform body rotations into amplified translations, and body translations into diminished rotations. In this mapping, the user is equipped with a rigid wand, and the virtual tip of the latter serves as an indicator for the desired position and orientation of the robotic manipulator. This mapping offers the advantage of expanding the translation workspace through the leverage provided by the lever and the rotations of the body. However, it comes at the cost of reducing the rotational workspace, necessitating the rotation of the user’s hand around the robot’s end-effector, and therefore large translations proportional to the wand’s length.

By converting human rotational motions into translations, this mapping strategy also enables users to leverage body parts with limited translational range but significant rotational capability, such as the trunk or the head. The use of head-based wands was previously explored in the eighties and nineties, particularly with tetraplegic patients possessing residual head mobility [12][13], employing head-based wands to draw or operate a keyboard. Wands are also known to be able to integrate into the body schema [14], making them intuitive. Nevertheless, traditional rigid wands have inherent limitations, including constraints on weight and size, as well as a lack of motorization and easy reconfiguration.

To overcome these limitations, we propose the use of a virtual wand instead of a physical one. A virtual wand eliminates these physical constraints, and offers more flexibility. However, as the robot motions are often slower than the human operator’s motions, the robot effector might be delayed compared to the virtual lever’s effector. Users can interact with the virtual wand without seeing it directly, but, in order to visualize the delay, they can opt to use an Augmented Reality (AR) headset to observe the virtual wand in real time. While the latter may introduce some visual discomfort due to the holograms, it provides an effective means to mitigate the impact of delays (which are usually undesirable for teleoperation [8]), and should ease the integration of the tool into the body schema, enhancing

the overall user experience. The use of Augmented Reality for distant teleoperation was previously explored in a one-to-one direct mapping scenario [15], but was limited to 2 DoF and not compared to other methods or control without AR visual-based feedback.

Our proposed Wand Mapping aims to provide an amplified position mapping that does not require any customization (unlike scaling) and is solely based on geometric relations, like one-to-one Direct position-to-position mapping. As it amplifies the operator’s rotation into translation, we may call it “rotation-to-position” mapping.

Our goal is not to replace the traditional one-to-one position-to-position mapping, but to propose an alternative that naturally amplifies body rotations, and therefore could be use through head or trunk motions, and therefore in the previously described scenarios, unlike position-to-position. In the following experimental results, we decided to use the operator’s hand to control the robot, as it is the only body part that can naturally use both mappings with ease, and thus provide an equal comparison, but applied scenarios would a priori include assistance tasks, using the head or torso, and users with limited mobility.

In the following sections, we first describe the implementation of the system and 6 DoF mappings, and we then evaluate the performances, preferences and impacts on motor control of the Wand Mapping compared to the traditional and well-known one-to-one Direct Mapping.

II. MATERIAL AND METHODS

A. Experimental set-up

The set-up is presented in Fig. 2. The virtual device base frame \mathcal{F}_{E_H} is materialized by an optical marker attached to the tool manipulated by the user’s hand, either a wand or a cube. The marker is tracked in real time by an Optitrack motion capture system w.r.t. its fixed frame \mathcal{F}_O . The experiment also involves a Hololens 2 Augmented Reality (AR) headset that is self-localized in real-time w.r.t. a fixed $\mathcal{F}_{W_{AR}}$, and a 7 DOFs ©Kinova GEN3 Ultra Light Weight robot with fixed base frame \mathcal{F}_{B_R} .

Prior to the experiment, a procedure allows for registering \mathcal{F}_O , $\mathcal{F}_{W_{AR}}$ and \mathcal{F}_{B_R} , all with respect to a fixed world frame \mathcal{F}_W (chosen arbitrarily). This allows to express in the same frame \mathcal{F}_W the optical measurements, the location of the pointer tip to be displayed in the AR headset, and the robot position or velocity commands.

The AR headset is used to display the desired end-effector location to the participant (in dark blue as seen Fig. 2). This end-effector is a cube centered at the origin of frame $\mathcal{F}_{E_R^*}$. Namely, the desired pose for the robot writes:

$$\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{W \rightarrow E_R^*}(t) & \mathbf{x}_{W \rightarrow E_R^*}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

where $\mathbf{R}_{A \rightarrow B}$ and $\mathbf{x}_{A \rightarrow B}$ are the rotation matrix and the origin translation from \mathcal{F}_A to \mathcal{F}_B , respectively.

The robot end-effector location $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R}$ is servoed to $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t)$ using a resolved rate controller that imposes an end-effector velocity proportional to the error. The controller

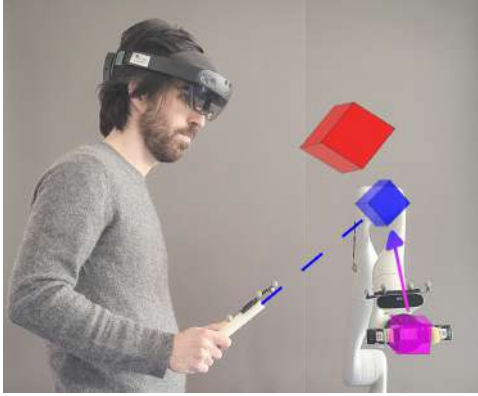


Fig. 2: A representation of the AR visualisation during Wand Mode : the desired end-effector position is shown in blue (and does not appear during the visual perturbation mode), the target is shown in red, and the current robot’s end effector is shown in magenta. The robot is servoed to follow the desired configuration (arrow, not shown in the AR headset). A similar representation is show in Direct mapping, without the handle of the hand and solely the desired blue end effector.

guarantees, due to its integral effect, a null permanent error. The convergence rate is tuned by a simple proportional gain k determining the closed-loop position control bandwidth. Its value is set to $k = 0.5 \text{ s}^{-1}$, heuristically determined to obtain the fastest behavior before exciting the internal joint position controller oscillations of the Kinova. The augmented reality (AR) headset additionally presents the actual position of the robot effector in a semi-transparent manner. This feature enables participants to visually estimate when the robot has attained the desired configuration.

An illustrative video detailing the system used with the head and torso can be seen at: <https://www.youtube.com/watch?v=EgwezT784Fws>.

B. Virtual Representation

The virtual environment features three objects: a light magenta cube representing the current configuration of the robot end-effector, a dark blue cube denoting the desired end-effector configuration (either corresponding to the tip of the wand or the teleoperated effector which directly maps the hand motions), and a red cube signifying a target location that the robot end-effector is expected to reach such as seen Fig.2.

C. Teleoperation control modes

1) *Direct Mapping*: The direct mapping consists of simply mapping the displacement of the hand between the initial start of the experiment t_0 and the current instant t to the desired robot effector:

$$\mathbf{T}_{E_R^*(t_0) \rightarrow E_R^*(t)} = \mathbf{T}_{E_H(t_0) \rightarrow E_H(t)} \quad (2)$$

If at the initial time both the hand and the robotic effector have a similar orientation, then the user has the illusion

that the desired effector copies its motions with a constant translation in-between. To reinforce the illusion, users are holding a real cube of the dimensions of the virtual one.

2) *Wand Mapping*: The wand mapping consists of giving the illusion that the user is holding a wand whose tip is the desired cubic end-effector of the robot. The mapping writes:

$$\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*(t)} = \mathbf{T}_{W \rightarrow E_H(t)} \mathbf{T}_{E_H(t) \rightarrow E_R^*(t)} \quad (3)$$

where $\mathbf{T}_{E_H(t) \rightarrow E_R^*(t)}$ is constant and equal to its initial configuration, which corresponds to the geometry of the virtual wand. To give the illusion of a real wand, participants are holding a stick that they point towards the robot end effector at t_0 .

3) *Integration of a visual perturbation*: In order to evaluate the integration of the tool and of the mapping, we also propose at specific times to delete the visualization of the desired blue effector in direct mapping, and of blue the wand in the wand mapping. Users still hold the real object (cube or stick) and still see the half-transparent current position of the robot (magenta). The behaviour of the robot is exactly the same, meaning that, if the user stop their motion, the robot end-effector’s will attain the invisible desired end-effector configuration. This mode is equivalent to introducing a delay in the command, which was visually resolved using the AR. It is used in the experimental section to study the integration of the mappings in the body schema.

D. Protocol

Prior to commencing the experimental session, participants were introduced to the Augmented Reality Environment. Instructions were provided regarding the mappings, encouraging participants to ”focus on the task” and telling them that they could ”move without any restrictions,” allowing walking if necessary, thereby granting maximum freedom to the participants. Each participant used both control modes. The experiment comprised 7 trials for each control mode. Half of the participants initiated the experiment using the Direct Mapping control mode, while the remaining half began with the Wand Mapping control mode.

For each operational mode, the 4th and 6th trials were executed without the blue visualization, whereas the remaining trials featured the complete augmented reality (AR) visualization. Subjects were given the liberty to rest for as long as they desired between trials. At the onset of each trial, the participants’ hands were consistently positioned at the same starting point, indicated in the AR headset. This starting point corresponded to a 45cm distance (and a 45cm wand in Wand Mode) between the desired effector and the center of the participant’s palm.

Each of the 7 trials comprised the task of reaching a total of 30 targets — 15 central points and 15 outer targets. Targets alternated between the central point and outer locations, creating 15 back-and-forth trajectories. For outer targets, a 15cm hand translation (determined using a Fibonacci distribution on a 3D sphere [16] in order to explore various directions) was required, as well as a rotation between 0° and 45° around a randomly uniformly chosen 3D-axis. The

order of the targets was consistent between trials, which participants were informed.

The targets were not the same in both modes, but required the same hand starting and end points, which allowed to have consistent and comparable performances and hand trajectories between the modes. Certainly, employing identical targets for both mappings would inherently bias one method over the other. The one-to-one mapping is inherently proficient for tasks involving substantial rotations without translation, while the wand mapping is more efficient to manage extensive circular translations. Selecting uniform targets would have introduced disparities in mapping efficiency, and optimal hand paths with varying lengths, leading to incomparable trajectories and task completion times. Hence, our emphasis was on ensuring uniform optimal hand motions between both mappings.

The set of targets also remained the same across trials, which participants were duly informed. Successful target reaching was acknowledged when the robot remained within the 2cm tolerance for at least 1 second, with a 10-degree tolerance in axis-angle representation relative to the target (represented by a large red cube, which turned green when the configuration of the robot was correct). Once achieved, the target disappeared, and the next one appeared. The chosen tolerances struck a balance between requiring precision from the participants and ensuring a rapidly feasible task. Given the potential challenges associated with depth perception and precise orientation in AR visualization, the chosen tolerances were designed to assess the intuitiveness of the mapping rather than focusing on participants' perception of AR objects.

The total completion time for each set of 7 trials in each mode ranged from 25 to 30 minutes. The overall duration of the experiment, encompassing instructions and rest sessions, fell between 1 hour and 1 hour and 15 minutes.

E. Questionnaires

Additionally, after the whole experimental session, participants were asked to fill questionnaires with six questions. From French to English they can be translated as:

- 1) To what extent has the task required a physical effort?
- 2) To what extent has the task required a cognitive effort?
- 3) How much did you feel in the control of the robotic arm?
- 4) How intuitive was it to control the robotic arm?
- 5) To what extent have you felt that the robot was an extension of yourself?
- 6) Which global score would you rate this experiment?

Participants answered with a score ranging from -3 (very little) to 3 (very much).

One questionnaire was filled for each control mode, with and without the visualization of the desired effector / of the wand, resulting in a total of 4 questionnaires. For the reading of the results in the next section it is worth remembering that a high rated answer for questions 1 and 2 corresponds to a negative characteristic of the system (high load), while,

for questions 3 to 6 it reflects a positive characteristic (intuitiveness, general satisfaction, etc.).

Questionnaires groups are compared using a paired Mann-Whitney Wilcoxon U-Test as data are non-normal according to the Shapiro-Wilks Test.

F. Participants

The experimental study was carried out in accordance with the recommendations of Sorbonne Université ethics committee CER-SU, which approved the protocol.

Twenty asymptomatic participants, aged 18-55, volunteered for this experimental study. They all gave their informed consent, in accordance with the Declaration of Helsinki.

III. RESULTS

The success rate was of 100% for all participants and all targets in both modes, with and without visualisation. Distributions presented in this section show the median, the 25th and 75th quartile, as well as 1.96 time the standard deviation in dotted line, which correspond to approximately the 95% confidence interval. Rotations are denoted using the scalar geodesic angle from the angle-axis representation.

A. Performances of the effector

1) *Task Performances:* We show on Fig.3 the distribution of task durations to complete one target, per trial, and per mode of mapping across all participants. The disappearance of the visualisation shows an increase over time in both modes. Otherwise, in all trials with visualisation, the median time per target remains relatively constant, as well as the quartiles.

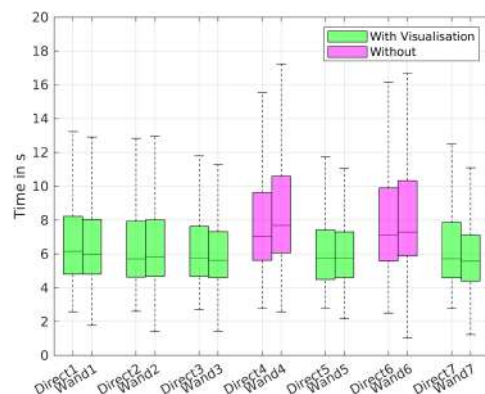


Fig. 3: Distribution of the duration per target in s. Green denotes a trial with visualization, and magenta without.

2) *Overshoot:* In order to evaluate the precision, we also show on Fig.4 the distribution of overshoots above the target tolerance as a percentage, both in translation and rotation. The first visualisation removal (4th trial) shows an increase of the overshoot, but this phenomenon is mitigated during the second trial without visualisation (6th trial). We also observe a strong overshoot during the 2nd trial for both modes.

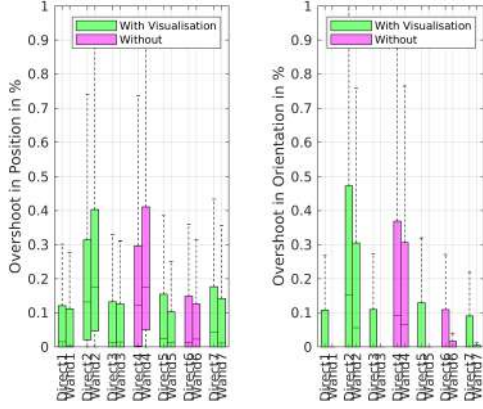


Fig. 4: Distribution of the overshoot of the desired virtual end-effector above the tolerance per target as a percentage, both in translation and in rotation. Green denotes a trial with visualization, and magenta without.

3) *End effector Motion:* We also present the desired effector (whether the tip of the virtual wand, or the projected hand motions) normalized motions as well as velocities Fig.5 and Fig.6 respectively during trials with Visualisation. Similar curves are observed without visualisation but exhibits higher standard deviations.

Though the median velocity curve only exhibits one single motion, the standard deviation of the velocity actually shows that the average filter mitigates the presence of a secondary motion to adjust the effector’s position. Therefore, we denote that the global motion consist of two sub-motions : a ballistic motions, which, based on the standard deviation of the velocity, accounts for 50% of the duration, and an adjusting motion accounting for the remaining 50%. This temporal distribution is consistent across both mappings. We also note that the ballistic motion accounts for 80 up to 95% of the total motion amplitude, while the adjust motion for the remaining 5 to 20%.

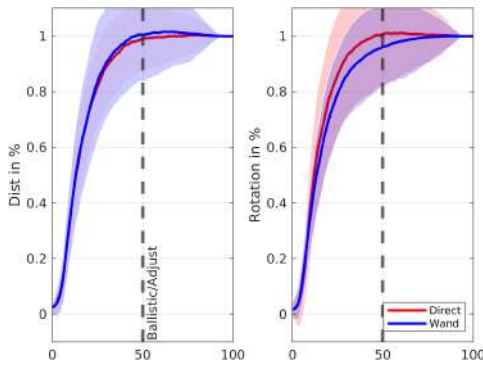


Fig. 5: Normalized Median of the Hand Motion in Translation and Rotation during trials with Visualisation. The lighter area denotes the standard deviation of the curve. The dotted line indicates the separation between the estimated ballistic and adjust phases.

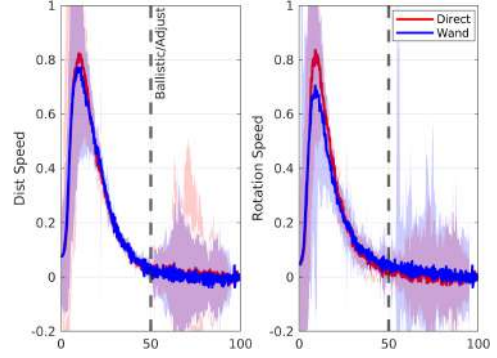


Fig. 6: Median of the Hand Velocity in Normalized Translation and Rotation Trajectories. The lighter area denotes the standard deviation of the curve during trials with Visualisation. The dotted line indicates the separation between the estimated ballistic and adjust phases.

4) *Duration of ballistic and adjust phase:* In order to try to evaluate the time of the ballistic motion and the time of the adjust motion, we also present the 80% response time of the end-effector in Fig.7. The value 80% was chosen as the lowest value of the standard deviation curve in position and rotation at the end of the ballistic motion Fig.6. The results are consistent with the overshoot results with more important times during the 2nd and 4th trial, indicating that the ballistic motion was less precise during these phases, which probably caused the overshoot.

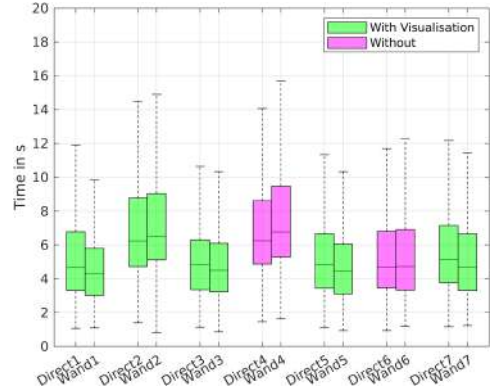


Fig. 7: Distribution of the response time of the effector at 80% per target in s.

B. Analysis of hand motions during ballistic phase

We also want to analyze is there are any motor control changes between the two mappings. Though the targets have been designed to that the optimal hand trajectory is the same, we can also compare the hand motions and velocities. As suggested by [17], we can analyze motor control invariant kinematic properties during the ballistic motion of the hand. This approach involves normalizing the ballistic motions in both time and amplitude as shown Fig.8. The plots show very similar temporal behaviours in both translation and orientation.

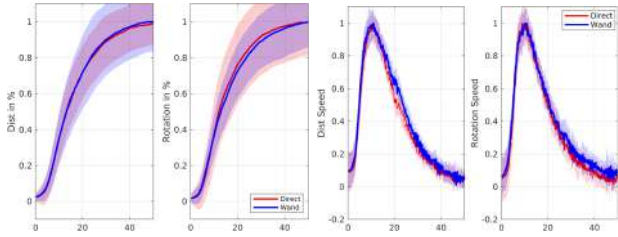


Fig. 8: Normalized Median Hand Trajectories during Ballistic Phase in Translation and Rotation (left) and the associated normalized velocities during Ballistic Phase (right).

We can also plot the motions curves in translation and orientation from Fig.8 as a function of one another in order to study the spatial coordination behaviour. According to [17], an invariant spatial coordination should be observed, with the rotation error plotted against the position error forming a linear pattern. As these plots are averaged on 20 participants, which might hide participant-specific differences, we also provide the same plot per participants Fig.9. Individual participant analysis revealed that 18 out of 20 participants exhibited very similar patterns between the two modes, with only 2 participants showing patterns above the $y=x$ line in Direct Mapping mode and below the $y=x$ in Wand Mapping mode.

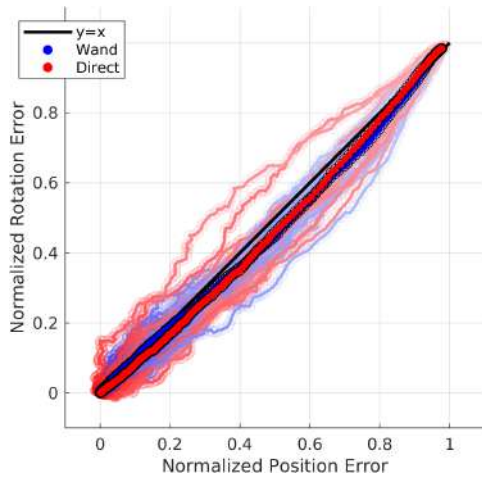


Fig. 9: Normalized Hand Spatial Coordination during Ballistic Phase per participants. The darker curves with black outlines indicates the average across all participants (the blue-wand one and the red-direct one are almost superimposed), while the lighter curves are per participant.

As a comparison, we provide the same spatial coordination plot expressed at the tip of the effector during ballistic motion. The curve in Direct mode remains identical, as the relative motions of the hand and of the effector are one-to-one mapped, but the curve in Wand Mode switches from below the $y=x$ curve for the hand, to above the $y=x$ axis for the effector, as, indeed, the wand mapping mostly transforms rotations into large translations and conversely large translations into rotations of the effector, inverting the coordination

pattern between the hand and the tip of the effector. This behavior is not only observed in the collective average but also in the individual behaviors of each participant.

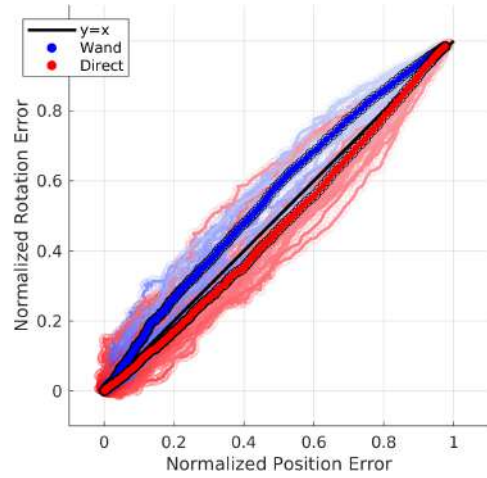


Fig. 10: Normalized Desired Effector Spatial Coordination during Ballistic Phase averaged across all participants (darker line with black outline) and per participant (lighter curves).

C. Preferences

Finally we provide the questionnaires' results on Fig.11. In order to establish significant statistical difference, the 2-by-2 p values comparison are also provided Fig.12. The removal of visual cues in Direct Mapping significantly increased cognitive load according to the results, but the questionnaire responses remained closely aligned across both mapping modes and were generally positive in all conditions with some non-significant preferences for the Wand Mapping.

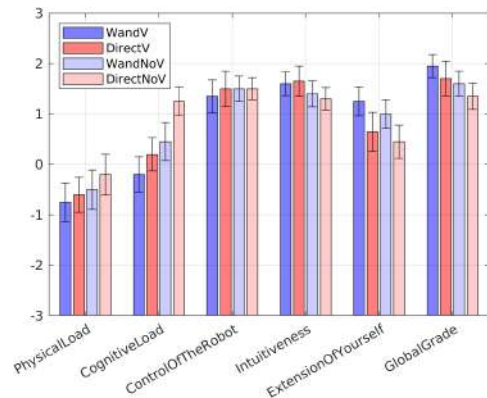


Fig. 11: Questionnaires responses. A high rated answer for questions 1 and 2 corresponds to a negative characteristic of the system while for questions 3 to 6 it reflects a positive characteristic.

IV. DISCUSSION

The performances between the two mapping modes were found to be nearly identical, with both the durations to complete the tasks and the overshoots exhibiting a strong

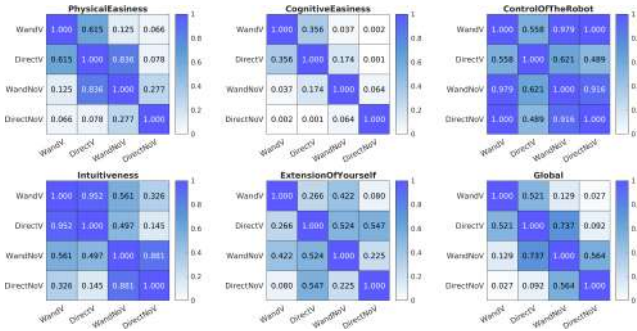


Fig. 12: 2-by-2 p-Values associated with each mode and each question.

similarity. Orientation overshoot was slightly higher in the Direct Mapping mode, though not exceeding 10%. This variance may be attributed to the fact that the pure orientation of the effector requires larger motions in Wand Mapping.

In the 2nd trial, there was an increase in overshoot without a corresponding increase in time. It's plausible that participants, informed that the targets remained the same, attempted to expedite their movements, inadvertently resulting in higher overshoot. Though, the operator being faster than the Kinova robot itself, it did not impact the overall task duration. Interestingly, this behavior was noted in both mappings. In the 3rd trial, participants in both mappings demonstrated a reduction in overshooting, suggesting an awareness that the overshoot strategy was sub-optimal, despite the delay in the real robot's response.

Upon introducing visual perturbations, both overshoot and completion time increased. In the second perturbed trial, overshoot significantly decreased, accompanied by a reduction of the 80% response time. This suggests that participants achieved a better integration of the mapping, leading to more accurate ballistic motions. However, the precision and the adjustment phase remained challenging without visualisation, indicating that further training may be necessary to enhance these aspects. Remarkably, performances without visualization were close to one another for both mappings, suggesting that both mappings were similarly integrated in the body schema.

The overall behavior of normalized effector motion was also notably similar between the two modes. However, one can see that in both mode the standard deviation of the speed curve reveals two distinct sub-motions: a ballistic motion accounting for 50% of the duration and an adjustment motion accounting for the remaining 50%. The ballistic motion, in turn, represented 80 to 95% of the overall effector motion in distance and rotation.

Then, to examine potential effects of mapping on motor control, an analysis of hand motions was conducted, focusing on ballistic phase. The median spatial coordination indicated a slight deviation below the $y=x$ curve, possibly attributable to the robot's delay which is slightly more pronounced in rotation due to the arm's geometry and reconfiguration challenges, but is overall close to being linear. Interestingly,

again, the median pattern remained highly similar between the two mapping modes while the effector task was different for the two modes. Notably, when comparing the same plot for the end-effector, a clear difference emerged, with the wand mapping consistently following a pattern above the $y=x$ line. This suggests that hand motions and motor control were not significantly affected by the mapping choice whereas the effector was exhibiting different trajectories and behaviours, which supports that constructing targets to elicit identical optimal hand motions for both modes was indeed observed.

In the context of questionnaires, no major differences were observed between Wand and Direct Mapping. This overall consistency in participant feedback supports the conclusion that the mapping did not significantly impact motor control, and participants generally perceived both modes positively for all the listed criteria.

Based on the comprehensive observations and analyses of performance metrics, participant preferences, and motor control dynamics conducted in this study, our findings suggest that the choice between Direct and Wand mapping in a general hand scenario — exploring various translations and orientations - does not appear to be of high significance, and both mapping modes demonstrated comparable outcomes.

However, our knowledge of the mapping prompt us to consider specific scenarios where the choice of mapping may indeed hold significance. In instances where the task necessitates translations with minimal rotations, Wand Mapping could prove advantageous. The leverage provided by the wand, particularly in scenarios involving large translations, may contribute to enhanced control and improved overall performance. Conversely, in situations requiring substantial rotational reconfigurations alongside minor translational displacements, Direct Mapping may be the preferred choice.

Moreover, the suitability of each mapping method might also depend on the specific body part employed for robot control. Wand Mapping, for instance, could offer advantages when using body parts with significant rotational capabilities, such as the head or trunk (as to be found in the case of assistance to paralyzed users), allowing for the scaling of rotations to achieve substantial robotic translations due to the leverage provided by the wand. this scaling not only converts rotations into translations but is exclusively grounded in the length of the link. Therefore, it relies on geometric considerations of the task, differing from traditional translation scaling that necessitates the adjustment of a gain. Oppositely, Direct Mapping holds an advantage to deal with important rotations without translating the effector, which is hardly possible with the Wand Mapping.

In essence, **the optimal choice between Direct and Wand Mapping should be contingent on the specific requirements of the task, the body part used for control, and the desired balance between rotational and translational movements.** These considerations underscore the importance of tailoring the mapping strategy to the specific characteristics and demands of the robotic manipulation scenario. Likewise, in certain scenarios, such as navigating a wheelchair, position control cannot serve as a substitute

for velocity control. Hence, we are contemplating the introduction of hybrid modes that would permit transitioning between Wand, Direct, or Velocity control. Moreover, these hybrid modes could incorporate the simultaneous utilization of multiple controls, such as employing a joystick to manage the length of the wand while employing head orientations to position the desired effector's position.

V. CONCLUSION

In this paper, we introduced an innovative control paradigm, termed "wand" mapping or "rotation-to-position" mapping, which utilizes a virtual linkage mapping for 6 DoF manipulation. The primary advantage of this approach lies in its ability to translate body rotations into substantial effector translations, albeit at the cost of a reduced rotational task space. A comparative analysis with the well-established one-to-one "direct" position mapping, in a general 6 DoF scenario with equivalent hand displacements, reveals comparable performance, user preferences, and motor control behaviors across both mappings.

The objective of this wand mapping is not to supplant the direct mapping method but rather to offer an alternative that may prove more suitable in specific scenarios. For example, the amplification could prove beneficial in scenarios involving body parts characterized by a wide rotational range and limited translation range, such as the head or trunk.

While the amplifying mode offers advantages, the suitability of this mapping depends on the nature of the task and, for applications demanding intricate orientations with fixed translations, an automatic handling approach, such as vision-based grasping, may be needed. A switch between direct and wand mapping could also prove advantageous if operators can seamlessly transition between the two modes.

REFERENCES

- [1] "World Robotics 2023, IFR presentation," 2023.
- [2] C.-S. Chung, H. Wang, and R. A. Cooper, "Functional assessment and performance evaluation for assistive robotic manipulators: Literature review," *The Journal of Spinal Cord Medicine*, vol. 36, no. 4, 2013.
- [3] R. K. Al-Halimi and M. Moussa, "Performing Complex Tasks by Users With Upper-extremity disabilities Using a 6-DOF Robotic Arm: A Study," *IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL SYSTEMS AND REHABILITATION ENGINEERING*, 2016.
- [4] M. Casadio, R. Ranganathan, and F. A. Mussa-Ivaldi, "The Body-Machine Interface: A New Perspective on an Old Theme," *Journal of Motor Behavior*, vol. 44, no. 6, pp. 419–433, Nov. 2012. [Online]. Available: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00222895.2012.700968>
- [5] F. Parietti and H. Asada, "Supernumerary Robotic Limbs for Aircraft Fuselage Assembly: Body Stabilization and Guidance by Bracing."
- [6] E. J. L. Pulgarin, O. Tokatli, G. Burroughes, and G. Herrmann, "Assessing tele-manipulation systems using task performance for glovebox operations," *Frontiers in Robotics and AI*.
- [7] R. C. Lincoln, "Visual tracking: III. The instrumental dimension of motion in relation to tracking accuracy," *Journal of Applied Psychology*, vol. 37, no. 6, pp. 489–493, Dec. 1953. [Online]. Available: <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/h0060608>
- [8] Won Kim, F. Tendick, S. Ellis, and L. Stark, "A comparison of position and rate control for telemanipulations with consideration of manipulator system dynamics," *IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 3, no. 5, pp. 426–436, Oct. 1987. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1087117/>
- [9] "Virtuose 6D RV - HAPTION SA." [Online]. Available: <https://www.haption.com/fr/products-fr/virtuose-6d-fr.html>
- [10] L. Dominjon, A. Lcuyer, J.-M. Burkhardt, and R. Simon, "A Comparison of Three Techniques to Interact in Large Virtual Environments Using Haptic Devices with Limited Workspace."
- [11] C. Freschi, V. Ferrari, F. Melfi, M. Ferrari, F. Mosca, and A. Cuschieri, "Technical review of the da Vinci surgical telemanipulator: Technical review of the da Vinci surgical telemanipulator," *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 9, no. 4, pp. 396–406, Dec. 2013. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rcs.1468>
- [12] K. H. Jewell, "A custom-made head pointer for children," *The American Journal of Occupational Therapy*, vol. 43, no. 7, pp. 456–460, 1989, publisher: The American Occupational Therapy Association, Inc.
- [13] E. Dymond and R. Potter, "Controlling assistive technology with head movements—a review," *Clinical rehabilitation*, vol. 10, no. 2, pp. 93–103, 1996, publisher: Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA.
- [14] A. Maravita and A. Iriki, "Tools for the body (schema)," *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 8, no. 2, pp. 79–86, Feb. 2004. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364661303003450>
- [15] C. Nuzzi, S. Ghidini, R. Pagani, S. Pasinetti, G. Coffetti, and G. Sansoni, "Hands-Free: a robot augmented reality teleoperation system," *International Conference on Ubiquitous Robots*, 2020.
- [16] . Gonzalez, "Measurement of areas on a sphere using Fibonacci and latitude-longitude lattices," *Mathematical Geosciences*, vol. 42, no. 1, pp. 49–64, Jan. 2010, arXiv:0912.4540 [math]. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/0912.4540>
- [17] E. B. Torres and D. Zipser, "Simultaneous control of hand displacements and rotations in orientation-matching experiments," *Journal of Applied Physiology*, vol. 96, no. 5, pp. 1978–1987, May 2004. [Online]. Available: <https://www.physiology.org/doi/10.1152/jappphysiol.00872.2003>

Hands-free teleoperation of a nearby manipulator through a virtual body-to-robot link

Alexis Poignant¹, Nathanaël Jarrassé^{1,2}, Guillaume Morel¹

Abstract—This paper introduces an innovative control approach for teleoperating a robot in close proximity to a human operator, which could be useful to control robots embedded on wheelchairs. The method entails establishing a virtual connection between a specific body part and the robot’s end-effector, visually displayed through an Augmented Reality (AR) headset. This linkage enables the transformation of body rotations into amplified effector translations, extending the robot’s workspace beyond the capabilities of direct one-to-one mapping. Moreover, the linkage can be reconfigured using a joystick, resulting in a hybrid position/velocity control mode using the body/joystick motions respectively.

After providing a comprehensive overview of the control methodology, we present the results of an experimental campaign designed to elucidate the advantages and drawbacks of our approach compared to the conventional joystick-based teleoperation method. The body-link control demonstrates slightly faster task completion and is naturally preferred over joystick velocity control, albeit being more physically demanding for tasks with a large range. The hybrid mode, where participants could simultaneously utilize both modes, emerges as a compromise, combining the intuitiveness of the body mode with the extensive task range of the velocity mode. Finally, we provide preliminary observations on potential assistive applications using head motions, especially for operators with limited range of motion in their bodies.

Index Terms—Physically Assistive Devices, Telerobotics and Teleoperation

I. INTRODUCTION

Body-machine interfaces are devices linked to the body in order to extend or replace body functions [1]. They include assistive manipulators [2], and generic physical input devices such as mice, keyboard or computer screens. In the domain of assistance to the disabled, *e.g.* individuals with spinal cord injury exhibiting residual mobility of upper-body parts [1], some devices are controlled through upper-body motions, like head [3] or shoulders [4].

The most common control mode used for these devices is position-to-velocity, where a displacement of a user’s body part from a neutral point generates a velocity of the device. Position-to-velocity controllers are particularly efficient for wide-range tasks and delayed interfaces [5] which make them adapted for wheelchair control for example. However, such velocity control usually require highly customized interfaces [6] and training.

For manipulation tasks, as long the spatial range is limited, with no significant delay [5] nor large input noise [7], position-to-position control, which directly maps operator’s

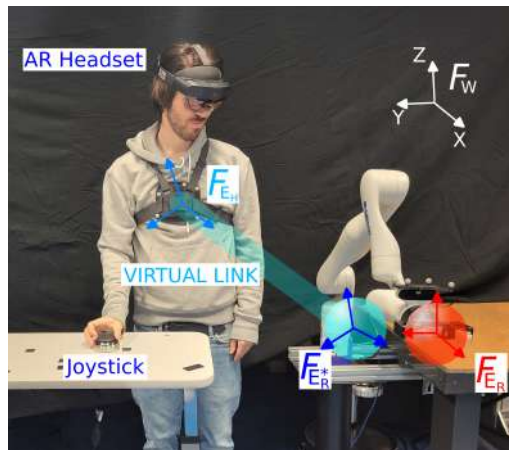


Fig. 1. Representation of the set-up used during the experiments: the virtual end-effector \mathcal{F}_{E_R} (light blue sphere) is linked (light blue segment) to the user’s thorax \mathcal{F}_{E_H} , whose movements are captured using Optitrack markers. This link is displayed using a virtual reality headset and can be reconfigured using a 3D joystick manipulated by the user’s dominant hand. A robot, set nearby, with end-effector \mathcal{F}_{E_R} (red sphere) is then servoed to follow the desired end-effector position. The link and spheres on the image are representations of what is seen through the AR headset. A frame \mathcal{F}_\bullet is referenced by its three axes X , Y and Z .

motions into robotic motions, is therefore often assessed as more intuitive. This approach enables better performances in terms of time [8], accuracy [9] and user-assessed preferences [10] while requiring no operator’s specific tuning as it solely relies on geometric relations. Examples include surgical telemanipulators [11] or nuclear or chemical closed spaces [12], where the environment and the spatial configuration are well controlled. In this master-slave scenario, the mapping between the user’s and the robot’s displacements is made efficient through a careful alignment between user hands and robot end-effector frames.

This direct position mapping therefore eases the robot control, but only applies across a small task space and while the operator stays still at a fixed control cabin. This direct mapping is therefore not transposable to assistive manipulators without using amplifying mechanisms like clutching or scaling [13] which degrade intuitiveness or precision.

When the robot and the operator are close from each other, another possible position-to-position control approach consists in creating a link between a human body’s part and the end-effector. Examples include head-pointers, *e.g.* mechanical [14][15] or optical (laser pointers for computer screens, [16]). Those are used to convey desired 3D or 2D positions through head movements and could be used to input

¹Sorbonne Université, CNRS, INSERM, Institute for Intelligent Systems and Robotics (ISIR), Paris, France.

²Email: jarrassé@isir.upmc.fr

desired positions of a robotic effector. This pointer-mapping, or rotation-to-position mapping, allows to transform body rotations into large effector translations using the leverage of the link. Unlike direct mapping, it scales the operator’s motions, without requiring any tuning like traditional scaling or velocity control interfaces as shown in [15]. Finally, it is also ”hands-free” and can, unlike joystick, utilize dexterity of the head or the thorax while the hand might present little to no mobility, especially in rehabilitation scenarios.

For such a mechanical pointer connected to a human body part, the desired robot end-effector location given by the pointer, with respect to the world frame, $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}$, can be computed as:

$$\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t) = \mathbf{T}_{W \rightarrow E_H}(t) \mathbf{T}_{E_H \rightarrow E_R^*}, \quad (1)$$

where $\mathbf{T}_{A \rightarrow B}$ is the homogeneous transform from frame \mathcal{F}_A to frame \mathcal{F}_B , \mathcal{F}_{E_H} a frame linked to the human body effector, where the pointer base is attached, $\mathcal{F}_{E_R^*}$ is the desired frame location for the robotic end-effector and \mathcal{F}_W the world fixed frame. In this equation, $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_H}(t)$ shall be measured to record the human motions while $\mathbf{T}_{E_H \rightarrow E_R^*}$ is constant and reflects the shape of the pointer. Finally, the real robot with effector \mathcal{F}_{E_R} and base fixed with respect to \mathcal{F}_W , is servoed to follow $\mathcal{F}_{E_R^*}$, with unavoidable delays in the position tracking process.

Using rigid physical pointers (and thus constant $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}$) limits the attainable task space for the user. In this paper, we propose to implement a virtual pointer whose geometry can be changed using an external control, namely a joystick. With this system, referring to Eq. (1), the user can control the desired robot position E_R^* using whether its own body motions $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_H}(t)$ or by reshaping on-line the pointer, making $\mathbf{T}_{E_H \rightarrow E_R^*}(t)$ time varying. In order for the user to benefit from a visual feedback of the virtual pointer end-effector’s location, $\mathcal{F}_{E_R^*}$, we add in the setup an augmented reality headset that displays the current virtual link shape. The visualization allows to easily deal with the inherent delay of the cobot, which is slower than the operator, especially due to the lever effect.

In the following sections, we first detail the control algorithms and then report experimental results aimed at determining how humans subjects try to achieve positioning tasks with such a system, when they are asked to use one of the two control inputs, or both simultaneously.

II. DIFFERENT MODES AND METHODOLOGY

A. Experimental set-up

The set-up is presented in Fig. 1. The virtual device base frame \mathcal{F}_{E_H} is materialized by an optical marker attached to the user’s thorax. The marker is localized in real time by an Optitrack motion capture system w.r.t. its fixed frame \mathcal{F}_O . In this paper, the thorax was chosen as a body part that presents limited translation motions, making it therefore unsuitable for direct position-to-position mapping, while having little influence on the perception of the task (unlike the head) or the hand motions, allowing an industrial scenario where

the thorax controls a proximal robot, while the hands are performing another task.

An illustrative video detailing the system shows other choices for the location of the marker \mathcal{F}_{E_H} (head, elbow), is available online¹. The experiment also involves a Hololens 2 Augmented Reality (AR) headset that is self-localized in real-time w.r.t. a fixed $\mathcal{F}_{W_{AR}}$, and a 7 DOFs Kinova GEN3 robot with fixed base frame \mathcal{F}_{B_R} . It is noteworthy that in a laboratory setting, the motion capture system offers precise and high-frequency tracking. However, we highlight that tracking of the human frame can also be accomplished using the native headset SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) and inertial measurement units, as demonstrated towards the end of the video.

Prior to the experiment, a procedure allows for registering \mathcal{F}_O , $\mathcal{F}_{W_{AR}}$ and \mathcal{F}_{B_R} , all with respect to a fixed world frame \mathcal{F}_W (chosen arbitrarily). This allows to express in the same frame \mathcal{F}_W the optical measurements, the location of the pointer tip to be displayed in the AR headset, and the robot position or velocity commands.

The AR headset is used to display the pointer end-effector location to the participant. This end-effector is a sphere centered at the origin of frame $\mathcal{F}_{E_R^*}$, whose orientation is kept constant during an experiment. Namely, the desired pose for the robot writes:

$$\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{W \rightarrow E_R}(t_0) & \mathbf{x}_{W \rightarrow E_R^*}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

where $\mathbf{R}_{A \rightarrow B}$ and $\mathbf{x}_{A \rightarrow B}$ are the rotation matrix and the origin translation from \mathcal{F}_A to \mathcal{F}_B , respectively, while t_0 is the time at the beginning of the experiment.

The robot end-effector location $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R}$ is servoed to $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t)$ using a simple resolved rate controller imposing an end-effector velocity proportional to the error. The controller guarantees, due to its integral effect, a null permanent error. The convergence rate is tuned thanks to a simple proportional gain k determining the closed-loop position control bandwidth. Its value is set to $k = 0.5 \text{ s}^{-1}$, heuristically determined to obtain the fastest behavior before exciting the internal joint position controller oscillations.

In a closely proximate scenario, such as when the robot is affixed to a wheelchair, the controller necessitates implementation with kinematic constraints. These constraints can be realized through the utilization of bounding boxes that prohibit the robot from entering specific regions, like the participants themselves. One effective method for achieving this is by employing a Quadratic Programming (QP) controller, as demonstrated in [17]. During the subsequent experimental campaign, where participants were situated at a given distance from the robot, the inverse kinematics were solved using a conventional pseudo-inverse Jacobian matrix.

B. Teleoperation control modes

Three teleoperation modes were implemented to allow participants controlling the desired position $\mathbf{x}_{W \rightarrow E_R^*}(t)$.

¹<https://www.youtube.com/watch?v=EgwzT784Fws>

1) *Joystick Mode*: With the joystick mode, the user controls the robot desired velocity thanks a 3D SpaceMouse joystick. This corresponds to state of the art and will be used as a reference. The robot end-effector desired pose is computed thanks to Eq. (2), with:

$$\mathbf{x}_{W \rightarrow E_R^*}(t) = \mathbf{x}_{W \rightarrow E_R}(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{\mathbf{x}}_W^J(\tau) d\tau, \quad (3)$$

with $\dot{\mathbf{x}}_W^J$ the velocity input provided by the joystick at all time relative to the reference world frame W .

The velocity is computed from the joystick output with a gain that tunes the sensitivity of the system. Prior to the recorded experiments, each participant performs a few positioning experiments with several gains, and chooses the preferred one. The joystick is a 3D SpaceMouse compact [18], which is a 6 degrees of freedom joystick, though only its translations were used in this experiment. In this mode, the virtual effector E_R^* is displayed in the AR headset as a sphere. Controlling the virtual end-effector E_R^* and not the real effector allows to have velocity inputs that are more important than without, and deletes the potential delay of the velocity control loop and maximum acceleration of the robot at the start of the motions.

2) *Body Mode*: In the body mode, the user mobilizes his/her thorax movements to move the robot end-effector thanks to a rigid virtual link between \mathcal{F}_{E_H} and $\mathcal{F}_{E_R^*}$. Namely:

$$\mathbf{x}_{W \rightarrow E_R^*}(t) = \mathbf{R}_{W \rightarrow E_H}(t) \mathbf{x}_{E_H \rightarrow E_R}(t_0) + \mathbf{x}_{W \rightarrow E_H}(t). \quad (4)$$

At the beginning of each experiment, the robot end-effector is at a given initial location $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R}(t_0)$ while the participant is asked to stand at a given location (without high precision). Its precise location $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_H}(t_0)$ is recorded and used to shape the pointer $\mathbf{x}_{E_H \rightarrow E_R^*}(t_0)$. The shape of the pointer might vary depending on the physiognomy of the participants, but ensures that E_R is in the center of the robot task space, to avoid getting close to singularities. The length of the link was around 1 meter for all the participants. In order to move the effector, participants could either translate their thorax (they were authorized to put one of their foot forward or backward for stability, but not both), or rotate it.

3) *Dual Mode*: In the dual mode, the user can use simultaneously the joystick and his/her thorax movements to move the desired end-effector:

$$\mathbf{x}_{W \rightarrow E_R^*}(t) = \mathbf{R}_{W \rightarrow E_H}(t) \mathbf{x}_{E_H \rightarrow E_R^*}(t) + \mathbf{x}_{W \rightarrow E_H}(t), \quad (5)$$

where $\mathbf{x}_{E_H \rightarrow E_R^*}(t)$ depends on the joystick's inputs:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{E_H \rightarrow E_R^*}(t) &= \mathbf{x}_{E_H \rightarrow E_R}(t_0) \\ &+ \int_{t_0}^t \mathbf{R}_{E_H \rightarrow W}(\tau) \dot{\mathbf{x}}_W^J(\tau) d\tau. \end{aligned} \quad (6)$$

Notice that, if the participant stays still, then $\forall t, \mathbf{T}_{W \rightarrow E_H}(t) = \mathbf{T}_{W \rightarrow E_H}(t_0)$ the hybrid controller given in Eqs. (5-6) is equivalent to the joystick controller given in Eq. (3). Similarly, if the participant does not

use the joystick and teleoperates the robot from his/her body movements only, then $\forall t, \dot{\mathbf{x}}_W^J(t) = 0$, and the hybrid controller is equal to the body control mode described in Eq. (4).

C. Protocol

Before starting the experimental session, subjects could train as long as they wished using the joystick and familiarizing with the virtual+robotic environment, without being asked to precisely reach any target. This familiarization session lasted typically five minutes. The sensitivity of the joystick could be adjusted by the subjects according to their preference. All of them chose a sensitivity gain leading to a maximum velocity of the virtual effector E_R^* faster than the time response of the position controller used to servo E_R , thus the utilization of the AR even in joystick mode. There was no preliminary training with the Body mode nor Dual mode.

The whole experiment corresponded to 7 trials that the participants had to perform using the three different control modes, in the following order:

- 1st, 4th, 7th trials using Joystick mode (Joystick 1, 2 and 3 respectively),
- 2nd, 5th trials using Body mode (Body 1 and 2),
- 3rd, 6th trials using Dual mode (Dual 1 and 2).

Subjects rested as much as they wanted between trials. The joystick was performed 3 times as we suppose that on the first trial people were still not fully familiarized with AR headset and visualization. Therefore, a third joystick trial was added as a final reference.

Each of the 7 trials consisted of reaching 30 targets, 15 of them being the same central point, 15 others spread on a 15 cm radius sphere following the Fibonacci distribution, as outlined in [19]. This distribution facilitates the exploration of directions that are nearly uniformly distributed on the sphere. The target alternated between the central point and the surface of the sphere, creating 15 back and forth trajectories (see Fig. 2).

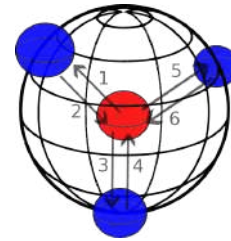


Fig. 2. A task example with 3 blue targets and 6 trajectories (numbered arrows). The task starts from the central point (red sphere), goes to one blue spherical target centered on the black sphere surface, and then back to center. Each target is completed when the robot end-effector E_R has stayed for 1s less than 2cm away from the target center. Only 1 target appears at a time. Real trials consisted of 15 blue targets to reach.

Each target reaching was acknowledged when the robot stood at least 1 second inside a 2cm radius tolerance sphere. This tolerance was chosen such as the real robot effector had to immobilize close to the target, but such as it was not

too difficult for the subjects to maintain (mostly due to the depth being hard to distinguish for some participants in the AR visualization, as well as their slight sway or tremor).

Total completion of all the trials took from 30 minutes to 1 hour depending on the participants' performances and rest sessions duration.

D. Metrics

From a first set of preliminary experiments with five subjects (notice that the results of those first five participants were not included in the experimental results analysis), we analyzed the signals (participant and robot movements, joystick output) and selected three indexes:

1) *Completion time per target*: Since the task was the same for all the control modes, we did not study the precision but rather the duration to complete each target, from when it appeared to its validation.

2) *Total Body Displacement per target*: In order to evaluate how much a participant uses his/her body during a task, we measure the displacement between the beginning of the task (at t_0 , when the target appears in the AR headset) and its validation at t_f (task completed), $\mathbf{T}_{E_H(t_0) \rightarrow E_H(t_f)}$.

We then evaluate the following 6 components (X, Y, Z in translation, α, β, γ in rotation) of this displacement:

$$\begin{pmatrix} \delta_{H_X} \\ \delta_{H_Y} \\ \delta_{H_Z} \\ \delta_{H_\alpha} \\ \delta_{H_\beta} \\ \delta_{H_\gamma} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |\mathbf{x}_{E_H(t_0) \rightarrow E_H(t_f)}| \\ |\text{angleaxis}(\mathbf{R}_{E_H(t_0) \rightarrow E_H(t_f)})| \end{pmatrix}, \quad (7)$$

where $\text{angleaxis}(\mathbf{R})$ is a vector oriented along the rotation axis of \mathbf{R} with a norm corresponding to its geodesic distance. X corresponds to the trunk moving forward/backward, Y sideways and Z up and down.

3) *Control distribution in the Dual Mode*: During trials 3 and 6 (dual mode) participants can perform the task using only the joystick controls, only body movement controls or a mix of both. Joystick controls modify the shape of the virtual link between the body marker and the desired robot location, namely $\mathbf{x}_{E_H \rightarrow E_R^*}(t)$. The contribution to the robot movement produced by the joystick input, from t_0 , at a given time t , writes:

$$\delta_J(t) = \mathbf{x}_{E_H \rightarrow E_R^*}(t) - \mathbf{x}_{E_H \rightarrow E_R^*}(t_0). \quad (8)$$

The total robot displacement (produced by both inputs), from t_0 (was resetted each time a goal was attained) to t expressed in the initial body frame $\mathcal{F}_{E_H}(t_0)$, writes:

$$\delta(t) = \mathbf{R}_{E_H \rightarrow W}(t_0) (\mathbf{x}_{W \rightarrow E_R^*}(t) - \mathbf{x}_{W \rightarrow E_R^*}(t_0)). \quad (9)$$

We therefore define the contribution to the robot displacement by the body control mode by:

$$\delta_B(t) = \delta(t) - \delta_J(t) \quad (10)$$

Finally for the analysis, we use the contribution of each control mode to the robot movement normalized over the total displacement. Namely, along the \bullet axis (with \bullet corresponding to X, Y or Z), we define the following ratios:

$$\begin{cases} b_\bullet(t) &= \frac{\delta_{B_\bullet}(t)}{\delta_\bullet(t_f)} \\ j_\bullet(t) &= \frac{\delta_{J_\bullet}(t)}{\delta_\bullet(t_f)} \end{cases}, \quad (11)$$

where $\delta(t) = [\delta_X \ \delta_Y \ \delta_Z]^T$, $\delta_B(t) = [\delta_{B_X} \ \delta_{B_Y} \ \delta_{B_Z}]^T$ and $\delta_J(t) = [\delta_{J_X} \ \delta_{J_Y} \ \delta_{J_Z}]^T$, all in $\mathcal{F}_{E_H}(t_0)$.

In any direction X, Y or Z , data points where the total displacement of the effector in that direction was inferior to 2 cm (task tolerance) were not considered in order to remove noisy measures from the distributions.

E. Questionnaires

Additionally, after the whole experimental session, participants were asked to fill questionnaires with six questions. From French to English they can be translated as:

- 1) To what extent has the task required a physical effort?
- 2) To what extent has the task required a cognitive effort?
- 3) How much did you feel in the control of the robotic arm?
- 4) How intuitive was it to control the robotic arm?
- 5) To what extent have you felt that the robot was an extension of yourself?
- 6) Which global score would you rate this experiment?

Participants answered with a score ranging from -3 (very little) to 3 (very much).

One questionnaire was filled for each control mode. For the reading of the results in the next section it is worth remembering that a high rated answer for questions 1 and 2 corresponds to a negative characteristics of the system (high load), while, for questions 3 to 6 it reflects a positive characteristics (intuitiveness, general satisfaction, etc.).

F. Participants

The experimental study was carried out in accordance with the recommendations of Sorbonne Université ethics committee CER-SU, which approved the protocol.

Fourteen asymptomatic participants, aged 20-45, volunteered for this experimental study. They all gave their informed consent, in accordance with the Declaration of Helsinki.

III. RESULTS

Data presented in the results are not normal according to the Shapiro-Wilk test. Therefore the Mann-Whitney-U Test was used to compute p-values and to analyse statistical difference between sessions and modes. In figures, \star denotes significant difference at $p < 0.05$, and $\star\star$ at $p < 0.005$. When 2 comparisons were made using the same data, a Bonferroni correction of 2 was applied.

A. Performances and preferences between modes

A distribution of the completion time per target for all the participants is provided in Fig. 3. Body mode was the fastest, approximately 10% than the other modes ($p < 0.005$), and with a lower variance.

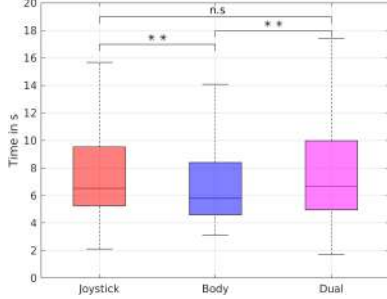


Fig. 3. Distribution of the completion time per target for each participant (medians, 25th and 75th quartiles, and whiskers of width 1.96 the standard).

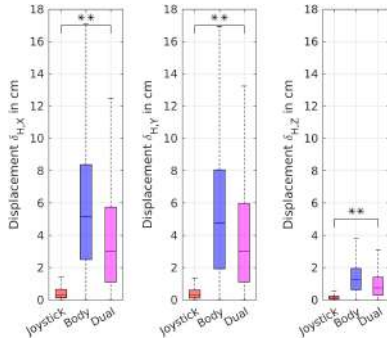


Fig. 4. TBD of the thorax per target in translation in cm

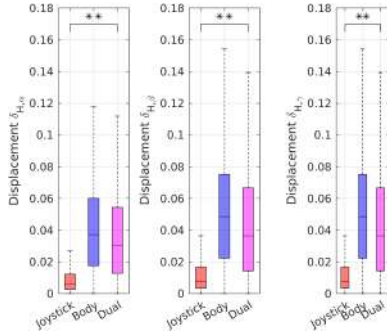


Fig. 5. TBD of the thorax per target in rotation in radians

The total body displacement (TBD) of the thorax per target along the three axes in translation and rotation are provided in Fig. 4 and 5 respectively. In any mode, δ_{H_X} and δ_{H_Y} are much higher than δ_{H_Z} . Further, the rotation $\delta_{H,\alpha}$ around the X-axis is less used than $\delta_{H,\beta}$ and $\delta_{H,\gamma}$. Nonetheless, in all directions, both in translation and rotation, the displacements exhibited by the participants' were significantly higher in Body Mode compare to Joystick Mode, around 3 to 6 times higher depending on the axes. Similarly, Dual Mode exhibits values around 3 to 4 times higher than the ones in Joystick Mode, but significantly lower than in Body Mode.

Finally, the questionnaire results shown Fig. 6 exhibit that:

- the average global grade was equally positive for all control modes (+1.8);
- the body control has been rated significantly more physical than the other modes ($p < 0.005$). Dual mode is also significantly less physical than body mode;
- there are no significant differences between all the modes regarding questions 2, 3 and 4 ($p > 0.2$ for all the tests);
- during the body control mode, the arm is rated as slightly more as an "extension" of oneself ($p < 0.05$).

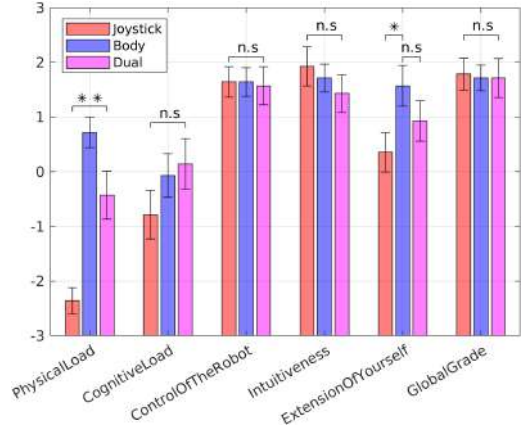


Fig. 6. Questionnaires responses distribution for each mode along the 14 participants.

B. Control distribution during dual mode

In Dual mode, the median curve of the body $b_{\bullet}(t)$ contribution and joystick contribution $j_{\bullet}(t)$ relative to the whole robot displacement, $b_{\bullet}(t_f)$ are shown Fig. 7. Overall, in all directions, body movements contributed to 80% of the task in median (and therefore the joystick for the remaining 20%), with the upper 75th quartile being close to 100%. We can also see that the end-effector motions due to the body and joystick are sequential: the body engenders a fast and wide motion at start, then, in a second step, body and joystick simultaneously adjust the desired position.

C. Evolution of the performances across trials

A distribution of the time of completion per trial is shown in Fig. 8. Between the first and second trial (and third trial for joystick) of each mode, we observed a lower median duration with a statistically significant difference. Dual2 and Joystick3 presented similar median times (6.3 and 6.0 s respectively, with no statistically significant difference) while Body2 was slightly faster with a lower median time (5.4 s) and a smaller variance. This is consistent with the results presented in Fig. 3.

We can also look at $b_{\bullet}(t_f)$ between both of the dual trials, shown in Fig. 9. Along X and Y, we can see that between the first and second trial this percentage has increased significantly, going from 75% to 85%. Along the Z direction, the first trial is closer to 80% and does not increase significantly

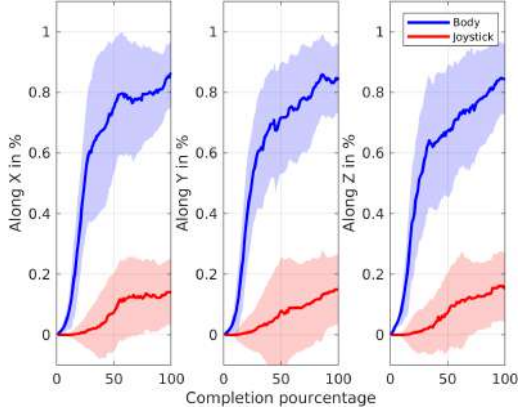


Fig. 7. Median trajectory curve of the control distribution in dual mode, for both the body $b_{\bullet}(t)$ (blue) and joystick $j_{\bullet}(t)$ (red), with standard deviation in a lighter color.

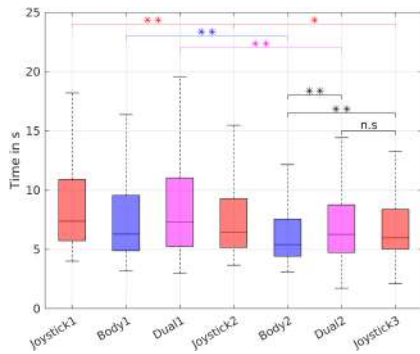


Fig. 8. Distribution of the completion time per target per trial for each participant (14 participants, 30 targets each)

after ; this might be due to the fact that people were already using more body motions along Z as they are not used to Z-joystick and more accustomed to 2 DOFs joystick. After the second trial, in all directions, the body contributes to more than 85% of the task in average, showing that the initial body usage does not fade away over time, but rather increases.

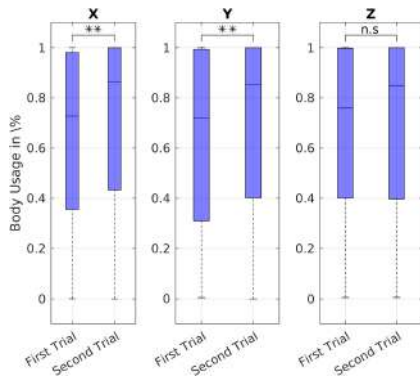


Fig. 9. Body usage in percent regarding the task completion (Medians: X: 0.73 and 0.86 / Y 0.72 and 0.85 / Z 0.76 and 0.85)

IV. DISCUSSION

Body mode has demonstrated a slight improvement of the completion time compared to Joystick Mode. However, it

involves significantly more physical exertion than Joystick mode, as indicated by both questionnaires responses and measured thorax displacements. Yet, in the Dual mode, where participants were free to choose between the two modes, more than 80% of the tasks were performed using body motions. This natural inclination towards body motions might suggest an intuitive preference of the position-position body control over a third party velocity-controller, as long as the physical demands remains manageable. This observation is further supported by the fact that the body consistently initiates motion ahead of the joystick, with the joystick being used later for fine-tuning or minor adjustments. Furthermore, this behavior remains consistent over time: during the second Dual trial, the use of the body increased despite participants potentially experiencing fatigue (the experiment lasted 30 to 60 minutes depending on the participants).

These results were also observed despite participants never having trained with our interface. The training effect of the Body Mode was at least as effective as in Joystick Mode, evidenced by a significant reduction in the variance of task durations (Fig. 8), which also suggests the intuitiveness of the interface.

In line with previous research [5], [10], we observed an apparent preference for position-position control in Dual mode. Yet, in this experiment, this preference persists despite the high physical demands associated with the thorax control. However, for more extensive and energy expensive movements, the joystick comes into play to complete the motion. It is likely that the use of the joystick will become more prominent in more challenging tasks, such as executing larger effector motions or handling rotations, which can be physically demanding due to the lever effect. Hence, the utilization of an additional velocity controller would remain essential to effectively operate within a broader task space.

Additionally, it appears that this behavior is largely unconscious, as no significant differences emerged in the "intuitiveness"-related question, and control modes were rated similarly in terms of the global grade. During the Body control mode, the robotic arm was however more frequently perceived as "an extension" of the user. To draw more conclusive insights on this aspect, further studies on body representation are needed, but it may align with previous findings suggesting that tools [20], assistive devices [21] or worn robotic devices like prostheses [22] can be integrated into our body schema.

We should however note that the participants were not representative. They were healthy, relatively young (less than 45 years old) and the acceptance of such technology, as well as the mobility of the users might differ with other group of participants. Namely, the cognitive load could increase, resulting in significant results in the questionnaires. The virtual link was also constantly fixed to the participants' thorax during a trial, while a real-case scenario would repeatedly attach and detach the link for each new task, and a mechanism to attach the virtual link should be used, for example using gaze. These observations could impact the acceptance of the technology by the users, which would

remain critical for a daily implementation.

Lastly, it's important to note that all of these results were observed while participants used their thorax. It is reasonable to anticipate even better performances with a hand-based interface (thus gaining in agility at a price of losing the hand-freedom for controlling the robot). These results also suggest that such a system could be well-suited for assistive applications, namely using trunk or head motions to control the robotic arm (which can be captured through the native headset's SLAM and Inertial Measurement Units, eliminating the need for external optical motion capture). Nonetheless, while the system can facilitate a wide range of horizontal and vertical motion of the end-effector via natural body rotations, depth control requires substantial body translations, and is best handled using a velocity controller. As a result, a hybrid dual control approach appears to be the most suitable for such applications, combining position control for smaller task spaces and velocity control for broader and more physically demanding motions.

V. DISCOVERY SESSIONS WITH IMPAIRED PARTICIPANTS

Two participants, each affected by upper body movement-restricting pathologies (spinal amyotrophy and partial locked-in syndrome), which restricted their head movement amplitude to less than a few centimeters of displacement, also tested the system. One of them routinely employs a Kinova Jaco arm, controlled by the manufacturer conventional 2 DoF joystick interface [23], while the other participant lacked prior experience with an assistive robotic arm but uses a 2 DoF joystick to control her wheelchair. As the data gathering of such participants can contain sensitive data, and in compliance with ethical committee guidelines and French (law Jardé) and European laws governing sensitive data protection, data from these preliminary sessions were not recorded and the following feedback is qualitative. The robot itself was also far away from the participants to ensure safety.

During a half-hour session, each participant recreatively used the HoloLens mode with virtual fixation to the head to perform pick-and-place tasks, specifically grasping cups or pens and placing them on a wide table. Task performance metrics were not recorded; our aim was to gather their feedback and preferences. Participants only experimented with the Body mode, excluding the Dual mode due to their limited hand motions and inability to use the joysticks available in the laboratory.

After 5 to 10 minutes of practice, using head motions, participants successfully performed various proposed tasks, especially vertically and horizontally, facilitated by the transformation of head rotation to robotic end-effector position – an achievement unattainable through direct mapping as the length of the link scales the effector's motions. It could be noted that, in contrast to position-to-velocity controllers that require tuning, the body-based control solely relies on geometric relations and, consequently, tasks were achieved without any customization. Both participants, despite distinct

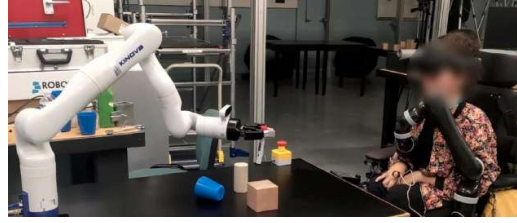


Fig. 10. The first participant using the proposed body control. A Kinova arm is set on her wheelchair, which she use daily.

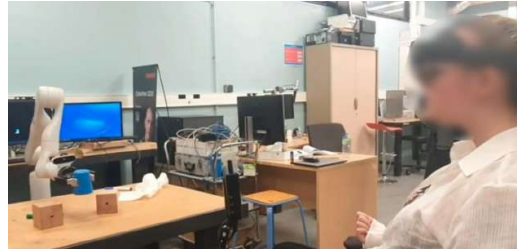


Fig. 11. The second participant using the proposed body control. She had no prior experiences with robotics, but was familiar with gaze-to-text software.

pathologies, were able to operate the system with little training.

However, depth-related tasks proved challenging due to the limited neck and torso movements of the participants. Even if they could leverage the motion of their wheelchair to control depth, such method is not viable in uncontrolled environments. The first participant suggested the potential use of their own joystick or a force sensor on their headrest for hybrid control along that direction, while the second, accustomed to gaze detectors for speech, proposed utilizing the latter. They also observed that while the headset itself was not particularly heavy, the presence of the embedded battery and electronics at the back of their head restricted the option of comfortably resting against their headrest. Consequently, the headset case should be relocated to address this constraint.

To conclude, these preliminary observations in a head-based control were promising, particularly with individuals exhibiting restricted upper body movements, and could be compared to [15] which used rigid head-pointers to draw or type on a keyboard. Participants seemed enthusiast and curious to explore further possibilities. However, as previously mentioned, a hybrid control mode remains necessary for challenging directions, such as depth control, and would likely be essential for handling difficult orientations which where not yet explored in this paper. A hybrid coupling, integrating personalized inputs (joystick, gaze, etc.), could facilitate intentional control of more than 3 degrees of freedom simultaneously. This stands in contrast to existing sole joystick systems, which are inherently constrained by the hand dexterity of their users and usually limited to 2 DoF.

VI. CONCLUSION

In this paper, we have introduced an approach for teleoperating a robotic manipulator in a nearby environment. This approach could serve to either restore lost manipulation abilities in an assistive context, or extend one's capacity to manipulate objects without relying on natural hands, potentially opening up new possibilities for tasks involving more than two hands. Our experimental results have demonstrated that this interface is intuitive to use and that there is a natural inclination to employ body motions rather than traditional external velocity joystick controllers. Furthermore, the hybrid dual control mode has been shown to combine the advantages of both position and velocity controllers without compromising performance. We plan to replicate this study with a 6 DOFs task to explore the generalization of these findings in more complex and expansive tasks. Additionally, investigating the performance of body (or dual) control with the virtual link attached to different body parts would be valuable for characterizing the effects of the location (proximal or distal) of the virtual link fixation on the body. For example, using the head might interfere with exploration of the environment or with another simultaneous task.

We emphasize that the body-to-robot link control introduced in this study is not intended to replace existing joystick solutions but rather to complement them. It offers a hand-less 3-degree-of-freedom (3 DoF) position control that requires no tuning and proves intuitive for small-range tasks, while the joystick velocity control remains applicable for larger or more challenging motions. This pointer mode stands out, to our knowledge, as the sole position control mode in the literature that is fully voluntary and potentially adaptable for use in assistive robotics.

Finally, we observed that body motions consistently initiate before joystick motions. This sequential pattern raises the possibility of partially automating joystick velocity inputs by analyzing body motions. This, at term, could eliminate the need for an external input hand-based controller to generate velocity control of the end-effector, allowing for the generation of both position and velocity control within a single postural input. Such a paradigm has been explored in the context of master-slave teleoperation [24] and prosthesis control [25] and could be applied to our approach.

REFERENCES

- [1] M. Casadio, R. Ranganathan, and F. A. Mussa-Ivaldi, "The Body-Machine Interface: A New Perspective on an Old Theme," *Journal of Motor Behavior*, vol. 44, no. 6, pp. 419–433, Nov. 2012.
- [2] S. Jain, A. Farschiansadegh, A. Broad, F. Abdollahi, F. Mussa-Ivaldi, and B. Argall, "Assistive robotic manipulation through shared autonomy and a Body-Machine Interface," in *2015 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*. Singapore, Singapore: IEEE, Aug. 2015, pp. 526–531.
- [3] D. Craig and H. Nguyen, "Wireless Real-Time Head Movement System Using a Personal Digital Assistant (PDA) for Control of a Power Wheelchair," in *2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference*. Shanghai, China: IEEE, 2005, pp. 772–775.
- [4] M. Casadio, A. Pressman, S. Acosta, Z. Danzinger, A. Fishbach, F. A. Mussa-Ivaldi, K. Muir, H. Tseng, and D. Chen, "Body machine interface: Remapping motor skills after spinal cord injury," in *2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*. Zurich: IEEE, Jun. 2011, pp. 1–6.
- [5] Won Kim, F. Tendick, S. Ellis, and L. Stark, "A comparison of position and rate control for telemanipulations with consideration of manipulator system dynamics," *IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 3, no. 5, pp. 426–436, Oct. 1987.
- [6] F. Rizzoglio, M. Giordano, F. A. Mussa-Ivaldi, and M. Casadio, "A Non-Linear Body Machine Interface for Controlling Assistive Robotic Arms," *IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING*, vol. 70, no. 7, 2023.
- [7] M. Couraud, "Etude du contrle sensorimoteur dans un contexte artificiel simplifi en vue d'amliorer le contrle des prothses myoelectriques." 2018.
- [8] R. C. Lincoln, "Visual tracking: III. The instrumental dimension of motion in relation to tracking accuracy," *Journal of Applied Psychology*, vol. 37, no. 6, pp. 489–493, Dec. 1953.
- [9] R. J. Jagacinski, D. W. Repperger, M. S. Moran, S. L. Ward, and B. Glass, "Fitts' Law and the Microstructure of Rapid Discrete Movements," *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, no. 6(2), pp. 309–320, 1980.
- [10] S. Zhai, "Human Performance in Six Degree of Freedom Input Control," 1995.
- [11] C. Freschi, V. Ferrari, F. Melfi, M. Ferrari, F. Mosca, and A. Cuschieri, "Technical review of the da Vinci surgical telemanipulator: Technical review of the da Vinci surgical telemanipulator," *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 9, no. 4, pp. 396–406, Dec. 2013.
- [12] E. J. L. Pulgarin, O. Tokatli, G. Burroughes, and G. Herrmann, "Assessing tele-manipulation systems using task performance for glovebox operations," *Frontiers in Robotics and AI*, 2022.
- [13] L. Dominjon, A. Lecuyer, J.-M. Burkhardt, and R. Simon, "A Comparison of Three Techniques to Interact in Large Virtual Environments Using Haptic Devices with Limited Workspace."
- [14] "Headpointer - Handi Life Sport," Oct. 2017. [Online]. Available: <https://handilifesport.com/product/headpointer/>
- [15] K. H. Jewell, "A custom-made head pointer for children," *The American Journal of Occupational Therapy*, vol. 43, no. 7, pp. 456–460, 1989, publisher: The American Occupational Therapy Association, Inc.
- [16] N. Goodman, A. M. Jette, B. Houlihan, and S. Williams, "Computer and Internet Use by Persons After Traumatic Spinal Cord Injury," *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 89, no. 8, pp. 1492–1498, Aug. 2008.
- [17] M. Khoramshahi, A. Poignant, G. Morel, and N. Jarrass, "A Practical Control Approach for Safe Collaborative Supernumerary Robotic Arms," 2023.
- [18] "SpaceMouse Compact - Official 3Dconnexion UK store." [Online]. Available: <https://3dconnexion.com/us/product/spacemouse-compact/>
- [19] . Gonzalez, "Measurement of areas on a sphere using Fibonacci and latitude-longitude lattices," *Mathematical Geosciences*, vol. 42, no. 1, pp. 49–64, Jan. 2010, arXiv:0912.4540 [math].
- [20] A. Maravita and A. Iriki, "Tools for the body (schema)," *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 8, no. 2, pp. 79–86, Feb. 2004.
- [21] M. Pazzaglia and M. Molinari, "The embodiment of assistive devices from wheelchair to exoskeleton," *Physics of Life Reviews*, vol. 16, pp. 163–175, Mar. 2016.
- [22] Y. Sato, T. Kawase, K. Takano, C. Spence, and K. Kansaku, "Incorporation of prosthetic limbs into the body representation of amputees: Evidence from the crossed hands temporal order illusion," in *Progress in Brain Research*. Elsevier, 2017, vol. 236, pp. 225–241.
- [23] "Jaco assistive robot User guide."
- [24] L. Dominjon, A. Lecuyer, J. Burkhardt, G. Andrade-Barroso, and S. Richir, "The "Bubble" Technique: Interacting with Large Virtual Environments Using Haptic Devices with Limited Workspace," in *First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*. Pisa, Italy: IEEE, 2005, pp. 639–640.
- [25] M. Legrand, N. Jarrasse, E. d. Montalivet, F. Richer, and G. Morel, "Closing the Loop Between Body Compensations and Upper Limb Prosthetic Movements: A Feasibility Study," *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, vol. 3, no. 1, pp. 230–240, Feb. 2021.

6DoF control of an assistive manipulator through a virtual body-to-robot link

Alexis Poignant¹, Nathanaël Jarrassé^{1,2}, Guillaume Morel¹

Abstract—The paper introduces a control approach for teleoperating the 6 degrees of freedom (DoF) end-effector of a robotic manipulator positioned near a human operator. The approach involves establishing a virtual connection between a body part and the robot’s end-effector, which is visualized through an Augmented Reality (AR) headset. While this control method was previously explored for 3-DoF translation tasks, it has now been extended to cover 6-DoF tasks, which include orientations. We conducted an experimental study aiming at demonstrating the advantages and limitations of this approach when compared to the traditional joystick-based teleoperation method. The results indicate that, for tasks with a limited range, this method is more efficient and intuitive than the joystick. Moreover, we also present a hybrid mode that combines both body and joystick movements to intuitively and effectively perform on larger operational task spaces.

Index Terms—Physically Assistive Devices, Telerobotics and Teleoperation

I. INTRODUCTION

In the past decades, the development of cheaper and lighter robotic manipulators has rapidly expanded the possibilities of robotic applications, especially for assistive daily tasks [1], and for industrial tasks, such as robotic third hands for soldering [2]. These mechanical advancements have been complemented by the concurrent development of “body-machine” interfaces [3], which connect users to robots, enabling them to voluntarily command robots through physiological signals like body motions. However, both the acquisition of these signals and their transformation into the control space remain major challenges in assistive applications, particularly for multiple degrees of freedom (DoF) tasks [4].

In industrial robotics, controlling up to 6 DoF is typically accomplished using hand controllers. However, 6 DoF one-handed interfaces are usually large [5] or challenging to design [6] or to control. Therefore, 6 DoF controls are usually addressed using bi-manual controllers, such as an Xbox controller [7][8], or visual interfaces [9].

These interfaces are challenging to transpose to assistive scenarios, as many users have little to no hand mobility, or the interfaces are too large to embark on a mobile base (such as a wheelchair) or on the users themselves. Applications in this domain employ a 2 or 3-DoF joystick input and a button switch that allows changing modes to sequentially control more than 2 DoF [10], or, similar to bi-manual controllers, coupling multiple joysticks from various body parts [11]. However, these solutions often require extensive

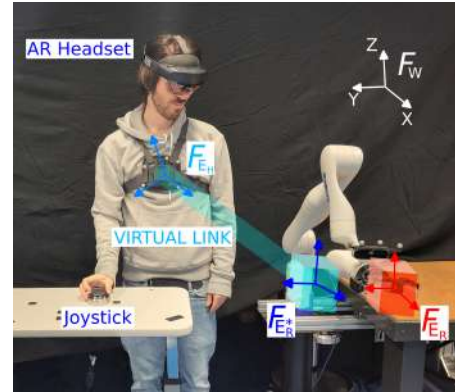


Fig. 1: Representation of the set-up used during the experiments: the virtual end-effector $\mathcal{F}_{E_R^*}$ (light blue cube) is linked (light blue segment) to the user’s thorax \mathcal{F}_{E_H} , whose movements are captured using Optitrack markers. This link is displayed using a virtual reality headset and can be reconfigured using a 3D joystick manipulated by the user’s dominant hand. A robot, set nearby, with end-effector \mathcal{F}_{E_R} (red cube) is then servoed to follow the desired end-effector position. The link and spheres on the image are representations of what is seen through the AR headset. A frame \mathcal{F}_\bullet is referenced by its three axes X , Y and Z .

training in order to learn the various mappings and modes. Another solution involves utilizing a personalized mapping simultaneously using different residual body motions to control the manipulator; this mapping is usually computed using Principal Component Analysis or Auto-encoder Networks [12], which are complex to train for multidimensional control and may lead to non-linear mappings. Therefore, continuously controlling multiple degrees of freedom is typically addressed through either complex interfaces or intricate mappings, and the continuous control of a 6 DoF effector remains relatively uncommon in assistive or hands-free industrial scenarios.

In a previous work [reference 3 DoF], we introduced a control approach for teleoperating a robot positioned near a human operator, involving the establishment of a virtual link between a body part and the robot end-effector. The link is displayed through an Augmented Reality (AR) headset, aiding users in visualizing the connection and addressing the latency of the robot. It is operable using various body parts, such as the trunk or the head. Unlike many of the previously mentioned control methods, our approach offers position-position control, which often proves to be more effective than position-velocity methods, especially in small operational

¹Sorbonne Université, CNRS, INSERM, Institute for Intelligent Systems and Robotics (ISIR), Paris, France.

²Email: jarrass@isir.upmc.fr

task spaces [13][14][15]. Furthermore, our control method is based on the manipulation of a rigid link, akin to using a rigid tool, a concept extensively studied in motor control literature. This body of research has demonstrated that users can typically easily integrate such tools into their body schema [16], including in assistive scenarios [17][18], which might result in ease of use and good performance.

Previously, our control was evaluated in 3 DoF translation tasks, demonstrating that the approach was more efficient and intuitive than a 3 DoF joystick. However, the control of orientations remains crucial for most daily assistive tasks, and the link, due to its length and the lever effect, requires important body motions to perform rotations, while translations are performed using small body rotations. This paper aims to extend our control method's applicability to 6 DoF tasks. We will evaluate its performance against a small one-handed 6 DoF SpaceMouse joystick [19], commercially available and commonly used in various 3D software.

II. MATERIAL AND METHODS

A. Experimental set-up

The set-up is presented in Fig. 1.

The virtual device base frame \mathcal{F}_{E_H} is captured in real time using an optical marker (Optitrack) located on the user's thorax w.r.t. its fixed frame \mathcal{F}_O . For an illustrative video detailing the system other locations for the marker \mathcal{F}_{E_H} (head, elbow), see <https://www.youtube.com/watch?v=EgwwzT784Fws>. An Augmented Reality (AR) headset (Hololens 2) is also worn by the user. It is self-located relative to a 7 DOFs Kinova GEN3 robot with fixed base frame \mathcal{F}_{B_R} . The AR headset is used to display the link as well as its end-effector location $\mathcal{F}_{E_R^*}$ to the user. This end-effector is a cube centered at the origin of frame $\mathcal{F}_{E_R^*}$. Namely, the desired pose for the robot writes:

$$\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{W \rightarrow E_R^*}(t) & \mathbf{x}_{W \rightarrow E_R^*}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

where $\mathbf{R}_{A \rightarrow B}$ and $\mathbf{x}_{A \rightarrow B}$ are the rotation matrix and the origin translation from \mathcal{F}_A to \mathcal{F}_B , respectively. The robot end-effector location $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R}$ is then servoed to $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t)$ using a resolved rate controller, which imposes an end-effector velocity proportional to the error and guarantees a null permanent error without any oscillations.

B. Teleoperation control modes

Three teleoperation modes were implemented to allow participants controlling the desired position and orientation $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t)$:

- A Joystick Mode, where the user uses a 6 DoF joystick. A direct mapping, both in translation and rotation, is performed between these DoF and the desired effector E_R^* velocity. In this mode, the virtual effector E_R^* is displayed, but not the virtual link. Participants could tune the sensitivity of the joystick. All of them chose a gain such as the maximum E_R^* velocity was faster than the maximum velocity of the robot effector E_R .

- A Body mode, where the user mobilizes his/her thorax movements to move the robot end-effector using a rigid virtual link between \mathcal{F}_{E_H} and $\mathcal{F}_{E_R^*}$. Namely:

$$\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t) = \mathbf{T}_{W \rightarrow E_H}(t) \mathbf{T}_{E_H \rightarrow E_R}(t_0), \quad (2)$$

where t_0 the time at the beginning of the experiment, which fixes the rigid configuration $\mathbf{T}_{E_H \rightarrow E_R}(t_0)$ of the link, which is displayed at all time in the AR headset.

- A Dual mode, where the user can use simultaneously the joystick and his/her thorax movements to move the desired end-effector. The thorax motions $\mathbf{T}_{W \rightarrow E_H}(t)$ allows to move the link while the joystick motions reconfigure the link $\mathbf{T}_{E_H \rightarrow E_R}(t)$ in real time :

$$\mathbf{T}_{W \rightarrow E_R^*}(t) = \mathbf{T}_{W \rightarrow E_H}(t) \mathbf{T}_{E_H \rightarrow E_R}(t). \quad (3)$$

C. Protocol

Prior to commencing the experimental session, participants underwent a training session with the joystick, allowing them to acquaint themselves with the virtual and robotic environment. This familiarization session typically lasted between three to five minutes, during which subjects could adjust the joystick sensitivity according to their preferences. There was no preliminary training provided for the Body mode or Dual mode. Subsequently, participants engaged in a 3 DoF task, as detailed in [reference 3 DoF]. This task involved controlling the robot's position while the orientation of the effector was kept horizontal. The control was executed using either the three translations of the Joystick, the Body Mode, or the Dual Mode. Finally, participants performed 7 trials of a 6 Degree of Freedom (DoF) task in the following order:

- 1st, 4th, 7th trials using Joystick mode (Joystick 1, 2 and 3 respectively),
- 2nd, 5th trials using Body mode (Body 1 and 2),
- 3rd, 6th trials using Dual mode (Dual 1 and 2).

Subjects rested as much as they wanted between trials.

In each of the 7 trials, participants were tasked with reaching 30 targets. 15 were situated at the same central point with a flat orientation, while the remaining 15 were distributed on a 15 cm radius sphere using the Fibonacci distribution [20], featuring orientations with geodesic angles of up to 25°. Notably, all targets were strategically positioned to be reachable exclusively using the Body Mode though they required arduous motions. The sequence of targets alternated between the central point and the surface of the sphere, generating 15 back-and-forth trajectories. A successful target reach was accounted when the robot remained within a 2 cm radius tolerance sphere and a 10° tolerance angle (based on the geodesic) for at least 1 second. These tolerances were implemented to ensure the stabilizing of the manipulator while maintaining a level of difficulty that participants could manage, which arose from the perception of depth and precise orientations, which could be challenging to distinguish in AR, as well as the subjects' slight sway or tremor. The entire completion of all the trials varied from 30 minutes to 1 hour, depending on individual participant performances and rest sessions.

D. Metrics

1) *Completion time per target*: Since the task was the same for all the control modes, we did not study the precision but rather the duration to complete each target, from when it appeared to its validation.

2) *Control distribution during Dual Mode*: We define the control distribution as the ratio of the task performed using either body motions or joystick motions in each direction X,Y,Z and in rotation. The rotation is expressed as the geodesic angle, between the starting and the end orientation of the effector. These control distribution ratios are plotted over time (normalized between 0 and 100% of the task completion time) to show the temporal coordination of the Body and Joystick motions, and their final value indicates the percentage of the task that was performed using each input.

3) *End-effector spatial coordination*: Finally, we study the spatial coordination of the end-effector, which is the normalized error in rotation plotted as a function of the normalized error in translation. In reaching scenarios, the way humans adjust both their hand position and orientation to align with a target follows a systematic pattern that can be approximated as a linear relationship [21]. Though plotting such graph is straightforward, it is however arduous to quantitatively evaluate its linearity. To do so, we use the Root-Mean Difference test [22] defined as the standard deviation between a linear fit and a higher-order polynomial fit:

$$\mu_n = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (f(x_i) - g_n(x_i))^2}{N}} \quad (4)$$

where μ_n the n-order root-mean difference, N the number of samples, x_i the position error samples, and f and g_n respectively the linear and n-order polynomial functions that were fitted on the dataset (x_i, y_i) with y_i the rotation error samples. We showcase this analysis with g_n as a 2nd up to 5th-order polynomial function.

E. Questionnaires

Additionally, after the whole experimental session, participants were asked to fill questionnaires. From French to English these questions can be translated as:

- 1) To what extent has the task required a physical effort?
- 2) To what extent has the task required a cognitive effort?
- 3) How much did you feel in the control of the robotic arm?
- 4) How intuitive was it to control the robotic arm?
- 5) To what extent have you felt that the robot was an extension of yourself?
- 6) Which global score would you rate this experiment?

Participants answered with a score ranging from -3 (very little) to 3 (very much).

A questionnaire was completed for each control mode. For clarity in interpreting the results in the subsequent section, it's important to note that a high rating for questions 1 and 2 indicates negative system characteristics (e.g., high load);

conversely, for questions 3 to 6, a high rating reflects positive characteristics (e.g., intuitiveness, general satisfaction, etc.). The same questionnaire was also administered to the participants during the 3-DoF task. Consequently, we also present a paired comparative between the responses obtained in the 6-DoF and 3-DoF tasks.

F. Participants

The experimental study was carried out in accordance with the recommendations of Sorbonne Université ethics committee CER-SU, which approved the protocol.

Fourteen asymptomatic participants, aged 20-45, volunteered for this experimental study. They all gave their informed consent, in accordance with the Declaration of Helsinki.

III. RESULTS

Data presented in the results are not normal according to the Shapiro-Wilk test. Therefore the Mann-Whitney-U Test was used to compute p-values and to analyse statistical difference between sessions and modes. In figures, * denotes significant difference at $p < 0.05$, and ** at $p < 0.005$.

A. Performances and preferences between modes

The success rate for all the targets, all the control modes and all the participants was of 100%.

A distribution of the completion time per target for all the participants is provided in Fig. 2, as well as the median in both the 3-DoF task and 6-DoF task for all modes Table. I. In the 3-DoF task, although the Body was 10% faster than the other two modes, all three modes exhibited relatively similar completion times as seen Table I. Now, in the 6-DoF task, the Body is significantly faster than the other two modes (50%) as seen Fig.2. Furthermore, the time increase between the 3-DoF and 6-DoF tasks is of 19% in Body Mode, whereas it is of 52% for the Joystick, and 30% in Dual Mode.

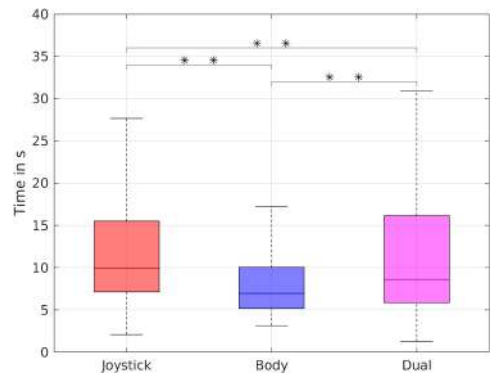


Fig. 2: Distribution of the completion time per target in each control mode (median, 25th and 75th quartiles, and variance).

Finally, the questionnaire results shown Fig. 3 exhibit that:

- the average global grade was equal;
- the Body control has been rated significantly more physical than the other modes ($p < 0.005$); Dual mode is also significantly less physical than body mode;

TABLE I: Median Completion Time per Target in both 3-DoF and 6-DoF tasks in s

Mode	Joystick	Body	Dual
3DOF	6.5	5.8	6.6
6DOF	9.9	6.9	8.6

- there are no significant differences between all the modes regarding questions 2, 3 and 4 ($p > 0.2$ for all the tests);
- during the Body mode, the arm is rated as more as an "extension" of oneself ($p < 0.005$) than during Joystick mode.

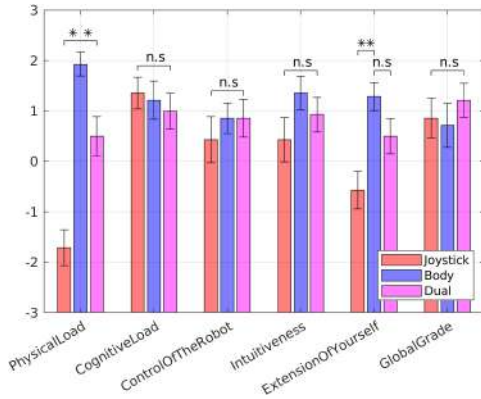


Fig. 3: Questionnaires responses distribution for each mode along the 14 participants.

However, these results do not reflect the generalization from the 3-DoF task to the 6-DoF task. To investigate this, since the same participants performed both tasks and answered the same questionnaires, we can study the paired difference between the responses at 6 and 3 DoF (extracted from [ref 3 Dof]) as seen Fig. 4. The differences of questions 1 and 2 are positive, indicating an increase of the physical and cognitive load, while the remaining differences are negative, showing a degradation of the control, intuitiveness, extension of oneself as well as the global grade. It appears that the increase in cognitive load was higher for the joystick, as was the degradation of control, intuitiveness, and self-extension. Conversely, the degradation for the Body is relatively low concerning intuitiveness and self-extension.

B. Evolution of the performances across trials

In order to assess the learning over trials, we show a distribution of the time of completion per trial in Fig. 5. Between the 1st and 2nd trial (and 3rd trial for joystick) of each mode, we observed a lower median duration with a statistically significant difference, as well as a reduction of the variability. For Joystick mode, between 1st and 2nd trial, the median time decreases by 16% and the inter-quartile by 36%; between 2nd and 3rd trial, it decreases by 8% and 19% respectively; in Body mode, the median and inter-quartile decrease are of 8% and 9%; in Dual mode, 15% and 53%.

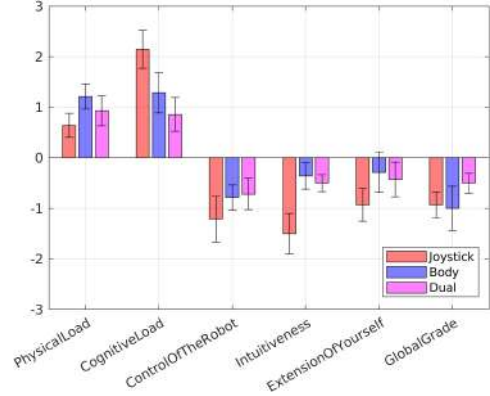


Fig. 4: Distribution of the differences 6-DoF minus 3-DoF task questionnaires responses for each mode along the 14 participants.

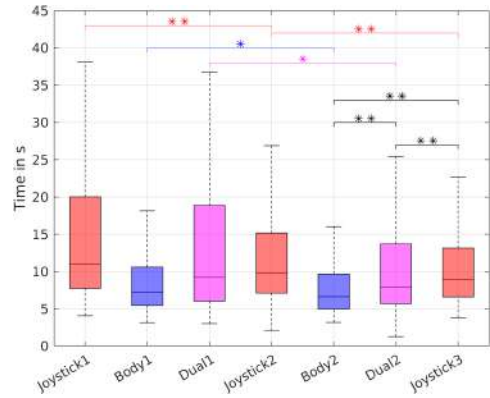


Fig. 5: Distribution of the completion time per target per trial.

C. Control Distribution during Dual Mode

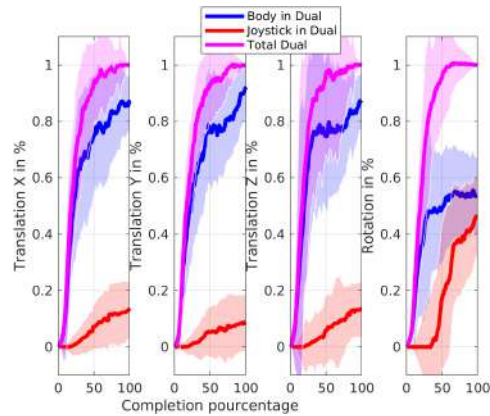


Fig. 6: Medial control Distribution curves (line) and standard deviation (light area) over time in Dual Mode, both for the Body (blue), the Joystick (red), as well as the Total effector displacement (purple), in X,Y,Z and in rotation, across all participants.

A plot of the median curve of the body and joystick

contribution over the duration of the task is shown Fig. 6 across all participants. Similarly to what was observed in the 3-DoF task, during the Dual mode, body movements accomplish 80% of the task, while the joystick contributes 20%. However, in rotation, the distribution between body and joystick is now 50-50. Moreover, two different temporal strategies are observed: in translation, the body initiates a wide and rapid movement first, before the joystick starts, and, simultaneously, both adjust the effector's position; in rotation, the body also starts first, but as soon as the joystick begins, the body stops, with the body and joystick being used in a temporally decorrelated manner. To better analyze this phenomenon, one can study the same rotation distribution curve for different task angles.

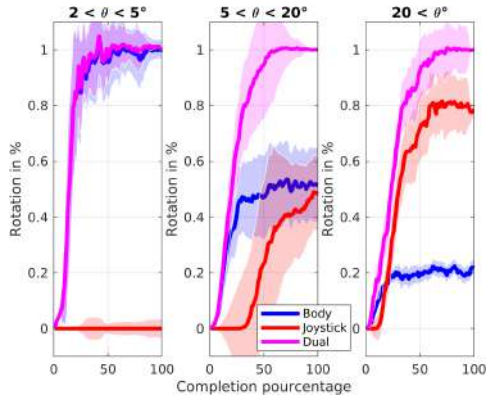


Fig. 7: Median control Distribution (line) and standard deviation (light area) over time of the rotation for the Body (blue) and Joystick (red) in Dual Mode, as well as the Total (purple), depending on the desired orientation demanded by the task.

For small angles, participants did not use the joystick much or at all. For moderate angles, a 50-50 distribution is observed, while for large angles, the joystick accomplishes 80% of the task. However, despite these different distributions, the temporal sequence remains consistent: the body first, followed by the joystick, in a decorrelated manner, and the global response exhibited a similar profile for any task angle.

D. Spatial coordination of the effector per participants

Median coordination plots for all participants and all modes are provided Fig. 8. In Dual mode, similar to the control distribution, the decomposition of the body and joystick motions is also presented. In order to analyze the linearity of these curves, the Root-Mean Difference Test is also presented Fig. 9, comparing first-order function fits f with 2nd to 5th order polynomial fit g . The Root-Mean Difference Test seems to converge for g a fifth order function, so we'll use this value as a reference.

In the Body mode, participants' translation-rotation coordination is relatively linear, as indicated by both the plot and the low root-mean difference. However, in the Joystick mode, a greater dispersion is observed, symmetrically around

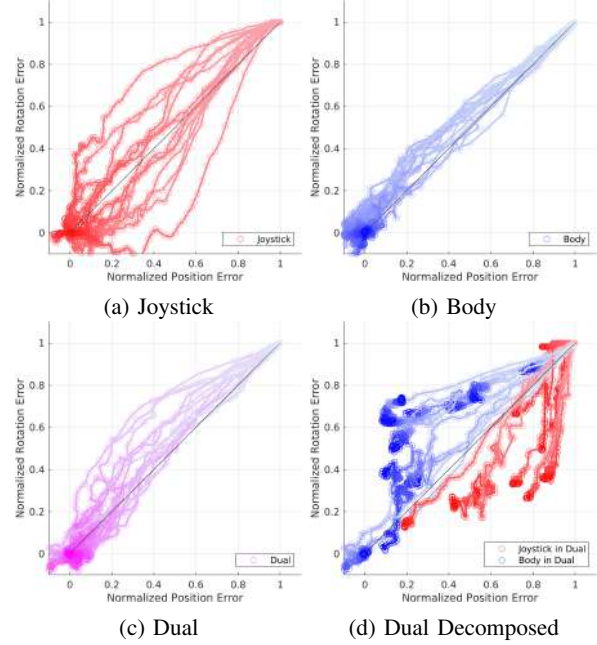


Fig. 8: Median spatial coordination plots per participants (14), for all modes

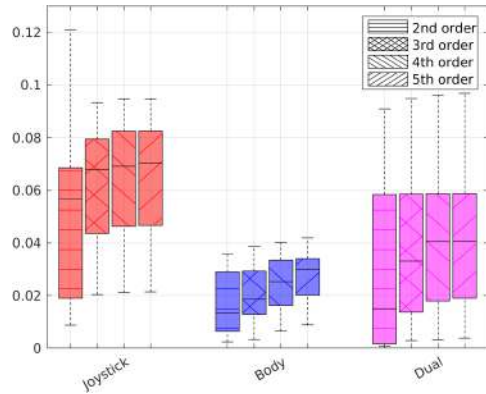


Fig. 9: Root-mean difference test μ_n , expressing the linearity of the spatial coordination per participants in each mode, for g_n a second up to fifth order polynomial function, from left to right.

the $y=x$ line, as seen by the greater values of the root-mean difference. On the other hand, the Dual mode exhibits an intermediate dispersion, always above the $y=x$ line (i.e., translation is performed slightly before the effector's rotation), and with a root-mean difference that varies depending on participants.

If we decompose the Dual mode, however, we observe highly varied strategies among participants. While almost all of them predominantly use the body for translation movements and the joystick for rotation movements, the trajectories vary considerably, even though the effector trajectories were relatively similar and following a linear coordination pattern.

IV. DISCUSSION

The Body mode exhibits better performance compared to the Joystick mode, despite its higher physical demand. While these results may be related to the device used (one-handed, potentially less convenient than a bi-manual device), the increase in time between the 3-DoF and 6-DoF tasks was smaller for the Body mode than the Joystick mode, indicating easy generalization between the two tasks.

Furthermore, in the Body trials, although there is evidence of learning, as shown by the reduction in variance between the 1st and 2nd Body trial, this learning effect is, in percentage, less important than the Joystick one, whose inter-quartile considerably reduces. This suggests that the joystick required a longer training period, while the 6-DoF Body mode was quickly integrated.

This generalization is reinforced by the questionnaires, which show that the "extension of yourself" was answered more positively in Body mode; as well as the minimal degradation of responses between the 3-DoF and 6-DoF tasks for questions regarding intuitiveness and self-extension in Body Mode. It's possible that the physical link, or at least the "tool" attached to the trunk, is well integrated into the body schema, facilitating such relatively smooth generalization for participants, unlike the joystick, which may be too complex for some participants to use effectively. It might also explain why the Dual Mode was intermediately graded regarding this question.

However, in the Dual mode, two different control distribution strategies were observed in translation and rotation. In translation, although the body initiates movement first, reflecting intuitiveness, in a second phase, the body and joystick co-act simultaneously, showing some temporal correlation to adjust the effector's position. In contrast, in rotation, the body and joystick are temporally decorrelated, with the body always making the initial movement (even in very large angles and tasks), and the joystick making the second movement, without both being activated simultaneously. Therefore, the body is always called upon intuitively first, but the temporal decorrelation suggests that participants need to concentrate to use joystick rotations, interrupting their natural motor loop to focus on the device.

The complexity of the 6-DoF joystick also appears in the spatial coordination curves: the joystick exhibits more dispersion around the $y=x$ line, indicating a certain difficulty in managing translations and rotations simultaneously. However, this dispersion is symmetric around the $y=x$ line, hinting that the device is not inherently defective, but is rather handled differently by each participant, with some performing translation before rotation and vice versa. In contrast, the Body mode shows a more linear profile, suggesting that the tool is very well integrated into the body schema for all participants. The Dual mode, using both, presents an intermediate linearity profile, and tends to be above the $y=x$ line, as participants used body motions first, which tends to favor translations.

However, this linearity profile in the Dual mode is ob-

served while participants must manage distinct sources of effector movement: a position-position control, performed by body movements, and a position-velocity control performed by the joystick, which reconfigures the link in real-time. Each participant exhibits a unique strategy, not or rarely found in any other participant, while, for all participants, the spatial coordination of the effector shows a relatively linear profile. These results suggest that, regardless of the inputs, whether it be their control type (position or velocity) or their origin of the movement (trunk or hand), the subject always focuses, unconsciously, on the effector's spatial coordination, using an "internal coordination" between inputs that is unique to them and that ensure such property of the effector's motion.

Yet, the position-position control provided by the Body does not enable the attainment of large working spaces, especially in rotation, and therefore position-velocity control remains necessary. This is a major drawback that was previously observed in classical 2 DoF teleoperation [14] and is since well-known. Nevertheless, the Dual hybrid mode allows to combine position-position control for small movements and position-velocity control for arduous ones, though this requires two distinct input sources, which complicate its integration to assistive scenarios. However, the observation of a sequential temporal coordination between the body and joystick in Dual mode suggests that it might be possible to infer the position-velocity control from body movements, using similar strategies shown in [23] for teleoperation and [24] for upper-prosthesis control, which generate velocity inputs once the position inputs respectively exhibit large or arduous motions.

V. CONCLUSION

In this paper, we have extended our approach for teleoperating a robotic manipulator in a nearby environment to 6 DoF tasks, which can find applications in both assistance scenarios and complex industrial operations requiring more than two hands. Our empirical findings indicate a preference for using our body-movements-based control over conventional joystick controllers, even for tasks involving orientation adjustments that may be physically demanding. However, it's important to note that the range of tasks that can be accomplished with this approach is still somewhat limited in range, and we have demonstrated that a hybrid dual control mode, incorporating the strengths of both position and velocity controllers, can be advantageous for such larger tasks.

Furthermore, we consistently observed that body motions initiate before joystick motions, even when the joystick performs larger movements than the body. This sequential pattern suggests the potential for automating velocity inputs by analyzing body motions, which could eliminate the requirement for an external input controller in the hybrid dual mode.

REFERENCES

- [1] C.-S. Chung, H. Wang, and R. A. Cooper, "Functional assessment and performance evaluation for assistive robotic manipulators: Literature review," *The Journal of Spinal Cord Medicine*, vol. 36, no. 4, 2013.

- [2] F. Parietti and H. H. Asada, "Supernumerary robotic limbs for aircraft fuselage assembly: body stabilization and guidance by bracing." *IEEE*, 2014, pp. 1176–1183.
- [3] M. Casadio, R. Ranganathan, and F. A. Mussa-Ivaldi, "The Body-Machine Interface: A New Perspective on an Old Theme," *Journal of Motor Behavior*, vol. 44, no. 6, pp. 419–433, Nov. 2012. [Online]. Available: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00222895.2012.700968>
- [4] R. K. Al-Halimi and M. Moussa, "Performing Complex Tasks by Users With Upper-extremity disabilities Using a 6-DOF Robotic Arm: A Study," *IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL SYSTEMS AND REHABILITATION ENGINEERING*, 2016.
- [5] "Virtuose 6D RV - HAPTION SA." [Online]. Available: <https://www.haption.com/fr/products-fr/virtuose-6d-fr.html>
- [6] V. M. Hung and U. J. Na, "Tele-operation of a 6-DOF Serial Robot Using a New 6-DOF Haptic Interface."
- [7] F. Lopez, C. Reao, A. Rosenqvist, M. Morris, and S. Tosunoglu, "FARA: Framing Assembly Robotic Arm System for Construction Sites," 2017.
- [8] A. Campeau-Lecours, U. Cote-Allard, D.-S. Vu, F. Routhier, B. Gosselin, and C. Gosselin, "Intuitive Adaptive Orientation Control for Enhanced HumanRobot Interaction," *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*.
- [9] L. Ramli, "Control strategies for crane systems: A comprehensive review," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017.
- [10] Kinova, "Watch Laura in Action With Her Kinova Jaco Assistive Robotic Arm." 2023. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=UB9umogPnO8>
- [11] I. Rulik, S. H. Sunny, I. I. Zarif, B. Brahmi, S. I. Ahamed, K. Schultz, I. Wang, T. Leheng, J. P. Longxiang, and M. H. Rahman, "Control of a Wheelchair-Mounted 6DOF Assistive Robot With Chin and Finger Joysticks," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 9, 2022.
- [12] F. Rizzoglio, M. Giordano, F. A. Mussa-Ivaldi, and M. Casadio, "A Non-Linear Body Machine Interface for Controlling Assistive Robotic Arms," *IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING*, vol. 70, no. 7, 2023.
- [13] Won Kim, F. Tendick, S. Ellis, and L. Stark, "A comparison of position and rate control for telemanipulations with consideration of manipulator system dynamics," *IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 3, no. 5, pp. 426–436, Oct. 1987. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1087117/>
- [14] R. C. Lincoln, "Visual tracking: III. The instrumental dimension of motion in relation to tracking accuracy." *Journal of Applied Psychology*, vol. 37, no. 6, pp. 489–493, Dec. 1953. [Online]. Available: <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/h0060608>
- [15] R. J. Jagacinski, D. W. Repperger, M. S. Moran, S. L. Ward, and B. Glass, "Fitts' Law and the Microstructure of Rapid Discrete Movements," *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, no. 6(2), pp. 309–320, 1980.
- [16] A. Maravita and A. Iriki, "Tools for the body (schema)," *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 8, no. 2, pp. 79–86, Feb. 2004. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364661303003450>
- [17] M. Pazzaglia and M. Molinari, "The embodiment of assistive devices from wheelchair to exoskeleton," *Physics of Life Reviews*, vol. 16, pp. 163–175, Mar. 2016. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1571064515002110>
- [18] Y. Sato, T. Kawase, K. Takano, C. Spence, and K. Kansaku, "Incorporation of prosthetic limbs into the body representation of amputees: Evidence from the crossed hands temporal order illusion," in *Progress in Brain Research*. Elsevier, 2017, vol. 236, pp. 225–241. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079612317301048>
- [19] "SpaceMouse Compact - Official 3Dconnexion UK store." [Online]. Available: <https://3dconnexion.com/us/product/spacemouse-compact/>
- [20] . Gonzlez, "Measurement of areas on a sphere using Fibonacci and latitude-longitude lattices," *Mathematical Geosciences*, vol. 42, no. 1, pp. 49–64, Jan. 2010, arXiv:0912.4540 [math]. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/0912.4540>
- [21] E. B. Torres and D. Zipser, "Simultaneous control of hand displacements and rotations in orientation-matching experiments," *Journal of Applied Physiology*, vol. 96, no. 5, pp. 1978–1987, May 2004. [Online]. Available: <https://www.physiology.org/doi/10.1152/japplphysiol.00872.2003>
- [22] M. H. Kroll and K. Emancipator, "A theoretical evaluation of linearity," *Clinical chemistry*, vol. 39, no. 3, pp. 405–413, 1993, publisher: Oxford University Press.
- [23] L. Dominjon, A. Lecuyer, J. Burkhardt, G. Andrade-Barroso, and S. Richir, "The "Bubble" Technique: Interacting with Large Virtual Environments Using Haptic Devices with Limited Workspace," in *First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*. Pisa, Italy: IEEE, 2005, pp. 639–640. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1407038/>
- [24] M. Legrand, N. Jarrasse, E. d. Montalivet, F. Richer, and G. Morel, "Closing the Loop Between Body Compensations and Upper Limb Prosthetic Movements: A Feasibility Study," *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, vol. 3, no. 1, pp. 230–240, Feb. 2021. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9311187/>

Controlling a motion extender without end-effector task explicitness

Alexis Poignant¹, Mathilde Legrand², Guillaume Morel¹, Nathanaël Jarrassé^{1,3}

Abstract— We consider the problem of controlling a *motion extender*, i.e. an assistive robotic manipulator that extends the movement capabilities of a human to which it is attached, such as a prosthesis or a supernumerary limb. In particular, we investigate the possibility for the motion extender controller to implicitly infer the position and orientation of the end-effector targeted by the user, without detecting motor intentions through external signals (such as gaze tracking or signals from brain-computer interfaces). To do so, we rely on observing the user’s posture, and we compute an extender posture that minimizes an overall postural cost-function. We show that moving the extender slowly enough is then sufficient to efficiently reach the unknown user’s goal, while optimising a postural criterion for the redundant human+robot system. The concept is presented and applied to a virtual handheld motion extender, illustrating the robustness of the method, which provides a simple coupling between the user and the robotic tool without task explicitness.

Index Terms— Wearable Robots, Physically Assistive Devices

I. INTRODUCTION

The serial connection of two systems allows their capacities to be combined for improved performance. This is particularly interesting when the combination results in a kinematically redundant system, opening up the possibility of a role distribution between two subsystems. This paradigm was largely explored in the 1990s by combining two robotic systems through the development of macro-micro manipulation or mobile manipulators. These early works promoted a centralised approach to control. Namely, a global primary task is formulated, possibly complemented by a null-space task that optimises a cost function. A control algorithm then drives all the actuators of the global structure simultaneously to complete the task. With this approach, the addition in series of a second robot, with motor capacities different from those of the proximal robot, allows to refine the precision [1], to increase the bandwidth [2], [3], improve stability [4], suppress endpoint vibrations [5], regulate contact forces with unknown environment [6] or optimise manipulability [7].

In this paper we consider a different configuration: the serial combination of two systems controlled by two independent controllers, such as a wearable robotic device and its human operator. In such human-centered scenario, the user aims to position the end-effector of the overall system, while the distal robotic device is expected to actively participate in the task completion, as seen Fig.1.

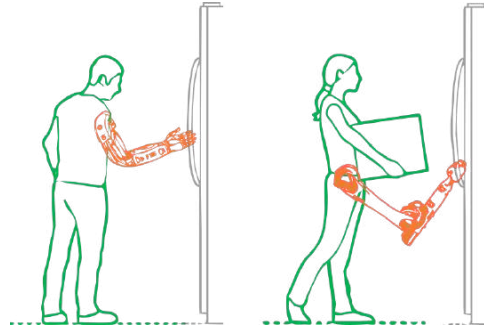


Fig. 1: Two examples of a human user (green), wearing a motion extender (prosthesis / supernumerary limb, orange). Both the human and the motion extender actively participate in the task, e.g opening a door.

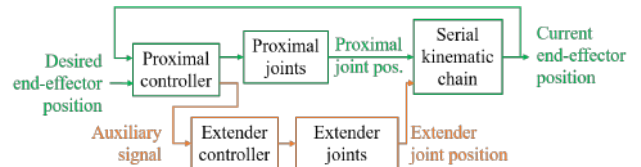


Fig. 2: Controlling a motion extender with auxiliary signals comes down to a centralized control approach with two parallel control chains for moving the end-effector.

To solve this problem, the extender can be controlled using auxiliary input signals directly generated by the human. In fact, as shown in Fig. 2, this corresponds to a centralised approach, as the user controls both their own motions (through their motor control system) and the extender (through auxiliary signals).

This paradigm is particularly observed in wearable assistive devices. Examples include hand-held robotic tools [8], [9], prostheses [10] or supernumerary robotic limbs [11], [12]. Auxiliary signals for these applications include joysticks or buttons [9], electromyograms [13], electro-oculograms [14], brain-computer interfaces [15] or direct mapping of unused and redundant joints, such as feet [16] or shoulders [17].

However, though this centralised approach is particularly efficient for robot-robot systems, it extends with difficulties to the human motor control system. For example, in a myo-electric controlled prosthetic arm, the generation of an EMG signal creates two parallel control chains: the natural movement (through human motor actions) and the robotic extender movement (through muscle contraction). Therefore, controlling both loops simultaneously can be particularly

¹Sorbonne Université, CNRS, INSERM, Institute for Intelligent Systems and Robotics (ISIR), Paris, France.

²GIPSA-Lab, Grenoble Institute of Technology, Grenoble, France

³Email: jarrassé@isir.upmc.fr

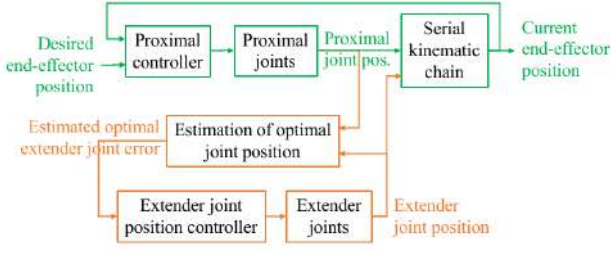


Fig. 3: Controlling a motion extender without any auxiliary controller. Both the end-effector desired position and the corresponding optimal joint posture are estimated from joint position measurement.

counter-intuitive: as the user prefers using its natural motor control loop, it usually leads to a limited use of the prosthesis, and therefore to strong compensatory motions [18].

In this paper, we present a control architecture that suppresses the need for auxiliary signal control. The general concept is presented in Sec. II. In Sec. III we implement a serial human-robot combination with the proposed motion extender controller and provide experimental results, analysing the dynamics of the overall system for different gains of the controller, as well as studying the response and performance of the user using the system for the first time.

II. CONTROL ARCHITECTURE

Instead of using an auxiliary signal, as the human motions actively participate in achieving the task, we aim at detecting its intention through its body motions. To do so, we propose to construct an independent loop with the following elements: i) observation of the overall system posture (user + device); ii) estimation of the goal of the user and computation of the overall optimal joint posture corresponding to this goal. The latter is fed to the extender position controller as shown in Fig. 3.

A. Kinematics

We consider a motion extender serially connected to a user. The proximal human system \mathcal{P} has a joint configuration $\mathbf{q}_p \in \mathbb{R}^{n_p}$ and the operational space configuration between its base (feet, hips, etc.) and its end-effector (shoulder, elbow, hand) writes:

$$\mathbf{x}_p = \mathbf{f}_p(\mathbf{q}_p). \quad (1)$$

The distal robotic system \mathcal{E} has a joint configuration $\mathbf{q}_e \in \mathbb{R}^{n_e}$ and the operational space configuration between its base and its end-effector writes:

$$\mathbf{x}_e = \mathbf{f}_e(\mathbf{q}_e). \quad (2)$$

The base of \mathcal{E} corresponds to the end-effector of \mathcal{P} , and the overall system's forward kinematics writes:

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{q}) = \mathbf{f}\left(\begin{bmatrix} \mathbf{q}_p \\ \mathbf{q}_e \end{bmatrix}\right) = \mathbf{x}_p \circ \mathbf{x}_e = \mathbf{f}_p(\mathbf{q}_p) \circ \mathbf{f}_e(\mathbf{q}_e), \quad (3)$$

where \circ denotes the composition in operational space configuration. The velocity transmission model writes:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}_{\mathbf{x}|\mathbf{q}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_{\mathbf{x}|\mathbf{q}_p}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}_p + \mathbf{J}_{\mathbf{x}|\mathbf{q}_e}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}_e. \quad (4)$$

We assume that $n_p \geq n_x$, and $\mathbf{J}_{\mathbf{x}|\mathbf{q}_p}$ is of full rank n_x . In other words, \mathcal{P} can entirely govern the end-effector even with a still motion extender, while \mathcal{E} brings (extra) redundancy. This is almost always observed in wearable robotics, whether prosthesis or supernumerary limbs.

B. Hypotheses on the proximal controller

In order to derive a controller for the extender, which is the main focus of this paper, we need to make hypotheses on the proximal controller, *i.e.* the human user. We first assume that the user aims at reaching an unknown goal \mathbf{x}_d . Then, we assume that the extender moves slowly, and therefore that, under a quasi-static assumption, the user considers the extender still at all time, meaning that the extender, from the human point of view, is a rigid tool.

Based on this simple assumption, we then model the human based on a Spatial Trajectory Formulation with Direction Mapping [19], which has been used to model human manipulation using a tool. In this model, the user continuously calculates spatial directions that minimizes a task error in spatial space. These spatial directions are then computed as joint angle increments ε_{q_p} that solves the redundancy of the kinematic chain by minimizing a cost-function c_p . As we assumed that the user alone can always reach its goal \mathbf{x}_d with a still extender, the model writes:

$$\varepsilon_{q_p} = \underset{\varepsilon}{\operatorname{argmin}} c_p(\mathbf{q}_p + \varepsilon) \text{ s.t. } \mathbf{x}_d = \mathbf{f}\left(\begin{bmatrix} \mathbf{q}_p \\ \mathbf{q}_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}\right), \quad (5)$$

where c_p is a scalar postural cost function. The kinematic constraint reflects the quasi-static assumption of reaching a desired goal \mathbf{x}_d using a rigid tool of constant joint configuration \mathbf{q}_e . This constraint supposes that the human operator correctly estimates the tip of the extender \mathbf{x} at all time, which is observed even when the exact geometric configuration of the extender is not precisely estimated by the human motor control system, as the tip of the instrument can be located through *e.g.* vision.

The quasi-static assumption previously made is the only one that we make, and further hypotheses are not required.

C. Motion extender controller

Literature mostly refers on a secondary signal explicitly emitted by the proximal controller to pilot the distal device. Instead we propose an alternative approach based on the previous hypothesis of the human model. First, we re-use the quasi-static assumption: as the extender is slow enough, we assume that the human has always reached its goal, or at least intermediate goals toward a global goal. This means that the current end-effector position \mathbf{x} is the spatial position that we aim to reach at equilibrium. Similarly, as the spatial error is then null, we estimate an optimal postural increment ε_q for the whole device by minimizing a cost-function c_e :

$$\varepsilon_{\mathbf{q}} = \underset{\varepsilon}{\operatorname{argmin}} c_e(\mathbf{q} + \varepsilon) \text{ s.t. } \mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{q} + \varepsilon), \quad (6)$$

where c_e is a scalar postural cost function for the whole system.

The optimization problem formulated in Eq. (6) outputs the full optimal joint configuration $\varepsilon_{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \hat{\varepsilon}_{\mathbf{q}_p} \\ \varepsilon_{\mathbf{q}_e} \end{bmatrix}$ where $\hat{\varepsilon}_{\mathbf{q}_p}$ an estimation of the increment that the user should perform to reach a comfortable position (according to c_e , which we discuss in Sec. II-E) and $\varepsilon_{\mathbf{q}_e}$ the extender joint increment that is then used to feed the extender position controller.

To implement the extender joint position controller, there is no specific need for a high bandwidth position controller (concordant to the quasi-static assumption) that we could obtain from torque controlled actuators and inverse dynamics. Rather, we propose to use velocity controlled actuators and a basic resolved rate motion controller:

$$\dot{\mathbf{q}}_{e_c} = \lambda \varepsilon_{\mathbf{q}_e}, \quad (7)$$

where λ is a positive gain and $\dot{\mathbf{q}}_{e_c}$ is the input of velocity controlled actuators. In Sec. III, we will experimentally study how the extender controllers may lead to instability, in particular when the gain λ becomes too large.

D. Equilibrium

In the present section, we assume that the system is stable and study its equilibrium configuration \mathbf{x}_{eq} for a given \mathbf{x}_d .

We denote the joint configuration at the equilibrium by: $\mathbf{q}_{eq} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{p,eq} \\ \mathbf{q}_{e,eq} \end{bmatrix}$.

As we assumed that the system has converged, we can integrate Eq. (5) and Eq. (6):

$$\mathbf{q}_{p,eq} = \underset{\mathbf{q}_p}{\operatorname{argmin}} c_p(\mathbf{q}_p) \text{ and } \mathbf{x}_d = \mathbf{f} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{q}_{p,eq} \\ \mathbf{q}_{e,eq} \end{bmatrix} \right) \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{q}}_{p,eq} \\ \mathbf{q}_{e,eq} \end{bmatrix} = \underset{\mathbf{q}}{\operatorname{argmin}} c_e(\mathbf{q}) \text{ and } \mathbf{x} = \mathbf{f} \left(\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{q}}_{p,eq} \\ \mathbf{q}_{e,eq} \end{bmatrix} \right) \quad (9)$$

with $\hat{\mathbf{q}}_{p,eq}$ the optimal proximal configuration estimated by the extender through c_e .

From Eq. (8), one ensures that the goal \mathbf{x}_d is reached for a given $\mathbf{q}_{e,eq}$, and therefore in Eq. (9) $\mathbf{x} = \mathbf{x}_d$. By combining the kinematic constraints from Eq. (8) and Eq. (9) this leads to :

$$\mathbf{f} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{q}_{p,eq} \\ \mathbf{q}_{e,eq} \end{bmatrix} \right) = \mathbf{f} \left(\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{q}}_{p,eq} \\ \mathbf{q}_{e,eq} \end{bmatrix} \right), \quad (10)$$

meaning that both solutions from Eq. (8) and Eq. (9) share the same effector position, as well as the same extender configuration $\mathbf{q}_{e,eq}$, but may have different optimal human configurations $\mathbf{q}_{p,eq}$ and $\hat{\mathbf{q}}_{p,eq}$ depending of c_p and c_e respectively.

In other words, c_e determines an optimal configuration $\mathbf{q}_{e,eq}$ of the extender, while c_p then determines an optimal posture $\mathbf{q}_{p,eq}$ using a given rigid tool of configuration $\mathbf{x}_{e,eq} = \mathbf{f}_e(\mathbf{q}_{e,eq})$:

$$\mathbf{q}_{p,eq} = \underset{\mathbf{q}_p}{\operatorname{argmin}} c_p(\mathbf{q}_p) \text{ s.t. } \mathbf{x}_d = \mathbf{f}_p(\mathbf{q}_p) \circ \mathbf{f}_e(\mathbf{q}_{e,eq}) \quad (11)$$

E. Choosing c_e

Based on the previous section, it is clear that the cost function c_e impacts the null-space configuration of the overall system, and should be chosen such as it keeps the user in a comfortable posture. The ideal choice would be:

$$c_e \left(\begin{bmatrix} \mathbf{q}_p \\ \mathbf{q}_e \end{bmatrix} \right) = c_p(\mathbf{q}_p). \quad (12)$$

This would lead to Eq. (8) and Eq. (9) sharing the exact same solution. However, c_p is obviously unknown.

Yet, as it was shown in Sec. II-D, the command is robust to model errors and the goal \mathbf{x}_d is theoretically always reached. Therefore, one should not aim at perfectly identifying c_p but rather choose c_e such as the user always converges towards a relatively comfortable posture. Applied scenarios previously used a fixed reference posture [20] or an ergonomic based cost-function [21] but could include balance, manipulability or energy-based cost-functions.

F. Algorithm implementation

We assume that, at all time, the postural configuration \mathbf{q} , the forward kinematics $\mathbf{f}(\mathbf{q})$ and the associated jacobian matrix $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ are measured and fully known (usually from motion capture systems or inertial measurements units). In the general case, the resolution of Eq. (6) might not have a direct analytical solution. To compute the optimal position, as the cost-function c_e would usually be continuous and derivable, we propose to iteratively solve the problem by computing a null-space reconfiguration using the gradient of c_e :

$$\begin{array}{l} \text{INITIALIZATION} \\ \mathbf{q}_{eq} \leftarrow \mathbf{q} \\ \delta \leftarrow \infty \\ \text{ITERATIVE LOOP} \\ \text{while } \|\delta\| > \tau, \\ \quad \delta \leftarrow \mathbf{J}^\dagger(\mathbf{q}) [\mathbf{f}(\mathbf{q}) - \mathbf{f}(\mathbf{q}_{eq})] \\ \quad \quad - [\mathbf{I} - \mathbf{J}^\dagger(\mathbf{q})\mathbf{J}(\mathbf{q})] \operatorname{grad} c_e(\mathbf{q}) \\ \quad \mathbf{q}_{eq} \leftarrow \mathbf{q}_{eq} + \delta \\ \text{end while} \end{array} \quad (13)$$

with \dagger the generalized inverse operator, and \mathbf{I} the identity matrix.

Each step δ is formed of two terms: the task-space step $\mathbf{J}^\dagger(\mathbf{q}) [\mathbf{f}(\mathbf{q}) - \mathbf{f}(\mathbf{q}_{eq})]$, which ensures that the forward kinematics is constant, and therefore the respect of the constraint $\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{q}_{eq})$ from Eq. (6) at all time; and the null-space step $[\mathbf{I} - \mathbf{J}^\dagger(\mathbf{q})\mathbf{J}(\mathbf{q})] \operatorname{grad} c_e(\mathbf{q})$ that locally minimizes the cost function c_e . The convergence is obtained when the step δ is as small as a tunable positive tolerance threshold τ .

Finally, we compute the error $\varepsilon_{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_{eq} - \mathbf{q}$.

This algorithm, due to its initialization and iterative solving, is fast to compute, and converges toward a solution \mathbf{q}_{eq} which is usually a local minima. While in optimal solving,

local minima are usually undesired, in worn robotics such as prostheses, it ensures that the motion expected by the human would be relatively close to its starting position, avoiding arduous postural reconfigurations.

III. MATERIAL AND METHODS

To further investigate the dynamics and robustness of the approach, we performed experiments involving a human-actuated proximal device, manipulating a virtual extender with a various gain λ (see Eq. (7)).

A. Model

In order to study the specific role of the proposed proximal-extender coupling approach on the end-effector positioning behaviour, we consider a simple system of two prismatic joints serially connected such as we perfectly know the kinematics of the system. The system is depicted in Fig. 5, with q_p the proximal joint linear position and q_e the extender joint position.

The system $\mathcal{P} + \mathcal{E}$ is redundant, since the two joint axes are coincident. Each sub-system is able to perform the task alone without redundancy. Thus, $\mathbf{J}_{x|q_e} = \mathbf{J}_{x|q_p} = 1$, *i.e.*:

$$x = q_p + q_e \quad (14)$$

$$\dot{x} = \dot{q}_p + \dot{q}_e, \quad (15)$$

where bolded symbols have been replaced by plain symbols to indicate scalar values rather than vectors.

We can note that q_p actually depends on the whole kinematics of the human arm, but, as shown in Sec. II-D, the choice of c_e will regulate the task distribution between the two prismatic joint positions and thus $q_{e,eq}$, while the human will itself regulate the kinematics of its own arm (shoulder, elbow, etc.) ensuring the correct $q_{p,eq}$.



Fig. 4: View of a participant with the experimental set-up wearing the Microsoft HoloLens headset and manipulating the tangible interface.

The system is displayed using an augmented-reality Microsoft HoloLens V2 headset, and the proximal joint is controlled by the participants using a linear potentiometer fitted with a squared handle as a tangible interface, shown on Fig. 4. Figure. 5 shows a first person view of the experiment.

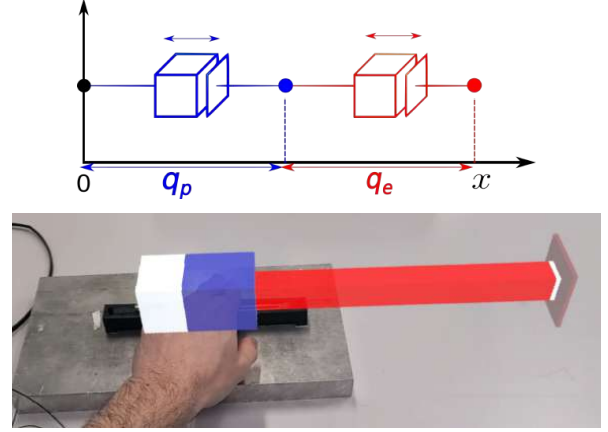


Fig. 5: Kinematic model (top) and first Person View of the setup from the HoloLens headset (bottom). The proximal (blue) joint is controlled by the subject hand through the tangible interface. The extender (red) joint is the motion extender controlled by the previously defined Eq. (18). The white part on the left is always still and represents a rigid link to the table. Target to be reached is represented by the right grey square.

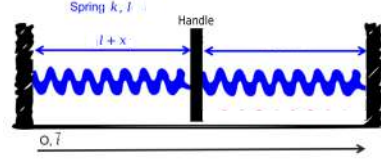


Fig. 6: Schematic of the manipulated device with two springs

The proximal prismatic joint, in blue, is governed by the measurement of the potentiometer displaced by the hand. The system is calibrated in such a way that the movement of the hand is reproduced as the movement of the proximal virtual device.

Finally, there are two springs attached to the handle, as seen in Fig. 6 in order to create, for the human operator, an energetic cost when moving the first joint, inspired by Eq. (5). These springs allow us to have a simple estimation on the effect of c_e and its choice relatively to an estimated c_p (which normally depends on the whole kinematics of the arm of the participants) that we approximate as the force applied by the springs, proportional to the square norm of q_p :

$$c_p(q_p) = \|q_p\|^2, \quad (16)$$

The extender joint (in red on Fig. 5) is then piloted by the controller depicted in Eq. (6) using a cost-function $c_e(\mathbf{q})$ defined as:

$$c_e(\mathbf{q}) = \|D_Z(q_p)\|^2, \quad (17)$$

with $D_Z(\cdot)$ a $\pm 1\text{mm}$ dead-zone around 0. This dead-zone allows the global system to reach a permanent stabilized state despite measurement noise or subject's tremor. However,

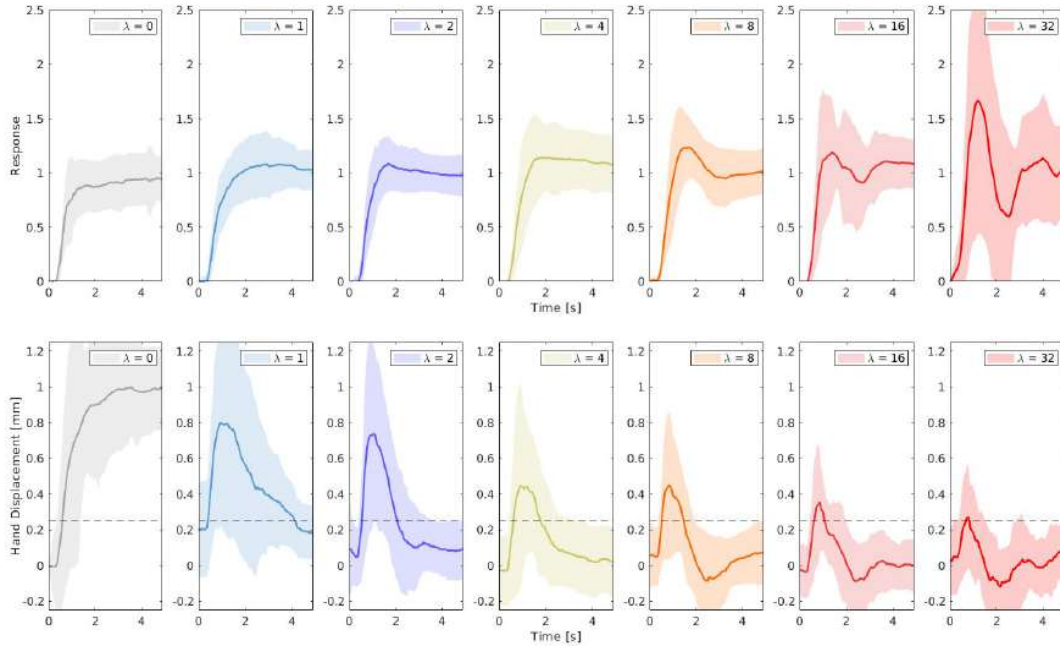


Fig. 7: Normalized (with respect to the distance) end-effector mean trajectory ($x(t)$, top) and hand mean trajectory ($q_p(t)$, bottom) out of the 20 repetitions per λ for 1 participant. The pale area corresponds to the standard deviation around the mean curve. The dotted line indicates the dead-zone.

this means that $c_e \neq c_p$, and that the equilibrium position of the proximal joint position $q_{p,eq}$ is not forced to zero but somewhere in the dead-zone interval. As demonstrated Sec. II-D, this difference should not prevent the user from reaching its goal but the solutions from Eq. (8) and Eq. (9) can differ by up to the length of the dead-zone.

Finally, the motion extender velocity controller from Eq. (7) directly computes:

$$q_{e,c} = \begin{cases} \lambda(q_p - Z) & \text{if } q_p > Z \\ \lambda(q_p + Z) & \text{if } q_p < -Z \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (18)$$

with $Z > 0$ the scalar length of the dead-zone equal to 1mm.

B. Participants

Twelve asymptomatic participants, aged 20-30, volunteered for this experimental study. The following study was carried out in accordance with the recommendations of Sorbonne Université ethics committee CER-SU, which approved the protocol. The participants gave their informed consent, in accordance with the Declaration of Helsinki.

C. Protocol

Before the experiment, participants have a short free time (approx. 1min) manipulating the handle using their dominant hand, and looking around with the AR headset, without any target to reach and a rigid extender. Then, the task objective is provided as "reaching the target as fast and precisely as possible, no matter the behaviour of the red robotic system". No indications were given regarding what would be the behaviour of the robotic red joint.

At first, the participants performed 20 repetitions of a reaching task toward a step goal (virtual square seen on the right of Fig. 5) incrementally displaced by a 4mm step, 10 forward then 10 backward. This was made with a gain $\lambda = 0$, i.e. performing only the task using the proximal part, pushing on the springs, with the extender joint remaining still. Each repetition lasts 5s, even if the participant does not reach the target. At start, the target is red. When the participant reaches the target with ± 1 mm, the target turns green, providing them a visual feedback of their task achievement.

Then each participant performs those same 20 repetitions for different lambda gain. Gains are increased following the sequence 1, 2, 4, 8, 16, 32. Each repetition is composed of target steps of 4, 6 or 8 mm (pseudo-randomly chosen), forward and backward. This uncertainty in the step-size partially limits the appearance of an automatic learning behaviour from the participants.

D. Assessment metrics

a) *Error-based metrics*: To assess the performance of the participants and the controller, we consider three metrics for each repetition.

- *Normalized stationary state error over the last 2.5 seconds* ε , defined as:

$$\varepsilon = \frac{1}{T_{step}} \int_{2.5}^5 |x(t) - T| dt \quad (19)$$

with $x(t)$ the end-effector position, T the target position, T_{step} the size of the step value. 2.5s were chosen as, for $\lambda = 0s^{-1}$, 95% of the trials had converged, thus

being an indication regarding the task performed by the human alone, with a still extender.

- *Response time at 66% $\tau_{66\%}$* , defined as:

$$\tau_{66\%} = \min_{\tau} \left\{ \forall t > \tau, x(t) \in \left[T \pm \frac{1}{3} T_{step} \right] \right\} \quad (20)$$

- *Maximum overshoot in percentage D* , defined as:

$$D = \begin{cases} 0, & \text{if } \forall t, x(t) < T \\ \frac{1}{T_{step}} \max_{t \in [0;5]} \{x(t) - x(0)\}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

b) *Cost-based Metrics*: We also consider two metrics to evaluate the effort provided by the subject, each defined per repetition.

- *Elastic Potential Energy E_H* . At rest the global force \vec{F} generated by the two springs 1 and 2 on the handle is:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = -kx_1 \vec{i} + kx_2 \vec{i} = \vec{0} \quad (22)$$

with x_1 and x_2 the elongation from rest position for spring 1 and 2, k their stiffness and \vec{i} the unit vector defining the springs axis. After a displacement x from rest position:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = -k(x_1 + x) \vec{i} + k(x_2 - x) \vec{i} = -2kx \vec{i} \quad (23)$$

Therefore the work done to elongate the spring is equivalent to:

$$W = \frac{1}{2} kx^2 \quad (24)$$

In order to approximate the required work done by the hand during the whole task, we calculate the signal energy of the work:

$$E_H = \int_0^5 x(t)^2 dt \quad (25)$$

where x is the position of the hand (the constant $\frac{1}{2}k$ not being taken into account).

- *Arc-length of the hand path, L_H* defined as:

$$L_H = \int_0^5 \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dt} \right)^2} dt \quad (26)$$

IV. RESULTS

A. Qualitative Analysis at Individual Level

An average response out of all the repetition per gain for one participant is provided on Fig. 7(top). Similar results are observed for every participant but there exists a high inter-variability between subjects, as seen in Fig. 9 which, once averaged, standardises the mean step-responses. This participant was selected as reflecting the average behaviour.

When $\lambda = 0$, the trajectory is slightly jittery, because of the forces from the springs leading the subject's hand to tremble. Then, at gain 1, 2 and 4, the trajectory is smoother. At 8, an important overshoot starts to appear, and oscillations begin at gain 16 and 32. We can note that the averaging mitigates this oscillatory behaviour, but the variations of the standard deviation show how important and various these

oscillations are, especially compared to the lower gains' standard deviation.

The associated hand displacement is also shown on Fig. 7(bottom). When $\lambda = 0$, the hand performs all the task, the extender being still. This leads to an expensive task for the user, which can be observed looking at the tremor of the trajectory. Then, as the gain increases, the hand initiates the movement and then returns to its original position, where the energetic cost of the spring is almost null. At high gain (16 and 32) oscillations appear and force the participant to perform a second hand motion in order to correct the position of the end-effector.

It can be noted that, due to the dead-zone in c_e , the subject's hand does not come back strictly to 0 but somewhere within the dead-zone. This is an example of an equilibrium where c_p and c_e are not equal. Yet, the control is robust to model errors and still converges, despite the equilibrium being sub-optimal to c_p and optimal to c_e .

B. Quantitative Analysis of Group Results

The median and standard variation of the three error-based metrics for the different λ values are summed on Fig. 8. According to the Shapiro-Wilk test, data groups are non-normal. In order to observe significant separability between the data for each gain λ , we performed the non-parametric Mann-Whitney-Wilcoxon test for each pair of gain λ for each performance (Fig. 10). At separability $p = 0.05$, there exists no significant difference between the gains 1, 2, 4 for any of the performances, while there exists a significant separability between the group of gains 1, 2, 4 and the group of gains 16 and 32. Moreover, there is no separability for the permanent state error between gains 0 and 1, 2, 4; the overshoot being the only performance degraded. The permanent state error is even slightly improved, due to some participants having difficulties to maintain the springs far away from their rest position.

It is however important to note that there exists important differences between the participants (Fig. 9), as some subjects had much trouble to perform with gain $\lambda = 8$ (such as participants 1 and 8, with red bars on the graph) while other had still very good performances with gain 16 (participants 4 or 7, in green). Yet, gains 2 and 4 have shown great results for all of the participants.

TABLE I: Average hand path arc length and Elastic potential energy per repetition for each λ

Cost-based metrics							
λ	0	1	2	4	8	16	32
L_H	0.75	0.79	0.76	0.66	0.59	0.72	0.73
E_H	27	0.32	0.17	0.10	0.07	0.05	0.04

The difference of energy between the task without control (gain $\lambda = 0$) and with control are considerable (Table I). Obviously these are two different tasks, but it shows how undesirable costs can be considered as criteria and reduced using kinematically redundant properties and the presented

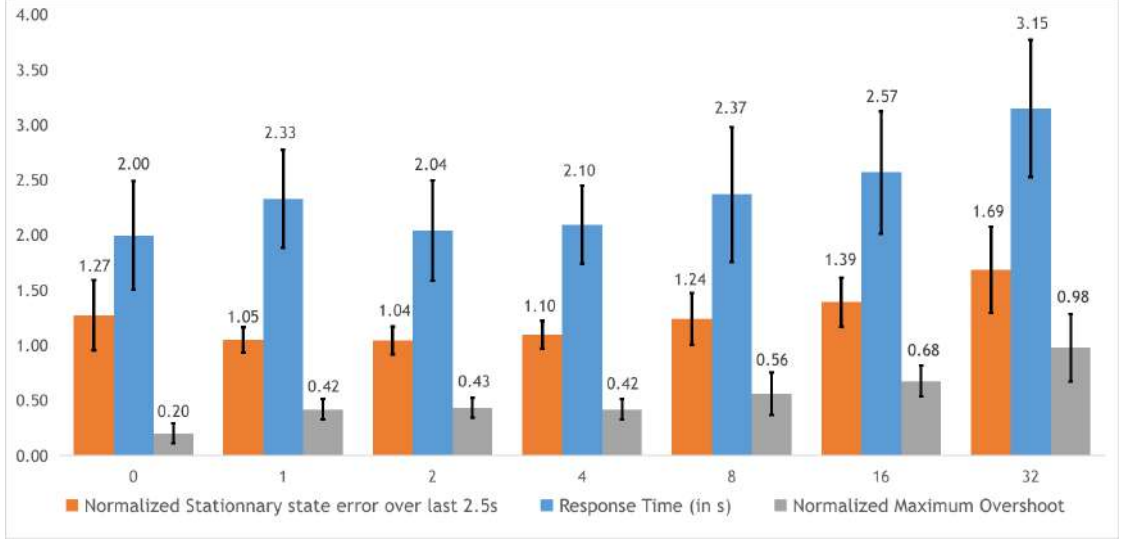


Fig. 8: Median and standard deviation of the three error-based metrics among all participants per gain λ .

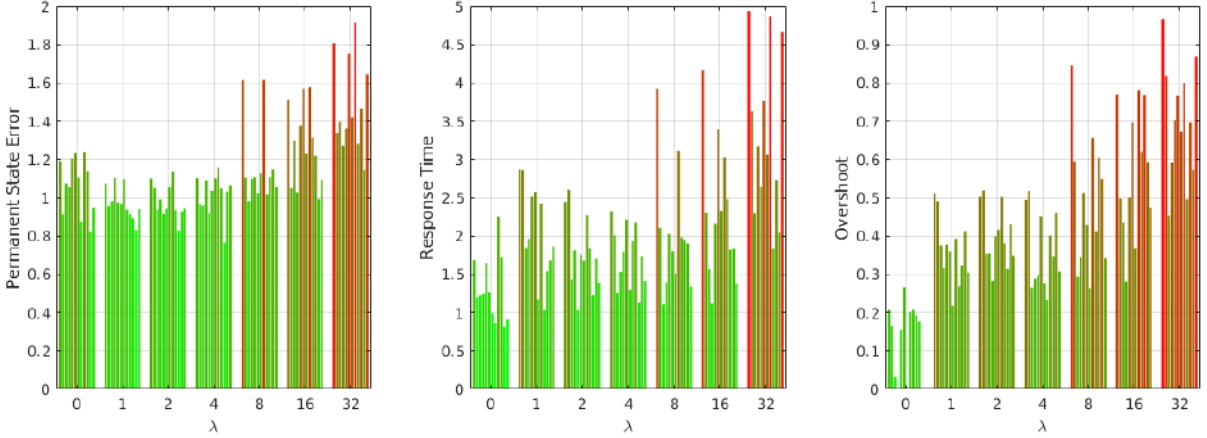


Fig. 9: Median of the metrics for each participant per gain λ . From left to right: permanent state error, response time and overshoot. Linear continuous coloring from green to red, green being the minimal value for all subjects and gains per metric, and red the maximal one.

control law. The hand path arc length between gains 0 and 1 first slightly increases, due to the subject rejecting the slow perturbation induced by the extender, then decreases, the control law significantly helping the subject. Finally, at gain 16 and 32, the path increases again due to the oscillations caused by the close instability of the control law, the subjects having to move back and forth between the positive and negative dead-zone value to perform an extender displacement in an opposite direction, correcting their overshoot.

V. DISCUSSION AND PERSPECTIVES

The bandwidth of human movement is known to be in the range of 2Hz to 5Hz, and thus presents a cut-off pulse ω_c between 12.6 and 31.4 rad/s [22]. Based on both the effector trajectories Fig. 7(top), and the performance results Fig. 8, we observe a strong degradation in stability as λ gets

closer to the pulsation range of the human motion, causing oscillations at high gains. At very high gain, it even seems human participants tend to change their motor behaviour to maintain their performance level, switching from a smooth trajectory control to a burst strategy, consisting of short hand impulses, which allows them to avoid instability (this is facilitated by the dead-zone), but still degrades precision and increases overshoot. This observation matches the quasi-static assumptions of our controller, as the degradation appears as the gain λ gets closer to $12s^{-1}$.

However, for λ ranging from 1 to 4, there are no statistical differences in performance as seen in Fig. 10, while the amplitude of the hand movements decreases significantly, offering a large reduction in energy cost E_H (Table I) without affecting their natural motor strategy. Between 0 and 4, we observed a slight increase in reaction time as well as an



Fig. 10: pValues of the 2-by-2 Mann-Whitney-Wilcoxon tests. From left to right: the permanent state error, the response time and the overshoot. The higher the p-value, the bluer is the corresponding cell. White cells mean that the metrics are significantly separable for the two gains.

overshoot due to the integral command, but the participants had never trained with our system, adapted immediately and showed good performances. With training, the observed overshoot could even be reduced and performance could still be improved, leading to the use of potentially higher gains while maintaining good precision performance.

Such a change in motor behaviour could also depend on the task range, for example, alternating between long and short reach distances. In this study, participants only reached targets between 4 and 8 mm away, and a higher gain could possibly be chosen for distant targets if response time is prioritised over accuracy. Alternatively, an adaptive gain depending on the value of the extension cost c_e could be considered.

However, for almost all of the λ gains tested, we observed that participants could perform the task with the gain λ in a wide range. Therefore, as stated in our quasi-static assumptions, the extender being slow compared to the user is sufficient enough to ensure that the user reaches his goal, while the overall structure optimises the cost function set by the extender. Furthermore, these results were observed despite the large inter-subject variability and the absence of prior training.

Nevertheless, we can note that since the extender in our experiments is virtual, there is no delay due to the dynamics of the robotic extender, the device reacts instantly. Such a delay could possibly increase instability phenomena and make it necessary to reduce the gain. A more detailed study of this issue should be carried out.

The main difficulty of this control law remains to find a cost function c_e , especially when performing a task requiring a high number of degrees of freedom, mixing both translations and rotations at the same time. We believe that the choice of this cost function is closely related to motor control studies. However, the controller is robust to model errors, allowing for approximate cost functions. Therefore, we believe that this cost function could be extended to more criteria than reference postures, such as balance, manipulabil-

ity or ergonomic indices [21], opening this control approach to more complex tasks.

Finally, the results presented in this paper were obtained on a 1 DOF linear task, which allowed us to fully know the system, but similar results have been observed in non-linear human-robot interactions, such as manipulation tasks using an upper limb prosthesis [23]. These previous results were observed using a simpler framework, specifically applied to prosthesis control, but coincide with the new generic formulation obtained in this study. Therefore, our following works will focus on combining this general formulation in a more complex cost-function in an applied scenario, such as manipulating a supernumerary robotic limb with multiple degrees of freedom.

VI. CONCLUSION

The control law presented in this paper could allow to perform a wide variety of reaching tasks using a motion extender (such as a robotic tool, a prosthesis or a robotic supernumerary limb) without any prior knowledge of the said tasks, instead using a cost function based on the user's postural observation. Moreover, the position controller requires only a gain to be tuned, which can be chosen robustly in a wide band with while ensuring good performances and reducing the physical load of the user.

Therefore, we believe that the proposed approach could be an interesting tool for the control of motion extenders by a human operator. Indeed, despite constant progress in the decoding of motor intentions through physiological signals (such as gaze tracking or signals from brain-computer interfaces), it remains particularly challenging for current robotic motion extenders (prostheses, supernumerary limbs, hand-held robotic tools) to access information about the human operator's task and goal, while the use of auxiliary signals (EMG, BCI) remains cognitively costing for the operator to directly transmit its goal posture to the robotic device. The control approach proposed here overcomes this limitation and could pave the way towards a simpler coupling of human

bodies and wearable robotics.

REFERENCES

- [1] C. Hegao and Z. Quan, "The study of macro/micro manipulator system for fine manipulation quality and reliability," vol. 25, no. 28, pp. 352–355.
- [2] T. Yoshikawa, K. Hosoda, T. Doi, and H. Murakami, "Dynamic trajectory tracking control of flexible manipulator by macro-micro manipulator system," vol. 12, no. 2, pp. 299–303.
- [3] O. Egeland and J. Sagli, "Kinematics and control of a space manipulator using the macro-micro manipulator concept," in *29th IEEE Conference on Decision and Control*. IEEE, pp. 3096–3101 vol.6.
- [4] A. Sharon, N. Hogan, and D. E. Hardt, "The macro/micro manipulator: An improved architecture for robot control," vol. 10, no. 3, pp. 209–222.
- [5] J. Lew, D. Trudnowski, M. Evans, and D. Bennett, "Micro manipulator motion control to suppress macro manipulator structural vibrations," in *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3. IEEE, pp. 3116–3120.
- [6] J. Y. Lew, "Contact control of flexible micro/macro-manipulators," p. 6.
- [7] Y. Yamamoto and X. Yun, "Coordinating locomotion and manipulation of a mobile manipulator," p. 16.
- [8] A. Gregg-Smith and W. W. Mayol-Cuevas, "The design and evaluation of a cooperative handheld robot," in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, pp. 1968–1975.
- [9] A. H. Zahraee, J. K. Paik, J. Szewczyk, and G. Morel, "Toward the development of a hand-held surgical robot for laparoscopy," p. 5523951.
- [10] J. Ribeiro, F. Mota, T. Cavalcante, I. Nogueira, V. Gondim, V. Albuquerque, and A. Alexandria, "Analysis of man-machine interfaces in upper-limb prosthesis: A review," vol. 8, no. 1, p. 16.
- [11] B. Yang, J. Huang, X. Chen, C. Xiong, and Y. Hasegawa, "Supernumerary robotic limbs: A review and future outlook," vol. 3, no. 3, pp. 623–639.
- [12] D. Prattichizzo, M. Pozzi, T. Lisini Baldi, M. Malvezzi, I. Hussain, S. Rossi, and G. Salvietti, "Human augmentation by wearable supernumerary robotic limbs: review and perspectives," vol. 3, no. 4, p. 042005.
- [13] G. Li, A. E. Schultz, and T. A. Kuiken, "Quantifying pattern recognitionbased myoelectric control of multifunctional transradial prostheses," vol. 18, no. 2, pp. 185–192.
- [14] M. Duvinage, T. Castermans, and T. Dutoit, "Control of a lower limb active prosthesis with eye movement sequences," in *2011 IEEE Symposium on Computational Intelligence, Cognitive Algorithms, Mind, and Brain (CCMB)*. IEEE, pp. 1–7.
- [15] M. Vilela and L. R. Hochberg, "Applications of brain-computer interfaces to the control of robotic and prosthetic arms," in *Handbook of Clinical Neurology*. Elsevier, vol. 168, pp. 87–99.
- [16] L. Resnik, S. L. Klinger, K. Etter, and C. Fantini, "Controlling a multi-degree of freedom upper limb prosthesis using foot controls: user experience," vol. 9, no. 4, pp. 318–329.
- [17] H. Shimobayashi, T. Sasaki, A. Horie, R. Arakawa, Z. Kashino, and M. Inami, "Independent control of supernumerary appendages exploiting upper limb redundancy," in *Augmented Humans Conference 2021*. ACM, pp. 19–30.
- [18] A. Hussaini, A. Zinck, and P. Kyberd, "Categorization of compensatory motions in transradial myoelectric prosthesis users," vol. 41, no. 3, pp. 286–293.
- [19] D. Bullock, S. Grossberg, and P. H. Guenther, "A Self-Organizing Neural Model of Motor Equivalent Reaching and Tool Use by a Multijoint Arm," vol. 5, no. 4, p. 28, 1993.
- [20] M. Legrand, N. Jarrasse, E. d. Montalivet, F. Richer, and G. Morel, "Closing the loop between body compensations and upper limb prosthetic movements: A feasibility study," vol. 3, no. 1, pp. 230–240.
- [21] A. Poignant, M. Legrand, N. Jarrasse, and G. Morel, "Computing the positioning error of an upper-arm robotic prosthesis from the observation of its wearer's posture," 06 2021.
- [22] J. C. Perry, J. Rosen, and S. Burns, "Upper-limb powered exoskeleton design," vol. 12, no. 4, pp. 408–417.
- [23] M. Legrand, C. Marchand, F. Richer, A. Touillet, N. Martinet, J. Paysant, G. Morel, and N. Jarrass, "Simultaneous control of 2dof upper-limb prosthesis with body compensations-based control: A multiple cases study," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 30, pp. 1745–1754, 2022.

Posture-based hybrid position/velocity control for the teleoperation of a nearby robot

Alexis Poignant¹, Mathilde Legrand², Nathanaël Jarrassé^{1,3}, Guillaume Morel¹

Abstract—We consider the problem of controlling a *virtual link*, which is a virtual tool extending the movement capabilities of a human user. The effector of such virtual link allows the user to convey the desired position of a nearby real robotic end-effector. Our previous research has demonstrated that users can intuitively manipulate such link. However, their range of motion are inherently limited by the link’s length. Typically, this length would be adjusted using an auxiliary signal, such as joysticks or electromyography (EMG) signals. Nonetheless, such secondary inputs necessitate additional interfaces, and can be cognitively demanding for users.

In this paper, we propose an implicit method for extending the virtual link—i.e., without explicit task requirements—by analyzing the user’s hand position and minimizing a postural cost function. This approach eliminates the need for additional inputs, removing the double task issue for the users, while maintaining the same level of performance.

Index Terms—Telerobotics and Teleoperation

I. INTRODUCTION

For manipulation tasks in teleoperation, position-position control (i.e., directly mapping an operator’s motions to robotic motions) has proven to be more effective than velocity control. This approach enables better performance in terms of time [1], accuracy [2], and user-assessed preferences [3], while requiring no specific operator tuning, as it solely relies on geometric relations. However, position control is inherently limited by the operator’s kinematic capability, as the range of motion of the robotic effector is equal to that of the operator.

In previous works, we introduced the concept of a virtual link: the user manipulates a rigid tool, or wand, whose end-effector indicates a desired position to which the real robot’s effector is then servoed (Figure 1). Through a lever effect, this system allows for wide vertical and horizontal translation motions through rotations of the body, albeit at the cost of a reduced rotational space around these two axes. Thanks to its scaling effect (which depends on the length of the link), this orientation-to-position coupling enables the use of the torso or the head as well as the hand. We have demonstrated that such a virtual link is as intuitive and efficient as direct position-to-position mapping [4] and faster than velocity control [5]. However, the workspace depth remains limited.

To address this issue, position-to-position systems can include clutching [6] (where the user can temporarily de-clutch, freeze the robot, return to a comfortable position, and then re-clutch to reactivate the coupling) or scaling [7], which



Fig. 1: The setup of the virtual link involves a virtual end-effector (represented by a blue square) connected to the user’s hand via a virtual link (illustrated by a dotted blue segment). This connection can optionally be visualized through an augmented reality headset. The length of the link can either remain rigid, which limits the workspace’s depth, as depicted here, or be reconfigured using an auxiliary velocity input device, creating a hybrid position/velocity controller. A nearby robot has its end-effector servoed to follow the desired end-effector position indicated by the virtual link.

amplifies the user’s motions by a scaling factor. However, clutching can be time-consuming and physically exhausting for large motions, while scaling is sensitive to noise.

Therefore, in large workspace scenarios, velocity control is often preferred by users [8]. A third technique, called Bubble control, was introduced by Dominjon in 2005 [9]. This method employs position control within a comfortable bubble zone and switches to a rate-control zone at the boundaries of the user’s workspace. This technique has been shown to be faster and more precise compared to clutching and scaling [10].

However, in our virtual link coupling, employing the Bubble technique would mean temporarily breaking the link, which we aim to avoid. In our previous work, we also explored the use of an additional joystick as a secondary input. This auxiliary input allows for reconfiguring the link while still utilizing body motions for position control,

¹Sorbonne Université, CNRS, INSERM, Institute for Intelligent Systems and Robotics (ISIR), Paris, France.

²GIPSA-Lab, Grenoble Institute of Technology, Grenoble, France

³Email: jarrassé@isir.upmc.fr

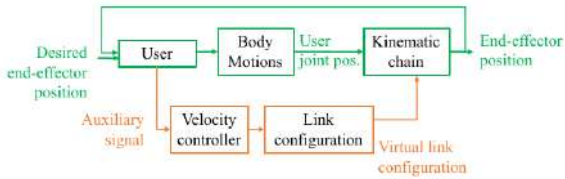


Fig. 2: The user wants the end-effector of the link (i.e. the global human+link system) to attain a desired position. Controlling the virtual link with an auxiliary input comes down to the use of two parallel control chains: the green chain represents body motions, i.e. manipulating a fixed link, while the orange chain represents the reconfiguration of such link using the auxiliary input (such as a joystick).

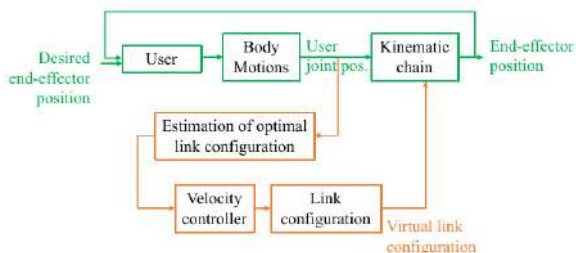


Fig. 3: Re-configuring the virtual link without any auxiliary controller. An optimal configuration of the link is estimated from the user’s joint position.

thereby achieving a hybrid position/velocity control without switching modes. This paradigm is already observed in wearable assistive devices, where users can use both their own body motions and a controller or the worn robot. Examples include handheld robotic tools [11], [12], prostheses [13], and supernumerary robotic limbs [14], [15]. Auxiliary signals for these applications include joysticks or buttons [12], electromyograms [16], electro-oculograms [17], brain-computer interfaces [18], or direct mapping of unused and redundant joints, such as feet [19] or shoulders [20].

However, this auxiliary approach creates two parallel control chains as seen Fig. 2: the natural movement (through human motor actions) and the robotic reconfiguration (through the auxiliary input). Controlling both loops simultaneously can be particularly counter-intuitive. For example, it has been observed that prosthesis users prefer using their natural motor control loop over the auxiliary control, usually leading to limited use of the prosthesis and, consequently, strong compensatory motions [21]. In a previous work, we observed similar patterns: when using an auxiliary joystick to reconfigure the virtual link, users would not use both their body motions and the joystick simultaneously, but rather sequentially, using first their body motions alone, and superposing the joystick’s control in a second phase [5].

In this paper, we present a control architecture (Fig. 3) that eliminates the need for auxiliary signal control by studying the user’s posture and controlling the length of the link

based on the minimization of a postural-based cost-function. The general concept is presented in Sec. II. In Sec. III, we implement a 1 DoF virtual link with the proposed controller and provide experimental results. We analyze the dynamics of the overall system for different controller gains and study the response and performance of users utilizing the system for the first time.

II. CONTROL ARCHITECTURE

Instead of using an auxiliary signal, as the human motions actively participate in achieving the task, we aim at detecting its intention through its body motions. To do so, we propose to construct an independent loop with the following elements: i) observation of the overall system posture; ii) estimation of the goal of the user and computation of the overall optimal posture corresponding to this goal. The latter is fed to the velocity controller as shown in Fig. 3.

A. Kinematics

We consider a link serially connected to a user. The human system \mathcal{H} has a joint configuration $\mathbf{q}_h \in \mathbb{R}^{n_h}$ and the operational space configuration between its base (feet, hips, etc.) and its end-effector (shoulder, elbow, hand) writes $\mathbf{x}_h = \mathbf{f}_h(\mathbf{q}_h)$. The distal link \mathcal{L} has a joint configuration $\mathbf{q}_l \in \mathbb{R}^{n_l}$ and the operational space configuration between its base and its end-effector writes $\mathbf{x}_l = \mathbf{f}_l(\mathbf{q}_l)$. The base of \mathcal{L} corresponds to the end-effector of \mathcal{H} , and the overall system’s forward kinematics writes $\mathbf{x} = \mathbf{x}_h \circ \mathbf{x}_l$, where \circ denotes the composition in operational space configuration. The velocity transmission model writes $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}_{\mathbf{x}|\mathbf{q}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$.

We assume that $n_h \geq n_x$, and $\mathbf{J}_{\mathbf{x}|\mathbf{q}_h}$ is of full rank n_x . In other words, the user \mathcal{H} can entirely govern the end-effector even with a rigid link, while the link \mathcal{L} brings (extra) redundancy.

B. Hypotheses on the proximal controller

In order to derive a controller for the virtual link, which is the main focus of this paper, we need to make hypotheses on the user. We first assume that the user aims at reaching an unknown goal \mathbf{x}_d . Then, we assume that the link reconfigures slowly, and therefore that, under a quasi-static assumption, the user considers the link still at all time, meaning that the link, from the human point of view, is a rigid tool.

Based on this simple assumption, we then model the human based on a Spatial Trajectory Formulation with Direction Mapping [22], which has been used to model human manipulation using a tool. In this model, the user continuously calculates spatial directions that minimizes a task error in spatial space. These spatial directions are then computed as joint angle increments ε_{q_h} that solves the redundancy of the kinematic chain by minimizing a cost-function c_h . As we assumed that the user alone can always reach its goal \mathbf{x}_d with a still link, the model writes:

$$\varepsilon_{q_h} = \underset{\varepsilon}{\operatorname{argmin}} c_h(\mathbf{q}_h + \varepsilon) \text{ s.t. } \mathbf{x}_d = \mathbf{f}\left(\begin{bmatrix} \mathbf{q}_h \\ \mathbf{q}_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}\right), \quad (1)$$

where c_h is a scalar postural cost function. The kinematic constraint reflects the quasi-static assumption of reaching a desired goal \mathbf{x}_d using a rigid tool of constant joint configuration q_l . This constraint supposes that the human operator correctly estimates the tip of the link \mathbf{x} at all time, which is observed even when the exact geometric configuration of the link is not precisely estimated by the human motor control system, as the tip of the instrument can be located through *e.g.* vision.

The quasi-static assumption previously made is the only one that we make, and further hypotheses are not required.

C. Virtual link controller

Literature mostly refers on a secondary signal explicitly emitted by the user (joystick or EMG signals for example) to pilot a worn device. Instead we propose an alternative approach based on the previous hypothesis of the human model. First, we re-use the quasi-static assumption: as the link is slow enough, we assume that the human has always reached its goal, or at least intermediate goals toward a global goal. This means that the current end-effector position \mathbf{x} is the spatial position that we aim to reach at equilibrium. Similarly, as the spatial error is then null, we estimate an optimal postural increment $\varepsilon_{\mathbf{q}}$ for the whole system by minimizing a cost-function c_l :

$$\varepsilon_{\mathbf{q}} = \underset{\varepsilon}{\operatorname{argmin}} c_l(\mathbf{q} + \varepsilon) \text{ s.t. } \mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{q} + \varepsilon), \quad (2)$$

where c_l is a scalar postural cost function for the whole system.

The optimization problem formulated in Eq. (2) outputs the full optimal joint configuration $\varepsilon_{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \hat{\varepsilon}_{\mathbf{q}_h} \\ \varepsilon_{\mathbf{q}_l} \end{bmatrix}$ where $\hat{\varepsilon}_{\mathbf{q}_h}$ an estimation of the increment that the user should perform to reach a comfortable position (according to c_l , which we discuss in Sec. II-D) and $\varepsilon_{\mathbf{q}_l}$ the link desired joint increment that is then used to feed the velocity controller.

To implement the velocity controller, there is no specific need for a high bandwidth position controller (concordant to the quasi-static assumption) that we could obtain from torque controlled actuators and inverse dynamics. Rather, we propose to use velocity controlled actuators and a basic resolved rate motion controller:

$$\dot{\mathbf{q}}_{c,l} = \lambda \varepsilon_{\mathbf{q}_l}, \quad (3)$$

where λ is a positive gain and $\dot{\mathbf{q}}_{c,l}$ is the input of velocity controller that reconfigures the link. In Sec. III, we will experimentally study how the gain λ may lead to instability, when it becomes too high.

D. Equilibrium and choosing c_l

In the present section, we assume that the system is stable and study its equilibrium configuration \mathbf{x}_{eq} for a given \mathbf{x}_d .

We denote the joint configuration at the equilibrium by: $\mathbf{q}_{eq} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{h,eq} \\ \mathbf{q}_{l,eq} \end{bmatrix}$.

As we assumed that the system has converged, we can integrate Eq. (1) and Eq. (2). Eq. (1) ensure that the goal \mathbf{x}_d

is reached for a given $\mathbf{q}_{l,eq}$, and therefore in Eq. (2) $\mathbf{x} = \mathbf{x}_d$. By combining the kinematic constraints from Eq. (1) and Eq. (2) :

$$\mathbf{f} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{q}_{h,eq} \\ \mathbf{q}_{l,eq} \end{bmatrix} \right) = \mathbf{f} \left(\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{q}}_{h,eq} \\ \mathbf{q}_{l,eq} \end{bmatrix} \right), \quad (4)$$

meaning that both solutions share the same effector position, as well as the same link configuration $\mathbf{q}_{l,eq}$, but may have different optimal human configurations $\mathbf{q}_{h,eq}$ and $\hat{\mathbf{q}}_{h,eq}$ depending of c_h and c_l respectively.

In other words, c_l determines an optimal configuration $\mathbf{q}_{l,eq}$ of the link, while c_h then determines an optimal posture $\mathbf{q}_{h,eq}$ using a given rigid tool of configuration $\mathbf{x}_{l,eq} = \mathbf{f}_l(\mathbf{q}_{l,eq})$. The cost function c_l impacts the null-space configuration of the overall system and the distribution of the task between the human and the virtual link reconfiguration. c_l should therefore be chosen such that it keeps the user in a comfortable posture. The ideal choice would be $c_l = c_h$, leading to Eq. (1) and Eq. (2) sharing the exact same solution. However, c_h is obviously unknown. Yet, the command is robust to model errors, and the goal \mathbf{x}_d is theoretically always reached (under the stability assumption). Therefore, one should not aim to perfectly identify c_h but rather choose c_l such that the user always converges towards a relatively comfortable posture. Dominjon, when using the Bubble technique, employed elastic force feedback when users were in the velocity control mode [9]. Such force helps users to return to their initial position, guiding the cost function c_h . In the following section, we also introduce an elastic force, which orients the users' comfortable postures and thus provides a candidate for the cost function c_l .

III. MATERIAL AND METHODS

To investigate the dynamics and robustness of the approach, we performed experiments involving a human-actuated device, manipulating a virtual link with the previous control method and a various gain λ (see Eq. 3).

A. Model

To study the specific role of the proposed coupling approach on end-effector positioning behavior, we consider a simplified system of two serially connected prismatic joints. The system is illustrated in Fig. 5, with q_h representing the position of the proximal joint and q_l that of the link. In a 6 DoF task, a more complex system and cost function could be chosen to reconfigure both the length and orientation of the link's tip. However, for the purpose of stability analysis, we have opted for a simplified 1 DoF controller. In this study, we focus solely on the virtual link without the presence of the nearby robot. The robot adds a servo delay, slowing the time to complete to task, and we have previously investigated that users can quickly adapt to such delay and the absence of virtual link visualization [4].

$\mathcal{H} + \mathcal{L}$ are colinear, and the global system is redundant, since the two joint axes are coincident. Each sub-system is able to perform the task alone without redundancy. We can note that q_h actually depends on the whole kinematics of

the human arm, but, as shown in Sec. II-D, the choice of c_l will regulate the task distribution between the two prismatic joint positions and thus $q_{l,eq}$, while the human will itself regulate the kinematics of their own arm (shoulder, elbow, etc.) ensuring the correct $q_{h,eq}$.



Fig. 4: View of a participant with the experimental set-up wearing the Microsoft HoloLens headset and manipulating the tangible interface.

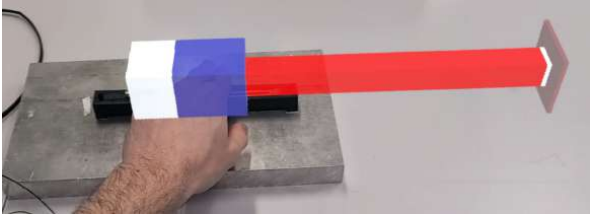


Fig. 5: The length of the proximal (blue) joint is controlled by the subject hand through the tangible interface. The virtual reconfigurable link (red) is the distal joint controlled by the previously defined Eq. (6). The white part on the left is always still and represents a rigid link to the table. Targets to be reached are represented on the right by a grey square.

The system is displayed using an augmented-reality Microsoft HoloLens V2 headset, and the proximal joint is controlled by the participants using a linear potentiometer fitted with a squared handle as a tangible interface, shown on Fig. 4. Fig. 5 shows a first person view of the experiment. The virtual proximal prismatic joint, in blue, is governed by the measurement of the potentiometer displaced by the hand. The system is calibrated in such a way that the movement of the hand is reproduced as the movement of the proximal virtual device.

Finally, there are two springs attached to the handle in order to create, for the human operator, an elastic force cost when moving the first joint, inspired by Eq. (1) and by the Bubble technique. These springs allow us to have a simple estimation on the effect of c_l and its choice relatively to an estimated c_h (which normally depends on the whole kinematics of the arm of the participants) that we approximate as the force applied by the springs, proportional

to the square norm of q_h .

The virtual link (in red on Fig. 5) is then piloted by the controller depicted in Eq. (2) using a cost-function $c_l(\mathbf{q})$ defined as:

$$c_l(\mathbf{q}) = \|D_Z(q_h)\|^2, \quad (5)$$

with $D_Z(\cdot)$ a $\pm 1\text{mm}$ dead-zone centered around 0. This dead-zone allows the global system to reach a permanent stabilized state despite measurement noise or subject's tremor. This means that the equilibrium position of the human arm $q_{h,eq}$ is not forced to zero but somewhere in the dead-zone interval. As demonstrated Sec. II-D, this difference should not prevent the user from reaching its goal but the solutions from Eq. (1) and Eq. (2) can differ by up to the length of the dead-zone.

Finally, the link velocity controller from Eq. (3) directly computes:

$$\dot{q}_{c,t} = \begin{cases} \lambda(q_h - Z) & \text{if } q_h > Z \\ \lambda(q_h + Z) & \text{if } q_h < -Z \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (6)$$

with $Z > 0$ the scalar length of the dead-zone equal to 1mm.

B. Participants

Twelve asymptomatic participants, aged 20-30, volunteered for this experimental study. The following study was carried out in accordance with the recommendations of Sorbonne Université ethics committee CER-SU, which approved the protocol. The participants gave their informed consent, in accordance with the Declaration of Helsinki.

C. Protocol

Before the experiment, participants have a short free time (approx. 1min) manipulating the handle using their dominant hand, and looking around with the AR headset, without any target to reach and a rigid link. Then, the task objective is provided as *"reaching the target as fast and precisely as possible, no matter the behavior of the red robotic system"*. No indications were given regarding what would be the behavior of the robotic red joint.

At first, the participants performed 20 repetitions of a reaching task toward a step goal (virtual square seen on the right of Fig. 5) incrementally displaced by a 4mm step, 10 forward then 10 backward. This was made with a gain $\lambda = 0$, i.e. performing only the task using the proximal part, pushing on the springs, with the link remaining still. Each repetition lasts 5s, even if the participant does not reach the target. At start, the target is red. When the participant reaches the target with $\pm 1\text{mm}$, the target turns green, providing them a visual feedback of their task achievement. This task offers a comparison of the system with a rigid link. However, the elastic force in this scenario

Then each participant performs those same 20 repetitions for different gains λ . Gains are increased following the sequence 1, 2, 4, 8, 16, 32. Each repetition is composed of target steps of 4, 6 or 8 mm (pseudo-randomly chosen), forward and backward. This uncertainty in the step-size partially limits the appearance of an automatic learning

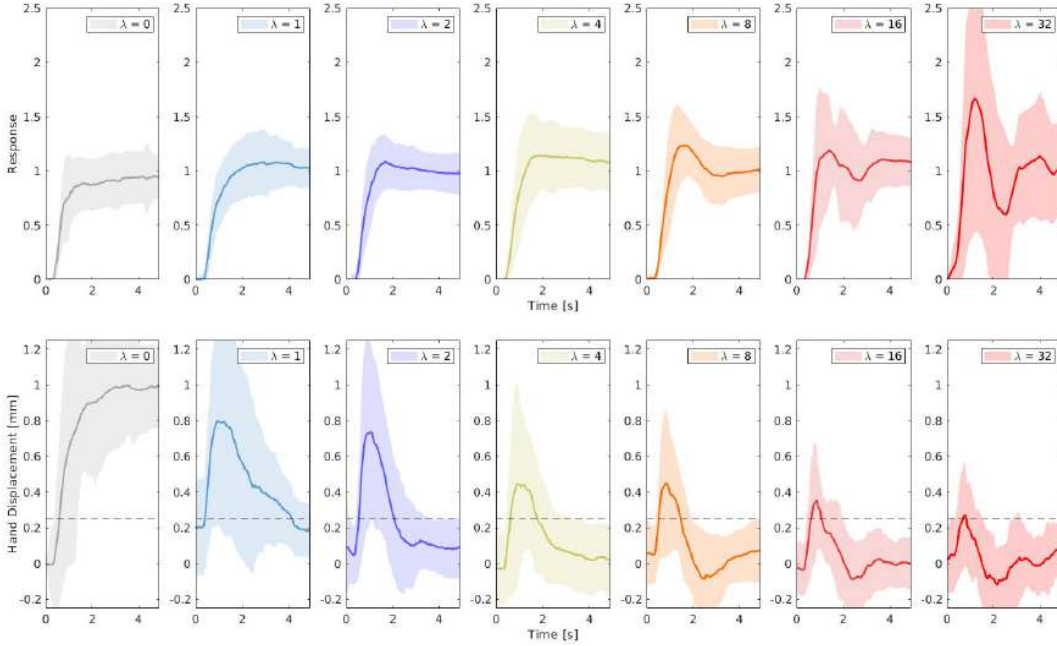


Fig. 6: Normalized (with respect to the distance) end-effector mean trajectory ($x(t)$, top) and hand mean trajectory ($q_h(t)$, bottom) out of the 20 repetitions per λ for 1 participant. The pale area corresponds to the standard deviation around the mean curve. The dotted line indicates the dead-zone.

behavior from the participants. Steps were chosen of a few millimeters to assess the precision of the user's. Longer displacements could simply be achieved by integrating the velocity command of the virtual link for a longer period of time.

D. Assessment metrics

a) *Error-based metrics*: To assess the performance of the participants and the controller, we consider three metrics for each repetition.

- *Normalized stationary state error over the last 2.5 seconds* ε , defined as:

$$\varepsilon = \frac{1}{T_{step}} \int_{2.5}^5 |x(t) - T| dt \quad (7)$$

with $x(t)$ the end-effector position, T the target position, T_{step} the size of the step value. 2.5s were chosen as, for $\lambda = 0s^{-1}$, 95% of the trials had converged, thus being an indication regarding the task performed by the human alone, with a still link.

- *Response time at 66%* $\tau_{66\%}$, defined as:

$$\tau_{66\%} = \min_{\tau} \left\{ \forall t > \tau, x(t) \in \left[T \pm \frac{1}{3} T_{step} \right] \right\} \quad (8)$$

- *Maximum overshoot in percentage* D , defined as:

$$D = \begin{cases} 0, & \text{if } \forall t, x(t) < T \\ \frac{1}{T_{step}} \max_{t \in [0; 5]} \{x(t) - x(0)\}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

b) *Cost-based Metrics*: We also consider two metrics to evaluate the effort provided by the subject, each defined per repetition.

- *Elastic Potential Energy* E_H . The work done to elongate the springs is equivalent to:

$$W = \frac{1}{2} k x^2, \quad (10)$$

with k the spring stiffness. In order to approximate the required work done by the hand during the whole task, we calculate the signal energy of the work:

$$E_H = \int_0^5 x(t)^2 dt \quad (11)$$

where x is the position of the hand (the constant $\frac{1}{2}k$ not being taken into account). This metric is not meant to be used when the gain λ is null, but rather compare the work done by users when $\lambda > 0$.

- *Arc-length of the hand path*, L_H defined as:

$$L_H = \int_0^5 \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dt} \right)^2} dt \quad (12)$$

IV. RESULTS

A. Qualitative Analysis at Individual Level

An average response out of all the repetition per gain for one participant is provided on Fig. 6(top). Similar results are observed for every participant but there exists a high inter-variability between subjects, as seen in Fig. 7 which, once averaged, standardizes the mean step-responses. This participant was selected as reflecting the average behavior.

When $\lambda = 0$, the trajectory is slightly jittery, because of the forces from the springs leading the subject’s hand to tremble. Then, at gain 1, 2 and 4, the trajectory is smoother. At 8, an important overshoot starts to appear, and oscillations begin at gain 16 and 32. We can note that the averaging mitigates this oscillatory behavior, but the variations of the standard deviation show how important and various these oscillations are, especially compared to the lower gains’ standard deviation.

The associated hand displacement is also shown on Fig. 6(bottom). When $\lambda = 0$, the hand performs all the task, the link being still. This leads to an expensive task for the user, which can be observed looking at the tremor of the trajectory. Then, as the gain increases, the hand initiates the movement and then returns to its original position, where the energetic cost of the spring is almost null. At high gain (16 and 32) oscillations appear and force the participant to perform a second hand motion in order to correct the position of the end-effector.

It can be noted that, due to the dead-zone in c_l , the subject’s hand does not come back strictly to 0 but somewhere within the dead-zone. This is an example of an equilibrium where c_h and c_l are not equal. Yet, the control is robust to model errors and still converges, despite the equilibrium being sub-optimal to c_h and optimal to c_l .

B. Quantitative Analysis of Group Results

TABLE I: Average performance metrics for each λ

Cost-based metrics							
λ	0	1	2	4	8	16	32
ε	2.00	2.335	2.04	2.10	2.37	2.57	3.15
$\tau_{66\%}$	27	0.32	0.17	0.10	0.07	0.05	0.04
D	0.20	0.42	0.43	0.42	0.56	0.68	0.98

The median and standard variation of the three error-based metrics for the different λ values are summed on Tab. I. According to the Shapiro-Wilk test, data groups are non-normal. In order to observe significant separability between the data for each gain λ , we performed the non-parametric Mann–Whitney–Wilcoxon test for each pair of gain λ for each performance (Fig. 8). At separability $p = 0.05$, there exists no significant difference between the gains 1, 2, 4 for any of the performances, while there exists a significant separability between the group of gains 1, 2, 4 and the group of gains 16 and 32. Moreover, there is no separability for the permanent state error between gains 0 and 1, 2, 4; the overshoot being the only performance degraded. The permanent state error is even slightly improved, due to some participants having difficulties to maintain the springs far away from their rest position.

It is however important to note that there exists important differences between the participants (Fig. 7), as some subjects had much trouble to perform with gain $\lambda = 8$ (such as participants 1 and 8, with red bars on the graph) while other had still very good performances with gain 16 (participants

4 or 7, in green). Yet, gains 2 and 4 have shown great results for all of the participants.

TABLE II: Average hand path arc length and Elastic potential energy per repetition for each λ

Cost-based metrics							
λ	0	1	2	4	8	16	32
L_H	0.75	0.79	0.76	0.66	0.59	0.72	0.73
E_H	27	0.32	0.17	0.10	0.07	0.05	0.04

The difference of energy between the task without control (gain $\lambda = 0$) and with control are considerable (Table II). Obviously these are two different tasks, but it shows how undesirable costs can be considered as criteria and reduced using kinematically redundant properties and the presented control law. The hand path arc length between gains 0 and 1 first slightly increases, due to the subject rejecting the slow perturbation induced by the link reconfiguration, then decreases, the control law significantly helping the subject. Finally, at gain 16 and 32, the path increases again due to the oscillations caused by the close instability of the control law, the subjects having to move back and forth between the positive and negative dead-zone value to perform displacement a reconfiguration in the opposite direction, correcting their overshoot.

V. DISCUSSION AND PERSPECTIVES

The bandwidth of human movement is known to range from 2 Hz to 5 Hz, corresponding to a cutoff frequency ω_c between 12.6 and 31.4 rad/s [23]. Based on both the effector trajectories (Fig. 6 top) and the performance results (Fig. I), we observe significant stability degradation as λ approaches the frequency range of human motion, leading to oscillations at high gains. At very high gains, participants tend to adjust their motor behavior to maintain performance levels by adopting a burst strategy involving short hand impulses, facilitated by the dead-zone, which helps avoid instability but increases overshoot and reduces precision. This observation aligns with the quasi-static assumptions of our controller, where degradation occurs as the gain λ nears 12s^{-1} .

However, for λ values ranging from 1 to 4, there are no statistical performance differences, as shown in Fig. 8, despite a significant decrease in hand movement amplitude, resulting in a substantial reduction in energy cost E_H (Table II) without compromising natural motor strategies. Between 0 and 4, we observed a slight increase in reaction time and overshoot due to the integral command, but participants adapted immediately despite no prior training, demonstrating good performance. With training, observed overshoot could be further reduced, allowing for higher gains while maintaining precision.

Changes in motor behavior may also depend on task requirements, such as alternating between long and short reach distances. In this study, participants only reached targets 4 to 8 mm away, with high precision, and higher gains

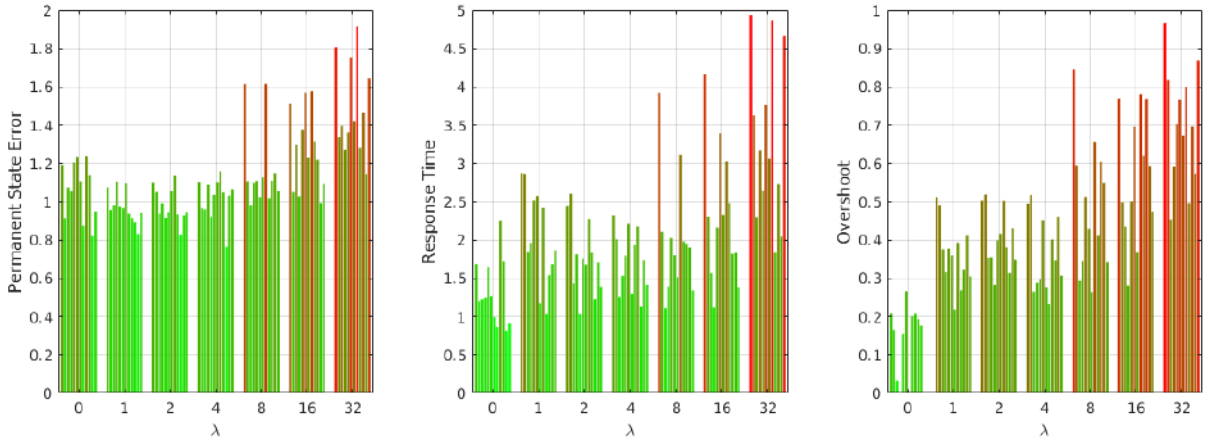


Fig. 7: Median of the metrics for each participant per gain λ . From left to right: permanent state error, response time and overshoot. Linear continuous coloring from green to red, green being the minimal value for all subjects and gains per metric, and red the maximal one.



Fig. 8: pValues of the 2-by-2 Mann-Whitney-Wilcoxon tests. From left to right: the permanent state error, the response time and the overshoot. The higher the p-value, the bluer is the corresponding cell. White cells mean that the metrics are significantly separable for the two gains.

could be more viable for distant targets or if response time outweighs accuracy. Alternatively, an adaptive gain based on the value of the cost function c_l could be considered.

Across λ gains 1 to 4, participants successfully completed the tasks, supporting our quasi-static assumption that the velocity controller, slower than the user, effectively guides them to their goal while optimizing the cost function set by the virtual link. These findings hold despite significant inter-subject variability and the absence of prior training.

The primary challenge of this control law remains selecting an appropriate cost function c_l , particularly for tasks involving multiple degrees of freedom combining translations and rotations simultaneously. We posit that this choice closely relates to motor control studies. Nonetheless, the controller's robustness to model errors allows for approximate cost functions, suggesting potential extensions to additional criteria. Future work will focus on integrating this framework with a more complex cost function, potentially involving

manipulation of a virtual link robotic limb with multiple degrees of freedom such as a rotating wrist. The same study could also be repeated with the springs removed, potentially causing users to struggle to return to their rest posture, thereby necessitating a more complex cost function.

VI. CONCLUSION

The control law presented in this paper could allow to perform a wide variety of reaching tasks using a link without any prior knowledge of the said tasks, instead using a cost function based on the user's motor behavior observation. Moreover, the controller requires only a gain to be tuned, which can be chosen robustly in a wide bandwidth while ensuring good performances and reducing the physical load of the user.

Therefore, we believe that the proposed approach could be an interesting tool for the teleoperation of nearby robots by a human operator. Indeed, despite constant progress in the decoding of motor intentions through physiological signals

(such as gaze tracking or signals from brain-computer interfaces), it remains particularly challenging for current velocity controller to access information about the human operator's task and goal, while the use of auxiliary signals (EMG, BCI) remains cognitively costing for the operator. Oppositely, position-position control is very efficient but range limited. Our approach proposes an hybrid position/velocity control, which simplifies the velocity controller by removing the need of an auxiliary input, using the intuitive position controller for short displacements, and superposing a velocity command when large uncomfortable motions are detected, allowing, without any additional devices, to also reach for distant targets.

REFERENCES

- [1] R. C. Lincoln, "Visual tracking: III. The instrumental dimension of motion in relation to tracking accuracy." *Journal of Applied Psychology*, vol. 37, no. 6, pp. 489–493, Dec. 1953. [Online]. Available: <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/h0060608>
- [2] R. J. Jagacinski, D. W. Repperger, M. S. Moran, S. L. Ward, and B. Glass, "Fitts' Law and the Microstructure of Rapid Discrete Movements," *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, no. 6(2), pp. 309–320, 1980.
- [3] S. Zhai, "Human Performance in Six Degree of Freedom Input Control," 1995.
- [4] A. Poignant, G. Morel, and N. Jarrasse, "Teleoperation of a robotic manipulator in peri-personal space: a virtual wand approach," 2024. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2406.09309>
- [5] A. Poignant, N. Jarrasse, and G. Morel, "Hands-free teleoperation of a nearby manipulator through a virtual body-to-robot link," *IEEE RAS EMBS 10th International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob 2024)*, 2024. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2406.09301>
- [6] E. G. Johnsen and W. R. Corliss, *Human factors applications in teleoperator design and operation*. Wiley-Interscience New York, 1971.
- [7] A. Fischer and J. M. Vance, "PHANToM Haptic Device Implemented in a Projection Screen Virtual Environment."
- [8] Won Kim, F. Tendick, S. Ellis, and L. Stark, "A comparison of position and rate control for telemanipulations with consideration of manipulator system dynamics," *IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 3, no. 5, pp. 426–436, Oct. 1987. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1087117/>
- [9] L. Dominjon, A. Lecuyer, J. Burkhardt, G. Andrade-Barroso, and S. Richir, "The "Bubble" Technique: Interacting with Large Virtual Environments Using Haptic Devices with Limited Workspace," in *First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*. Pisa, Italy: IEEE, 2005, pp. 639–640. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1407038/>
- [10] L. Dominjon, A. Lcuyer, J.-M. Burkhardt, and R. Simon, "A Comparison of Three Techniques to Interact in Large Virtual Environments Using Haptic Devices with Limited Workspace."
- [11] A. Gregg-Smith and W. W. Mayol-Cuevas, "The design and evaluation of a cooperative handheld robot," in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Seattle, WA, USA: IEEE, May 2015, pp. 1968–1975. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7139456/>
- [12] A. H. Zahraee, J. K. Paik, J. Szewczyk, and G. Morel, "Toward the Development of a Hand-Held Surgical Robot for Laparoscopy," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, p. 5523951, Dec. 2010. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5523951/>
- [13] J. Ribeiro, F. Mota, T. Cavalcante, I. Nogueira, V. Gondim, V. Albuquerque, and A. Alexandria, "Analysis of Man-Machine Interfaces in Upper-Limb Prosthesis: A Review," *Robotics*, vol. 8, no. 1, p. 16, Feb. 2019. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/2218-6581/8/1/16>
- [14] B. Yang, J. Huang, X. Chen, C. Xiong, and Y. Hasegawa, "Supernumerary Robotic Limbs: A Review and Future Outlook," *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, vol. 3, no. 3, pp. 623–639, Aug. 2021. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9446590/>
- [15] D. Praticchizzo, M. Pozzi, T. Lisini Baldi, M. Malvezzi, I. Hussain, S. Rossi, and G. Salvietti, "Human augmentation by wearable supernumerary robotic limbs: review and perspectives," *Progress in Biomedical Engineering*, vol. 3, no. 4, p. 042005, Oct. 2021. [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2516-1091/ac2294>
- [16] G. Li, A. E. Schultz, and T. A. Kuiken, "Quantifying Pattern RecognitionBased Myoelectric Control of Multifunctional Transradial Prostheses," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 18, no. 2, pp. 185–192, Apr. 2010. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5378627/>
- [17] M. Duvinage, T. Castermans, and T. Dutoit, "Control of a lower limb active prosthesis with eye movement sequences," in *2011 IEEE Symposium on Computational Intelligence, Cognitive Algorithms, Mind, and Brain (CCMB)*. Paris, France: IEEE, Apr. 2011, pp. 1–7. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5952116/>
- [18] M. Vilela and L. R. Hochberg, "Applications of brain-computer interfaces to the control of robotic and prosthetic arms," in *Handbook of Clinical Neurology*. Elsevier, 2020, vol. 168, pp. 87–99. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444639349000081>
- [19] L. Resnik, S. L. Klinger, K. Etter, and C. Fantini, "Controlling a multi-degree of freedom upper limb prosthesis using foot controls: user experience," *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 318–329, Jul. 2014. [Online]. Available: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.3109/17483107.2013.822024>
- [20] H. Shimobayashi, T. Sasaki, A. Horie, R. Arakawa, Z. Kashino, and M. Inami, "Independent Control of Supernumerary Appendages Exploiting Upper Limb Redundancy," in *Augmented Humans Conference 2021*. Rovaniemi Finland: ACM, Feb. 2021, pp. 19–30. [Online]. Available: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3458709.3458980>
- [21] A. Hussaini, A. Zinck, and P. Kyberd, "Categorization of compensatory motions in transradial myoelectric prosthesis users," *Prosthetics & Orthotics International*, vol. 41, no. 3, pp. 286–293, Jun. 2017. [Online]. Available: <https://journals.lww.com/00006479-201741030-00009>
- [22] D. Bullock, S. Grossberg, and P. H. Guenther, "A Self-Organizing Neural Model of Motor Equivalent Reaching and Tool Use by a Multijoint Arm," vol. 5, no. 4, p. 28, 1993.
- [23] J. C. Perry, J. Rosen, and S. Burns, "Upper-Limb Powered Exoskeleton Design," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 12, no. 4, pp. 408–417, Aug. 2007. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4291584/>