



HAL
open science

Commande robotique hybride par téléopération et comanipulation : Application au positionnement d'une sonde échographique en milieu contraint

Joseph Diab

► **To cite this version:**

Joseph Diab. Commande robotique hybride par téléopération et comanipulation : Application au positionnement d'une sonde échographique en milieu contraint. Robotique [cs.RO]. Université d'Orléans, 2021. Français. NNT : 2021ORLE3144 . tel-03685405

HAL Id: tel-03685405

<https://theses.hal.science/tel-03685405>

Submitted on 2 Jun 2022

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.

UNIVERSITÉ D'ORLÉANS

**ÉCOLE DOCTORALE
MATHÉMATIQUES, INFORMATIQUE, PHYSIQUE THÉORIQUE ET INGÉNIERIE
DES SYSTÈMES**

Laboratoire PRISME

THÈSE présentée par :

Joseph DIAB

soutenu le : 03 décembre 2021

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université d'Orléans**

Discipline/ Spécialité : SCIENCE ET TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES

Commande robotique hybride par téléopération et comanipulation : Application au positionnement d'une sonde échographique en milieu contraint.

THÈSE dirigée par :

M. Gérard POISSON

Professeur des universités, Université d'Orléans

RAPPORTEURS :

Mme Hélène CHANAL

M. Arnaud LELEVÉ

Maîtresse de conférences HDR, Université de Clermont Auvergne

Maître de conférences HDR, INSA de Lyon

JURY :

M. Samer ALFAYAD

Mme Hélène CHANAL

M. Arnaud LELEVÉ

M. Bertrand TAVITIAN

Mme Aïcha FONTE

M. Cyril NOVALES

M. Gérard POISSON

Professeur des universités, Université d'Evry, Président du jury

Maîtresse de conférences HDR, Université de Clermont Auvergne

Maître de conférences HDR, INSA de Lyon

Professeur des universités, Université Paris Descartes

Maîtresse de conférences, Université d'Orléans

Maître de conférences, Université d'Orléans

Professeur des universités, Université d'Orléans

Dédicace

"Neither a lofty degree of intelligence nor imagination nor both together go to the making of genius. Love, love, love that is the soul of genius."
"Ni un haut degré d'intelligence, ni l'imagination, ni les deux ensemble ne contribuent à la formation du génie. L'amour, l'amour, l'amour qui est l'âme du génie."

W. A. Mozart

Remerciements

Il me sera très difficile de remercier tout le monde que je souhaiterais car c'est grâce à l'aide de nombreuses personnes que j'ai pu mener cette thèse à son terme.

Avant tout, je tiens à exprimer ma sincère gratitude à mon directeur de thèse, le Professeur Gérard POISSON, pour son soutien permanent lors de mes études doctorales et de mes recherches connexes, pour sa grande disponibilité, sa volonté et son immense savoir. Ses orientations m'ont soutenu à chaque instant de la phase de recherche et de rédaction de ce mémoire. Je n'aurais pas rêvé d'avoir un meilleur directeur et mentor pour mon doctorat.

Outre mon directeur de thèse, je tiens à remercier mes encadrants Dr Aïcha FONTE et Dr. Cyril NOVALES pour leurs aides considérables ainsi que pour leurs remarques et suggestions au fil des phases expérimentales et de rédaction de rapports.

En plus de mon directeur et mes encadrants, je suis reconnaissant aux membres de mon comité de thèse : Dr HDR Hélène CHANAL et Dr HDR Arnaud LELEVÉ d'avoir rapporté sur ce travail, ainsi qu'aux Professeurs Samer ALFAYAD et Bertrand TAVITIAN d'avoir accepté de participer à mon jury.

Je remercie sincèrement le laboratoire PRISME, et plus particulièrement le Département IRAUS, de m'avoir donné l'opportunité de participer à des recherches liées à la robotique, ainsi que de m'avoir donné l'accès aux différents équipements du laboratoire, aux robots et aux installations de recherche. Sans ce soutien précieux, il n'aurait pas été possible de mener cette recherche.

Je souhaite également exprimer ma gratitude à mes collègues du laboratoire pour les discussions stimulantes, pour les nuits blanches passées à travailler ensemble avant les échéances, et pour tout le plaisir que nous avons eu au cours de ces trois dernières années. Je remercie mon confrère Mustafa ELAHRES pour ses critiques et ses remarques intéressantes, ainsi que pour ses questions stimulantes qui m'ont incité à élargir ma réflexion à partir de diverses perspectives au cours de nos deux années de coopération.

Je tiens à remercier la région Centre-Val de Loire qui m'a accordé la bourse régionale pour réaliser ma thèse.

Enfin, je tiens à remercier ma famille : mes parents, ainsi que mon frère et ma sœur, qui m'ont apporté un grand soutien moral tout au long de la réalisation de cette thèse et de ma vie en général.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	iii
Table des matières	v
Introduction générale	1
1 La téléopération et ses domaines d'application	5
1.1 Introduction	7
1.2 La téléopération robotisée	8
1.2.1 Les premières téléopérations robotisées	8
1.2.2 L'évolution de la téléopération haptique	12
1.2.2.1 L'interface haptique	12
1.2.2.2 Le retour multi-modal	15
1.2.2.3 Téléprésence et transparence	16
1.3 Les différentes architectures de téléopération avec retour d'effort	17
1.3.1 Asservissement bilatéral position/position	18
1.3.2 Asservissement asymétrique position/force	19
1.3.3 Stratégie move-and-wait	21
1.3.4 Contrôle supervisé et ses variantes	21
1.3.5 La téléopération basée sur la passivité	22
1.4 Applications de la téléopération avec retour d'effort	24
1.4.1 La manipulation des matières à risque	24
1.4.2 Les véhicules subaquatiques	24
1.4.3 Les robots spatiaux	24
1.4.4 La téléopération appliquée au domaine médical	25
1.4.4.1 La téléchirurgie	25
1.4.4.2 L'examen téléopéré	26
1.5 Conclusion	27

2	État de l’art de la Cobotique	30
2.1	Introduction	32
2.2	Émergence de la cobotique	33
2.2.1	De robotique à “robotique collaborative”	33
2.2.2	Le rôle de l’opérateur humain dans la cellule robotique	35
2.3	Les interactions humain-robot	36
2.3.1	Les différents types d’interactions humain-robot	36
2.3.2	Proposition de définition d’un Cobot	39
2.3.2.1	L’organisation de l’équipe cobotique	40
2.3.2.2	Les niveaux d’autonomie du robot	41
2.3.2.3	Les informations échangées entre humain et robot	42
2.3.2.4	L’opérateur humain dans la boucle de contrôle	42
2.3.2.5	La comanipulation	44
2.3.3	Différents types de tâches à accomplir en comanipulation	44
2.3.3.1	La planification démonstrative	44
2.3.3.2	L’adaptation des efforts	45
2.4	Différents types de commandes de comanipulation	46
2.4.1	Le contrôle passif de l’interaction	46
2.4.2	Le contrôle actif de l’interaction	47
2.4.2.1	La commande en amortissement	47
2.4.2.2	La commande en raideur active	48
2.4.2.3	La commande compliant : impédance/admittance	49
2.4.2.3.1	La commande en impédance	49
2.4.2.3.2	La commande en admittance	52
2.4.2.3.3	La commande hybride impédance/ admittance	54
2.4.2.4	La commande en force directe	55
2.4.2.5	La commande hybride position/force	56
2.5	Le concept de composant cobotique virtuel pour la commande compliant	58
2.5.1	Collision entre la pince du robot UR3 et la paume de la main	60
2.5.2	Collision entre la pince du robot et le fantôme flexible	63
2.5.3	Conduire à des robots plus sûrs	66
2.6	Analyse comparative entre téléopération et comanipulation	66
2.6.1	Les similitudes entre télérobotique et comanipulation	67
2.6.2	Les distinctions entre téléopération et comanipulation	68
2.7	Conclusion	70
3	Téléopération, comanipulation et commande alternée des deux modalités	72
3.1	L’alternance entre téléopération et comanipulation : pertinence et problématique	74

3.2	Les choix matériels et logiciels - le cadre expérimental	75
3.3	Synthèse et implémentation d'une commande en mode téléopéré	77
3.3.1	La téléopération unilatérale : du téléopérateur vers le robot	78
3.3.1.1	Modélisation du dispositif maître	78
3.3.1.2	Modélisation du dispositif esclave : le robot porte-sonde échographique	79
3.3.1.3	Synthèse de la loi de commande pour la téléopération	82
3.3.1.4	Simulation de la commande en téléopération	86
3.3.1.4.1	Simulation d'une téléopération en position	86
3.3.1.4.2	Simulation d'une téléopération en position et orientation	88
3.3.1.5	Implémentation de la commande téléopérée sur le robot UR3	89
3.3.2	La téléopération avec retour d'effort	91
3.3.2.1	Modélisation des actions de contact humain-robot	91
3.3.2.2	Synthèse de la commande téléopérée avec retour d'effort	93
3.3.2.3	Simulation d'une téléopération avec retour d'effort	94
3.3.3	Téléopération bilatérale	95
3.3.3.1	Simulation de la téléopération bilatérale	95
3.3.3.2	Implémentation de la commande bilatérale	98
3.4	Synthèse et implémentation d'une commande en mode comanipulé	100
3.4.1	Synthèse de la loi de commande en admittance	100
3.4.2	Phase expérimentale de la comanipulation en position	104
3.4.3	Comanipulation en position et orientation	106
3.5	Enchaînement séquentiel de modes téléopérés et comanipulés	108
3.5.1	Le mode C->T : Comanipulation vers Téléopération	111
3.5.2	Le mode T->C : Téléopération vers Comanipulation	113
3.6	Conclusion	115
4	Commandes robotiques par "Comanipulation et Téléopération Combinées" 117	
4.1	Introduction	119
4.2	Le couplage entre téléopération et comanipulation	120
4.2.1	Modélisation de la combinaison téléopération et comanipulation	120
4.2.2	Différentes approches de la loi de commande TC^2	122
4.2.2.1	Combinaison spatiale de téléopération et comanipulation	122
4.2.2.2	Combinaison par mixage de téléopération et comanipulation	123
4.2.2.3	Combinaison par mixage variant avec le temps	123
4.2.3	Formulation générique de la combinaison TC^2	123

4.2.4	Détermination de la matrice de sélectivité	124
4.3	Simulations et expérimentations	125
4.3.1	Premier exemple : combinaison spatiale.	125
4.3.2	Deuxième exemple : combinaison par mixage isotrope, ($\alpha_1 = 1/2$)	129
4.3.3	Troisième exemple : commande avec mixage différent selon les directions de l'espace	132
4.3.4	Quatrième exemple : commande avec mixage fonction du temps	135
4.4	Conclusion	138
Conclusions et perspectives		140
Bibliographie		I
Table des figures		xiv
Liste des tableaux		xix
A Annexe 1 : Le robot UR3, modélisations pour la commande		1
A.1	Tableau de Denavit-Hartenberg modifié (DHm) pour le robot UR3 de Universal Robots	2
A.2	Les singularités des robots Universal Robots (UR)	4
A.3	Le Modèle Géométrique Inverse (MGI) des robots Universal Robots	5
A.3.1	Détermination de θ_1	8
A.3.2	Détermination de θ_5	9
A.3.3	Détermination de θ_6	11
A.3.4	Détermination de θ_3	12
A.3.5	Détermination de θ_2	13
A.3.6	Détermination de θ_4	13
A.3.7	Effcience et limites du présent modèle	14
A.4	MGD, MGI et les 8 aspects du UR3	15
B Annexe 2 : Éléments de la norme ISO 10218		19
B.1	ISO 10218	20

Introduction générale

Les robots sont à ce jour présents et impliqués de plus en plus dans notre vie quotidienne. Ils jouent un rôle essentiel dans les chaînes de production, ils investissent le secteur agricole, le milieu médical, les services... Si longtemps leur principale caractéristique a été de fonctionner en autonomie, ils sont de plus en plus amenés à devoir fonctionner en proximité des humains et à devoir collaborer avec eux. Cette proximité a conduit au développement des robots dits collaboratifs, plus couramment désignés cobots.

Les cobots conservent toujours l'aspect typique des robots, à savoir qu'ils peuvent être programmés pour fonctionner en autonomie ou pilotés à distance par téléopération. Ils autorisent, par contre, une interaction directe avec l'humain, ce que ne permettent pas les robots classiques. Cette interaction peut prendre différentes formes, toutefois sa conséquence est que le geste global du cobot est dans tous les cas issu d'une combinaison humain-cobot.

Ainsi, les cobots offrent plus de flexibilité quant à la manière de les utiliser. Ils sont donc assurément moins rapides et pas nécessairement aussi précis que les robots classiques. Ils présentent des capacités d'action et de charge compatibles avec une collaboration humaine et sont en mesure de garantir la sécurité des opérateurs les utilisant. Si, par conception, ils sont amenés à collaborer avec l'humain, ils sont comme les robots classiques (parce qu'il restent des robots) aussi en mesure de travailler en autonomie ou être pilotés à distance par téléopération.

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à cette question de l'utilisation double (nous pourrions écrire duale) de la comanipulation et de la téléopération comme modalités de commande des robots.

Alors que la téléopération concerne le contrôle, à distance, d'un robot esclave par un dispositif maître, la comanipulation concerne le contrôle du cobot/robot par interaction directe avec un opérateur le manipulant. Les schémas fonctionnels de ces deux modalités

sont totalement différents : alors qu'on mettra en œuvre des commandes de position et vitesse pour la téléopération, ce sont des commandes dynamiques, telle la classique commande en admittance, qui sont développées pour la comanipulation. C'est cette distinction importante dans les principes de commande utilisés et aussi la question de la proximité versus distance qui nous amène à penser au terme "dualité" pour qualifier la relation entre comanipulation et téléopération.

Le laboratoire PRISME, au sein duquel nous avons préparé cette thèse, s'est largement positionné sur les deux thématiques de téléopération et comanipulation. La télé-échographie robotisée est une activité historique de l'équipe depuis plus de 20 ans : de nombreux robots ont été conçus, fabriqués, contrôlés en téléopération via des médias variés (réseau local, ligne téléphonique, satellites fixes ou mobiles...). Par ailleurs, l'équipe a été impliquée, dans la décennie passée, dans divers projets relevant de la cobotique, au travers notamment de l'étude de la problématique de sûreté de fonctionnement et la sécurité de l'opérateur en cobotique.

Appuyé sur ces deux socles que constituent les approches téléopération et comanipulation, notre travail de thèse avait pour enjeu scientifique d'établir un pont (s'il en est un) entre téléopération et comanipulation.

La séparation entre téléopération et comanipulation n'est toutefois pas toujours aussi évidente qu'il n'y paraît. Diverses questions se posent alors, qui sont autant de points ou enjeux qui ont orienté nos travaux :

- Lorsqu'un robot commandé à distance est saisi par un opérateur qui en prend localement le contrôle, ce robot est-il téléopéré ou comanipulé ?
- Lorsqu'un dispositif haptique est fixé sur une partie mobile d'un robot, celui-ci est-il téléopéré ou comanipulé ?
- Ainsi, téléopération et comanipulation sont-elles deux modalités distinctes, voire contraires ?
- Sont-elles compatibles ?
- Un état intermédiaire, forme de combinaison téléopération-comanipulation peut-il être imaginé ?

Préalablement à toute idée de combinaison, nous avons étudié séparément les deux approches de commandes robotiques que sont la téléopération puis la comanipulation. Nous avons modélisé puis implémenté ces deux approches sur une plateforme robotique constituée d'un dispositif haptique (le Phantom Omni de Sensible) et d'un cobot sériel à 6 degrés de liberté (le UR3 de Universal Robots). Diverses formes de combinaisons ont été proposées. Une application médicale d'échographie assistée par robot, incluant donc des phases téléopérées et des phases comanipulées, a en partie guidé notre démarche

expérimentale.

Le premier chapitre de ce mémoire s'intéresse à la téléopération. Y sont rappelées les bases de la téléopération, le rôle de l'interface haptique et les structures des différents types d'architectures de commande intégrant un retour d'effort.

Le deuxième chapitre s'intéresse à la comanipulation. Y sont d'abord rappelés les grands principes de la robotique collaborative, puis analysée l'importante question des interactions entre humain et robot. Les différents types de commandes en comanipulation sont décrits. Nous détaillons ensuite le concept de "composant cobotique virtuel" à intégrer dans une loi de commande articulaire, que nous avons proposé pour apporter plus de sûreté en cobotique. Illustrant ce concept, des expérimentations de type collision ont été réalisées avec le robot UR3.

Le troisième chapitre est une première proposition de combinaison entre téléopération et comanipulation. Les deux modalités sont alors considérées sur un même robot, pour une même application, de manière alternée. Sont détaillés les schémas fonctionnels des deux approches de commande par téléopération puis comanipulation, puis celui de l'approche combinée dite commande alternée. Diverses simulations et expérimentations sur robot sont décrites et commentées. Le champ applicatif considéré est celui de l'échographie assistée par robot.

Le quatrième chapitre est une proposition générique de combinaison entre téléopération et comanipulation. L'introduction d'une matrice de sélectivité permet ce concept. Différentes formes de combinaisons sont proposées : combinaison spatiale, combinaison par mixage, combinaison fonction du temps. Modèles, simulation et expérimentations sur robot sont donnés et commentés.

Un chapitre de conclusions générales et perspectives dresse quelques futures orientations possibles de nos travaux.

1

La téléopération et ses domaines d'application

Le dictionnaire Larousse définit une téléopération comme une opération pratiquée à l'aide d'une télécommande. Dans ce chapitre, nous proposons une brève présentation de ce que représente cette modalité de contrôle robotique à distance appelée "téléopération". Nous posons un regard particulier sur les applications médicales téléopérées. Dans un premier temps, dans les paragraphes de la section 1.2.1 et de la section 1.2.2, les caractéristiques d'une téléopération robotisée sont détaillées. Nous présentons ensuite, dans la section 1.3, les différentes méthodes utilisées ces dernières années concernant le développement de cette modalité. Enfin, dans la section 1.4, nous nous intéressons plus spécialement aux applications médicales téléopérées, au travers la présentation de plusieurs dispositifs chirurgicaux, de diagnostic ou d'assistance au handicap.

Sommaire

1.1	Introduction	7
1.2	La téléopération robotisée	8
1.2.1	Les premières téléopérations robotisées	8
1.2.2	L'évolution de la téléopération haptique	12
1.2.2.1	L'interface haptique	12
1.2.2.2	Le retour multi-modal	15
1.2.2.3	Téléprésence et transparence	16
1.3	Les différentes architectures de téléopération avec retour d'effort	17
1.3.1	Asservissement bilatéral position/position	18
1.3.2	Asservissement asymétrique position/force	19
1.3.3	Stratégie move-and-wait	21
1.3.4	Contrôle supervisé et ses variantes	21
1.3.5	La téléopération basée sur la passivité	22
1.4	Applications de la téléopération avec retour d'effort	24
1.4.1	La manipulation des matières à risque	24
1.4.2	Les véhicules subaquatiques	24
1.4.3	Les robots spatiaux	24
1.4.4	La téléopération appliquée au domaine médical	25
1.4.4.1	La téléchirurgie	25
1.4.4.2	L'examen téléopéré	26
1.5	Conclusion	27

1.1 Introduction

Le concept de téléopération remonte aux premiers âges, lorsque les humains ont découvert que l'utilisation d'outils étendait leur portée, par exemple en utilisant de longs bâtons pour récolter des fruits. Quant au terme "téléopération", tel qu'il est connu aujourd'hui, il a été abordé dans les médias à la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e , comme dans les ouvrages de science-fiction [Hockstein2007]. Le plus ancien prototype de téléopération semble remonter à 1898, date du début des communications radio, lorsque Nicola Tesla a fabriqué le premier appareil télécommandé. Cette percée majeure a été publiée sous le numéro de brevet américain 613,809 [Tesla1898], intitulé : Method of and Apparatus for Controlling Mechanism and moving vessel and vehicles.

La figure 1.1 illustre la structure d'une téléopération bidirectionnelle dite chaîne téléopérée [Mahvash2005]. Nous identifions les cinq éléments principaux de cette chaîne : le modèle opérateur humain, le modèle maître, le modèle bloc de communication, le modèle esclave et le modèle environnement.

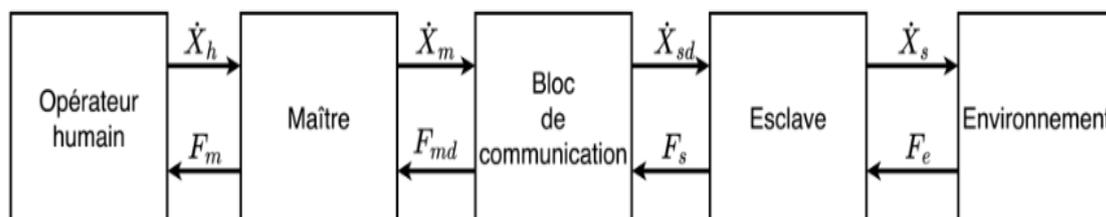


FIGURE 1.1 – Schéma de principe d'une téléopération bidirectionnelle [Mahvash2005]

D'un point de vue théorique, la téléopération comporte deux dispositifs robotisés : un maître et un esclave, interchangeant des signaux (positions, vitesses et/ou forces). L'esclave s'efforce d'imiter le comportement du maître qui, à son tour, réagit aux forces ou couples retransmis en retour de cet esclave. On peut décrire le comportement entre maître et esclave par un modèle non linéaire basé sur la méthode de dérivation de Lagrange comme suit :

$$\begin{cases} M_m \ddot{x}_m + C_m(\dot{x}_m, x_m) \dot{x}_m = F_m + F_{op} \\ M_s \ddot{x}_s + C_s(\dot{x}_s, x_s) \dot{x}_s = F_s - F_e \end{cases} \quad (1.1)$$

où x_m et x_s , F_m et F_s , M_m et M_s , $C_m(\dot{x}_m, x_m)$ et $C_s(\dot{x}_s, x_s)$ représentent respectivement les coordonnées généralisées, les forces d'entrée généralisées, les matrices d'inertie positive,

les matrices des forces de Coriolis et centrifuges du maître et de l'esclave. F_{op} et F_e sont les forces externes exercées par l'opérateur humain et l'environnement, respectivement.

Au fil de ce chapitre, nous donnons les principes de la téléopération, nous abordons quelques grandes lignes de développement des applications en téléopération médicale, puis nous progressons ensuite pour aborder la téléopération par retour de force, à savoir la téléopération haptique, avant de présenter les approches les plus courantes pour le contrôle de téléopération.

1.2 La téléopération robotisée

Cette section est consacrée, en premier lieu, à une présentation historique de la téléopération, ceci afin de mieux en comprendre les évolutions et les enjeux. Puis nous détaillons les premières implémentations de la téléopération et enfin nous introduisons les principes de la téléopération haptique.

1.2.1 Les premières téléopérations robotisées

Au milieu du XX^e siècle, la recherche nucléaire a poussé le concept de téléopération vers un nouvel horizon en utilisant des mécanismes articulés qu'il conviendrait d'appeler "automates". En 1940, l'américain Raymond Goertz a conçu un télémanipulateur passif (actionné uniquement par l'opérateur), capable, pour la première fois, d'aider un opérateur humain à manipuler des matériaux radioactifs derrière un bouclier de protection [Goertz1947]. Ce dispositif était totalement mécanique et sans retour d'information autre que celui de la vue directe. Goertz a alors imaginé un dispositif mécanique - sans actionneurs - composé d'un couple d'automates passifs mécaniquement liés : un automate maître que l'opérateur manipule et un automate esclave qui reproduit ses actions. La manipulation au travers de ce dispositif permettait que l'opérateur puisse ressentir, sur l'automate maître, les forces et les vibrations dont l'automate esclave était le siège. Ainsi, le retour n'était pas seulement visuel mais aussi sensitif.

La seconde version de ce dispositif comportait une partie électrique, cependant sa commande était particulièrement inconfortable, car elle se faisait via un ensemble d'interrupteurs. Par la suite, dans les années 60, la liaison mécanique directe entre le maître et l'esclave fut remplacée par une liaison électrique. C'est alors qu'on a pu utiliser

le terme robot. Le robot esclave, avec sa propre énergie et sa propre motorisation, reproduisait alors les actions du robot maître manipulé par l'opérateur (aussi désigné l'expert). Ce type de liaison a permis une modification des échelles de grandeurs, de forces ou de couples, autorisant ainsi la manipulation de charges lourdes. En contrepartie, le retour sensitif était perdu : seule la vue permettait à l'opérateur expert de jauger ses mouvements.

Le premier grand projet français de robotique médicale téléopérée fut "Spartacus". Pensé en 1975, il a regroupé plus de 30 laboratoires. L'objectif était de développer un robot téléopéré pour l'assistance aux tétraplégiques n'ayant plus usage de la préhension bilatérale. Le télémanipulateur conçu dans ce cadre (MAT1), possédait 7 degrés de liberté (ddl), il était totalement contrôlable par une personne handicapée [Dupourqué1981]. Un tétraplégique pouvait le commander pour nombre de tâches quotidiennes. On imaginait l'équiper de capteurs d'efforts et de capteurs tactiles pour assurer une préhension souple. Il fut désigné par le terme "téléthèse". Cette acception n'a cependant pas résisté au temps.

En 1982, le Laboratoire d'Automatique et Systèmes Homme-Machine de Lille et une équipe de médecin lillois ont développé un robot d'assistance chirurgicale téléopéré : le robot MSVO (Micro-télémanipulateur Stéréotaxique pour Vitrectomie Oculaire) afin de pratiquer des vitrectomies oculaires (ablations du gel situé à l'arrière du cristallin). Ce robot comportait 7 ddl, et permettait l'insertion d'une aiguille dans l'orbite oculaire sous contrôle téléopéré d'un expert médical [Guerrouad1989], [Poisson2019].

A la même période, de 1980 à 1986, un programme national français, dirigé par Georges Giralt, rassemblait de nombreuses équipes autour des thèmes robotiques. Il s'intitulait Automatisation et Robotique Avancée (ARA). ARA était axé sur la robotique industrielle et a été considéré comme un projet marquant en raison de sa multidisciplinarité, car il touchait à de nombreux aspects de la robotique, tels que la téléopération, la robotique générale, la mécanique, les ateliers flexibles, la vision synthétique et l'intelligence artificielle. La partie téléopération de ce projet portait sur la manipulation d'objets tels que les produits toxiques et le démantèlement d'une bride dans une chambre radioactive. La robotique générale couvrait les algorithmes de contrôle et de perception, la prise de décision, la planification et l'exécution des tâches. La mécanique couvrait la conception mécanique et mécatronique du robot : sa structure, le nombre de degrés de liberté, les types de capteurs... Le robot utilisé dans le projet ARA était un bras manipulateur MA23 de la société La Calhene. Ce robot exécutait des tâches non fréquentes, complexes, qui ne pouvaient pas être décrites totalement. ARA était un exemple particulièrement représentatif de la recherche multidisciplinaire, ce qui a permis de développer de nouvelles applications dans le traitement de l'image et de la robotique en milieux hostiles (nucléaire, spatial et médical).

Depuis 1995, notre laboratoire (Laboratoire Vision et Robotique -LVR- à l'époque) mène des recherches sur la téléopération de robots médicaux et plus particulièrement sur le thème de la télé-échographie robotisée. Le robot Syrtech (Figure 1.2a), spécialement conçu pour cette pratique, a été utilisé lors d'une Première mondiale en 1998 entre la France et le Népal [Gourdon1999]. Piloté à distance par un expert en échographie, le robot déplace une sonde ultrasonore sur le corps d'un patient. Les images ultrasonores acquises, transmises en temps réel à l'expert, permettent à ce dernier de pratiquer son diagnostic comme s'il était en proximité du patient.

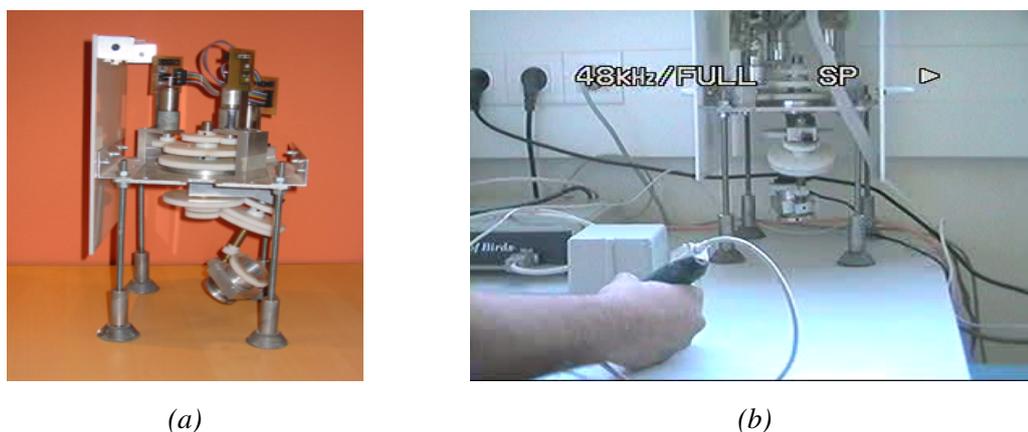


FIGURE 1.2 – Robot porte-sonde-échographique Syrtech à 3 ddl (à gauche) (Figure 1.2a) et sonde fictive utilisée pour la téléopération de Syrtech (à droite) (Figure 1.2b).

Différents dispositifs complémentaires ont été développés au cours des années suivantes, au travers nombreux projets ciblés télé-échographie robotisée dans lesquels était également impliqué notre laboratoire : le robot TER, développé en partenariat avec le laboratoire TIMC (Figure 1.3a) [Vilchis2001], le robot Teresa (Figure 1.3b) imaginé pour des télé-échographies spatiales (projet mené avec l'Agence Spatiale Européenne -ESA-) [Vieyres2003], [Courrégés2005], les robots Otelo1 et Otelo2 développés dans le cadre du projet européen Otelo (Figure 1.3c) [Arbeille2003], [Delgorge2005], les robots Estele (Figure 1.3d) et Melody (Figure 1.3e) produits par des partenaires industriels et le robot Prosit développé dans le cadre du projet ANR de même nom (Figure 1.3f) [Essomba2012].

La distance de séparation entre le poste maître et le poste esclave s'avère être très variable en fonction de l'application. Lors d'applications médicales, les robots maître et esclave peuvent se situer dans la même pièce ou dans des pièces adjacentes, comme dans le cas d'une opération avec le robot de chirurgie mini-invasive Da Vinci (voir plus loin la figure 1.9b). Dans cette utilisation, les robots maître et esclave sont placés à proximité

l'un de l'autre dans la même salle d'opération. En revanche, certaines procédures médicales peuvent se dérouler sur des distances beaucoup plus grandes, par exemple entre des villes d'une même nation ou même entre des continents distincts. Un exemple est la télé-échographie réalisée par le robot Syrtech en 1998 entre la France et le Népal. La conquête de Mars, comme récemment avec le robot Persévérance et l'exploration interplanétaire représentent l'exemple extrême de la téléopération à grande distance.

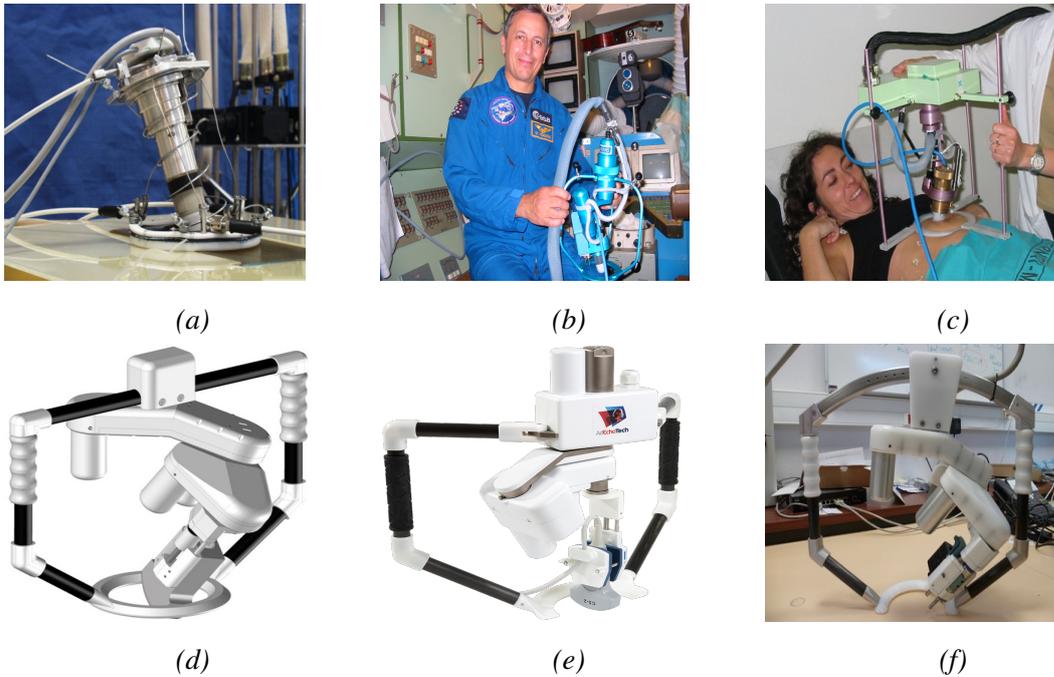


FIGURE 1.3 – *1.3a* Robot porte-sonde de Télé-Échographie Robotisée (TER). *1.3b* Robot Teresa, à 4 ddl, imaginé pour des échographies spatiales (projet Agence Spatiale Européenne -ESA-). *1.3c* Robot Otelol, à 6 ddl, (projet européen Otelol). *1.3d* Robot Estele à 4 ddl. *1.3e* Robot Melody à 4 ddl. *1.3f* Robot Prosit à 4 ddl.

Le retour d'effort s'avère indispensable pour des applications spécifiques pour lesquelles l'opérateur doit ressentir ou mesurer son action. Cette notion fut appliquée de manière moderne par l'équipe de l'australien Rodney Brooks avec les projets Grope I [Steelman1969] à Grope III [Brooks1990]. Le dispositif matériel que constituait le bras esclave est remplacé par "un dispositif logiciel" (une simulation) contenant des objets virtuels dotés de propriétés physiques particulières. Le robot maître est alors un robot manipulateur à 6 ddl. Dans la dernière version développée par les auteurs, la manipulation se fait dans une simulation du monde nanoscopique où l'opérateur peut déplacer des molécules virtuelles. Il peut alors ressentir, à son échelle, une image des forces moléculaires agissant sur les particules. Cette téléopération montre qu'il est possible d'agir, via un facteur d'échelle convenablement choisi, entre le poste maître et le poste esclave.

Le retour de force s'est imposé dans la plupart des applications de téléopération robotisée car il permet à l'opérateur, localisé sur le site maître, de ressentir les interactions du monde réel qui ont lieu sur le site esclave. Cette capacité du système téléopéré revêt une extrême importance dans le domaine médical où l'expert veut conserver la maîtrise de son acte et de ses décisions. Toutefois, il nous faut préciser que le retour d'effort n'est en aucune manière obligatoire pour la réussite d'une opération. Pour preuve, nous citerons le cas du robot de chirurgie Da Vinci qui avoisine à ce jour les 8 millions d'utilisations. Il est capable des plus hautes prouesses en termes de chirurgie téléopérée, il fonctionne cependant admirablement bien sans retour d'effort. Par ailleurs, il a été montré, par des chercheurs de notre laboratoire, que pour des applications d'échographie téléopérée, parce qu'elles sont des applications non-invasives, l'emploi d'un dispositif passif (équipé d'un simple ressort) au poste maître, apportait une sensation d'effort variable très appréciée des échographistes [Mourioux2005]. Cette sensation, bien que non fidèle à l'interaction distante robot-patient, contribuerait à améliorer le confort de l'expert, donc par voie de conséquence la qualité de son diagnostic.

1.2.2 L'évolution de la téléopération haptique

1.2.2.1 L'interface haptique

Si le retour de force n'est pas indispensable à la réussite d'une téléopération (parce que les opérateurs se sont entraînés à travailler sans -cas du Da Vinci-), il est quand même particulièrement utile dans la majorité des applications de téléopération moderne. Évidemment, selon les domaines applicatifs, les dispositifs diffèrent selon la sensation à fournir en retour à l'opérateur expert. Ces sensations ressenties par l'opérateur sont alors de deux types : la perception du mouvement, que l'on appelle perception kinesthésique et la perception tactile, liée au sens du toucher. La majorité des applications de téléopération exploitent la perception kinesthésique.

Le développement d'une perception kinesthésique nécessite de créer des forces et des couples dans la main de l'opérateur. Le dispositif par lequel l'opérateur téléopère son robot distant et qui fournit en retour des forces (voire aussi des couples, mais pas toujours) est appelé interface haptique. Cette interface assure ainsi deux fonctions : la commande du robot distant et le retour des forces (et éventuellement des couples) dans la main de l'opérateur.

Le terme haptique vient du grec "haptomai" signifiant le toucher. Il a été utilisé pour la première fois en robotique par Lederman [Lederman1972]. Le rôle d'une interface haptique est de reproduire les sensations réelles du toucher. Au travers de ce rendu, deux types de retour se distinguent. D'une part le toucher proprement dit, pour lequel le

téléopérateur ressent, au niveau de la main, comme la structure et le type de surface qu'il touche et d'autre part le retour d'effort, comme les forces et les couples résistants ressentis.

La littérature classe ainsi les interfaces haptiques en deux catégories : les interfaces tactiles et les interfaces kinesthésiques, encore appelées "à retour d'effort". Les dispositifs tactiles permettent au téléopérateur de ressentir la forme, la texture ou la température des objets grâce à divers types de capteurs situés sur la peau des doigts du téléopérateur. Plusieurs technologies sont développées, notamment avec des matrices de mini picots vibrants contrôlés en fréquences permettant de simuler des surfaces dures, douces ou rugueuses [Bach-y Rita1998]. La technologie proposée par le Dr Suichi Ino de l'université d'Hokkaido, au Japon, est basée sur un système de rendu de température permettant une discrimination tactile [Ino1993]. Toutefois, le retour tactile est encore assez peu utilisé en téléopération.

La grande majorité des interfaces haptiques utilisées en téléopération robotisée sont basées sur le retour kinesthésique : le dispositif permet de faire des retours de forces et de couples (mais pas toujours, sur les interfaces haptiques simples et bon marché) qui s'opposent aux mouvements du téléopérateur. Les mouvements de ce dernier sont ainsi freinés, accompagnés ou stoppés selon les directions et l'intensité avec lesquelles il manœuvre le bras maître [Burdea1992]. Ce bras maître devient donc une interface haptique, puisqu'il réalise deux fonctionnalités : il permet de diriger le bras esclave distant et il permet, de plus, de restituer les efforts dans la main de l'opérateur.

Pour la téléopération robotisée, nous pouvons ainsi définir une interface haptique comme étant un système mécanique robotisé tactile ou kinesthésique, capable de créer une interaction entre un humain et l'environnement distant. [Casiez2004] a distingué deux grandes familles d'interfaces haptiques à retour de force :

- * Les dispositifs "human based" : dispositifs portés par l'utilisateur, tels que des gants (Figure 1.4a) ou des exosquelettes (Figure 1.4b).



FIGURE 1.4 – 1.4a Le gant haptique Dexmo. 1.4b Le Space Exoskeleton Controller (SPOC).

Le gant haptique Dexmo de Dexta Robotics (Figure 1.4a) est un exosquelette mécanique pour les mains. Il reproduit tous les mouvements de la main et fournit un retour de force instantané qui permet de ressentir la taille, la forme et la rigidité des objets virtuels. Le Space Exoskeleton Controller (SPOC), représenté (Figure 1.4b), est la quatrième génération de dispositif maître d'exosquelette développé par l'Agence Spatiale Européenne. SPOC est un dispositif haptique à retour de force entièrement actionné, doté de 8 ddl. SPOC utilise une architecture de contrôle à quatre canaux pour effectuer des téléopérations haptiques bilatérales pour des applications d'exploration spatiale.

* Les dispositifs “Desk based” : dispositifs posés sur support, tels que bras haptique (Figure 1.5a), stylets (Figure 1.5b) sondes ou poignées (Figure 1.5c).



FIGURE 1.5 – 1.5a le Virtuose 6D, 1.5b le Phantom omni, 1.5c le Falcon.

Le bras haptique virtuose 6D d'Haption (Figure 1.5a) est un dispositif haptique à 6 ddl assurant un retour de force élevé par ses 6 articulations contrôlables. Le dispositif haptique Phantom Omni de Sensable (Figure 1.5b) est un dispositif haptique à stylets avec 6 ddl dont les 3 premières articulations sont contrôlables et les 3 dernières sont libres. Le dispositif haptique Falcon de Novint Technologies (Figure 1.5c) est un exemple des dispositifs haptiques à poignée solidaire d'une nacelle d'une structure parallèle de type “Delta”.

Naturellement, l'architecture d'une interface haptique varie selon les applications de téléopération robotisée pour lesquelles elle est destinée. Normalement, le retour d'une information tactile telle que la rugosité ou la sensation de glissement est nécessaire si on souhaite faire une manipulation d'objets fragiles et de masse variable. Par exemple, en ayant ce retour de sensation de glissement, il devient plus facile de saisir un verre, qu'il soit vide ou rempli, qu'il soit sec ou mouillé. Cependant, nous n'avons pas actuellement d'interface haptique qui nous permette de ressentir ce glissement. Nous utilisons alors une interface haptique à strict retour d'effort. L'opérateur doit alors s'interroger pour savoir si le verre est plein ou vide par le retour d'une autre modalité (un retour d'image par exemple). Il doit aussi estimer la solidité du verre, en s'appuyant sur ses connaissances et

ses expériences, afin d'appliquer une force de préhension dont l'intensité sera compatible avec la tâche de saisie, autrement dit ne pas briser le verre ou en renverser son contenu.

1.2.2.2 Le retour multi-modal

Plus le téléopérateur aura d'informations de retour réalistes depuis le poste esclave, plus sa téléopération sera aisée. Nous avons vu que le retour haptique était fort utile. De plus, il peut être complété avec un retour visuel 2D ou 3D et un retour auditif : chacune de ces modalités, à condition qu'elles soient bien synchronisées entre elles, vont aider l'opérateur à "s'immerger" dans sa téléopération à distance. Ce retour combiné de plusieurs grandeurs est appelé retour multimodal. Dans la littérature, le téléopérateur peut être modélisé par plusieurs représentations :

le modèle du processeur humain [Card1983b], le modèle GOMS (Goal, Operator, Method, Sélection) [Card1983a], Keystroke [Card1983c], le théorème de l'action [Massaro1990]. Pour tous ces modèles, les organes qui reçoivent les stimulations en retour sont les suivants : les muscles (force/couple), la peau (toucher), les yeux (vision) et les oreilles (sons).

Dans la majorité des applications robotiques, le téléopérateur utilise principalement un retour du type visuel : une diffusion du retour vidéo du robot et de son environnement. A cette vision directe peut s'ajouter ou se substituer, une image virtuelle issue de simulation du robot et de son environnement. Deux types de retours visuels sont définis pour la téléopération : le retour visuel simple et le retour visuel supplémentaire. Le retour supplémentaire, c'est l'ensemble des signalisations ajoutées au retour visuel simple afin d'enrichir les informations renvoyées à l'opérateur. Par exemple, l'affichage d'une horloge peut être utilisé pour faciliter la conscience temporelle [Glas2012], ou une croix ainsi que des informations numériques sur la position de la cible peuvent être superposées à l'image vidéo que voit l'utilisateur dans des tâches de ciblage [Hoff1991]. Aujourd'hui, le retour visuel supplémentaire est plutôt connu sous le nom de la réalité augmentée. Ainsi, quelle que soit la catégorie choisie, un retour visuel se définit par tout ce que l'opérateur voit à tout instant (vidéo du robot réel, ou simulation 3D du robot géré par l'ordinateur).

Le fait de concentrer les retours uniquement sur du visuel, implique une très forte charge de concentration pour le téléopérateur, afin de compenser le défaut des autres sens. Ce téléopérateur se fatigue alors très vite, ressent une sorte de désorientation, voire tunnelise sur un aspect particulier en perdant de vue la vision globale. Dans ce cas, des informations auditives peuvent améliorer la vigilance de l'opérateur, déchargeant d'autant les retours visuels [Sigris2013]. L'utilisation des retours auditifs tels que des alarmes et des alertes réduit les affichages superposés sur le retour visuel, ce qui réduit les distractions de l'opérateur [Secoli2011] et peut augmenter son attention sur la tâche

téléopérée qu'il a à exécuter. Une telle augmentation de vigilance est corrélée à une diminution des accidents ainsi qu'à une meilleure performance [Nagai2003]. L'enrichissement du retour visuel par les informations auditives aboutit à un meilleur contrôle intuitif du robot esclave pendant les tâches de manipulation [Tachi2003]. Ce retour auditif peut aussi aider à la localisation dans le cas où le champ de vision transmis au téléopérateur est limité [Simpson2004] - sur le même principe qu'un radar de recul de voiture par exemple. La modalité audio ajoute réellement un plus et un confort d'utilisation pour le téléopérateur.

Plus il y a de modalités (vision, audio, haptique), plus la téléopération est facilitée et intuitive pour l'opérateur. Cependant, en général, les téléopérations utilisent essentiellement deux modalités : le retour visuel avec ou sans réalité augmentée et le retour haptique kinesthésique. La modalité sonore étant souvent limitée à des alarmes à caractère prioritaire. Quant à la modalité haptique du toucher, elle n'est pas technologiquement totalement au point.

1.2.2.3 Téléprésence et transparence

La téléopération ne peut plus être vue uniquement comme une manipulation à distance. Elle vise à projeter virtuellement le téléopérateur, sur les lieux de la manipulation : comme si il était réellement sur le site distant. Cette notion est formalisée sous le terme de téléprésence par Marvin Minsky en 1980 [Minsky1980]. Minsky a montré également la nécessité d'avoir un retour multimodal pour garantir la téléprésence. En 1992 Sheridan la sépare en deux catégories : la téléprésence et la présence virtuelle. La première renvoie le sentiment d'être physiquement présent sur un site physique distant, alors que la présence virtuelle renvoie le sentiment d'être physiquement présent dans un environnement virtuel (généralisé par ordinateur) [Sheridan1992]. Pour Biocca, la téléprésence est un critère subjectif mesurable par l'opérateur qui se sent immergé dans l'environnement distant [Nowak2003]. Quant à Giraldi, il qualifie l'objectif de la téléprésence par l'étendue des capacités de manipulation et de résolution de problèmes d'un téléopérateur [Giraldi2003].

A cette notion de téléprésence s'ajoute la notion de transparence qui décrit le degré de similitude entre ce que le téléopérateur perçoit et ce qu'il percevrait s'il était physiquement localisé sur le site distant. Pour cela, il se sert des impédances mesurées sur le site distant et sur le site de téléopération [Lawrence1993]. Pour Yokokohji, le terme de transparence signifie que les informations de force/position, du côté esclave, sont accessibles du côté maître [Yokokohji1994]. Finalement les résultats des recherches portant sur la transparence menée par Lawrence, Yokokohji et Yoshikawa ont prouvé la nécessité d'une transmission bi-directionnelle des forces ET des vitesses, pour procurer un sentiment de téléprésence transparente au téléopérateur.

1.3 Les différentes architectures de téléopération avec retour d'effort

En utilisant l'un des périphériques de retour de force présentés dans la section précédente, il est possible de concevoir un système de téléopération transparent qui permet à l'opérateur de se sentir projeté dans l'environnement distant grâce aux efforts ressentis. Le robot esclave, dans cette application transparente, reproduit de manière identique les mouvements du robot maître (ici un bras haptique, généralement un dispositif kinesthésique). Tandis que le dispositif maître reproduit fidèlement les efforts exercés par le robot esclave sur son environnement de travail (réel ou virtuel). Dans le cas d'une téléopération, ces forces résultant d'une interaction physique entre le robot et l'environnement distant sont réelles, par contre elles sont fictives et générées virtuellement dans le cas d'une simulation informatique. La transparence entre le poste maître et le poste esclave implique un certain degré de réversibilité mécanique dans la structure du robot esclave et celle du dispositif haptique utilisé par le téléopérateur. De nos jours, ces dispositifs maître et esclave sont équipés d'actionneurs électriques. La réversibilité mécanique peut cependant être envisagée sur des dispositifs mécaniques non réversibles à travers une boucle de contrôle courant/couple implicitement intégrée dans le contrôle bas-niveau de ces dispositifs. Cette boucle garantit une quasi-réversibilité mécanique qui permet de définir une multitude de solutions pour réaliser une téléopération transparente avec retour d'effort.

En ce qui concerne la théorie du contrôle, il a été souligné que pour atteindre une transparence élevée en téléopération, la commande bilatérale est un facteur clé, même si ce type de contrôle ne garantit pas simultanément la transparence et la stabilité en raison de l'incertitude du système, de l'environnement et des délais de communication entre les deux sites (maître et esclave). Par conséquent, selon Hashtrudi-Zaad et Salcudean, un système bilatéral doit trouver un équilibre entre la stabilité et la transparence [[Hashtrudi-Zaad2002a](#), [Hashtrudi-Zaad2002b](#)].

Afin de simplifier la représentation de chaque solution, un modèle simplifié pour les robots maîtres et esclaves a été choisi. Ce modèle décrit les robots comme étant constitués d'un seul degré de liberté avec des impédances simples (masse, raideur, amortissement) et au sein desquels les actionneurs sont des sources de force/couple parfaites (c'est-à-dire des structures mécaniques réversibles).

Dans la section suivante, nous présentons les différentes techniques de contrôle appliquées à la téléopération avec retour de force. En premier lieu, nous présentons la structure de commande bilatérale position/position, puis nous introduisons l'asservissement asymétrique (position/force), suivi de la stratégie du "Move and Wait", puis la commande supervisée et enfin la téléopération basée sur la passivité.

1.3.1 Asservissement bilatéral position/position

Le principe de cette solution de téléopération est basé sur une structure symétrique : le dispositif maître est asservi sur la position du robot esclave et vice-versa. La figure 1.6 représente l'asservissement bilatéral pour un système à un seul degré de liberté.

On note F_e et F_m les forces générées par les actionneurs de l'esclave et le maître respectivement. F_{op} et F_{ext} sont respectivement les forces exercées par l'opérateur sur le robot maître et par l'environnement sur le robot esclave. Finalement on note X_m et X_e les positions des deux dispositifs respectivement maître et esclave. Tous ces paramètres sont reliés par les deux équations suivantes :

$$X_m = M(F_{op} + F_m) \quad (1.2)$$

$$X_e = E(F_{ext} + F_e) \quad (1.3)$$

Ce type d'asservissement se réalise par une commande différentielle de position entre les deux robots maître et esclave.

$$F_{m_d} = {}^m K_p (X_e - X_m) \quad (1.4)$$

$$F_{e_d} = {}^e K_p (X_m - X_e) \quad (1.5)$$

Les deux équations précédentes de F_{m_d} et de F_{e_d} , ne reflètent qu'une partie de la commande, puisque généralement des frottements existent mais ne sont pas mentionnés. En considérant ces frottements, qui sont principalement visqueux dans ce cas, les équations précédentes s'écrivent :

$$F_{m_d} = {}^m K_p (X_e - X_m) + {}^m K_v \frac{\partial (X_e - X_m)}{\partial t} \quad (1.6)$$

$$F_{e_d} = {}^e K_p (X_m - X_e) + {}^e K_v \frac{\partial (X_m - X_e)}{\partial t} \quad (1.7)$$

Le système complet comprend des composantes statiques et des composantes dynamiques tels que les frottements secs, les forces de pesanteurs et les efforts de Coriolis et centrifuges. Quels que soient les éléments étudiés dans les deux systèmes (maître et esclave), le principe de base reste le même : chaque robot est asservi sur la position de l'autre, ainsi chacun des robots reçoit une consigne proportionnelle à l'écart de position qu'il y a entre eux.

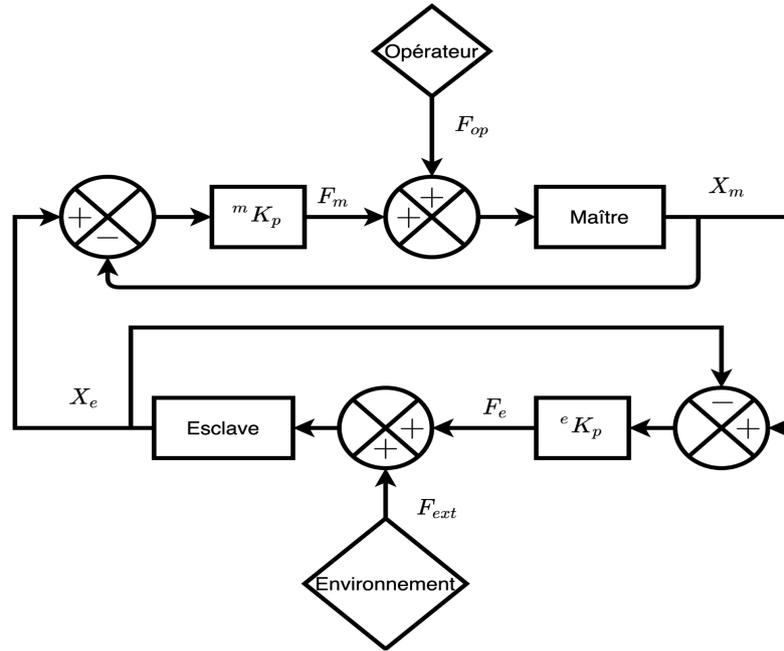


FIGURE 1.6 – Asservissement bilatéral position/position

Pour résumer, ce type d'asservissement repose sur la réversibilité mécanique des dispositifs maître et esclave, où cette caractéristique mécanique permet à une force F_{op} exercée par l'opérateur sur le robot maître, ici le dispositif haptique, de se manifester par un déplacement (X_m). Ce déplacement volontaire du dispositif maître constitue la consigne à exécuter par le robot esclave. Puisque la structure est symétrique, le même phénomène est dupliqué dans le sens inverse par l'esclave.

1.3.2 Asservissement asymétrique position/force

Le principe d'asservissement bilatéral asymétrique repose sur le principe du retour d'effort vers le maître. Le dispositif esclave, par cette méthode, est asservi sur la position du robot maître (le dispositif haptique), tandis que le maître a pour consigne les forces appliquées par l'environnement sur l'esclave (Figure 1.7). Généralement ces efforts d'interactions (couples, forces) sont mesurés par un capteur d'effort.

D'après la figure 1.7, F_e , la force mesurée résulte de l'interaction directe du robot esclave avec l'environnement qui n'est autre qu'une raideur Z_e . Cette force peut être déduite par calcul à condition de connaître la localisation du point d'application X_0 . F_e est reliée à Z_e par une équation différentielle entre le point d'application et la coordonnée du dispositif esclave X_e .

$$F_e = Z_e(X_e - X_0) \quad (1.8)$$

La force F_e est idéale puisqu'elle provient d'un calcul direct d'impédance. En téléopération bilatérale où le but est d'améliorer la téléprésence (amélioration de la

sensation de présence de l'opérateur sur le site esclave), cette force n'est pas déduite par un calcul théorique mais elle est plutôt fournie par un capteur d'effort. Dans le cas d'un asservissement dans l'espace articulaire ce capteur est localisé au niveau de l'articulation concernée. Dans le cas d'un asservissement dans l'espace cartésien ce capteur est localisé au bout de la chaîne cinématique du robot esclave.

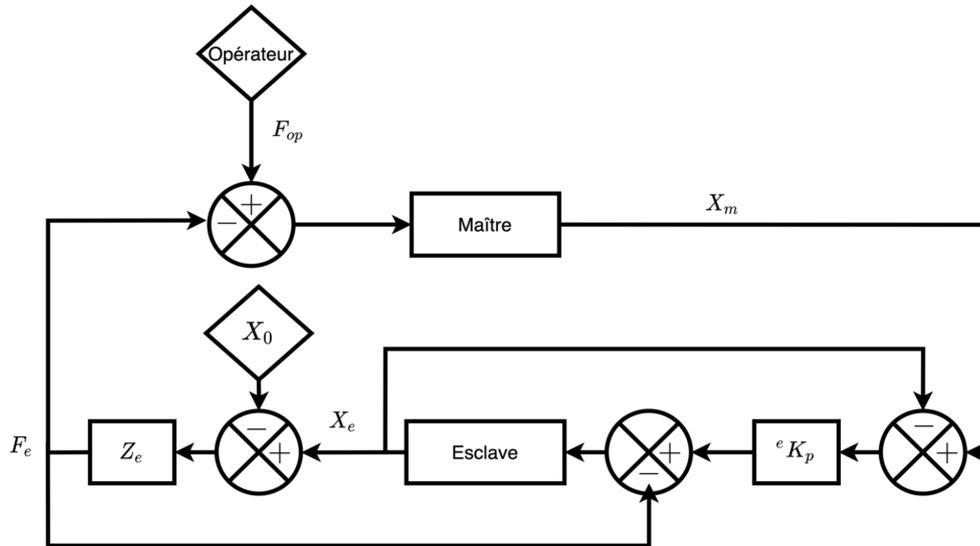


FIGURE 1.7 – Asservissement asymétrique - position/force

Pour résumer, ce type d'asservissement permet d'avoir une transparence plus élevée par rapport à celle obtenue par asservissement bilatéral (position/position) au niveau de la perception du retour haptique. De plus, l'application de cette technique provoque une projection sensorielle (niveau tactile) de l'opérateur dans l'espace distant qui lui provoque la sensation d'être en contact direct avec l'environnement. Cette sensation du toucher, fournie à l'opérateur, est généralement modulée : une augmentation des efforts si les forces de contact mesurées sont faibles, une diminution de ces efforts si les forces mesurées sont très grandes par rapport aux limites du dispositif maître. Donc la téléprésence et la transparence dépendent de la bande passante des efforts des systèmes ainsi que du gain appliqué aux efforts mesurés.

Dans les expériences simplifiées (Section 1.3.1) et (Section 1.3.2), l'effet du retard de transmission des consignes du maître vers l'esclave, et réciproquement, était négligé, ce qui contredit la réalité. Ce retard était le sujet de l'étude de Sheridan [Sheridan1963] et Ferrell [Ferrell1965] qui a abouti à la définition d'une nouvelle stratégie de contrôle "Move-and-Wait" ou ce retard est considéré.

1.3.3 Stratégie move-and-wait

Les expériences de télémanipulation menées par Sheridan et Ferrell, au début des années 1960, avaient un objectif de quantification du temps total requis pour accomplir une tâche spécifique par téléopération en présence de retard. Les expériences étaient divisées en deux catégories : une première qui ne présente aucun délai de transmission des consignes entre maître et esclave, et une seconde présentant un délai de communication.

Chaque fois que des délais étaient introduits dans la boucle de communication, l'opérateur humain réagissait à ce retard en adoptant une stratégie séquentielle dans l'exécution du mouvement pour s'assurer que la tâche était bien terminée. Cette stratégie est appelée "Move and Wait". Ainsi, une telle stratégie consiste à initier un mouvement de contrôle et à attendre la réponse du robot distant, puis procéder à un mouvement correctif et attendre de nouveau pour voir la réponse retardée du robot distant. Ce cycle d'exécution se répète en boucle, jusqu'à ce que la tâche soit accomplie.

Selon les expériences de Sheridan et Ferrell [Sheridan1963], les N gestes distincts effectués par l'opérateur lors de la stratégie "move-and-wait", varient selon le degré de difficulté de la tâche et ne dépendent pas de la valeur du délai. Ainsi, le temps d'achèvement T , d'une tâche précise peut se calculer à partir de la valeur N comme suit :

$$T = t_r + \sum_{i=1}^N [(t_m(i) + t_w(i)) + (t_r + t_d).N + t_g + t_d] \quad (1.9)$$

avec t_r qui désigne le temps de réaction de l'opérateur humain, t_m la durée des manœuvres, t_w le temps d'attente après chaque action, t_g le temps de préhension, t_d le retard introduit dans le canal de communication et N le nombre total de gestes.

Ces expériences ont abouti à une double conclusion : la première montre que le temps d'achèvement des tâches est linéaire vis-à-vis du retard présent dans la boucle, et la seconde montre que l'opérateur humain agit de façon "stable", autrement dit, 'qu'il initie une séquence de manœuvres cohérentes en accord avec la stratégie "move-and-wait".

1.3.4 Contrôle supervisé et ses variantes

Comme le temps d'achèvement de la tâche dépend linéairement du facteur retard dans la boucle de commande, une des façons de contourner ce problème a été proposée par Ferrell et Sheridan en 1967 [Ferrell1967], qui consiste à permettre aux commandes émises par l'opérateur d'être de nature supervisées. De cette façon, le robot esclave est

doté de plus “d’intelligence”, lui permettant d’accomplir de façon autonome certaines sous-tâches. Ce genre d’approche ignore la dynamique de la manipulation et se concentre sur l’aspect stéréo-géométrique du problème, à savoir la position du manipulateur, l’objet manipulé et les obstacles éventuels. Le progrès des microprocesseurs des années 1970 à 1990, a amené la téléopération à mieux exploiter leurs puissance calculatoire, pour réaliser la supervision à un niveau plus élevé. Ce niveau élevé de supervision a permis à l’opérateur humain d’envoyer des commandes de haut niveau au manipulateur distant [Fong1986].

De plus, l’essor de l’informatique, à cette époque, a transformé le contrôle de supervision pour être de plus en plus contrôlé par logiciel [Madni1983]. Ce nouveau type de contrôle conserve l’aspect de commande supervisé, mais réduit au minimum l’effort humain dans la boucle de perception. Ces logiciels différencient les commandes de téléopération et les décomposent en commandes primitives et commandes variables. Les commandes primitives ne nécessitent aucun apport de l’opérateur humain, par exemple la fermeture de la pince d’un robot manipulateur. Par contre, les commandes variables nécessitent des entrées fournies par l’utilisateur : comme des points ou une spécification complète de la trajectoire, par exemple se déplacer d’un point A vers un point B. Ainsi cette variante de contrôle de supervision nous permet de simplifier et de décomposer des tâches complexes par enchaînement de commandes primitives et variables. D’autres améliorations ont été suggérées dans Sato et Hirai [Sato1987], notamment l’introduction des différents outils logiciels “software jigs” et le mode d’enseignement “teaching mode” du téléopérateur. Le “software jig” fait référence aux contraintes mises en œuvre dans le logiciel, qui allège et facilite les tâches de l’opérateur humain ; par exemple, transporter un verre d’eau ne demande aucun changement d’orientation le long des axes du plan horizontal ; ceci est une tâche susceptible d’être gérée par le logiciel. De plus, l’introduction d’un module de mode d’apprentissage permettra à l’utilisateur de reproduire la tâche effectuée précédemment en appelant le sous-programme qui exécute ce qui a été précédemment stocké en mémoire.

1.3.5 La téléopération basée sur la passivité

À la fin des années 1980, il a été observé qu’un système de téléopération, composé d’un maître et d’un esclave avec leurs contrôleurs respectifs, situé entre l’opérateur humain et l’environnement, peut être modélisé comme un réseau à deux ports pour lequel des outils d’analyse existent déjà comme l’analyse de Lyapunov. [Anderson1989b], [Anderson1989a], [Buzan1989], [Hannaford1988], [Hannaford1989b], [Hannaford1989a]. Le réseau à deux ports est illustré dans la figure 1.8.

Il est possible de représenter le comportement de ce réseau à l'aide de diverses représentations matricielles telles que :

l'impédance $Z(s)$ de Raju [Raju1989], qui relie les forces aux vitesses, ou l'hybride $H(s)$ de Hannaford [Hannaford1989b, Hannaford1989a], qui relie les vecteurs d'entrée mixtes force-vitesse aux vecteurs de sortie mixtes force-vitesse. Chacune de ces représentations est utile en fonction des systèmes de mesure et de commande disponibles.

Modèle de Raju :

$$\begin{pmatrix} F_m(s) \\ F_s(s) \end{pmatrix} = Z(s) \begin{pmatrix} \dot{x}_m(s) \\ \dot{x}_s(s) \end{pmatrix} \quad (1.10)$$

Modèle de Hannaford :

$$\begin{pmatrix} F_m(s) \\ \dot{x}_s(s) \end{pmatrix} = H(s) \begin{pmatrix} \dot{x}_m(s) \\ F_s(s) \end{pmatrix} \quad (1.11)$$

La représentation hybride de Hannaford est devenue la base de plusieurs contributions les plus utilisées en téléopération, telles que l'approche par des variables d'ondes (scattering variable) introduite par Anderson [Anderson1989b] et le modèle à 4 canaux introduit par Lawrence [Lawrence1993]. Il est à noter que la téléopération passive n'est pas limitée à ce que nous avons présenté, mais nous pouvons trouver de multiples variantes de chaque approche. Quelques variantes importantes, par exemple la formulation de la variable d'onde présentée par Niemeyer et Slotine [Niemeyer1991a], l'adaptation d'impédance, Niemeyer et Slotine [Niemeyer1991b], la téléopération par Internet [Goldberg1995].

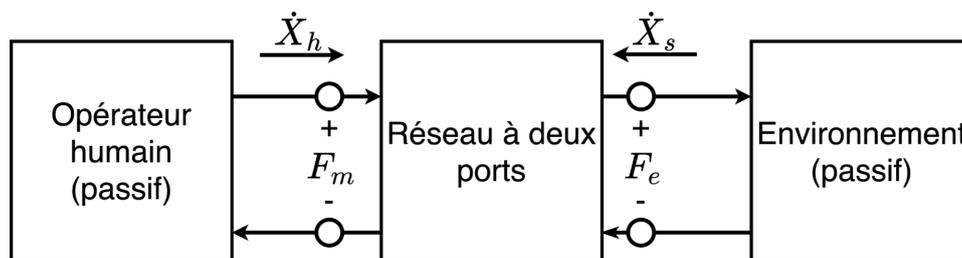


FIGURE 1.8 – Le réseau à deux ports

1.4 Applications de la téléopération avec retour d'effort

Au cours des 50 dernières années, la téléopération bilatérale a été appliquée dans divers domaines telle que : la commande de robots spatiaux, la commande de véhicules sous-marins, la manipulation de matières dangereuses, la conduite de robots mobiles avec évitement d'obstacles et enfin dans le domaine de la médecine (chirurgie, diagnostic). La plupart des concepts théoriques évoqués dans les sections précédentes ont été exploités de façon explicite ou implicite en vue d'obtenir une téléopération stable, ergonomique et transparente.

1.4.1 La manipulation des matières à risque

La manipulation de matériaux nucléaires a été à l'origine de la première application des manipulateurs téléopérés. Les problématiques d'une telle tâche ont été décrites tout au long de l'étude de Clément [Clément1985], telles que la mise à l'échelle du mouvement, le retour visuel, les contraintes de l'espace de travail et le retour de force. De plus, des applications récentes sont apparues dans ce domaine comme les travaux de Wang et Yuan concernant la détection de fuites de matériaux radioactifs scellés [Wang Wei2004].

1.4.2 Les véhicules subaquatiques

Depuis 1970, la téléopération a été développée notamment pour des robots sous-marins utilisés pour l'exploration scientifique ou les activités militaires. C'est le cas par exemple des travaux menés par le laboratoire français IFREMER [Laranjeira2020], [Arnaubec2015], [Raugel2019]. L'utilisation de câbles pour guider de tels véhicules est peu pratique en raison des risques d'enchevêtrement et d'interférence. D'autre part, la dispersion des signaux de contrôle et de retour d'information à travers les milieux aquatiques entraîne des retards importants qui nuisent aux performances et à la stabilité du système. L'approche dominante pour aborder ces systèmes téléopérés était le contrôle par supervision et c'est dans cette perspective que le problème des délais a été traité [Funda1991], [Madni1983], [Yoerger1987]. Un premier système de manipulation sous-marine est apparu en 1973 avec Urich, dans lequel le retour de force était utilisé.

1.4.3 Les robots spatiaux

L'exploration et l'exploitation spatiales imposent le recours à des robots téléopérés [Skaar1994], qui réduisent le coût des opérations d'assemblage, de maintenance et de réparation effectuées dans l'espace. Plusieurs études ont été publiées dans ce domaine par : Bejczy, Imaida, Jenkins, Hirzinger, Lee et Yoon [Bejczy1987], [Imaida2004],

[Jenkins1986], [Hirzinger1987, Hirzinger1989, Hirzinger1993], [Lee1985], [Yoon2004].

La téléopération dans l'espace ne se limite pas aux manipulateurs robotiques, elle peut également être appliquée dans le domaine de la robotique mobile. Les exemples les plus notables sont les robots mobiles utilisés par la NASA lors de l'exploration de la planète Mars : le robot Mars Exploration Rover (MER), les robots Spirit et Opportunity. La téléopération haptique de ces robots mobiles permet à l'opérateur d'avoir une idée de l'environnement dans lequel évolue le robot et de réduire la nécessité d'un retour visuel de haute qualité.

1.4.4 La téléopération appliquée au domaine médical

1.4.4.1 La téléchirurgie

La téléopération a trouvé des champs d'application prometteurs en médecine, par exemple en téléchirurgie. Cette dernière permet un échange d'expertise médicale à travers la planète sans que le médecin soit obligé de se déplacer. Cela économise du temps, de l'argent et des efforts en rapprochant la salle d'opération éloignée du chirurgien. Funda, Madhani ou Taylor décrivent les enjeux liés à la conception des systèmes de téléchirurgie [Funda1996], [Madhani1998], [Taylor1995].

Aujourd'hui, le nombre de chirurgies téléopérées réalisées à une distance importante entre le maître et l'esclave ne sont pas très courantes, à l'exception des démonstrations d'Orange (Opération Lindbergh) et d'Huawei (Chirurgie de la colonne vertébrale) en 2001 et en 2021 [Marescaux2002], [Tian2020]. De telles démonstrations tenaient plus de la promotion que du réel besoin médical. Ce faible niveau de réalisation est également dû au manque de maturité de la technologie de communication. À l'époque, la connexion entre le maître et l'esclave était à faible débit, empêchant l'exécution d'une telle opération. Ce faible débit ne garantissait pas la stabilité de la téléopération en raison de son retour multimodal non fiable. Cependant, avec l'émergence des connexions à haut débit comme la fibre optique et la 5G, le retour multimodal nécessaire au succès de cette opération est assuré.

Le champ d'application de la téléchirurgie bilatérale couvre à ce jour de nombreux secteurs médicaux : la chirurgie mini-invasive, la chirurgie neurologique, les chirurgies oculaire, abdominale ou génitale. Elle peut aussi être appliquée à bien d'autres interventions puisque le système de téléchirurgie repose sur les capacités du chirurgien spécialiste et sur son expertise et son savoir-faire. Dans de telles applications, le télé-robot est une simple extension de bras du chirurgien par un bras artificiel pour

améliorer la dextérité durant l'intervention

Plusieurs systèmes de téléchirurgie sont actuellement accessibles sur le marché. Le plus célèbre et le plus utilisé étant le robot Da Vinci (Figure 1.9b). D'autres dispositifs ont été ou sont encore utilisés : Zeus (Figure 1.9a), DLR Micro Surge (Figure 1.9c) ou Sina flex (Figure 1.9d).

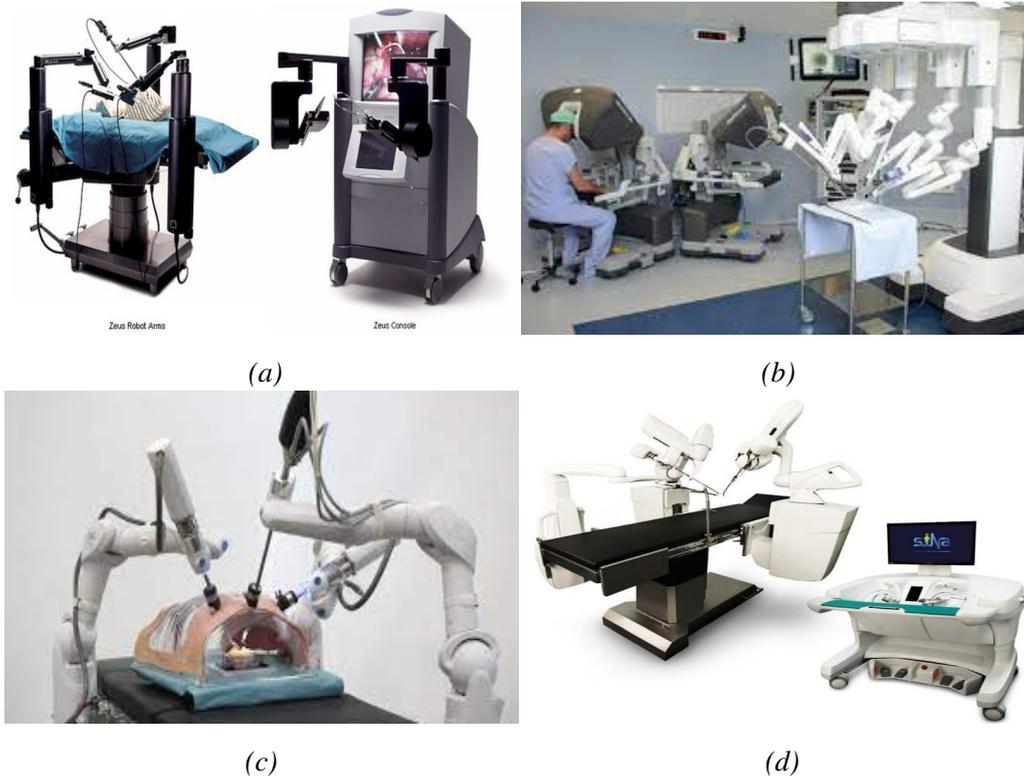


FIGURE 1.9 – 1.9a le robot Zeus et son poste de téléopération. 1.9b Le robot Da Vinci et son poste de téléopération. 1.9c Le robot DLR Micro Surge. 1.9d Le robot Sina flex et son poste de téléopération.

1.4.4.2 L'examen téléopéré

L'examen médical est basé sur un contact direct entre le médecin et le patient. Grâce à la téléprésence et à la transparence offertes par la téléopération bilatérale, ainsi qu'à la multimodalité du retour d'information, le médecin distant peut effectuer une consultation ordinaire comme si le patient était en face de lui.

La téléprésence offre des avantages importants pour les services médicaux, tels que l'extension de la portée et la réduction du temps de prestation des services médicaux, l'amélioration de la qualité du diagnostic et de l'intervention, la compensation et la réduction des contraintes humaines en termes de fatigue, d'observation, de dextérité et

de précision... Par exemple, l'absence de certains spécialistes dans les communautés reculées et les zones rurales peut être compensée par la mise à disposition de soins et de consultations médicales spécialisés téléopérés de manière efficace. La transmission des forces au moyen de dispositifs haptiques garantit une meilleure appréciation médicale, vu que l'interaction haptique médecin-patient est un élément crucial dans ce types de prestations, sachant que le toucher est souvent utilisé pour établir un diagnostic.

Dans la majorité des examens classiques, la pression exercée par le médecin sur un organe à examiner apporte des informations pertinentes (gonflement, amas de tissus anormaux, coupures...). En outre, l'examen téléopéré peut être d'une grande utilité dans le domaine humanitaire, par exemple lors de l'exploration de zones reculées, pour apporter une aide médicale urgente dans des régions touchées par des catastrophes naturelles ou des guerres. L'une des applications les plus connues de l'examen par téléopération est la télé-échographie. Les robots de télé-échographie les plus utilisés ont été présentés dans la section [1.2.1](#).

Quelle que soit l'application, le robot esclave télécommandé est en contact direct avec un environnement, qui peut être complexe et non structuré dans certaines applications. Dans les opérations médicales telles que la téléchirurgie et la téléconsultation, ce télé-robot est soit en contact direct, soit à proximité du patient, tandis que dans certains cas, il doit remplacer l'équipe médicale dans des applications radiologiques à haut niveau de radiation telles que la tomographie assistée par ordinateur (CT scan).

En tenant compte de la présence humaine dans son environnement, ce robot doit assurer la sécurité humaine (tant pour les patients que pour les médecins). Ainsi, nous avons vu l'intérêt de fournir un contrôle coopératif en termes de contrôle de compliance pour garantir la sécurité du patient et du personnel médical. Etant donné que notre laboratoire a été parmi les premiers à s'intéresser aux bénéfices de la téléopération en échographie, nous avons proposé d'associer le contrôle cobotique à la téléopération dans une application d'échographie télé-coopérative.

1.5 Conclusion

Nous pouvons conclure de tout ce qui précède l'importance du retour de force et/ou du retour tactile dans les applications "modernes" de téléopération. Nous avons également souligné la nécessité d'un contrôle coopératif dans ce type d'utilisation ainsi que la possibilité de créer des applications combinant à la fois la téléopération et la

cobotique (Chapitre 3, Chapitre 4). Enfin, nous avons souhaité fournir un récapitulatif du vocabulaire simple pour permettre au lecteur d'appréhender rapidement les concepts de téléopération, voir tableau 1.1.

Téléopération
Caractéristiques : Site distant Site local Bloc de communication Maître Esclave Proximité maître/esclave
Architectures : (Unilatérale Bilatérale) avec ou sans retour
Types de contrôle : Direct Assisté Supervisé
Téléprésence : Aucun Partiel Complet Augmenté
Type de raccordement(Maître/Esclave) : Mécanique électrique Par réseau
Degré d'autonomie(Robot esclave) : Aucun Faible Moyen Haut Complet
Type de téléopérateur : Manette Bras maître Dispositifs haptiques
Type d'interaction avec l'environnement : Aucun Saisie Contact
Type de délai de communication : Négligeable Fixe Variable
Type d'environnement : Microscopique Macroscopique statique dynamique
Application microscopique : Génie génétique Pharmaceutique Nano-robotique
Application macroscopique : Exploration (Militaire,Spatiale,Maritime) Médical (Diagnostique, Chirurgie) Gestion des éléments toxiques(Industrie chimique, Nucléaire)
Présence humaine : Actionneur dans le site local Téléprésence en site distant
Rôle humain : Opérateur Superviseur
Rôle du robot : Esclave
Types de télé-robots : Robot mobile Robot fixe
Types de retour : Retour de position/vitesse Retour de force/couple

TABLEAU 1.1 – *Tableau récapitulatif du vocabulaire dédié-téléopération*

2

État de l'art de la Cobotique

Le chapitre précédent a été consacré à une présentation de la commande robotique par téléopération; celui-ci concerne un principe complémentaire de cette commande : la cobotique. Nous rappelons la genèse et présentons les grands principes de la robotique collaborative (ou collaboration humain-robot). Sont ensuite décrits les différents types d'interactions qui transparaissent entre un humain et un robot en fonctionnement puis les différents types de commandes classiquement implémentées sur les robots pour gérer la manipulation : les commandes en amortissement ou en raideur active, les commandes en impédance ou admittance, les commandes en force. Nous proposons et développons le principe d'une commande par composant élastique virtuel. Enfin, les deux modalités que sont la téléopération et la cobotique font l'objet d'une analyse comparative.

Sommaire

2.1	Introduction	32
2.2	Émergence de la cobotique	33
2.2.1	De robotique à “robotique collaborative”	33
2.2.2	Le rôle de l’opérateur humain dans la cellule robotique	35
2.3	Les interactions humain-robot	36
2.3.1	Les différents types d’interactions humain-robot	36
2.3.2	Proposition de définition d’un Cobot	39
2.3.2.1	L’organisation de l’équipe cobotique	40
2.3.2.2	Les niveaux d’autonomie du robot	41
2.3.2.3	Les informations échangées entre humain et robot	42
2.3.2.4	L’opérateur humain dans la boucle de contrôle	42
2.3.2.5	La comanipulation	44
2.3.3	Différents types de tâches à accomplir en comanipulation	44
2.3.3.1	La planification démonstrative	44
2.3.3.2	L’adaptation des efforts	45
2.4	Différents types de commandes de comanipulation	46
2.4.1	Le contrôle passif de l’interaction	46
2.4.2	Le contrôle actif de l’interaction	47
2.4.2.1	La commande en amortissement	47
2.4.2.2	La commande en raideur active	48
2.4.2.3	La commande compliant : impédance/admittance	49
2.4.2.3.1	La commande en impédance	49
2.4.2.3.2	La commande en admittance	52
2.4.2.3.3	La commande hybride impédance/ admittance	54
2.4.2.4	La commande en force directe	55
2.4.2.5	La commande hybride position/force	56
2.5	Le concept de composant cobotique virtuel pour la commande compliant	58
2.5.1	Collision entre la pince du robot UR3 et la paume de la main	60
2.5.2	Collision entre la pince du robot et le fantôme flexible	63
2.5.3	Conduire à des robots plus sûrs	66
2.6	Analyse comparative entre téléopération et comanipulation	66
2.6.1	Les similitudes entre télérobotique et comanipulation	67
2.6.2	Les distinctions entre téléopération et comanipulation	68
2.7	Conclusion	70

2.1 Introduction

La cobotique, comme la téléopération, est une approche caractérisant un mode particulier d'utilisation et de commande des robots. Ces deux pratiques faisant, l'une et l'autre, partie du domaine plus large qu'est celui de la robotique collaborative.

L'usage courant du terme "cobot" est récent. Il s'est généralisé lors de la décennie passée, même si, comme nous le verrons plus loin, ce terme est apparu pour la première fois en 1999. Robots et cobots sont à l'origine des "machines" identiques. Nous pourrions énoncer, en guise de définition préliminaire, que le cobot est un robot qui présente un mode d'utilisation collaboratif privilégié avec l'humain. On évoque d'ailleurs à ce jour, pour une même machine utilisée mais selon l'emploi qui en est fait, les concepts de fonctionnements "robotique" ou "cobotique". Le comportement cobotique d'une machine est alors dépendant, à des degrés variables, des interactions directes et de proximité de type humain-robot. Parce qu'il est justement en plus grande proximité avec l'humain et parce qu'il est aussi plus directement sous son contrôle, le cobot perd en autonomie décisionnelle par rapport au robot, avec notamment une moindre autonomie en suivi de trajectoire. Cette analyse est en particulier soutenue par [Moulières-Seban2014]. La première particularité de la cobotique est ainsi l'existence d'une interaction par contact physique direct entre l'humain et le robot.

Cette interaction directe humain-robot soulève des questions concernant la sécurité des opérateurs humains qui interagissent avec une machine poly-articulée et en mouvement, lors d'une application collaborative. Ces questions de sécurité relatives à l'interaction sont abordées par les normes et directives qui spécifient les exigences de sécurité pour une application collaborative sûre. Nous citerons comme principales : ISO 10218, une norme datant de juillet 2011 (concernant exclusivement machines et robots industriels) et ISO/TS 15066, une spécification technique (TS) datant de février 2016, réexaminée en 2019.

Afin que les cobots soient conformes aux dites normes, dont le but est d'assurer un haut niveau de sécurité et la compliance à l'action humaine, les robots-cobots sont spécialement conçus pour y répondre. Pour cela, soit il est fait recours à des dispositifs passifs présents dans leurs articulations (par une approche mécanique intrinsèque), telles que les transmissions à variation continue [Moore2003], soit sont utilisées des méthodes de contrôle actives comme le contrôle d'admittance et/ou d'impédance (par une approche plutôt orientée commande). Ces deux méthodes, que l'on peut qualifier respectivement de passives et actives, permettent au global, le mouvement libre des articulations robotiques par un assouplissement de celles-ci (diminution momentanée des raideurs articulaires) lors d'interventions humaines. Le projet ANR SISCob, porté par le laboratoire PPRIME et dans lequel notre laboratoire était partenaire, avait cet objectif

d'apporter des solutions, à la fois par la mécanique et par la commande à ces questions de sécurité en cobotique. Nous évoquons, au cinquième paragraphe de ce chapitre, l'approche "commande" que nous avons développée dans le cadre de ce projet : la méthode du composant élastique virtuel (une capsule logicielle intégrée dans la commande et agissant entre l'actionneur et la sortie de l'articulation).

Par l'apport de cette souplesse articulaire, les cobots sont moins dangereux que les robots traditionnels. Pour cette raison, on constate que les structures cobotiques commencent à remplacer les robots rigides classiques et à être davantage présentes dans de nombreux secteurs : qu'il s'agisse de l'industrie, de la robotique médicale, de la robotique d'assistance ou des robots compagnons

Afin de mieux comprendre le concept de la "cobotique", nous allons rappeler son contexte historique et définir, plus finement que nous l'avons fait en préalable, le terme cobot. Nous définissons aussi ce qu'est un système cobotique et quelles sont ses caractéristiques principales.

2.2 Émergence de la cobotique

2.2.1 De robotique à "robotique collaborative"

Nous avons vu que depuis la fin des années 1960, les robots ont progressivement remplacé la main-d'œuvre humaine dans les industries manufacturières. Les robots sont globalement précis, robustes et surtout très flexibles, au sens où il est possible de re-programmer un robot en fonction de l'évolution des tâches qu'il doit accomplir. Malgré tout, un robot reste un dispositif dangereux. Ainsi, les opérations robotisées ont été réglementées par des directives et des textes stricts sur la manière d'éviter les accidents. Les premiers robots sont généralement mis en œuvre derrière des barrières de protection (ils le sont d'ailleurs encore majoritairement), évitant de ce fait toute interaction humaine directe.

Dans les années 90, l'administration de la santé et de la sécurité au travail en Amérique (OSHA) s'est inquiétée de la manière dont le constructeur General Motors (GM) et les autres grands industriels américains, en particulier ceux du secteur automobile, traitaient le problème des accidents du travail causés par le manque d'ergonomie dans les usines. À cette époque, l'OSHA a observé que les blessures de type industriel sont causées par une fatigue prématurée des opérateurs sur leur lieu de travail. L'OSHA a déclaré que l'industrie automobile devait s'attaquer à cet important problème et que GM, en tant que leader de l'industrie, se devait de montrer la voie.

Afin de répondre aux exigences de l'OSHA, GM a alors fait appel à des experts en robotique de l'Université Northwestern et de l'Université Californie-Berkeley (UC Berkeley), ainsi qu'à Prasad Akela (responsable de l'équipe robotique du GM Robotics Centre), pour trouver les moyens qui rendent les robots et les équipements péri-robotiques suffisamment sûrs afin qu'ils puissent être utilisés en équipe avec des personnes. À Northwestern, GM a financé les professeurs de génie mécanique J. Edward Colgate et Michael Peshkin, dont les recherches ont conduit aux premiers robots collaboratifs (possédant des articulations non-holonomiques dirigeables par l'opérateur humain) [Colgate1996]. Tandis qu'à UC-Berkeley, Homayoon Kazerooni a reçu un soutien pour travailler sur les prolongateurs ou amplificateurs de puissance humaine. Les dispositifs résultant de ces efforts ont ensuite été classifiés comme une classe hybride des dispositifs d'assistance intelligents (DAI) pour l'interaction physique directe du robot avec l'humain dans un espace de travail partagé.

Ces chercheurs ont ainsi introduit le terme de "robot collaboratif" permettant à l'humain de travailler avec ou en proximité d'un robot industriel. J.E. Colgate et M. Peshkin ont fondé en 1997 la société Cobotics : les robots produits par celle-ci utilisaient ce que l'on appelle aujourd'hui le "Hand Guiding" (contrôle guidé par la main). Ces modèles étaient employés pour l'assemblage final d'automobiles [Akella1999]. C'est alors qu'apparaît la première utilisation officielle du terme "cobot". Elle remonte ainsi au 14 septembre 1999, dans le brevet américain US005952796A de J.E. Colgate et M. Peshkin. Ce brevet décrit un cobot comme un appareil ET une méthode d'interaction physique directe entre une personne et un manipulateur universel contrôlé par un ordinateur. La fonctionnalité du cobot était de permettre le contrôle du mouvement par ordinateur, en dirigeant ou redirigeant une charge utile, en coopération avec le travailleur humain. Les termes cobot et cobotique étaient nés !

Cinq ans plus tard, en 2004, le géant industriel allemand KUKA a brisé la domination américaine sur le domaine de la cobotique et a proposé son premier cobot, le KUKA LBR 3 (LBR est une abréviation allemande signifiant robot de poids léger). Ce cobot léger commandé par ordinateur était le résultat d'une longue collaboration avec l'Institut du Centre aérospatial allemand. En tenant compte des commentaires de ses acheteurs, KUKA a fait progresser les technologies cobotiques vers de nouvelles perspectives. Il a sorti le KUKA LBR 4 en 2008 puis le KUKA LBR iiwa en 2013. Dans un autre pays européen, en 2008, le fabricant danois Universal Robots (UR) a développé l'UR5, premier cobot capable de fonctionner en toute sécurité aux côtés des salariés, éliminant ainsi le besoin de cage ou de barrière de sécurité. Puis UR a sorti le cobot UR10 en 2012 et, un peu plus tard, en 2015, un UR3 plus petit et à plus faible charge utile (3 kg). Le dernier et plus grand de la gamme des quatre, le UR16, est sorti en 2018. À ce jour, Universal Robots a pris le pas sur le volet commercial de la robotique collaborative avec environ 50 000

robots vendus au monde (ce qui toutefois, ne représente encore que quelques % des robots installés). C'est avec un UR3 que nous avons réalisé nos premières expérimentations de laboratoire. Nous avons également validé le concept de Téléopération et Comanipulation Combinée en ce mois d'octobre 2021 à l'APHP Georges Pompidou avec un UR3.

Ces nouveaux robots ont officiellement impulsé la période des robots collaboratifs flexibles et conviviaux : une nouvelle ère de la robotique industrielle a débuté. Ces robots offrent maintenant, aux petites et moyennes entreprises, la possibilité d'automatiser leurs sites sans avoir à investir dans des infrastructures technologiques coûteuses ou dans un réaménagement intégral de leurs ateliers de fabrication.

Entre 1999 et 2015, la majorité des cobots étaient des cobots à charge utile faible ou moyenne. Ceci a poussé l'entreprise japonaise FANUC, en 2015, à introduire son premier robot collaboratif, le FANUC CR-35iA, capable de supporter une charge utile de 35 kg. Pour des raisons de compétition, FANUC a développé une gamme de robots collaboratifs de faible charge, notamment le FANUC CR-4iA et le FANUC CR-7iA. Depuis 2015, les cobots ont été adoptés comme une nouvelle façon d'améliorer la productivité tout en assurant la sécurité des travailleurs [Moulières-Seban2017]. Avec son FANUC CRX-10iA, robot de portée moyenne et de 10 kg de charge, tout récemment commercialisé en 2020, FANUC a visiblement voulu se placer en leader de l'interaction robotique, en gérant la sécurité au contact avec une finesse non encore rencontrée.

La globalité des cobots produits sont des bras manipulateurs, sauf quelques-uns comme les robots Baxter et Sawyer de Rethink Robotics conçus en 2008 et 2015 ou le robot Yumi produit par la firme ABB en 2015. Ces trois robots sont des robots collaboratifs à double bras, utilisés en grande partie dans la recherche. Les cobots ne sont pas limités aux robots manipulateurs industriels, mais ils peuvent également présenter une structure humanoïde. Cependant cette catégorie de cobots n'est pas encore très développée et leur utilisation reste encore souvent confinée dans les laboratoires de recherche. NAO, développé par le français Aldebaran Robotics en 2006, fait figure de pionnier sur ce secteur. C'est un "super-jouet", nécessairement cobot, qui peut être utilisé comme un robot compagnon. Il est ainsi beaucoup exploité dans le monde de la rééducation, notamment auprès d'enfants autistes du fait de son fort potentiel interactif cognitif. Et que dire des exosquelettes, si ce n'est qu'ils sont, de par leur conception même, des dispositifs collaboratifs, donc des systèmes cobotiques.

2.2.2 Le rôle de l'opérateur humain dans la cellule robotique

L'intégration d'un cobot au sein d'un espace de travail robotique, donc en proximité d'un opérateur humain, doit tenir compte de la capacité d'apprentissage de cet opérateur,

car les opérateurs n'ont pas tous le même niveau d'éducation. Développer une application cobotique doit permettre d'assurer que chaque acteur de la scène ait une exacte compréhension de ce que sera sa propre contribution. Il a été souligné que la complexité des interventions dépend de la tâche exécutée par le ou les acteurs [Yanco2004], [Drury2003].

Il existe plusieurs catégories d'intervenants humains dans la boucle cobotique :

- Le simple opérateur : c'est lui qui pilote le robot. Le pilotage de l'action du robot peut se faire localement ou à distance. Dans ce premier cas, le robot fonctionne avec une faible autonomie décisionnelle.
- Le collaborateur : il est généralement caractérisé par un niveau d'éducation moindre. Ce peut être un humain travaillant de concert avec le robot sur un même objet.
- Le superviseur : il dirige les performances de la chaîne de production, contrôle la qualité de l'objet final et donne des ordres et des instructions aux travailleurs.
- Le spectateur : c'est un travailleur présent dans l'espace de travail et n'intervenant pas dans la tâche du robot. Cette classe d'interaction est généralement associée à la question de la sécurité de l'environnement de travail car elle constitue le principal facteur de risque (collision, blessures).
- L'équipe de maintenance : elle rassemble les techniciens qui interviennent en cas de dysfonctionnements ou de mise à niveau du système robotisé. Leur rôle consiste à changer les pièces détériorées ou usagées, à mettre à jour les logiciels robotiques, à intervenir sur des parties élémentaires des programmes (le paramétrage d'une temporisation par exemple).
- Les ingénieurs robotiques : hautement spécialisés en robotique, leurs actions consistent à concevoir des solutions robotiques et mécatroniques spécialisées et des programmes informatiques appropriés pour doter les robots des comportements efficaces attendus.

2.3 Les interactions humain-robot

2.3.1 Les différents types d'interactions humain-robot

D'après Holly A. Yanco, il existe six modes d'interactions de proximité physique humain-robot dans un environnement collaboratif [Yanco2004]. Un cobot sera alors capable (ou pas) de remplir tout ou partie de ces six modes d'interaction de proximité.

- 1^{er} mode - "Évitement de l'interaction" : le cobot essaie d'éviter toute interaction humaine inutile en évitant ou en esquivant tout engagement potentiel autre que celui

dont il a besoin. Par exemple, les cobots de service qui contournent les obstacles ou gèrent leur propre déplacement en fonction de ceux de certaines personnes au sein d'une foule dense.

- 2^e mode - "Transfert et échange d'objets" : dans ce cas, le cobot reçoit ou remet un objet à un opérateur. Par exemple, un opérateur passe un carton au robot afin que ce dernier le dépose à l'endroit souhaité.
- 3^e mode - "Suivi des actions de l'opérateur" : le cobot accompagne le mouvement de l'opérateur et exécute les commandes de celui-ci pour effectuer une tâche spécifique.
- 4^e mode - "Rapprochement de l'opérateur" : le robot cherche à rester à une proximité fixe d'un opérateur en le suivant et en se déplaçant vers lui.
- 5^e mode - "Collaboration directe" : le cobot et l'opérateur humain travaillent ensemble, en même temps ou à des intervalles différents, au même poste ou sur une même tâche. Par exemple, un cobot travaillant dans une ligne d'emballage peut saisir les objets et les placer à l'intérieur de cartons, puis un inspecteur humain peut vérifier le contenu de ces cartons et les fermer pour qu'ils soient ensuite expédiés.
- 6^e mode "Absence d'interaction" : aucun acteur humain n'est présent dans l'environnement du cobot. Ceci peut être le résultat du 1er mode, pour lequel le cobot fuit toute présence humaine, ou lorsque des opérations humaines ont déjà été effectuées et que l'humain impliqué a quitté l'espace de travail.

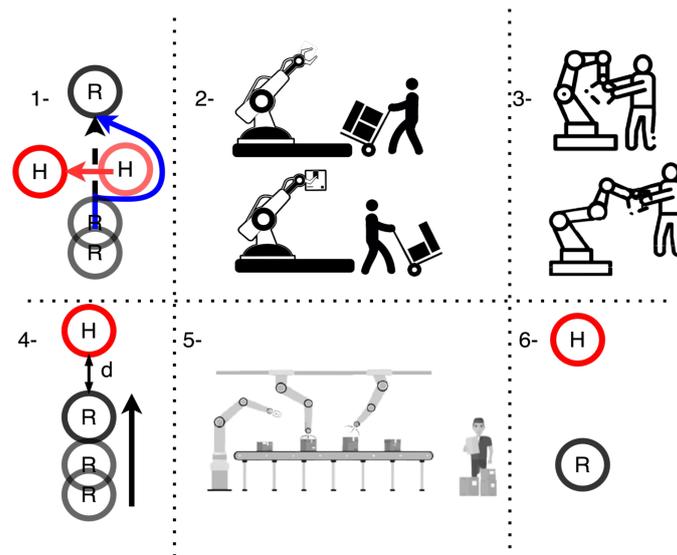


FIGURE 2.1 – les 6 modes de proximité humain-robot d'après YANCO

Cette classification permet de différencier différents modes collaboratifs, aussi bien en contact direct qu'en proximité. Une tâche cobotique peut ainsi être représentée par une

succession temporelle de ces modes, en fonction des actions du robot et de l'humain : approcher, toucher, suivre, éviter...

Le terme "interaction locale" utilisé par Jill L. Drury [Drury2003] désigne un contact physique direct entre le robot et l'humain ou une collaboration entre les deux par le biais d'une pièce interface. L'auteur oppose ce terme à un second, appelé "l'interaction à distance" qui désigne un vaste domaine regroupant diverses applications qui diffèrent selon le type d'informations (commandes ou retours) transmises entre le robot et l'humain. Ces informations peuvent être directement injectées au robot ou déduites de l'état de l'humain.

Dans le cas d'une interaction locale, le robot réagit à un retour direct de capteurs : une commande vocale, des forces, une lecture infrarouge... Tandis que lors d'une interaction à distance, la commande de la machine utilise des algorithmes chargés de surveiller l'état de l'opérateur : s'assurer par exemple que ce dernier n'exerce pas une force excessive ou surveiller son état de fatigue.

En industrie, de manière plus pragmatique, trois niveaux distincts d'interaction humain-robot ont été définis.

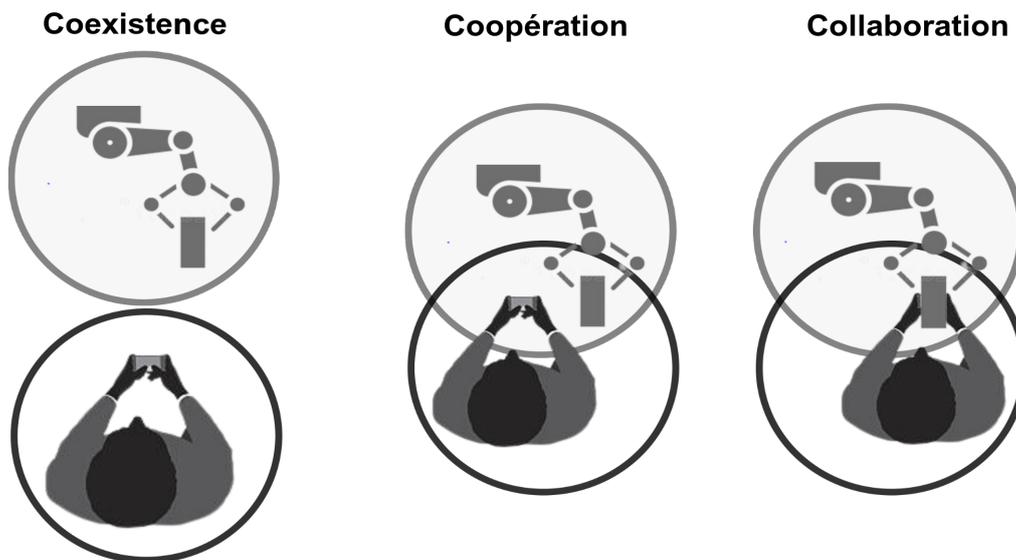


FIGURE 2.2 – les 3 niveaux d'interaction humain/robot en industrie

- Le premier niveau, le plus simple, est la **coexistence** humain-robot, qui implique qu'il y aura une zone de travail réservée aux humains, une zone de travail réservée aux robots et un espace intermédiaire entre les deux. Aucune barrière, clôture ou barrage fixe ne sera mis en place, mais plutôt une mesure de protection immatérielle, une barrière virtuelle. Cela permet à l'opérateur d'accéder à la zone de travail du robot, mais durant cette intrusion, le robot ralentira ou s'arrêtera automatiquement. Ce premier niveau de protection physique sans barrière permet une intégration plus souple des robots sur le lieu de travail.

- Le deuxième niveau est appelé **coopération**, où la zone de travail du robot et celle de l'opérateur humain s'intersectent. Cette zone partagée commune à l'opérateur humain et au robot doit être prise en compte au niveau sécurité par le concepteur du robot afin de respecter lois et normes : notamment les forces maximales appliquées et les énergies maximales déployées lors d'éventuels chocs. Il est à noter que dans cette zone de coopération, robot et opérateur humain ne travaillent pas en même temps sur un objet, mais alternativement.
- Le troisième niveau, appelé **collaboration**, est comparable au précédent, avec en plus la capacité pour le robot et l'opérateur humain de travailler ensemble sur un même objet. Par exemple, le robot peut tenir et tourner une pièce, puis l'opérateur humain viendra visser les vis ; ou l'inverse ! Cette forme de coopération, appelée aussi partage des tâches, est la forme la plus sophistiquée de coopération homme/robot.

2.3.2 Proposition de définition d'un Cobot

Les "parents" de la cobotique, J. Edward Colgate et Michael Peshkin, ont défini les cobots comme des robots dotés d'une stratégie de contrôle partagée où l'homme et les robots sont en contact en même temps avec la charge utile manipulée en collaboration [Peshkin2001]. Prasad Akela, chez GM, a repris le concept de cobots comme étant un sous-ensemble des dispositifs d'assistance intelligents (DAI), qui fournissent une certaine amplification de la puissance humaine [Akella1999]. Akella considère que les cobots sont des robots adaptatifs qui prennent en considération des capacités physiques et des capacités d'apprentissage des ouvriers et leurs manières d'assimilation des nouvelles tâches [Akella1999]. Ainsi plus simplement, les cobots sont des robots qui combinent les meilleures capacités de manipulation humaines avec celles de la machine [Colgate2004] .

Toutes les approches citées du cobot, établissent le système cobotique comme un système de robotique collaborative - comprenant un robot et un humain - travaillant en synergie pour effectuer une tâche dans le contexte d'un poste de travail particulier [Moulières-Seban2017]. Les systèmes cobotiques dépendent du rôle initial de l'opérateur humain (section 2.2.2), du type de tâche à accomplir (section 2.3.3) et du type d'interaction avec le robot (section 2.3.1). Goodrich, en 2008, a étendu ces facteurs caractéristiques en ajoutant l'organisation d'une équipe cobotique (détaillée juste après au section 2.3.2.1), le niveau d'autonomie du robot (section 2.3.2.2), la nature des informations transmises entre humain et robot (section 2.3.2.3) et pour finir, le modèle de l'opérateur humain dans la boucle de contrôle (section 2.3.2.4) [Goodrich2007].

2.3.2.1 L'organisation de l'équipe cobotique

L'organisation de l'équipe cobotique, aussi appelé collectif cobotique, varie en fonction de la façon dont cette équipe est composée et du degré de partage des tâches entre les membres de ladite équipe [Drury2003]. D'une manière générale, l'interaction humain-robot, dans une application cobotique, est fortement affectée par l'architecture de l'équipe robotique et le type d'interaction humain-robot rencontrée, comme le montre la figure 2.3. Les cas A à H sont représentés dans cette figure tels que schématisés par Holly A. Yanco et Jill L. Drury [Yanco2004]; le cas K a été rajouté par nos soins.

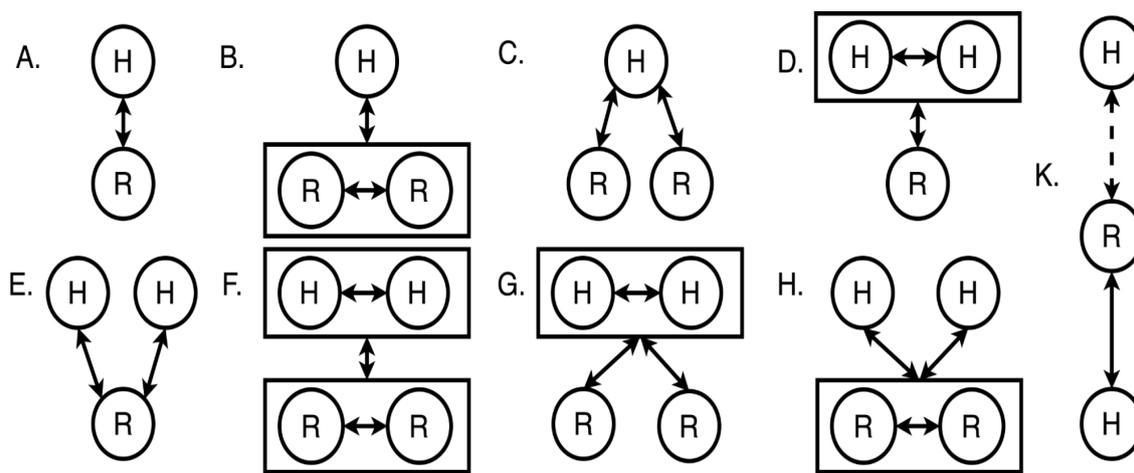


FIGURE 2.3 – Schémas d'organisation de l'équipe cobotique

Les différents types d'équipes robotiques, schématisés sur cette figure 2.3, peuvent être homogènes ou hétérogènes. Une équipe homogène est composée d'un certain nombre de robots identiques. Alors qu'une équipe robotique hétérogène est formée de plusieurs types de robots différents. Il faut noter que le contrôle des équipes robotiques homogènes est plus simple que celui d'un groupe hétérogène, essentiellement en raison de la gestion des données. Précisons que la gestion des données d'un groupe hétérogène est plus complexe du fait, principalement, de la diversité que présentent les architectures mécaniques des robots.

Le cas le plus simple est celui représenté en A. Dans cette interaction, le flux d'informations est bidirectionnel : un humain envoie des commandes au robot et le robot renvoie les informations issues des capteurs à cet humain.

Dans les cas B et C, un seul humain interagit avec deux robots. Ce cas n'est pas restreint à deux robots mais peut se généraliser à plusieurs. En B, un opérateur donne un ordre au groupement des robots qui s'organise alors de manière à établir lequel doit effectuer quelle action et comment réaliser la tâche, tandis qu'en C, un opérateur contrôle directement le groupement des robots de façon indépendante, ce qui correspond à un fonctionnement équivalent à plusieurs cas de type A.

Dans les représentations D et E, ce sont les cas duaux des cas B et respectivement C. Plusieurs humains contrôlent les actions d'un seul robot. En D, les différentes personnes se coordonnent entre elles pour émettre une commande. En E, plusieurs opérateurs émettent diverses commandes en même temps ou de façon temporisée. Dans ce type d'interaction, le robot doit classer et hiérarchiser les commandes reçues avant de prendre les mesures qui conviennent.

Dans les cas F, G et H, un groupe d'humains dirige le groupe robotique. F est une combinaison des cas B et D où un groupe d'humains s'organise et envoie une commande à l'équipe robotique qui à son tour répartit les actions et les rôles entre les robots. G est une combinaison des cas C et D où le groupe d'humains envoie des commandes multiples et différentes au groupe de robots qui accomplit ensuite les tâches séparément. H est une combinaison des cas E et B, lorsque les groupes humains envoient plusieurs commandes différentes en même temps ou de façon retardée vers le groupe de robots. Dans ce cas H, le groupe de robots doit trier, organiser et hiérarchiser les commandes, avant de répartir les rôles et organiser les tâches parmi les différents robots.

Nous avons disposé sur cette figure 2.3 le cas K. Bien qu'il fasse l'objet de ce qui sera développé au chapitre 4, il nous a semblé utile de juxtaposer son schéma représentatif auprès des points de vue de Yanko. Dans ce cas K, deux opérateurs (voire deux groupes d'opérateurs) collaborent avec un unique robot : l'un en modalité cobotique, l'autre par téléopération.

2.3.2.2 Les niveaux d'autonomie du robot

L'autonomie en robotique, en termes simples, s'évalue lors du temps au cours duquel le robot peut ne pas être surveillé par l'opérateur humain. Un robot doté d'un haut niveau d'autonomie est un robot qui peut fonctionner longtemps sans aucune intervention humaine.

Le spectre d'évaluation de l'autonomie des robots, définie par Thomas. B. Sheridan varie d'un robot contrôlé en permanence à un qui est complètement autonome [Sheridan1978]. Ce spectre a classé l'autonomie robotique en dix catégories. Ces catégories sont décrites par David B. Kaber en 1999 et Michael A. Goodrich en 2008 [Kaber1999], [Goodrich2007]. Dans une application robotique complexe, l'autonomie d'un robot peut changer en fonction de la contribution du facteur humain dans la boucle de contrôle. Alors une stratégie d'interaction flexible doit être appliquée à chaque instant du changement.

La figure 2.4 décrit la variation de l'autonomie en fonction de l'interaction humain-robot. À gauche de ce schéma, nous trouvons un robot à autonomie nulle, avec un contrôle direct dans le cadre des applications de téléopération. En se déplaçant vers la droite, les

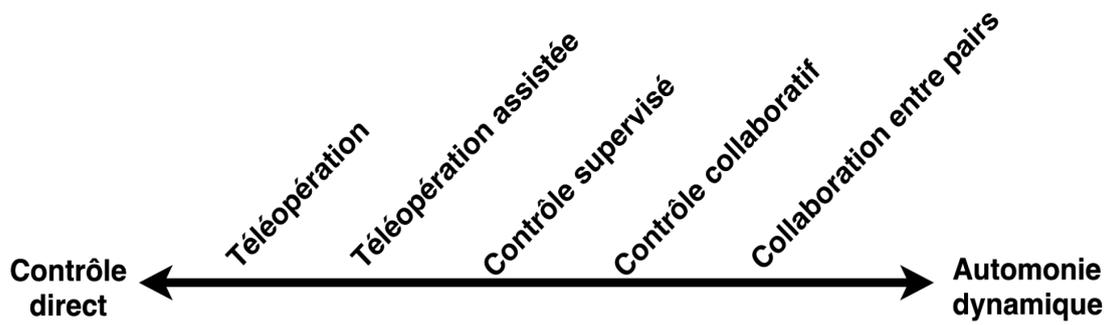


FIGURE 2.4 – les niveaux d'autonomie dans les applications robotiques [Goodrich-2008]

robots gagnent en autonomie jusqu'à la collaboration entre pairs, où le robot possède les aptitudes cognitives appropriées pour interagir de manière "humaine" avec l'opérateur. La collaboration "pair à pair" est encore loin d'être une réalité en raison du manque de maturité des sciences cognitives malgré le boom (essor) enregistré depuis une dizaine d'années, notamment grâce aux réseaux de neurones.

Compte tenu de ce qui précède, les applications cobotiques se situent à mi-chemin entre la téléopération directe et le robot entièrement autonome et "conscient" de lui-même. Les aptitudes cognitives attribuées aux cobots de nos jours, reposent sur trois approches courantes : détecter - planifier - agir, alors que l'analyse de comportement humain est plutôt : détecter - réfléchir - agir.

2.3.2.3 Les informations échangées entre humain et robot

Le système cobotique repose sur la transmission de données vers et depuis le couple humain-robot. Ce passage est à double sens où l'on trouve l'environnement de communication ainsi que le dispositif de transmission. Les trois sens (l'ouïe, le toucher et la vue) constituent la couche sensorielle de ce dispositif. Comme pour la téléopération, ces facteurs définissent la présence de l'humain dans la boucle de commande. Cependant, ce qui diffère de la téléopération, c'est le format des informations échangées entre le robot et l'humain. Ce format doit être accessible aux deux parties et doit être de haut niveau, comme une conversation normale ou un dialogue pour la communication vocale.

2.3.2.4 L'opérateur humain dans la boucle de contrôle

Ces dernières années, des recherches ont été menées afin de comprendre plus précisément les échanges corporels entre les humains, en vue de reproduire les mêmes flux naturels d'interactions humaines chez les robots et de créer ainsi une interface humain-robot intuitive. Par exemple, les résultats des recherches de Jonas Schmidtler,

Christina Harbauer et Klaus Bengler, menées en 2014 [[Schmidler2014b](#)], ont montré que si deux individus portaient une charge donnée, ces deux acteurs ne jouaient pas forcément un rôle identique; plutôt, l'un jouait le rôle de maître et l'autre celui de subordonné. En outre, la répartition des efforts entre les deux individus n'est pas homogène, elle varie suivant l'apport du maître, ce qui permet au suiveur de bien comprendre les buts et les intentions du maître. Typiquement, la coopération humain-robot, dans la plupart des contextes, peut être caractérisée par un comportement de type "esclave" attribué au robot, tandis que l'opérateur joue le rôle de maître. Dans cette configuration de coopération humain-robot supposée intuitive, la gestuelle du robot devrait respecter les comportements propres du guide humain [[Ikeura1995](#)], [[Reed2004](#)], [[Schmidler2014a](#)] et [[Ikeura2002](#)].

En général en cobotique, l'opérateur humain est vu comme étant un modèle d'impédance passive, très variable dans le temps, dont la dynamique des variations est de l'ordre de la seconde [[Lamy2012](#)]. Selon ce modèle, les forces appliquées par/ou sur l'opérateur peuvent être réparties en deux groupes : le premier est composé de forces volontaires, le second correspondant aux efforts induits par le déplacement du bras de l'opérateur et la contraction simultanée de ses muscles [[Mörtil2012](#)].

Pour ce type de modèle humain, différentes approches de commande robotique sont possibles. La première et la plus basique, est l'arrangement maître-esclave [[Hogan1984](#)]. Ce mécanisme repose sur un opérateur maître qui contrôle un robot agissant comme un suiveur, qui reproduit les actions du maître [[Campeau-Lecours2016](#)], [[Labrecque2014](#)], [[Lamy2012](#)], [[Gosselin2013](#)]. La simplicité d'utilisation et la facilité de mise en œuvre de cette méthode constituent l'avantage de cette approche. Cependant, en ce qui concerne les profils d'accélération et de vitesse, ils ne sont pas maîtrisés puisque l'opérateur dirige la vitesse et l'accélération à travers les forces qu'il applique sur le robot, contrairement à la seconde méthode de contrôle basée sur la détection d'intention.

La méthode de détection d'intention est une méthode de commande réactive. Le but de cette seconde approche est de déterminer l'intention de l'opérateur, voire de l'anticiper, afin de diriger l'effecteur du robot d'une manière qui concorde avec l'intention de cet opérateur [[Flash1985](#)], [[Maeda2001](#)]. Cela permet d'augmenter la précision lors de certains gestes, ainsi que de minimiser l'effort requis pour produire les mouvements voulus de l'opérateur sur le robot. Par exemple, si l'opérateur souhaite générer une trajectoire linéaire, le déplacement de l'effecteur produira une ligne parfaitement droite par répétition d'un trajet linéaire préenregistré. De plus, vu que ces gestes sont déjà connus, il est possible de contrôler leurs profils d'accélération et de vitesse et produire un déplacement automatique qui respecte la variation d'accélération de l'opérateur [[Flash1985](#)]. Le désavantage de cette méthodologie réside dans le fait que

si le type de geste souhaité par l'opérateur ne fait pas partie des motifs enregistrés, le robot effectue un mouvement qui ne concorde pas avec le mouvement voulu par l'opérateur. Donc, pour optimiser les résultats, un nombre considérable de motifs s'avère nécessaire.

Une autre technique récente a été développée en intégrant un contrôleur dans le planificateur de trajectoire (comme le contrôleur d'impédance). La génération de la trajectoire se fait dans une boucle de commande où c'est la force exercée par l'opérateur sur le robot qui sert d'entrée, et non pas la position finale désirée [Jlassi2014]. Dans ce cas, la vitesse obtenue est proportionnelle au vecteur force appliqué par l'opérateur. Le principal intérêt de cette approche est de pouvoir contrôler les secousses, les profils d'accélération et de vitesse, permettant ainsi une manipulation aisée et confortable pour l'opérateur, sans avoir à enregistrer les mouvements au préalable.

2.3.2.5 La comanipulation

Dans la littérature, la **comanipulation** robotique ne définit pas vraiment un niveau de cobotique (section 2.2) mais s'utilise pour décrire toute manipulation d'une pièce, à la fois par un opérateur humain et un cobot.

Dans le cadre de notre étude, nous avons limité la cobotique à la notion de comanipulation d'un objet par un humain et un robot. Cela correspond plus ou moins au niveau industriel 3 de cobotique (appelé **coopération**) et répond à la capacité de gérer les modes 2, 3, 4 et 5 d'interactions de proximité physique selon Holly A. Yanco (section 2.3.1)

2.3.3 Différents types de tâches à accomplir en comanipulation

Le rôle et l'action d'un robot dépendent en grande partie du type de tâche que celui-ci doit réaliser. Le domaine d'application détermine alors fortement le type d'interaction humain-robot. On comprend par exemple que le niveau d'interaction peut extrêmement varier selon que l'on soit dans une application industrielle de production ou sur un objectif de recherche et sauvetage [Goodrich2007]. Toutefois, quel que soit le domaine d'application considéré, il est possible de classer les missions de comanipulation sous deux axes essentiels : planification démonstrative d'une part et adaptation des efforts d'autre part.

2.3.3.1 La planification démonstrative

Lorsqu'il s'agit de transmettre de nouveaux comportements à un robot, l'approche de la planification par démonstration est souvent utilisée en combinaison avec d'autres

techniques d'apprentissage machine. La programmation basée sur la démonstration (PbD) est une technique qui consiste à enseigner la tâche au robot plutôt que de le programmer avec des instructions machine. Elle est également connue sous le nom de programmation basée sur les tâches. Le mode PbD est souvent utilisé dans le contexte de la comanipulation pour rendre le robot plus adaptatif. C'est une procédure que propose notamment le fournisseur FANUC sur son cobot le plus récent : le FANUC CRX-10iA. Pour cette méthode, lorsque l'opérateur applique un effort à l'effecteur final, le robot profite de cette action pour se rendre plus flexible. Le robot enregistre alors la trajectoire de comanipulation et la restitue automatiquement sans la participation de son opérateur [Ang1999], [Kober2014], [Kormushev2010], [Kormushev2011], [Grollman2010] et [Khansari-Zadeh2012].

2.3.3.2 L'adaptation des efforts

En comanipulation, les forces constituent un élément majeur dont il faut évidemment tenir compte. En médecine par exemple, une application excessive des forces peut endommager les organes examinés et mettre en danger la vie du patient. Pour cette raison, un traitement des amplitudes et variations des intensités des forces est indispensable à la réussite des interventions médicales. C'est le cas notamment pour les robots utilisés pour la chirurgie oculaire et les robots de laparoscopie. Ces deux types de robots exploitent la comanipulation pour soutenir le chirurgien dans l'exécution des gestes médicaux et pour améliorer la qualité de l'intervention et donc en garantir la réussite. Dans le cas de la chirurgie de la cornée, le chirurgien insère une aiguille comanipulée dans l'œil du patient. Le cobot assure une précision d'exécution élevée grâce au filtrage des oscillations naturelles et non désirées du chirurgien (ex. tremblements) . Tandis que dans le cas de la chirurgie laparoscopique, le concept de réduction de l'effort est utilisé, afin de minimiser les risques de perforation des organes vitaux par les outils cobotiques [Cagneau2008]. L'adaptation des forces ne se limite pas uniquement aux tremblements naturels de la main humaine ou à la réduction des intensités de ces forces, mais elle peut également augmenter ces forces dans le cas de supports de charge. Comme les dispositifs d'assistance intelligents (DAI) motorisés du groupe "Cobotics" permettant à un opérateur de soulever des charges lourdes.

Une application directe de ce type d'adaptation des efforts est le guidage manuel grâce à l'utilisation des "virtual fixtures". Dans ce cas, les robots utilisés en chirurgie peuvent exploiter ce guidage manuel afin de définir des lignes de conduite virtuelles qui permettent au chirurgien de manipuler les instruments chirurgicaux cobotiques, en les empêchant de pénétrer dans des zones critiques.

2.4 Différents types de commandes de comanipulation

Les robots utilisant les retours de force, de toucher, de distance et les retours visuels, sont censés pouvoir fonctionner en autonomie dans des environnements non-structurés au-delà des limites des applications robotiques classiques. La commande en force, en particulier, joue un rôle fondamental pour la synthèse d'un comportement robuste et polyvalent des systèmes robotiques dans ces milieux évolutifs, en fournissant une réaction intelligente et efficace dans des situations imprévues, améliorant de ce fait l'interaction humain-robot. Au cours des trois dernières décennies, la recherche sur les commandes en force pour la robotique s'est notablement développée.

L'interaction entre un manipulateur robotique et son environnement est décisive pour la réussite des nombreuses tâches nécessitant un contact. C'est le cas lorsque l'effecteur doit manipuler un objet ou effectuer une opération sur une surface. Lors du contact, l'environnement peut imposer des restrictions sur la géométrie des trajectoires à suivre par l'effecteur, appelées contraintes cinématiques. En pratique, ces contraintes entraînent l'émergence de forces et/ou moments pendant le contact, ce qui peut faire dévier le robot de son trajet programmé. L'utilisation d'un simple contrôleur de mouvement pour gérer de telles interactions est cependant susceptible d'échouer. En effet, la probabilité qu'un scénario de collision puisse se produire augmente dès lors que l'environnement devient plus rigide et que le contrôle de position devient plus précis.

Ce désavantage peut être contrebalancé par la présence d'une interaction compliant. Cette compliance peut alors être passive ou active.

2.4.1 Le contrôle passif de l'interaction

Lors d'une interaction passive, la flexibilité intrinsèque du robot fait que les forces d'interaction modifient naturellement la trajectoire finale de l'effecteur. Cette flexibilité peut être induite par la souplesse structurelle des liens mécaniques (les bras du robot), des articulations, des effecteurs ou encore par la flexibilité des motorisations. Pour une interaction et une comanipulation menées en toute sécurité, des bras robotiques flexibles possédant des articulations ou des liens élastiques ont été mis en œuvre. C'est une pratique utilisée dans un certain nombre d'applications industrielles. On constate ainsi une évolution dans l'utilisation de dispositifs mécaniquement souples et passifs dans le secteur industriel. Ces dispositifs sont appelés "Remote Center of Compliance" (RCC), acception qui n'est pas sans rappeler celle bien connue de "Remote Center of Motion" (RCM). Un RCC est, par exemple, apporté par un organe terminal flexible monté sur un robot rigide destiné à une tâche d'assemblage. De plus, ces systèmes flexibles offrent l'avantage d'être largement plus réactifs, puisque le temps de réponse d'un mécanisme passif est considérablement plus court (puisque'il est physique) que celui d'un composant

logiciel actif tributaire de l'exécution d'un algorithme de re-positionnement spatial. Cette approche élimine ainsi le besoin de modifier le trajet prédéfini du robot lors du contact avec l'environnement pendant l'exécution de la tâche..

Malgré les avantages de cette méthode, la mise en œuvre de la compliance passive n'est pas extrêmement courante, car ce type de compliance ne répond qu'à de faibles variations de position articulaires ou de direction et de la trajectoire souhaitée. Autrement dit, elle n'est pas très robuste aux variations de l'environnement. Pour cette raison, l'utilisation de tels dispositifs reste limitée, car chaque mission robotique impose la conception et la fabrication d'un dispositif flexible dédié, donc unique, contrairement à l'approche de contrôle actif, qui peut être utilisée pour n'importe quel type de robot et pour de multiples tâches, sans avoir à modifier les dispositifs mécaniques existants.

2.4.2 Le contrôle actif de l'interaction

Lors du contrôle de l'interaction active, la compliance du robot est garantie par un composant logiciel. Les forces et les moments de contact sont mesurés et renvoyés au contrôleur afin de modifier ou même de créer en ligne une nouvelle trajectoire pour le robot. Alors, une telle stratégie de contrôle actif nécessite la mesure directe ou indirecte des forces externes pendant le contact avec l'environnement, en utilisant des capteurs de positionnement et/ou de force. Bien que cette approche soit plus difficile à mettre en œuvre qu'un système passif, elle reste néanmoins la technique la plus fréquemment utilisée en cobotique pour assurer la sécurité d'un opérateur humain en contact direct ou à proximité d'un robot. Dans la suite de cette section, nous proposons une synthèse des principaux modèles de commande compliant figurant dans la littérature.

2.4.2.1 La commande en amortissement

La commande dite par amortissement est un principe de contrôle direct de la force d'interaction robot-environnement, elle suppose un comportement du robot équivalent à celui d'un système mécanique constitué uniquement d'un amortisseur [Whitney1977]. Cette méthode, proposée par Daniel E. Whitney en 1977, utilise un régulateur en boucle fermée avec une consigne de vitesse pour maîtriser les interactions avec l'environnement (figure 2.5). Les forces d'interaction mesurées à l'extrémité de la chaîne cinématique sont utilisées pour obtenir un retour de vitesse via un coefficient d'amortissement K_f caractéristique de la rigidité de l'environnement. Ainsi, la vitesse de l'effecteur est proportionnelle aux forces appliquées par le robot sur son environnement. Pour assurer la stabilité du système, Whitney a proposé de limiter à tout moment le produit du temps d'échantillonnage T par le coefficient de rigidité de l'environnement k_f et celui du robot (k_p) entre 0 et 1 :

$$0 < T.K_f.K_p < 1.$$

Cette méthode s'avère délicate à réaliser du fait que dans une application réelle où le comportement exact dans l'environnement est inconnu, il est très difficile de remplir la condition de stabilité mentionnée.

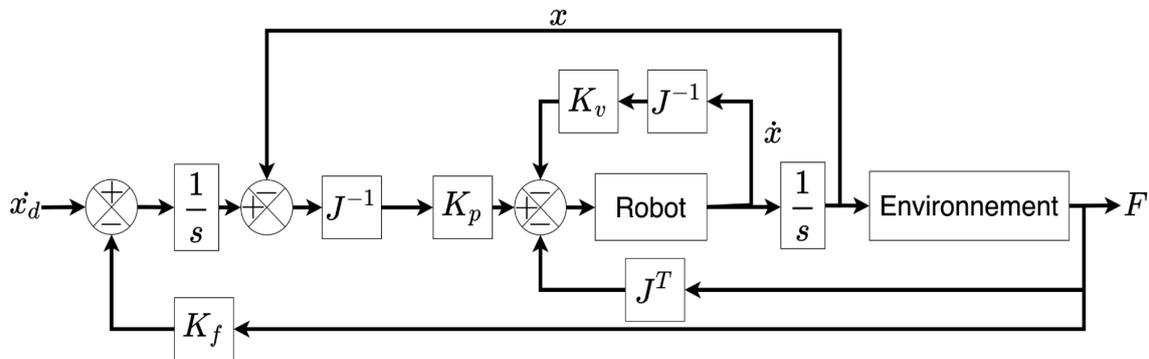


FIGURE 2.5 – Schéma bloc de la commande en amortissement. Notations : s variable de Laplace, J matrice jacobienne, J^{-1} son inverse et J^T sa transposée

2.4.2.2 La commande en raideur active

La commande dite en raideur active est une technique proposée par J. Kenneth. Salisbury en 1980 [Salisbury1980]. Cette méthode consiste à gérer la rigidité apparente de l'effecteur du robot en ajustant la matrice de rigidité cartésienne K_x via une application assistée par ordinateur. Au cours du contrôle du robot, l'opérateur définit une position d'équilibre qui déclenche la mise en œuvre du comportement de complianc à chaque fois que l'effecteur final s'écarte de cette position. Cette approche propose aussi de rajouter une force additionnelle F_b , pour permettre un contrôle simultané de la position et de la force dans les différentes directions de travail. Par exemple, si on cherche à exercer une force dans une direction cartésienne donnée, la valeur de la matrice de rigidité cartésienne associée à cette direction sera réduite de façon importante. Dans le cas le plus extrême d'un mouvement libre, le coefficient de rigidité dans cette direction sera pris à zéro. Dans ce système (figure 2.6), G_F est une fonction de compensation de couple entre la commande et le couple exercé sur les moteurs des articulations provenant des forces d'interaction directes de l'organe terminal avec l'environnement.

Cette méthodologie présente un défaut incontournable car lorsque la matrice de rigidité est mal ajustée, des perturbations peuvent apparaître réduisant ainsi la stabilité du système. De plus, afin d'ajuster correctement ladite matrice en fonction des directions de force, il est primordial d'avoir une connaissance détaillée de l'environnement, ce qui n'est pas le cas dans la plupart des applications cobotiques.

Si nous exprimons cette formulation dans le domaine de Laplace, nous obtenons :

$$F(s) = (M.s + D + K.s^{-1}).V(s) \text{ Avec pour impédance : } Z = M.s + D + K.s^{-1} \quad (2.3)$$

La commande en impédance de Hogan est conçue pour limiter l'intensité des forces de contact en s'adaptant aux caractéristiques de l'environnement. En contrôlant l'impédance, on peut contrôler le comportement du robot lors de son interaction avec l'environnement en définissant sa rigidité et son amortissement. Cela est possible en introduisant des matrices (virtuelles) de masse, amortissement et rigidité. Ces matrices ne sont pas nécessairement isotropes, à savoir qu'on peut leur attribuer différentes caractéristiques selon les directions sollicitées.

Ce type de commande permet également de contrôler le robot afin qu'il ait un comportement rigide, ceci dans l'objectif d'obtenir une faible erreur de position dans les directions du déplacement attendu.

Pour illustrer l'intérêt de la commande en impédance, supposons un individu les yeux bandés placé face à un mur. Supposons aussi que cet individu sache cependant qu'un mur se trouve devant lui, sans pour autant qu'il en connaisse la position. Afin de toucher ce mur, l'individu avance lentement et prudemment ses bras jusqu'à ce qu'il soit en contact direct avec le mur. Une fois ce contact réalisé, l'individu peut se déplacer perpendiculairement au mur de manière sûre. Son cerveau gère alors le déplacement de ses bras, via la force de poussée que génèrent ses muscles, dans un principe équivalent à celui d'une commande en impédance.

La commande en impédance diffère de la commande en position classique en ce sens que le robot ainsi contrôlé ne reçoit pas une consigne de position qu'il a pour principal objectif d'atteindre. En commande classique, tant que cette position désirée n'est pas atteinte, le contrôleur du robot génère un accroissement de la force d'interaction, au risque de conduire à des détériorations. En revanche, le contrôleur d'impédance ne génère pas d'interactions excessives, même en cas de collision, il garantit ainsi une plus grande sécurité pour l'environnement, dont en particulier pour les humains qui s'y trouvent.

Dans une commande robotique en impédance, on peut indirectement contrôler la force d'interaction robot-environnement et ainsi éviter d'appliquer des forces excessives, voire dangereuses. Ceci est particulièrement utile lorsqu'il y a incertitude concernant l'environnement. Par exemple, s'il s'agit d'introduire un axe dans un trou dont la position est sujette à incertitudes, c'est le comportement flexible du robot qui permettra de garantir la mission, à l'identique d'un opérateur qui aurait à réaliser cette tâche manuellement. Pour cela, le robot se déplacera légèrement au voisinage du trou en réagissant aux forces de contact et glissera l'axe dans le trou à l'endroit propice au lieu

de pousser et rester bloqué en essayant d'atteindre une position de consigne non-significative.

Une simple commande de force génère une réponse erronée si l'effecteur du robot n'est pas en contact avec une cible, puisque ces commandes de force déclenchent des actions brusques qui sont souvent inappropriées et dangereuses. Une réaction similaire se produit si un robot tente d'appliquer une force sur un objet alors que son effecteur n'est pas réellement en contact avec une surface.

Exemple d'une personne qui monte un escalier dans le noir en croyant à tort qu'il y a une marche supplémentaire qui n'existe pas. Cette personne va automatiquement lever le pied et essayer de l'atteindre. Comme le contact avec la marche est absent, la personne est obligée de se débattre pour garder son équilibre.

Ainsi, l'avantage du contrôle par impédance est la possibilité de contrôler le mouvement et la force de l'effecteur du robot en même temps, ce qui permet de gérer le problème du manque de contact et de garantir la stabilité du mouvement.

Formulation de la commande :

La commande en impédance peut être appliquée dans l'espace articulaire aussi bien que dans l'espace opérationnel (classiquement cartésien). Cette commande s'applique à tout type de robot et à toute structure cinématique, indépendamment de la nature de ses liaisons : prismatiques ou pivot.

Nous présentons ci-dessous le principe de cette commande dans l'espace articulaire pour un robot sériel. Le modèle dynamique d'un robot dans l'espace articulaire peut être exprimé dans sa forme lagrangienne comme suit :

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(\dot{q}, q)\dot{q} + g(q) - \tau_{ext} \quad (2.4)$$

où q désigne le vecteur position articulaire, M la matrice d'inertie symétrique et définie positive, C les efforts de Coriolis et centrifuges, g les efforts gravitationnels. τ_{ext} représente toutes les actions (forces et couples) extérieures agissant sur le robot et τ le vecteur forces/couples d'actionnement (autrement dit le vecteur de commande).

La loi de commande permettant d'établir le vecteur de commande τ (forces/couples d'actionnement) s'établit sous la forme suivante :

$$\tau = K(q_d - q) + D(\dot{q}_d - \dot{q}) + M(q)\ddot{q}_d + C(\dot{q}, q)\dot{q} + g(q) \quad (2.5)$$

où q_d désigne la position angulaire désirée de l'articulation. En combinant les équations (Eq 2.4) et (Eq 2.5), on obtient l'équation 2.6 ci-dessous qui représente l'équation du robot commandé :

$$\tau_{ext} = K(q_d - q) + D(\dot{q}_d - \dot{q}) + M(q)(\ddot{q}_d - \ddot{q}) \Rightarrow \tau_{ext} = K.e + D.\dot{e} + M(q).\ddot{e} \quad (2.6)$$

$$\text{avec } e = q_d - q$$

Les matrices K , D et M sont respectivement appelées les matrices de rigidité, d'amortissement et de masse apparente du système. On constate que le robot contrôlé est essentiellement modélisé (selon Hogan), comme une impédance mécanique multidimensionnelle masse-ressort-amortisseur par rapport à l'environnement qui est représentée par τ_{ext} . Alors, l'ajustement d'un de ces composants, et plus particulièrement de la matrice de rigidité, impactera le comportement du robot. Ce dernier pourra être soit plus souple, soit plus rigide, en fonction de la tâche et des forces externes qui lui seront appliquées.

Le schéma fonctionnel de la commande en impédance dans l'espace articulaire est présenté à la figure 2.7.

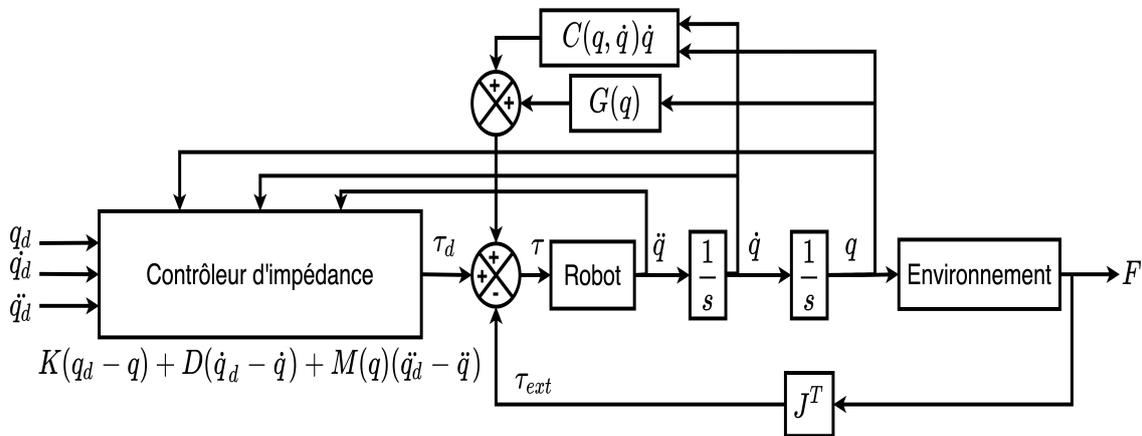


FIGURE 2.7 – Schéma bloc de la commande en impédance

2.4.2.3.2 La commande en admittance

L'admittance mécanique est l'inverse de l'impédance. L'admittance se définit comme un système mécanique qui reçoit en entrée un effort et qui génère en sortie un mouvement. Ainsi, à chaque fois que nous avons une entrée de force, nous parlons d'admittance, à savoir selon la formule suivante :

$$V = \frac{1}{Z} \cdot F \quad (2.7)$$

avec $\frac{1}{Z}$ est l'admittance, F est la force et V est la vitesse

Cette formulation révèle la nécessité de connaître les forces appliquées au robot, soit directement avec un capteur de force ou de couple, soit de les estimer.

Dans cette stratégie de commande par admittance, le contrôleur fonctionne comme une admittance et le robot comme une impédance. C'est le processus inverse de la

commande par impédance. Ainsi, le contrôleur fournit des consignes de position/vitesse au robot. Ce contrôleur fonctionne avec deux boucles : une boucle externe et une boucle interne. La boucle externe s'occupe de la récupération des forces mesurées/estimées F_{ext} , pour ensuite calculer et générer les consignes de position et/ou de vitesse souhaitées (x_d, \dot{x}_d) . La boucle interne est utilisée pour suivre les points de consigne désirés issus du premier contrôleur, minimisant ainsi l'erreur de consigne et rejetant les perturbations.

Dans le cas des robots industriels à inertie élevée, la boucle interne intègre une régulation classique de position/vitesse, souvent combinée à des contrôleurs PD sur le robot. Cette commande par admittance est plus robuste qu'une commande par impédance car elle ne nécessite pas l'utilisation du modèle dynamique du robot, ce qui peut introduire des incertitudes de modélisation. Par contre, si les paramètres dynamiques du robot sont connus, une commande en couple peut également être associée à la commande par admittance, comme proposé dans [Dawson1991].

Un des avantages du contrôle par admittance réside dans la possibilité de l'intégrer dans des robots industriels à inertie importante, tel que démontré dans les travaux de [Smith1994], [Ferretti2000], [Surdilovic1996]. On peut également relever une telle approche dans les travaux de Julien Baumeyer, à PRISME, pour le pré-positionnement d'un patient à l'intérieur du Gantry de l'imageur dans une application de protonthérapie à l'aide d'un robot de grande dimensions (rayon d'action de plus de 3 m). Baumeyer a utilisé le robot Orion, équipé d'un capteur de force/couple à six axes fixé en dessous du chariot médical, pour comanipuler le robot avec une commande par admittance [Baumeyer2017].

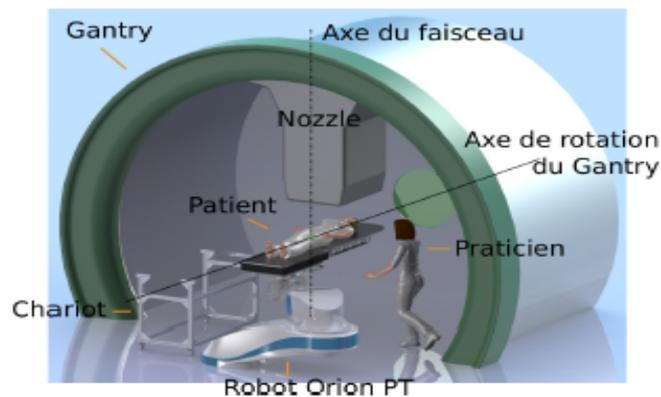


FIGURE 2.8 – Robot Orion dans le Gantry de protonthérapie (Baumeyer 2017)

Ce contrôle d'admittance peut fournir un faible rapport force/vitesse pour les robots ayant une inertie et un frottement élevés, il peut aussi dans certains cas améliorer les performances globales du robot en réduisant ces inerties apparentes.

Par contre, le comportement de compliance de cette stratégie dépend des forces externes mesurées ou estimées, ce qui peut générer des instabilités lorsque les forces issues

d'interactions sont trop importantes. De plus, la nature d'admittance du contrôleur, produit un réglage excessif lorsque l'admittance souhaitée est trop faible, ce qui provoque des instabilités dans le déplacement du robot. Le schéma fonctionnel du contrôle d'admittance dans l'espace articulaire est présenté à la figure 2.9 où \ddot{q}_d , \dot{q}_d , q_d et \ddot{q}_r sont l'accélération, la vitesse, la position de l'articulation désirées et l'accélération de référence pour le contrôleur de position.

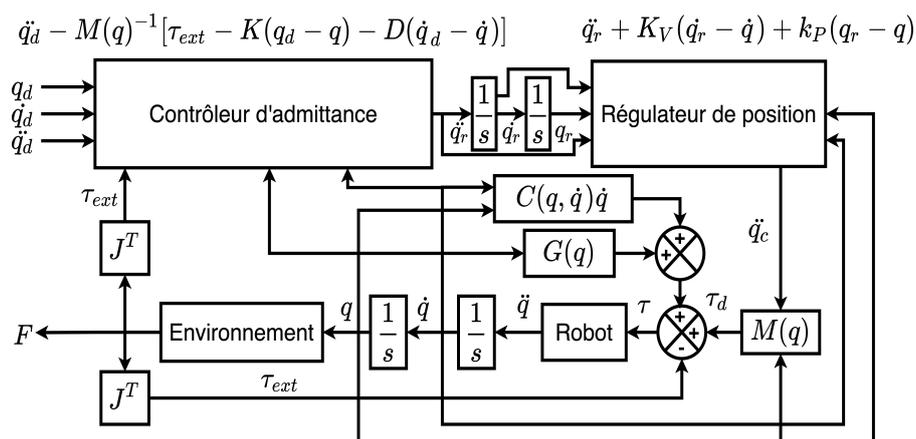


FIGURE 2.9 – Schéma bloc de la commande en admittance

2.4.2.3.3 La commande hybride impédance/ admittance

Cette commande a été proposée pour la première fois par Christian Ott en 2010 [Ott2010], puis améliorée en 2014 [Ott2015]. Elle consiste à coupler la commande par admittance et la commande par impédance au sein d'un même contrôleur. Ott a souligné que les performances de la commande en impédance se dégradent lorsque l'environnement est très mou ou lorsque le robot se déplace en espace libre, tandis que pour la commande en admittance, la détérioration se produit lorsque l'environnement est au contraire très rigide [Ott2015].

En raison de la nature complémentaire de ces deux approches vis-à-vis de la rigidité de l'environnement, le but de la commande hybride impédance/admittance est d'avoir une commande unifiée pour compenser les inconvénients des deux solutions susmentionnées. Ott a alors proposé que les deux commandes soient exécutées simultanément, chacune générant son propre vecteur de couples de sortie. Une stratégie de commutation des deux sorties est intégrée au contrôleur pour alterner en permanence ces deux signaux. C'est la clé de la méthode hybride. Les temps d'activation de chacune des deux commandes varient en fonction de la rigidité de l'environnement dans lequel on opère. La figure 2.10 présente le schéma fonctionnel de cette commande. Des résultats expérimentaux ont été présentés pour cette approche pour un robot 1 ddl dans [Ott2015].

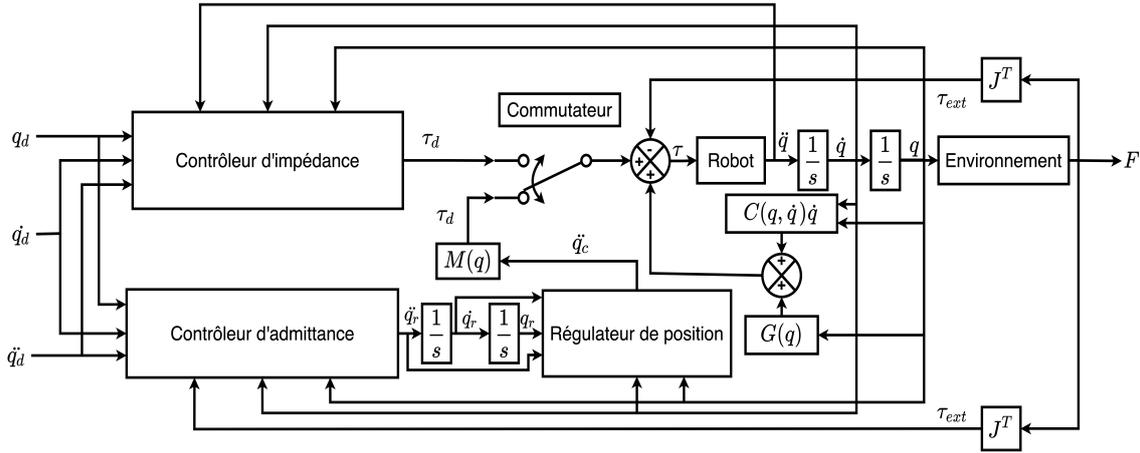


FIGURE 2.10 – Schéma bloc de la commande hybride en impédance et admittance

2.4.2.4 La commande en force directe

La régulation directe des forces appliquées est utilisée pour imposer des forces prédéfinies à un environnement spécifique. Pour un robot à un degré de liberté, si nous écrivons que l'erreur entre les forces souhaitées et les forces mesurées est $e = f_d - f_m$, en associant une commande proportionnelle-intégrale-dérivée (PID) classique pour suivre les forces souhaitées, nous obtenons la loi de commande suivante en :

$$u = K_p \cdot e + K_i \int e dt + k_d \frac{de}{dt} \quad (2.8)$$

où e , f_d , f_m , u , K_p , K_i , et K_d désignent respectivement l'erreur, la force désirée, la force mesurée, la commande, le gain proportionnel, le gain intégral et le gain dérivé.

Dans certaines tâches de comanipulation, une force résultante nulle peut être envisagée en réglant $e = 0$. Dès que l'opérateur exerce un effort supplémentaire, le robot le détecte et réagit en composant cette force. Cette approche peut être combinée avec tout autre schéma de régulation mentionné précédemment, comme le contrôle d'impédance par exemple. Une telle compensation des forces est avantageuse lorsque la force souhaitée n'est pas nulle, comme dans le cas d'une compensation de l'effet de la pesanteur liée à une charge manipulée directement par l'effectif humain-robot. Dans cette approche, les forces appliquées par l'utilisateur ou la charge sont généralement fournies au robot par le biais d'un capteur de force ou de couple. Ces mesures de force permettent au robot d'atteindre sa position à l'équilibre. Pour cela, une commande du type $u = -f_m$ pourrait être appliquée. En intégrant ce nouveau critère dans l'équation 2.8, on obtient une commande finale décrite dans l'équation 2.9 :

$$u = -f_m + K_p \cdot e + K_i \int e dt + k_d \frac{de}{dt} \quad (2.9)$$

2.4.2.5 La commande hybride position/force

En raison des contraintes associées au maintien des stabilités simultanées du déplacement planifié et de l'application d'une force de contact désirée, pour un robot interagissant avec un environnement, les commandes classiques en position et en force [Whitney1977] proposées jusqu'aux années 1960, furent abandonnées au profit d'approches combinant position et force.

Ce défi d'intégrer à la fois la position et la force dans une unique boucle de commande est certainement la raison pour laquelle John J. Craig et Marc. Raibert ont développé la commande hybride position/force [Craig1979]. Ce concept de régulation hybride, basé sur la formulation de tâches sous contraintes [Mason1981], permet un pilotage du robot à la fois en position et en force dans des directions orthogonales (comme par exemple l'insertion d'un axe dans un alésage où on peut identifier un besoin de contrôle en position dans un plan et un besoin de contrôle en force suivant la normale à ce plan). Cette commande, qui existe depuis la fin des années 70, permet de découpler la mobilité du robot de la force exercée sur l'environnement de travail [Raibert1981] et [Craig1979] et [Joly1997].

Le principe de base de cette commande hybride, illustré à la figure 2.11, est que, dans un espace donné (Z), la commande peut être divisée en deux tâches de commande indépendantes. L'une des sous-tâches consiste à contrôler la mobilité du robot dans certaines directions prédéfinies, tandis que l'autre consiste à réguler la force d'interaction par rapport aux autres directions. Au total, le nombre de directions contrôlées par les deux tâches correspond au nombre total de degrés de liberté du robot. La capacité de fournir des solutions cohérentes et non contradictoires entre les sous-contrôleurs complémentaires est essentielle au succès de cette approche, vu les rôles indépendants exécutés par chacun de ces sous-contrôleurs.

Par exemple, si un robot rencontre une paroi le long de son trajet, à l'intérieur de l'espace de travail, cette paroi agit comme une contrainte limitant la zone active du robot, empêchant le robot de se déplacer dans la direction normale à la surface de cette paroi. En revanche, cette paroi ne limite pas le mouvement du robot dans toutes les autres directions. Il est donc possible de mettre en œuvre des lois de commande des forces dans le sens du contact, afin d'ajuster ces forces d'interaction de sorte à appliquer une force permanente contre la paroi.

Simultanément, une loi de commande en position pourra être employée dans les autres directions pour diriger le robot le long de cette paroi. Mathématiquement, le concept de contrôle hybride se résume comme suit :

$$Z = X \oplus Y \quad (2.10)$$

où un espace Z est divisé en une somme directe de deux sous-espaces X et Y . Les lois de commande dans les espaces X et Y s'écrivent comme deux équations indépendantes comme suit :

$$\begin{cases} U_1(q, \dot{q}, \ddot{q}, F_x) = \tau_x \\ U_2(q, \dot{q}, \ddot{q}, F_y) = \tau_y \end{cases} \quad (2.11)$$

L'équation 2.11 exprime la dynamique du robot dans les deux sous-espaces X et Y . τ_x et τ_y sont les couples d'entraînement impliqués dans les sous-espaces en question.

En 1987, Oussama Khatib a exploité le modèle dynamique du manipulateur pour établir une formulation de contrôle hybride position/force, dans le but de contrôler l'effecteur final du robot dans les espaces cartésiens [Khatib1987]. Cette approche a été adoptée dans les espaces articulaires associés à des régulateurs de dynamique inverse [Yoshikawa1987], [Yoshikawa1988], [McClamroch1988].

Dans ces approches, la formulation de l'environnement était considérée comme statique et non flexible. Plus tard, ces limitations ont été reprises par Alessandro De Luca et Costanzo Manes qui ont élaboré, en 1994, une approche méthodique de modélisation de l'interaction avec un environnement dynamique [De Luca1994].

La commande hybride position/force suppose la connaissance parfaite de l'environnement pour échapper aux perturbations induites par le positionnement dans les directions soumises au contrôle de la force. Cette exigence réduit l'applicabilité de cette commande à des applications où l'environnement ne peut pas être décrit de façon précise, par exemple dans les tâches physiques d'interaction humain-robot. Plusieurs techniques ont été développées pour traiter cette exigence, notamment la commande en force avec un schéma de mouvement prédictif [De Schutter1988] et la commande en force/position parallèle avec un algorithme intégrant l'erreur des forces [Chiaverini1993], [Siciliano1994].

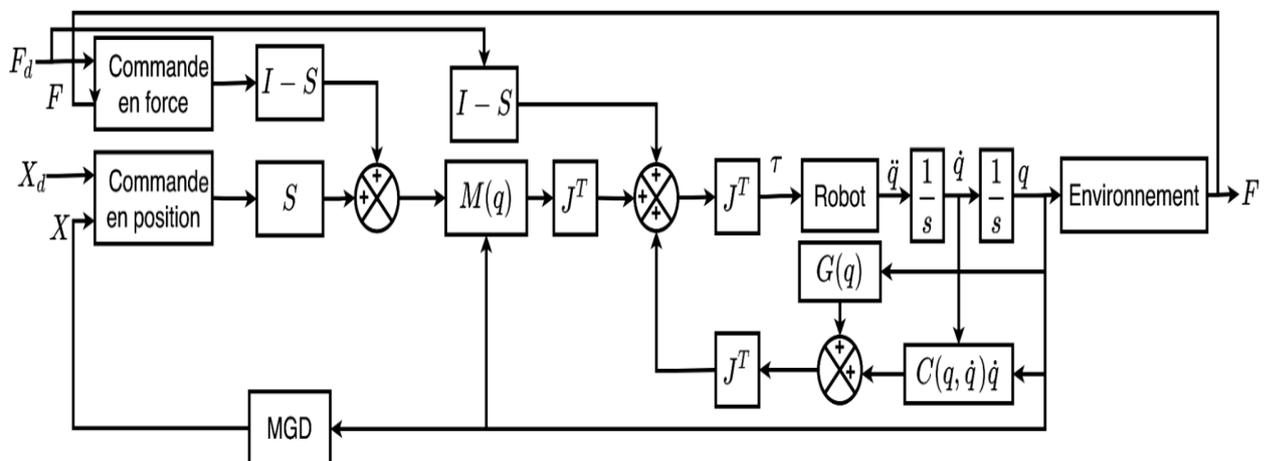


FIGURE 2.11 – Schéma bloc de la commande hybride position/force

La figure 2.11 présente l'architecture d'une commande hybride position/force pour un robot commandé dans l'espace opérationnel où $X \in R^m$ et S une matrice diagonale ayant pour éléments diagonaux les uniques valeurs de 1 ou 0. Où "1" correspond aux directions commandées en position et "0" aux directions commandées en force. $S \in R^{n \times m}$ où n est le degré de liberté cartésien du robot.

2.5 Le concept de composant cobotique virtuel pour la commande compliant

Ce concept a été développé dans le cadre du projet ANR-2014 SISCob (Safety Intelligent Sensor for Cobots) porté par le laboratoire PPRIME de Poitiers et au sein duquel notre laboratoire a été impliqué. Dans le contexte d'une thématique cobotique en fort développement, l'objectif du projet SISCob était d'apporter des solutions, à la fois par la mécanique et par la commande aux questions fondamentales de la sécurité en cobotique. C'est dans la seconde de ces deux approches que s'inscrit le concept de composant cobotique virtuel que nous présentons dans ce paragraphe.

Ce composant cobotique est une capsule logicielle (d'où sa désignation de "virtuel"). Par son intégration dans la boucle de commande d'une articulation robotique, il confère à un mécanisme actionné réel, un comportement compliant, gage de sécurité. Ce comportement est globalement équivalent à celui qu'aurait ce même mécanisme s'il était équipé du composant réel équivalent audit composant virtuel. Le composant en question, de fait élastique et compliant, est disposé dans l'articulation, entre la sortie du motoréducteur et le bras articulé (voir figure 2.12). L'approche logicielle permet d'ajuster à la demande les caractéristiques du composant (sa raideur et plus globalement son impédance, ses seuils... cela pourrait être aussi un temps de réaction, une valeur d'hystérésis), ce que naturellement l'approche matérielle ne permet pas de faire.

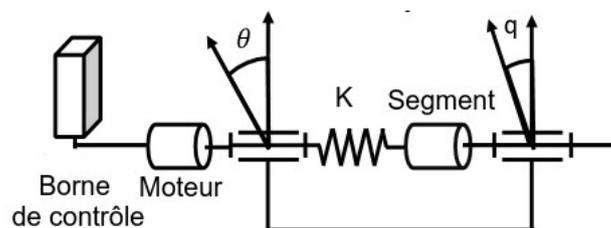


FIGURE 2.12 – Schéma de principe du composant cobotique compliant. La partie droite entre θ et q peut être réelle ou virtuelle. L'écart entre la sortie θ du motoréducteur et la variable articulaire q est appelé "déviation angulaire interne".

La synthèse d'une commande par composant virtuel se ramène à dimensionner (comme s'il était réel) ce qui est connu sous les noms d'Actionneur à Impédance Variable (VIA) ou Actionneur Élastique en Série (SEA). La distinction entre ces deux types de dispositifs tient à la capacité technique à ajuster leur impédance. Le SEA s'appuie sur un contrôle actif, comme le contrôle de la force, de l'admittance ou de l'impédance, tout en conservant les mêmes propriétés mécaniques à l'articulation [Navarro2016], [Zeng1997], [Pratt1995], contrairement au VIA qui modifie la flexibilité de l'articulation en ajustant ses propriétés mécaniques comportementales comme la rigidité ou l'amortissement [Vanderborght2013], [Tonietti2005], [Lenzi2011], [Spong1987].

Le modèle complet de l'architecture de commande par composant cobotique virtuel ainsi que des résultats de simulations ont été publiés dans [Diab2020]. Dans ce paragraphe nous présentons des résultats complémentaires aux dites simulations, non encore publiés, issus d'expérimentations menées sur un robot UR3 d'Universal Robots et en implémentant l'approche composant cobotique virtuel. Nous montrons alors que cette technique de commande compliant peut contribuer à réduire de manière significative les forces d'interaction lors de collisions robot-environnement et plus particulièrement lors de collisions robot-humain.

Notre stratégie de commande a été expérimentée sur deux types de corps, caractérisant deux impédances anatomiques distinctes : d'une part la paume d'une main humaine, considérée comme corps semi-rigide et d'autre part un fantôme flexible imageant le comportement d'un abdomen (voir figure 2.15). Ces expérimentations se sont effectuées avec un robot UR3 doté d'un capteur de force 6D (le FT 300 de Robotiq) et d'un préhenseur électrique à deux doigts (le 2F-85 de Robotiq). La programmation du robot a été faite sous ROS (Robot Operating System). Lors des essais, la pince est restée fermée et nous avons considéré des collisions frontales entre l'extrémité de la pince et l'environnement, telles que représentées aux figures (Figure 2.13) et (Figure 2.15) (qu'il s'agisse des essais réalisés sur la main comme ceux réalisés sur le fantôme). Pendant le déplacement, notamment la collision, la configuration du robot et les couples articulaires sont calculés à l'aide du modèle cinématique inverse et du modèle dynamique de l'UR3 [Diab2020].

Dans les expérimentations décrites ci-dessous, le modèle de raideur articulaire en fonction de la déviation angulaire, qui a été retenu, est un modèle continu mais non linéaire. Ce modèle préserve une valeur importante de cette raideur (K_{max}) pour de faibles "déviations angulaires internes" de l'articulation (ou écart entre θ et q , voir

(Figure 2.12)), et une valeur faible de cette raideur (K_{min}) pour de grandes déviations. Ce choix préserve ainsi un fonctionnement rigide du robot en l'absence de collisions afin de garantir la précision de positionnement, et un fonctionnement souple s'il y a collision. Cette forme de raideur est caractérisée par la fonction $K(\theta - q)$ définie ci-dessous :

$$K = \begin{cases} K_{max} ; \text{if } (\theta - q) < \sim \theta_m \\ K_{min} - \left(\cos \left(\frac{\pi(q - \theta + \theta_m)}{\theta_M - \theta_m} \right) + 1 \right) \left(\frac{K_{min}}{2} - \frac{K_{max}}{2} \right) \\ K_{min} ; \text{if } (\theta - q) > \sim \theta_M \end{cases} \quad (2.12)$$

Cette expression, continue et décroissante en fonction de $(\theta - q)$, a été choisie pour assurer une dégénérescence rapide de K lorsque : $\theta_m \leq (\theta - q) \leq \theta_M$.

Un seuil de détection de collision a été défini. La valeur que nous avons fixée pour ce seuil est de 7 N.

2.5.1 Collision entre la pince du robot UR3 et la paume de la main

Ce paragraphe décrit une collision frontale impliquant le robot et la paume d'une main humaine. La main est considérée comme un corps semi-rigide. Le mouvement global demandé est un déplacement linéaire de l'effecteur. La direction de ce déplacement a été choisie comme très proche de celle de l'axe X du repère-robot, en partant d'une position initiale X_0 allant jusqu'à la position cible X_f , telles que :

$$X_0 = [295.7, -105.45, 312] \text{ mm et } X_f = [420.3, -100, 310] \text{ mm}$$

La durée du déplacement a été fixée à $\Delta(t) = 2s$, la vitesse de l'effecteur au cours du mouvement est de 0,06 m/s.

Les figures (Figure 2.13) et (Figure 2.14) illustrent l'expérience réalisée et présentent les résultats obtenus. Les figures 2.13a à 2.13f montrent les différentes positions du robot à chaque phase de la collision. L'image 2.13d montre, par l'effet de "bougé" bien observable sur la photo, qu'il y a eu mouvement rapide du robot. En fait ce mouvement est un recul (ce qui n'est certes pas évident à observer sur la photo). Le robot réagit donc comme par action réflexe à la collision.

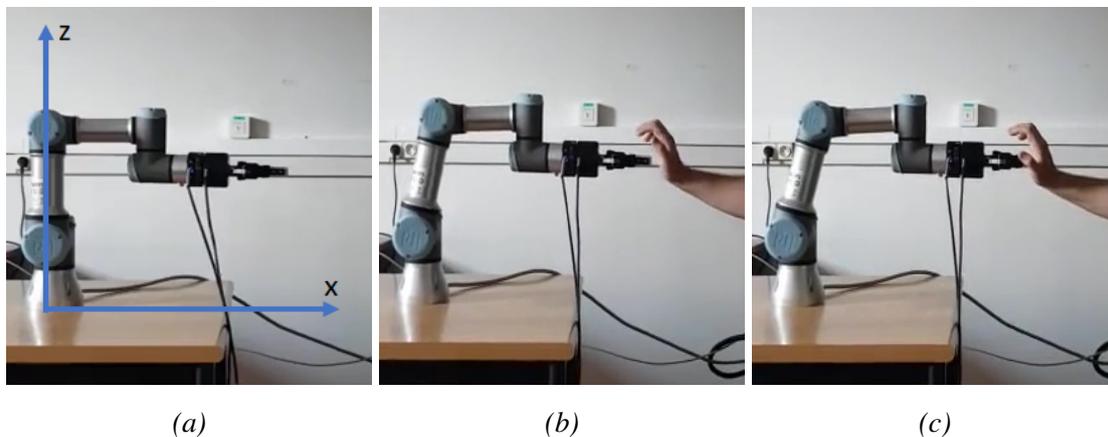
Compte tenu de la nature du mouvement que nous avons imposé, seule la deuxième variable articulaire (q_2) est présentée dans nos graphiques (figure 2.14a), car c'est celle qui a la plus grande influence sur les coordonnées cartésiennes de l'effecteur. On peut observer, sur cette figure, que le mouvement de cette articulation a été perturbé à partir de l'échantillon temporel numéro 600, montrant alors une position articulaire q_2

oscillant autour de 105 degrés. L'effet de la commande implémentée est visible sur la figure 2.14c où la force d'interaction est devenue suffisante pour déclencher le seuil prédéfini de 7 N en cas de collision. Une fois ce seuil dépassé, le ressort virtuel a commencé à réduire sa rigidité ; il contribue alors à minimiser les impacts de la collision.

La figure 2.14.b illustre l'évolution de la raideur du ressort virtuel au cours de l'impact. Avant l'impact sa rigidité est constante. A l'impact commence alors une phase de décroissance rapide de cette raideur, provoquée par la déviation angulaire interne (mais virtuelle) de l'articulation. En définitive le robot a reculé, comme s'il était équipé d'un composant compliant réel. La diminution de la rigidité de l'articulation 2 apparaît lors du contact robot-environnement (illustré figure 2.13d). Cette déviation est suffisante pour entraîner une chute des forces d'interaction de 30 N à 10 N une fois que le contact a cessé. Le robot acquiert alors un comportement souple, En raison des "propriétés mécaniques virtuelles" du ressort (supposé sans amortissement), celui-ci provoque des oscillations observables sur les vibrations de la deuxième articulation (voir figure 2.14a).

Étant donné que nous utilisons un contrôleur d'impédance, lors de la suppression du contact, le robot continue à suivre sa trajectoire prédéfinie, comme le montrent les figures 2.14a, 2.13e et 2.13f.

L'expérience a montré une diminution significative des efforts post-collision : le robot ralentit sur le point de collision et modifie sa trajectoire en contrôlant le mouvement de la deuxième articulation. Les résultats obtenus lors de cet essai réel sont cohérents avec ceux que nous avons pu obtenir préalablement en simulation [Diab2020] et valident le principe de cette commande par composant cobotique virtuel.



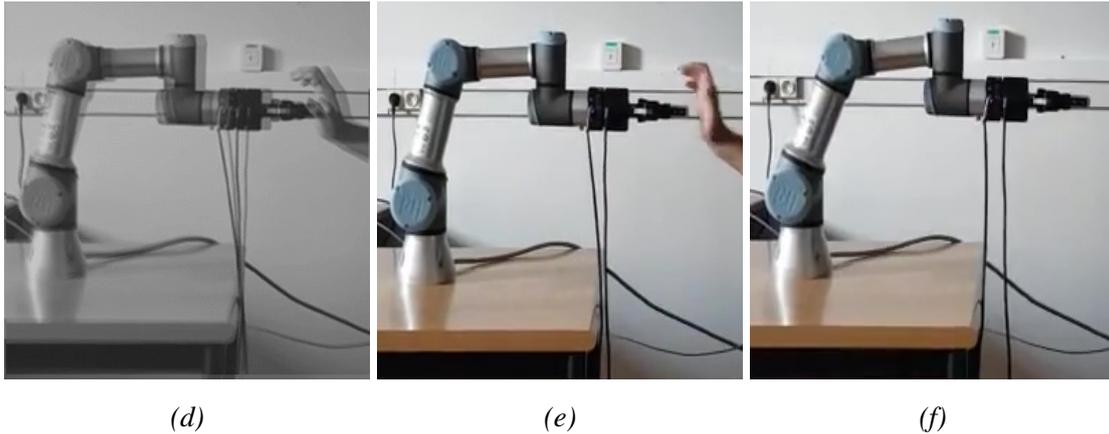


FIGURE 2.13 – Collision frontale entre l'effecteur du robot et la paume de la main : (a) position initiale du robot ; (b) position avant collision ; (c) position lors de la collision ; (d) Phase de collision robot-environnement ; (e) position juste après dégagement de la main ; (f) position finale du robot.

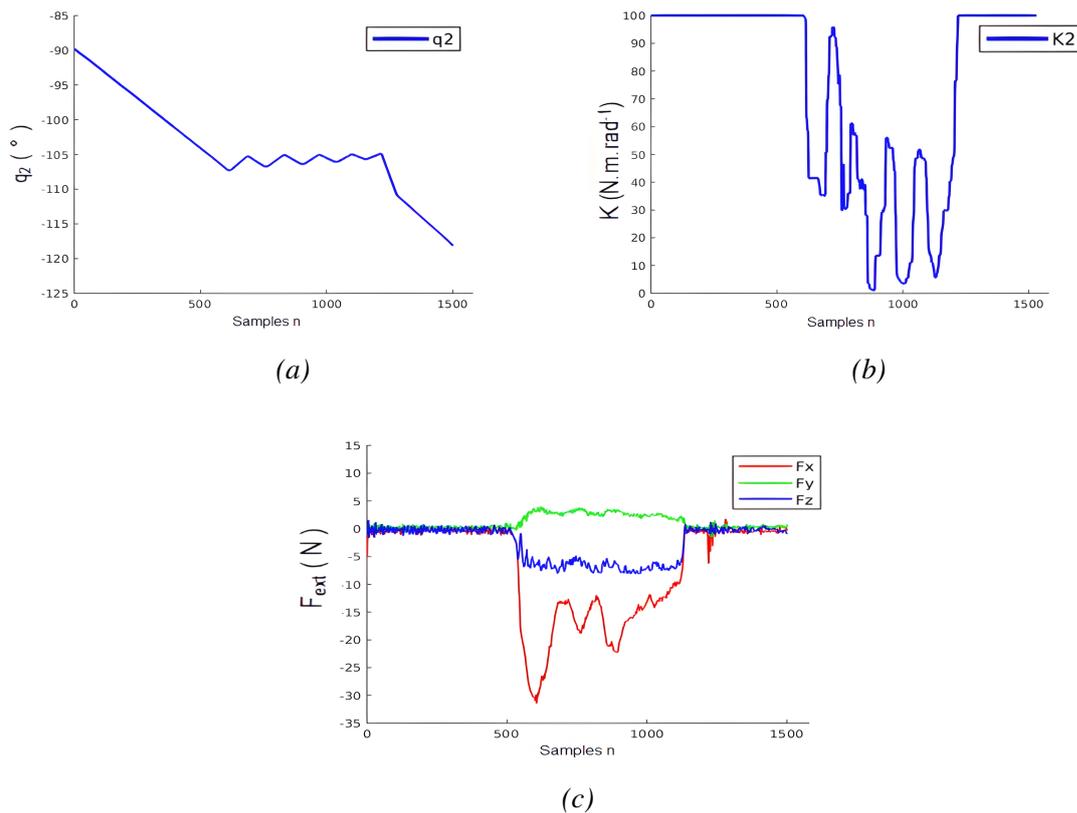


FIGURE 2.14 – Collision frontale entre l'effecteur du robot et la paume de la main : (a) variable articulaire q_2 ; (b) raideur virtuelle du ressort K_2 ; (c) forces externes F_{ext} . La période d'échantillonnage, comme l'unité des abscisses, sont sur cette figure de 0,001 s.

2.5.2 Collision entre la pince du robot et le fantôme flexible

Ce paragraphe présente une collision impliquant le robot et le fantôme flexible que nous avons réalisé. Le matériau nous ayant servi à composer ce fantôme est une gélatine balistique synthétique. Les résultats de l'expérience sont présentés dans les figures (Figure 2.15) et (Figure 2.16). Pour illustrer notre approche, la position du robot à chaque phase de l'expérience a été présentée, depuis sa position initiale jusqu'au moment de la collision. Au cours de cette étude, le robot se déplace en translation d'une valeur de 40 mm le long de l'axe z (vertical) du repère-robot.

Comme dans l'expérience précédente, c'est l'articulation 2 qui a la plus grande influence sur le mouvement de l'effecteur, c'est pourquoi nous n'avons représenté que la variable articulaire q_2 sur la figure 2.16a. Une distinction évidente est visible entre les positions de départ et d'arrivée, comme le montre la modification des positions de l'ensemble, illustrée sur les figures 2.15a et 2.15e. Sur la figure 2.15e, le robot s'arrête après une réduction des forces de collision grâce à l'utilisation de notre stratégie de commande par composant virtuel, conservant ainsi une position finale au point de contact avec le fantôme. Comme on peut le voir sur la figure 2.16, le mouvement articulaire de la deuxième articulation, pendant et après le contact, a été significativement affecté sur la période située entre $n=100$ et $n=1400$ échantillons.

On peut également voir, sur la figure 2.16b, comment la rigidité du ressort virtuel a été modifiée en trois étapes reflétant le comportement mécanique du matériau du fantôme flexible :

- Le premier entre 100 et 600 échantillons.
- Le deuxième entre 600 et 1200 échantillons.
- Le troisième à partir de 1200 échantillons.

Durant la première étape, nous observons une chute de la rigidité du ressort jusqu'à presque la moitié de son réglage initial, due à la déformation élastique du fantôme (Figure 2.15c).

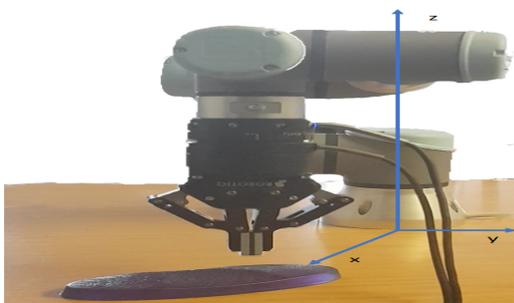
La deuxième étape montre une variation des forces externes sur les axes x et z dépassant le seuil prédéfini de 7 N.

La variation inattendue de la force suivant l'axe x résulte de la déformation du fantôme, indiquée par la modification de son aspect en surface (Figure 2.15e).

Une telle distorsion déclenche l’algorithme de détection de collision, influençant ainsi une seconde fois la rigidité du ressort virtuel afin de minimiser les impacts de la collision (Figure 2.16b). La diminution rapide de la rigidité des articulations offre aux articulations concernées une plus grande liberté de mouvement, permettant ainsi au matériau du fantôme de reprendre sa forme initiale, ce qui entraîne la rétraction du robot vers l’arrière le long de l’axe z. Ce comportement robotique ne se retrouve pas dans les commandes robotiques classiques telles que les commandes par impédance ou par admittance, qui conservent la même compression du matériau tout au long des phases de contact, de pénétration et de post impact.

Dans la troisième étape, les effets constatés sont similaires à ceux de la section précédente 2.5.1, cependant, grâce aux propriétés d’élasticité du fantôme, les oscillations observées sont amorties.

L’effet de la complianc apportée par la commande est observable par le “léger bougé” sur la figure 2.15e qui traduit un petit recul de la pince. Cet effet est aussi observable par le positionnement angulaire q_2 (Figure 2.16a). Bien que ce décalage ne dépasse pas quelques mm comme nous avons pu l’évaluer, cela a été suffisant pour faire passer les forces de -40 N à 7 N à la fin de cette expérience.



(a)



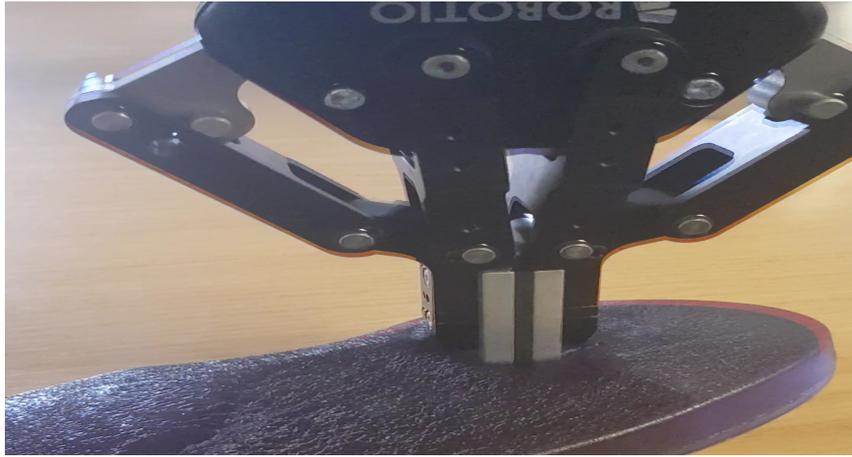
(b)



(c)



(d)



(e)

FIGURE 2.15 – Collision frontale entre l'effecteur du robot et le fantôme flexible : (a) position initiale du robot ; (b) position en début de collision ; (c) compression du fantôme lors de la collision ; (d) conformité du robot ; (e) position finale du robot .

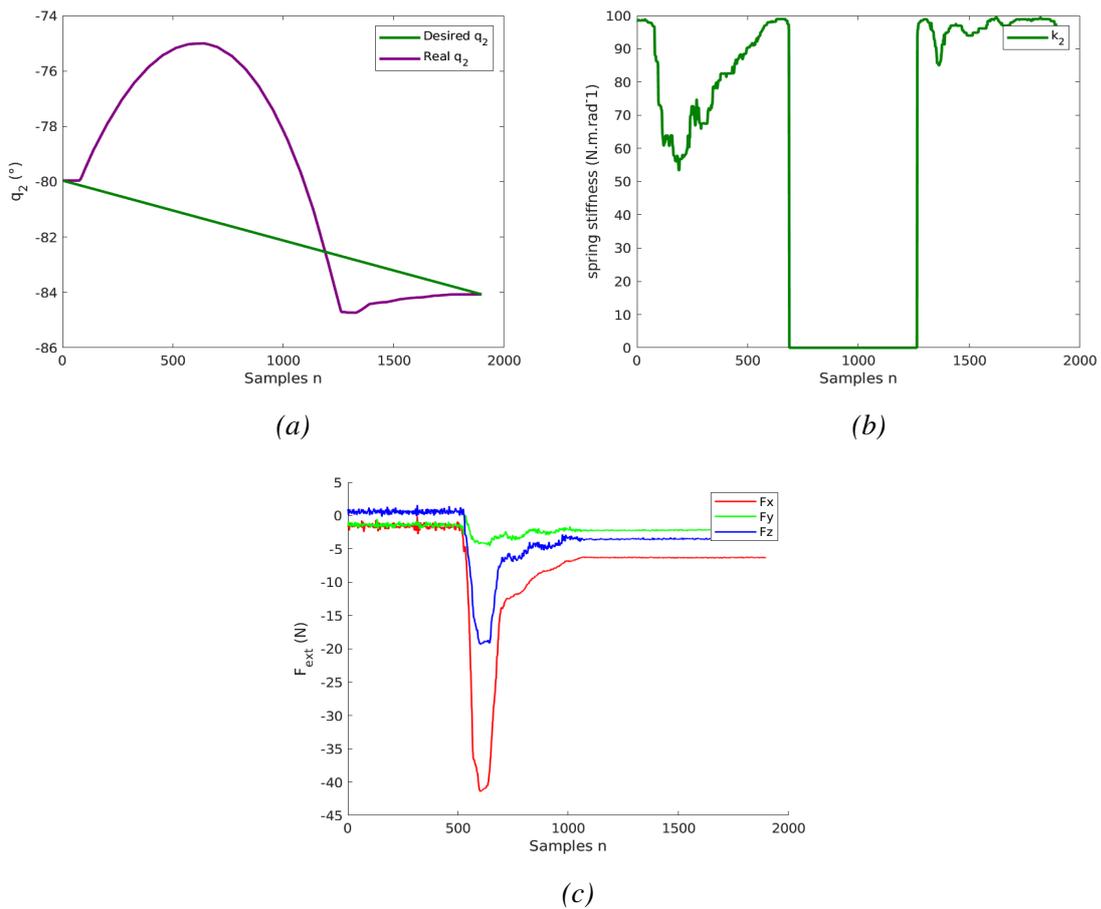


FIGURE 2.16 – Collision frontale entre l'effecteur du robot et le fantôme flexible : (a) variable articulaire q_2 ; (b) raideur virtuelle du ressort K_2 ; (c) forces externes F_{ext} .

Nous avons placé la question de la sécurité humaine comme objectif principal dans cette approche. C'est pourquoi la réduction des forces de collision renforce nos arguments quant à l'importance de cette méthode pour le déploiement futur de la cobotique en raison de sa capacité d'adaptation rapide aux accidents. Dans le cas de matériaux rigides ou semi-rigides, cette approche est comparable à d'autres solutions existantes mais présente l'avantage supplémentaire de pouvoir modifier la rigidité des articulations lorsque cela est nécessaire, assurant ainsi la conformité des robots durs et mous, grâce à l'adaptabilité rapide du ressort virtuel, qui assure la conformité du robot en termes de stabilité et de flexibilité.

En comparant les résultats enregistrés pour cette collision, dite flexible, avec ceux obtenus avec un corps semi-rigide, nous pouvons valider la stratégie que nous proposons, indépendamment de la nature de l'objet. Dans les deux cas, le robot s'arrête à l'endroit de la collision et modifie sa trajectoire afin de faire réagir la seconde articulation contre les forces de collision.

2.5.3 Conduire à des robots plus sûrs

Ce paragraphe montre la faisabilité d'un actionneur élastique virtuel intégré au SEA et son effet sur le mouvement des articulations du robot sans qu'il soit nécessaire de modifier matériellement l'articulation existante du robot. La méthode présentée combine la flexibilité de l'actionneur à impédance variable (VIA) et du SEA pour rendre un robot plus souple. Les résultats que nous avons préalablement obtenus par simulation ont été confirmés par les expérimentations réelles ci-dessus détaillées. Cela valide le fait que le principe de la commande par composant virtuel peut conduire à des robots plus sûrs. Il est ainsi possible de réduire la rigidité des articulations en fonction du risque humain probable, ajoutant ainsi quelques degrés de sécurité supplémentaires au VIA existant. Un autre avantage d'une telle approche est la possibilité d'ajuster la réponse de la rigidité articulaire non seulement à un profil spécifique mais aussi à des profils beaucoup plus complexes. Cette méthode constitue un nouveau moyen prometteur de réduire les forces d'interaction en cas de collision, mais elle est encore en cours de développement, notamment en ce qui concerne son adéquation à divers domaines d'application.

2.6 Analyse comparative entre téléopération et comanipulation

Dans la suite de cette section, nous présentons une analyse comparative entre téléopération et comanipulation.

2.6.1 Les similitudes entre télérobotique et comanipulation

La téléopération et la comanipulation sont deux approches complémentaires de la commande robotique mais dont les architectures sont différentes. En téléopération, l'architecture est composée d'un site distant et d'un site local séparés par un bloc de communication, tandis qu'en comanipulation, si les deux sites existent bien aussi, la couche de séparation est cependant inexistante ou faible.

En téléopération, comme en comanipulation, la présence humaine est très importante. La notion de téléprésence, en téléopération, permet à l'opérateur humain de se sentir présent sur le site de travail (le site distant), tandis qu'en comanipulation la présence humaine est réelle et naturelle.

L'interaction entre l'humain et le robot souligne l'importance de la perception humaine en comanipulation comme en téléopération. Ceci est garanti par la couche de communication qui relie le robot à l'humain dans les deux cas. Il est intéressant de noter que dans les deux modes (téléopération et comanipulation), le robot et l'humain partagent les mêmes canaux de communication. Par conséquent, nous pouvons constater une similitude entre ces deux approches qui exige de la multimodalité.

De plus, pour réaliser une tâche spécifique en téléopération avec retour haptique, le bras maître est parfois un robot en interaction directe avec l'opérateur humain agissant ainsi comme un cobot. Alors la boucle locale de la téléopération peut être vue comme un système de comanipulation. Sur le site distant aussi, les robots télécommandés peuvent avoir le rôle de cobot lorsqu'un humain intervient dans la zone opérationnelle active du robot téléopéré

En outre, un robot téléopéré doté d'une autonomie suffisante pour réagir à une présence humaine dans son espace de travail, correspond à la classification cobot. Nous pouvons déduire de nos observations précédentes que la téléopération pourrait intégrer des aspects cobotiques au sein de sa chaîne de commande. Ainsi, ces deux types de robots (cobot et robot téléopéré) sont contrôlés via des lois de commande similaires.

Les commandes en question, qui peuvent être appliquées à la fois en téléopération et en comanipulation sont les suivantes :

- Loi de commande hybride force/position
- Commande d'amortissement
- Commande de rigidité
- Commande compliant (impédance, admittance ou mode hybride).

Enfin, l'organisation de l'équipe de travail est également un facteur commun entre la téléopération et la comanipulation (voir section [2.3.2.1](#)).

2.6.2 Les distinctions entre téléopération et comanipulation

La première différence importante entre la téléopération et la comanipulation concerne l'environnement de fonctionnement du robot. En téléopération l'environnement est généralement "hostile" où l'homme ne peut pas s'y adapter ou bien la précision exigée de la tâche à réaliser dépasse ses capacités naturelles. Par contre, les systèmes de comanipulation sont appliqués dans des environnements non hostiles car l'humain partage souvent l'espace de travail du cobot.

La deuxième distinction importante tient à la difficulté de coordonner les mouvements du maître et de l'esclave. En téléopération, la structure du dispositif maître diffère de celle du robot distant. Cela nécessite un contrôle sophistiqué pour accorder les espaces de travail de l'esclave et du maître. En revanche, la comanipulation nécessite la commande d'un seul robot, le contrôle est ainsi plus simple et repose uniquement sur les intentions et les actions de l'opérateur humain.

La troisième distinction concerne l'autonomie du robot. Les robots téléopérés sont dotés (à des degrés variables) de capacités d'autonomie (ex. : évitement des obstacles, ajustement de la trajectoire, correction des erreurs de force/position...), tant qu'ils ne sont pas sous le contrôle direct de l'humain. Par contre la comanipulation entraîne un transfert d'autonomie du robot vers l'humain, ainsi le cobot interagit passivement avec l'humain. Cependant, les cobots ne sont pas tous dépourvus d'autonomie. Ceux-ci sont également dotés de capacités de décision, notamment grâce aux nouvelles méthodes de contrôle cognitif. C'est le cas par exemple des cobots développés pour la coopération industrielle.

L'une des différences les plus évidentes est le rôle du robot. En téléopération, le robot est toujours un esclave, mais dans la comanipulation, le cobot peut changer de rôle selon la situation, il peut être maître, esclave ou sans aucun rôle. Le rôle de l'humain est également une autre différence entre la téléopération et la comanipulation. Dans la téléopération l'humain prend toujours le rôle de maître, en tant que téléopérateur ou superviseur, tandis que dans la comanipulation les rôles humains pourraient être : opérateur, collaborateur, spectateur et superviseur .

Une autre différence est le mode de fonctionnement du robot. En téléopération, nous n'avons qu'un ou deux modes de fonctionnement robotique. Le premier est le mode imitateur de l'action humaine, dans ce mode le robot reproduit exactement l'action de l'opérateur. Le second mode est appelé mode assisté ou l'opérateur intervient en tant que superviseur dans l'accomplissement de la tâche. Dans ces deux modes téléopérés, l'opérateur se fie au retour sensoriel du robot pour éviter l'obstacle ou pour faire face à une perturbation inattendue. Par contre, en comanipulation, le cobot présente quatre modes de fonctionnement prévus par la norme ISO 10218. Le premier est une suspension complète des actions du robot lorsqu'un humain intervient dans son espace

de travail. Le deuxième est un mode de compensation guidé par les mains, dans lequel le cobot peut compenser des effets non désirés tels que la gravité ou l'effet d'inertie dû au codéplacement de l'objet avec un opérateur humain. Le troisième mode est une diminution graduelle des actions du robot jusqu'à son arrêt. Enfin, le quatrième mode représente une interaction physique dynamique directe avec le facteur humain (annexe B).

Une autre différence concerne l'interaction avec l'environnement ou la tâche. En téléopération il n'y a pas de lien direct entre l'opérateur et l'environnement, alors qu'en comanipulation ce lien est établi par une interaction directe entre le cobot et l'environnement suite aux actions de l'opérateur et à sa perception de l'environnement.

La téléopération et la comanipulation présentent une différence de priorité en matière de contrôle et de sécurité. En téléopération, nous attribuons une priorité plus élevée au facteur de contrôle qu'au facteur de sécurité, principalement pour les applications dont la présence humaine sur le site distant est rare. La sécurité dans ce cas est réservée à celle de l'équipement. Tandis que dans le cadre d'un système de comanipulation, le contrôle pourrait être négligé ou reporté pour assurer la sécurité de l'opérateur humain. Dans ce cas, le facteur de sécurité porte sur deux aspects : la sécurité de l'équipement et la sécurité humaine, avec une priorité plus élevée pour le facteur humain.

Une autre différence entre la téléopération et la comanipulation est le délai. En téléopération il y a trois sources principales de délai : le délai de perception causé par les capteurs, le délai de réaction causé par la réactivité des moteurs et le délai de communication causé par la couche de communication et la distance qui sépare le maître de l'esclave. Ces délais affectent la stabilité de la chaîne de téléopération. Cependant, en comanipulation, puisque la séparation physique est généralement faible ou inexistante, ce facteur de retard est réduit à deux éléments : le délai de perception et le délai de réaction, ce qui garantit la stabilité du système de comanipulation par rapport à celui de la téléopération.

L'accessibilité est également une autre différence entre la téléopération et la comanipulation. La téléopération peut être confrontée à une situation où le robot ne peut pas atteindre un emplacement souhaité en raison d'un obstacle, d'une singularité ou de défauts dans les modèles (géométrique, cinématique, dynamique) directs ou inverses, ce problème n'a aucun impact sur la comanipulation car lorsque les situations susmentionnées se produisent, l'homme peut agir directement pour guider le robot vers une nouvelle position, en modifiant manuellement les positions des articulations du cobot.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons souligné les problématiques d'interactions humain-robot, les nombreux développements ayant cours concernant la comanipulation des robots et les techniques de commande qui leur sont associées. Celles-ci vont des plus courantes comme les commandes en impédance ou admittance à une solution nouvelle construite sur le concept d'un composant compliant virtuel. Toutes ces commandes ont en commun le fait de devoir mesurer, identifier et contrôler des phénomènes dynamiques. Parce que l'on sait maintenant mesurer les couples articulaires avec précision et rapidité, parce que l'on sait implémenter un contrôleur dynamique en « temps-réel », ces commandes ont atteint d'excellents niveaux de performance. Des algorithmes cobotiques efficaces sont, depuis assez récemment, proposés par les constructeurs des grandes marques de robots. La présence humaine en proximité d'un cobot en fonctionnement, sans barrière de sécurité matérielle, est à ce jour possible.

Sur le volet de la sécurité, l'approche mécanique, parce qu'elle est intrinsèquement sûre, a longtemps été la seule à être considérée. Nous avons montré que le concept de composant virtuel devrait maintenant rivaliser avec le composant réel, parce que celui-là est sûr lui aussi et surtout parce qu'il est paramétrable par logiciel.

Enfin nous nous sommes intéressés à comparer téléopération et comanipulation. Si les deux modalités ont des points communs en termes d'objectifs, à savoir positionner le robot en réponse à une entrée désirée, les approches pour gérer la commande sont structurellement différentes. Et fondamentalement, la question de l'éloignement distingue téléopération et comanipulation. Pourtant, ne pourrait-on pas tendre vers un concept global de ces deux modalités ? Une téléopération ne peut-elle pas être considérée comme une forme de cobotique à distance ?

Ne peut-on pas envisager un système robotique qui puisse être alternativement téléopéré et comanipulé ?

C'est à cette dernière question que va s'intéresser le chapitre suivant.

3

Téléopération, comanipulation et commande alternée des deux modalités

Dans les deux chapitres précédents nous avons traité deux standards de coopérations existant entre un humain et un robot : la téléopération puis la comanipulation. Si la comanipulation est de fait en proximité immédiate du robot, il a été souligné que la téléopération d'un robot peut se conduire en proximité ou à grande distance de celui-ci. Par ailleurs, pour un même robot téléopéré, plusieurs sites maîtres peuvent être considérés.

Ce chapitre s'intéresse à la combinaison, en alternance temporelle, entre téléopération et comanipulation pour un même robot. Nous y décrivons comment nous avons mis en œuvre les deux modalités concernées, puis les avons combinés : sur les volets synthèse de la commande, simulation et implémentation. Une application médicale a guidé notre démarche : il s'agit du positionnement d'une sonde échographique pour laquelle les deux phases d'assistance robotique par téléopération et comanipulation sont nécessaires.

Sommaire

3.1	L’alternance entre téléopération et comanipulation : pertinence et problématique	74
3.2	Les choix matériels et logiciels - le cadre expérimental	75
3.3	Synthèse et implémentation d’une commande en mode téléopéré	77
3.3.1	La téléopération unilatérale : du téléopérateur vers le robot	78
3.3.1.1	Modélisation du dispositif maître	78
3.3.1.2	Modélisation du dispositif esclave : le robot porte-sonde échographique	79
3.3.1.3	Synthèse de la loi de commande pour la téléopération	82
3.3.1.4	Simulation de la commande en téléopération	86
3.3.1.4.1	Simulation d’une téléopération en position	86
3.3.1.4.2	Simulation d’une téléopération en position et orientation	88
3.3.1.5	Implémentation de la commande téléopérée sur le robot UR3	89
3.3.2	La téléopération avec retour d’effort	91
3.3.2.1	Modélisation des actions de contact humain-robot	91
3.3.2.2	Synthèse de la commande téléopérée avec retour d’effort	93
3.3.2.3	Simulation d’une téléopération avec retour d’effort	94
3.3.3	Téléopération bilatérale	95
3.3.3.1	Simulation de la téléopération bilatérale	95
3.3.3.2	Implémentation de la commande bilatérale	98
3.4	Synthèse et implémentation d’une commande en mode comanipulé	100
3.4.1	Synthèse de la loi de commande en admittance	100
3.4.2	Phase expérimentale de la comanipulation en position	104
3.4.3	Comanipulation en position et orientation	106
3.5	Enchaînement séquentiel de modes téléopérés et comanipulés	108
3.5.1	Le mode C->T : Comanipulation vers Téléopération	111
3.5.2	Le mode T->C : Téléopération vers Comanipulation	113
3.6	Conclusion	115

3.1 L'alternance entre téléopération et comanipulation : pertinence et problématique

Dans de nombreuses applications assistées par robot, notamment en milieu médical, il est courant de devoir alterner des phases telles le pré-positionnement d'un instrument ou l'accompagnement du geste de l'expert (ce sont là des phases qui peuvent être accomplies en comanipulation robotique) et des phases qu'il est nécessaire de téléopérer (ex. : protection des équipes médicales des dangers des rayons ionisants, ou réductions d'échelles). Il apparaît donc qu'un même robot peut être utilisé à deux fins distinctes et qu'il peut donc être contrôlé, alternativement, dans des modes téléopérés et comanipulés, pour une même application.

Cette alternance, au sein d'un même protocole d'assistance au geste robotique, soulève diverses problématiques techniques dont l'origine tient essentiellement aux distinctions structurelles des deux modalités considérées, et qui ont été soulignées en clôture du précédent chapitre. Nous avons identifié plusieurs problèmes liés à cette alternance de phases et qui constituent autant d'enjeux scientifiques sur le large volet de la commande robotique. Nous nous proposons ici d'y apporter quelques solutions.

Ces enjeux peuvent s'exprimer sous la forme des questions suivantes :

- Comment gérer la continuité du geste, sachant que celle-ci doit être assurée lors des transitions entre les phases comanipulées et téléopérées ; et réciproquement ?
- Comment gérer les transitions de phase entre comanipulation et téléopération ? En effet, la stabilité de chaque méthode de commande n'induit pas, de fait, la stabilité globale du système.
- Comment gérer le degré de priorité accordé à chaque loi de commande ?
- Comment évaluer l'influence de cette alternance sur les comportements robotiques et humains dans chacune des phases ?
- Comment décider de qui du téléopérateur et du comanipulateur peut prendre la main sur le système ?
- Comment faire que les opérateurs impliqués dans une opération combinant téléopération(s) et comanipulation bénéficient de ressentis identiques dans leur contrôle du geste, quel que soit le mode par lequel le robot est momentanément contrôlé ?
- Comment évaluer l'influence de cette alternance sur les comportements robotiques et humains dans chacune des phases ?
- Doit-on avoir le même espace de travail pour les 2 phases ? Comment affecter ou partager les espaces de travail pour chaque phase ?

Il est en effet possible d’imaginer deux espaces de travail différents pour chacune des phases, avec une intersection non nulle, et qui peuvent de plus évoluer au cours de la tâche.

- Comment apporter une “certaine” forme d’homogénéité aux deux approches fonctionnellement différentes ?

3.2 Les choix matériels et logiciels - le cadre expérimental

- Pour expérimenter la combinaison entre téléopération et comanipulation, nous avons utilisé le robot UR3 de Universal Robots.

Ce robot possède une structure sérielle à 6 ddl en rotation. Il a été équipé, sur l’organe terminal, du capteur d’effort 6D FT300 de Robotiq afin de mesurer les actions extérieures appliquées à l’outil. UR3 est accessible à une programmation graphique sur l’interface propriétaire Polyscope. Nous avons cependant choisi de le programmer en utilisant les outils de la plateforme logicielle ROS (Robot Operating System) avec une application qui tourne sur un micro-ordinateur dédié, communiquant avec l’unité de commande du robot mais séparé de celle-ci. Outre le fait que ROS soit open source, ce choix a permis de gérer plus efficacement toutes les tâches de programmation, en bénéficiant de fonctionnalités préalablement validées par la communauté ROS.

- Pour gérer la commande en téléopération, nous avons choisi d’utiliser le Phantom Omni, développé par Sensible, comme dispositif haptique maître.

Phantom Omni est un robot à structure sérielle à 6 degrés de mobilité en rotation et 3 degrés de retour d’effort. Ses 3 premiers axes sont contrôlables en force, les 3 derniers sont passifs et donc non motorisés. Ces 3 derniers axes sont concourants, constituant de ce fait une structure de type poignet sphérique. Le 6e segment est un stylet que prend en main l’opérateur.

Afin de répondre à la question de la non-homogénéité des contrôles bas-niveau entre téléopération et comanipulation, les tâches robotiques ont été formulées dans l’espace opérationnel pour chacune des deux modalités considérées. Un module, développé sous ROS, permet de réaliser les transformations entre espace opérationnel et espace articulaire. Téléopération et comanipulation génèrent ainsi des commandes de vitesses cartésiennes; les commandes transmises au robot sont par contre des consignes de vitesses articulaires.

Les modèles géométriques direct et inverse du robot UR3 sont développés en annexe. Le

formalisme de Denavit et Hartenberg modifié (DHm) a été privilégié pour les établir.



FIGURE 3.1 – *les systèmes robotiques utilisés*

Dans ce chapitre, nous présentons successivement les deux familles de commandes que nous avons développées (commandes en téléopération, dites en mode T; puis commandes en comanipulation, dites en mode C) puis nous montrons les enchaînements temporels de ces deux modalités sources, de deux façons opposées : pour la première, c'est le mode exprimant la transition de la cobotique à la téléopération (dit mode C vers T), pour la seconde c'est le mode passant de la téléopération à la cobotique (dit mode T vers C). Pour chacun des cas étudiés, les différents modèles de commande développés sont décrits. Sont aussi décrites les simulations et expérimentations qui ont été réalisées. Les résultats de ces expérimentations sont commentés.

Pour la commande en téléopération, 3 scénarios distincts sont présentés :

- Une commande en position dans l'espace 3D,
- Une commande en position et orientation,
- Une commande avec retour d'effort.

Pour la commande en comanipulation, 2 scénarios sont présentés :

- Une comanipulation en position,
- Une comanipulation en position et orientation.

Pour les combinaisons en alternance, sont présentés les résultats d'expérimentations menées via les deux approches :

- Le mode Comanipulation vers Téléopération (C->T)
- Le mode T->C

L'application robotique considérée

Fidèle aux axes de notre laboratoire, historiquement impliqué sur les thématiques de télé-échographie robotisée, nous avons travaillé sur une application d'échographie assistée par robot pour illustrer cette combinaison de téléopération et comanipulation.

Cette application concerne un projet au sein duquel est impliqué notre laboratoire mais qui n'est pas détaillé dans ce mémoire pour des raisons de confidentialité.

L'application en question s'appuie sur l'expertise des échographistes pour réaliser des examens diagnostiques : à distance d'une part, d'où le volet téléopération, en proximité d'autre part, sous assistance robotique, d'où le volet comanipulation. Ajoutant ainsi la dimension "comanipulation" à la maintenant classique procédure par télé-échographie, nous pouvons ainsi qualifier notre application d'échographie robotisée par téléopération et comanipulation combinées. C'est le concept désigné par TC^2 . Dans ce chapitre la combinaison considérée est donc une alternance séquentielle.

Concernant le volet téléopération, précisons que le dispositif haptique tenu par l'expert doit permettre la transmission de gestes précis, fluides et non chaotiques et qu'un retour d'effort est demandé.

Concernant le volet comanipulation, précisons que l'expert doit contrôler les mouvements de la sonde échographique avec laquelle il est en contact direct, sous assistance du robot. Précisons aussi que la sonde est fixée sur une canne porte-sonde, qui par nécessité des spécifications médicales, est d'une longueur importante au regard des dimensions du robot. Cette canne peut, selon le cas d'usage, atteindre une longueur équivalente au rayon d'action du robot, soit 500 mm (voir figure 3.2).

Pour une nécessaire souplesse du mode comanipulé, le robot se doit d'être sensible aux efforts/couples qu'applique l'expert sur le porte-outil. Ainsi, et afin de rester en harmonie avec les valeurs d'efforts enregistrés lors d'examen échographiques standards, nous considérons que l'effort maximal appliqué par l'expert sur le porte-sonde reste de l'ordre de 10 N.

3.3 Synthèse et implémentation d'une commande en mode téléopéré

Cette partie décrit l'architecture de commande que nous avons développée concernant la téléopération d'un robot portant une sonde échographique.

Il a été souligné qu'une téléopération consiste à émettre les consignes du téléopérateur et en observer leur bonne exécution. Cette observation peut prendre la forme d'un retour visuel vers l'opérateur, sans qu'il y ait nécessairement une information haptique sur les actions externes agissant sur le robot esclave distant. Bien que de nombreuses opérations de télé-échographies robotisées (et même de télé-chirurgies) fonctionnent avec cette approche, il a cependant été fait choix, en réponse au besoin médical exprimé, d'intégrer les retours d'effort dans l'application. Le téléopérateur aura ainsi connaissance des interactions robot-environnement et surtout des actions de contact entre la sonde échographique et le patient.

3.3.1 La téléopération unilatérale : du téléopérateur vers le robot

3.3.1.1 Modélisation du dispositif maître

Rappelons que le bras haptique Phantom Omni, utilisé au poste maître, possède 6 mobilités en rotation et 3 degrés de retour d'effort. Le tableau 3.1 dresse les paramètres géométriques du Phantom Omni, établis selon le formalisme de Denavit-Hartenberg modifié "DHm" [Khalil1986].

TABLEAU 3.1 – Paramètres de Denavit-Hartenberg modifié du Phantom Omni de Sensible.

Unités du tableau : radians et mm				
Liaison	α_{i-1}	a_{i-1}	θ_i	r_i
1	0	0	θ_1	0
2	$\pi/2$	0	θ_2	0
3	0	149.352	θ_3	0
4	$\pi/2$	0	θ_4	127.508
5	$-\pi/2$	0	θ_5	0
6	$\pi/2$	0	θ_6	0

En utilisant le modèle géométrique direct (MGD) et le modèle cinématique direct (MCD) de l'Omni, les consignes de position ou de vitesse peuvent être générées pour commander le robot esclave. Le MGD de l'Omni a été déduit de la matrice de transformation homogène globale 0T_n , construite via la démarche DHm, selon l'équation suivante :

$${}^0T_n = \prod_{i=1}^n {}^{i-1}T_i$$

où ${}^{i-1}T_i$ est la matrice de transformation homogène traduisant le mouvement articulaire du passage du segment i au segment $(i-1)$ de l'Omni.

Le MGD du Phantom Omni, issu de 0T_n est un vecteur 6×1 .

Ce vecteur caractérise la position 3D cartésienne de la pointe du stylet de l'interface haptique et l'orientation de ce stylet via les 3 angles de Roulis, Tangage et Lacet (mesurés autour des axes x, y, z du repère de base du Phantom Omni), respectivement notés : ψ, θ et ϕ .

Soit :

$$MGD = [(x, y, z), (\psi, \theta, \phi)] = [P, R]$$

où P est le vecteur position de la pointe du stylet et R le vecteur orientation de ce stylet.

Le vecteur P du MGD est défini par :

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot {}^0T_n \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Le vecteur R du MGD, conformément au formalisme utilisant les angles de roulis, tangage et lacet, est déterminé par la relation suivante :

$$R = \begin{bmatrix} \text{atan2}({}^0T_n(3,2)/\cos(\theta), {}^0T_n(3,3)/\cos(\theta)) \\ 0.0175 + \text{atan2}(-{}^0T_n(3,1), \pm \sqrt{{}^0T_n(3,3)^2 + {}^0T_n(3,2)^2}) \\ \text{atan2}({}^0T_n(2,1)/\cos(\theta), {}^0T_n(1,1)/\cos(\theta)) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Les mouvements d'inclinaison de la sonde ultrasonore demandés par l'expert au poste maître restent de faible amplitude (une analyse du geste préalablement menée au laboratoire a donné 30° pour moyenne des maximums rencontrés au cours d'un examen échographique standard et 45° observés de façon exceptionnelle). Nous avons alors vérifié, à partir de cette hypothèse, que la grandeur θ issue de l'expression ci-dessus ne prend pas les valeurs +/- 90°. On ne risque donc pas d'atteindre la singularité dite "Gimbal lock" classique du formalisme roulis-tangage-lacet; le modèle précédent est donc cohérent pour générer une consigne au robot esclave.

Le Modèle Cinématique Direct (MCD) du dispositif maître permet de définir les consignes de vitesse pour le robot esclave. Il s'écrit de la manière suivante :

$$\dot{x} = J(q) \cdot \dot{q}$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [v_x & v_y & v_z]^T \\ [w_x & w_y & w_z]^T \end{bmatrix} \text{ et } \dot{q} = \begin{bmatrix} \frac{dq_1}{dt} & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{dq_n}{dt} \end{bmatrix}^T$$

où J est la matrice jacobienne du dispositif maître.

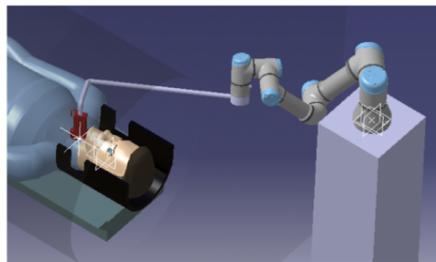
3.3.1.2 Modélisation du dispositif esclave : le robot porte-sonde échographique

Comme précisé plus haut, c'est le robot UR3 de Universal Robots qui est utilisé pour le positionnement de la sonde échographique. C'est un robot à structure 6R, léger et peu

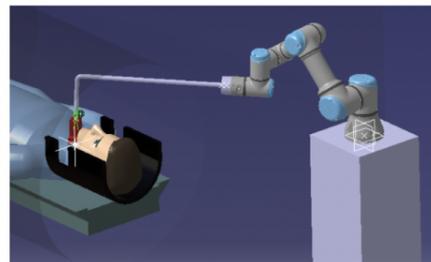
encombrant, présentant donc un volume de travail sphérique. Ses 6 ddl autorisent un déplacement le plus général de la sonde (3 translations et 3 rotations), sans redondance d'actionnement. Son rayon d'action est de 500 mm et sa capacité de charge de 3 kg. Pour tout cela, il convient pleinement pour la réalisation des deux tâches de téléopération et de co-manipulation qui sont spécifiées. Les modèles géométriques directs et inverses de ce robot sont détaillés dans l'annexe A.

La canne porte-sonde échographique prolonge l'organe terminal du robot (le 6e axe). Rappelons que le besoin de l'application médical fait que cette canne est de longueur importante, allant parfois jusqu'à 500 mm. Différentes formes de canne porte-sonde ont été envisagées ainsi que différentes configurations possibles du robot pour la porter. Du fait de la tâche à effectuer et notamment des contraintes d'encombrement inhérentes à l'application, quatre configurations (ou aspects) sont possibles, sur les huit qu'offre au maximum la structure cinématique à 6 ddl de l'UR3. La figure 3.2 illustre deux de ces configurations du robot et deux formes possibles de canne porte-sonde échographique. A gauche est montré l'exemple d'un porte-sonde à 3 segments (constitué de 3 tiges perpendiculaires) pour lequel le 1^{er} segment est perpendiculaire à l'axe articulaire Z_6 du robot (c.f. formalisme DHm). Le robot est ici représenté en configuration "coude bas" et "épaule droite". A droite de cette même figure, la canne porte-sonde est composée de seulement 2 segments. Le 1^{er} segment est dans la direction de l'axe Z_6 . Le robot est ici représenté en configuration "coude haut" et "épaule gauche".

Le robot UR3 est équipé du capteur d'effort 6D FT300 de Robotiq, disposé au niveau du 6e axe, juste avant la canne porte-sonde. Ce capteur a une masse propre de 400 g, il présente des plages de mesures de ± 300 N pour les 3 composantes de force et de ± 30 N.m pour les 3 composantes de moment.



Épaule droite, coude bas, porte-outil $\perp Z_6$



Épaule gauche, coude haut, porte-outil $// Z_6$

FIGURE 3.2 – Simulation sous Catia V5 de différentes configurations de l'ensemble robot & canne porte-sonde échographique lors d'une échographie de la carotide.

Le modèle complet du robot téléopéré est composé de deux modèles distincts : celui de l'UR3 et celui de la canne porte-sonde échographique, tels que donnés dans le tableau 3.2.

La matrice de transformation homogène du robot UR3, associée au porte-sonde, s'écrit comme suit :

$$\underbrace{{}^0T_n}_{\text{Robot esclave}} = \underbrace{{}^0T_6}_{\text{UR3}} \cdot \underbrace{{}^6T_{10}}_{\text{Porte-outil}} = \prod_{i=1}^6 {}^{i-1}T_i \cdot \prod_{i=7}^{10} {}^{i-1}T_i$$

Le MGD du robot UR3, issu de 0T_n , est un vecteur de dimension 6x1 :

$$MGD_{\text{esclave}} = [(x, y, z), (\psi, \theta, \phi)] = [P, R]$$

où P et R sont les vecteurs de position et d'orientation de la sonde respectivement.

Les vecteurs P et R du MGD sont définis par

$$\underbrace{P}_{\text{Robot esclave}} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} {}^0T_n[1,4] \\ {}^0T_n[2,4] \\ {}^0T_n[3,4] \end{bmatrix}}_{\text{Robot esclave}}$$

$$\underbrace{R}_{\text{Robot esclave}} = \begin{bmatrix} \psi \\ \theta \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{atan2}({}^0T_n(3,2)/\cos(\theta), {}^0T_n(3,3)/\cos(\theta)) \\ \text{atan2}(-{}^0T_n(3,1), \pm\sqrt{{}^0T_n(3,3)^2 + {}^0T_n(3,2)^2}) \\ \text{atan2}({}^0T_n(2,1)/\cos(\theta), {}^0T_n(1,1)/\cos(\theta)) \end{bmatrix}$$

Unités du tableau : rad et mm

	Liaison	α_{i-1}	a_{i-1}	θ_i	r_i
U3	1	0	0	θ_1	-248.1
	2	$-\pi/2$	0	θ_2	0
	3	0	243.65	θ_3	0
	4	0	213.25	θ_4	112.35
	5	$-\pi/2$	0	θ_5	85.35
	6	$\pi/2$	0	θ_6	81.9

(a) Tableau de Denavit-Hartenberg modifié pour le robot UR3

Unités du tableau : rad et mm

	Liaison	α_{i-1}	a_{i-1}	θ_i	r_i	
capteur de force	7	0	0	0	d_1	
	Porte-sonde	8	α_1	L_1	0	0
		9	0	0	$-\pi/2$	L_2
	10	$-\pi/2$	$-L_3$	0	0	

(b) Tableau de Denavit-Hartenberg modifié pour la canne porte-sonde

TABLEAU 3.2 – Paramètres DHm du robot porte-sonde échographique (robot UR3 à 6 ddl & canne porte-sonde échographique).

3.3.1.3 Synthèse de la loi de commande pour la téléopération

Nous détaillons ici le modèle et l'implémentation de l'architecture de commande que nous avons développée pour réaliser la téléopération du robot esclave en respectant les contraintes géométriques imposées.

La figure 3.3 illustre l'architecture de commande de la chaîne téléopérée : celle-ci comporte un générateur de consigne et un contrôleur, tous les deux programmés sur le PC du robot esclave.

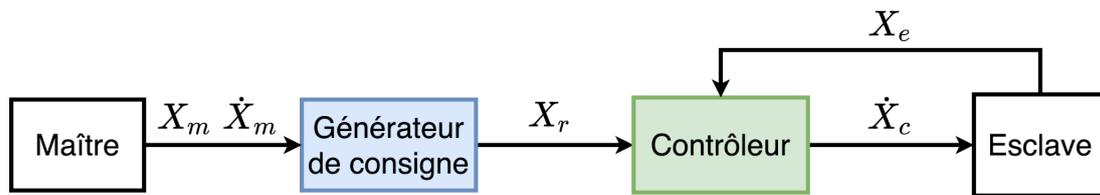


FIGURE 3.3 – Modèle global de la commande en téléopération.

Le Générateur de consigne reçoit les commandes du maître et génère les consignes de référence pour le robot esclave. Le Contrôleur a pour rôle de générer la consigne de vitesse à envoyer au robot et de vérifier que le mouvement souhaité est bien exécuté.

Le Générateur de consigne

Le schéma interne du Générateur de consigne est représenté sur la figure 3.4.

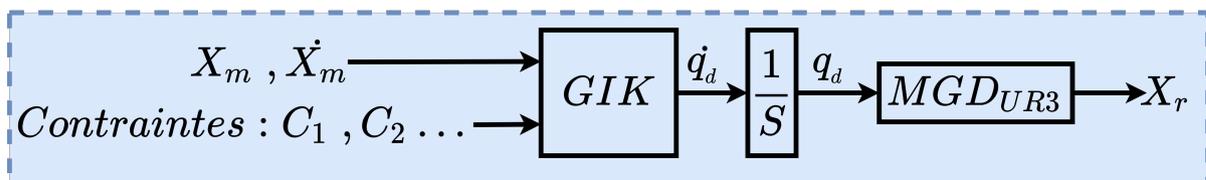


FIGURE 3.4 – Le Générateur de consigne pour la commande en téléopération.

A partir de la pose X_m issue de l'interface haptique maître et de sa dérivée \dot{X}_m , le bloc désigné par GIK (pour Generalized Inverse Kinematic - ou modèle géométrique inverse généralisé), détermine les vitesses articulaires à appliquer au robot esclave. Ce bloc intègre également les contraintes géométriques (C_i) imposées à la configuration globale du robot esclave (ex. : l'évitement de collision avec l'environnement). Après application du MGD, la pose de référence du robot porte-sonde est obtenue.

Le GIK est écrit comme un problème de résolution quadratique sous contraintes [Suleiman2016] :

$$\min_{\dot{q}} H(q) = \frac{1}{2} (\dot{q} - \dot{q}_0)^T W (\dot{q} - \dot{q}_0) \quad (3.3)$$

$$\text{soumis aux contraintes} \left\{ \begin{array}{l} \text{Première priorité } C_1 : \left\{ \begin{array}{l} J_1 \dot{q} = \dot{x}_1 + K_1 e_1 \\ A_1 \dot{q} \leq b_1 \end{array} \right\} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \text{Dernière priorité } C_k : \left\{ \begin{array}{l} J_k \dot{q} = \dot{x}_k + K_k e_k \\ A_k \dot{q} \leq b_k \end{array} \right\} \end{array} \right.$$

Où W est une matrice de pondération diagonale positive et \dot{q}_0 est un vecteur vitesse articulaire " préféré " .

Et avec, dans chaque équation du MCI et pour chaque contrainte :

- J_x la matrice jacobienne du sous-espace nul,
- $\dot{q} \in R^6$ la vitesse articulaire,
- \dot{x} un vecteur combinant vitesse linéaire et angulaire de la trajectoire souhaitée,
- K_x une matrice diagonale définie positive,
- e_x l'erreur de position & orientation de l'effecteur dans l'espace opérationnel entre la pose désirée et la pose calculée par l'optimisation : $e_x = x_{des_x} - x_{ee_x}$

Dans chaque inégalité, des paramètres A_k et b_k ont été choisis et adaptés selon la contrainte à gérer. Les contraintes retenues concernent le positionnement du robot, l'éloignement aux obstacles, limites articulaires et singularités, et la minimisation d'énergie.

Deux contraintes prioritaires concernent les mouvements du robot : la contrainte d'évitement d'obstacles (C_1) et celle de positionnement de l'effecteur (C_2). L'évitement d'obstacles (ou de collision) présentant naturellement une priorité supérieure à celle du positionnement de l'organe terminal.

La contrainte d'évitement C_1 est formulée à partir de la définition de l'amortisseur de vitesse, introduite à l'origine dans [Faverjon1987]. Dans ce cas :

$$A_1 = -n^T J_1$$

n est le vecteur de distance/orientation normale entre l'organe terminal du robot et l'obstacle (c'est le point le plus proche qui est alors considéré),

$$b_1 = \xi \frac{d-ds}{di-ds}$$

est ds la distance de sécurité et di la distance du déclenchement du freinage par l'amortisseur.

De plus K_1 et e_1 sont nuls dès lors que l'effecteur du robot ne suit pas une trajectoire prédéfinie.

La contrainte C_2 de positionnement de l'organe terminal de robot est définie par les équations de son modèle géométrique direct. L'inégalité de contrainte (c.f. inéquations de l'équation 3.3) n'existe donc pas dans ce cas, ainsi A_2 et b_2 sont nuls.

Pour résoudre le problème d'optimisation formulé dans l'équation 3.3, nous avons introduit deux facteurs U_1 et U_2 définissant les poids attribués à chacune des deux contraintes lors du calcul. Ceci facilite la résolution de ladite équation.

Nous avons aussi introduit des paramètres internes w_1 et w_2 correspondant à C_1 et C_2 , ce qui a permis de reformuler le problème d'optimisation sous forme quadratique comme suit :

$$\min_{\dot{q}, w_1, w_2} H(q) = \frac{1}{2}(\dot{q} - \dot{q}_0)^T W (\dot{q} - \dot{q}_0) + U_1 w_1^T w_1 + U_2 w_2^T w_2$$

$$\text{soumis à } \begin{cases} J_1 \dot{q} = r_1 + w_1^0 \text{ avec } r_1 = \dot{x}_1 + K_1 e_1 \\ -n^T J_1 \dot{q} \leq \xi \frac{d-d_s}{di-d_s} + w_1^1 \\ J_2 \dot{q} = r_2 + K_2 e_2 + w_2^0 \text{ avec } r_2 = \dot{x}_2 + K_2 e_2 \end{cases}$$

avec :

- J_1 la Jacobienne du robot UR3,
- J_2 la Jacobienne du robot UR3 avec le porte-sonde,
- $w_1^T = [w_1^{0T} w_1^{1T}]$ et $w_2^T = [w_2^{0T} 0]$ les variables de flexibilité interne pour la résolution des équations,
- U_1 et U_2 les deux constantes qui expriment l'importance relative des contraintes fixées par l'utilisateur et fixent ainsi les priorités. Nous avons choisi un rapport 1000 entre ces deux paramètres ($U_1 = 10^3 U_2$).

La figure 3.5 illustre les réponses simulées du GIK proposé, comparées à celles d'un modèle géométrique inverse standard et sans contraintes, quant à la capacité à générer une consigne articulaire cohérente pour le robot esclave (c'est-à-dire respectant les contraintes imposées et leurs éventuelles priorités).

La simulation fournie concerne un mouvement désiré de translation rectiligne de la sonde échographique le long de l'axe x du repère-robot, dans le sens des x négatifs, entre les abscisses initiale et finale : $X_i = -300\text{mm}$ et $X_f = -500\text{mm}$.

NB-1 : pour cette simulation, où l'objectif est d'analyser le comportement du GIK, et pas "encore" celui du contrôleur global de téléopération, il n'a pas été demandé d'asservir l'orientation de la sonde.

Dans cette simulation, la canne porte-sonde considérée est composée de 3 segments orthogonaux de longueur L_1 , L_2 et L_3 , fixée sur le capteur ayant lui même un centre à la cote d_1 dans la direction de l'axe Z_6 (voir figure 3.2 et tableau DHm du robot), avec $L_1 = L_2 = L_3 = 100$ mm et $d_1 = 100$ mm.

Le point E, extrémité de la sonde échographique, est le centre d'outil (ou TCP) auquel est appliqué le mouvement de translation.

Pour évaluer la capacité du bloc GIK à respecter la contrainte C_1 d'évitement d'obstacle, une limite $X_{ee_{lim}}$ de déplacement du TCP a été fixée. Elle a été choisie entre les valeurs initiale et finale du déplacement désiré : $X_{ee_{lim}} = -400$ mm.

On constate, sur la figure ci-après, que la solution obtenue par le GIK ne franchit pas cette limite $X_{ee_{lim}}$ (ligne rouge sur la figure de droite). De ce fait, le respect de la contrainte C_1 de non-collision entraîne de facto le non-respect de la contrainte C_2 (mouvement désiré).

NB-2 : *N'ayant pas imposé de contrainte d'orientation pour la sonde, on observe deux trajectoires distinctes pour l'effecteur. Celles de la sonde sont par contre évidemment identiques (toutefois avant la limite de collision).*

Le bloc GIK proposé est ainsi en mesure de satisfaire les contraintes imposées et leurs priorités, ce que ne ferait pas un classique MGI, d'où sa raison d'être dans notre synthèse de commande par téléopération.

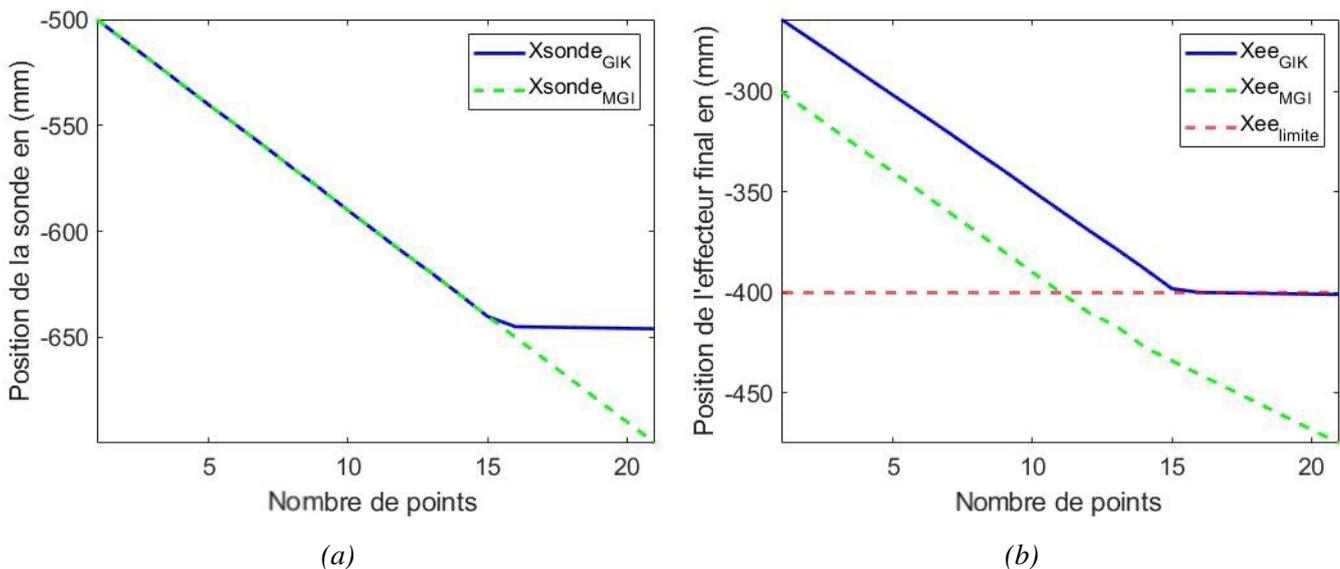


FIGURE 3.5 – Comparaison des réponses du GIK (à droite) et du MGI (à gauche) pour générer des consignes articulaires (en simulation)

Le contrôleur

Le schéma fonctionnel du contrôleur intégré dans la boucle de commande par téléopération est donné à la figure 3.6. Le facteur alpha gère la contribution de deux contrôleurs de positionnement internes distincts. L'un du premier ordre (en violet), l'autre est du deuxième ordre (en bleu). Ce contrôleur combiné (premier ordre + deuxième ordre) permet d'assurer un mouvement fluide du robot et des profils continus d'accélération et de vitesse, dans l'espace cartésien.

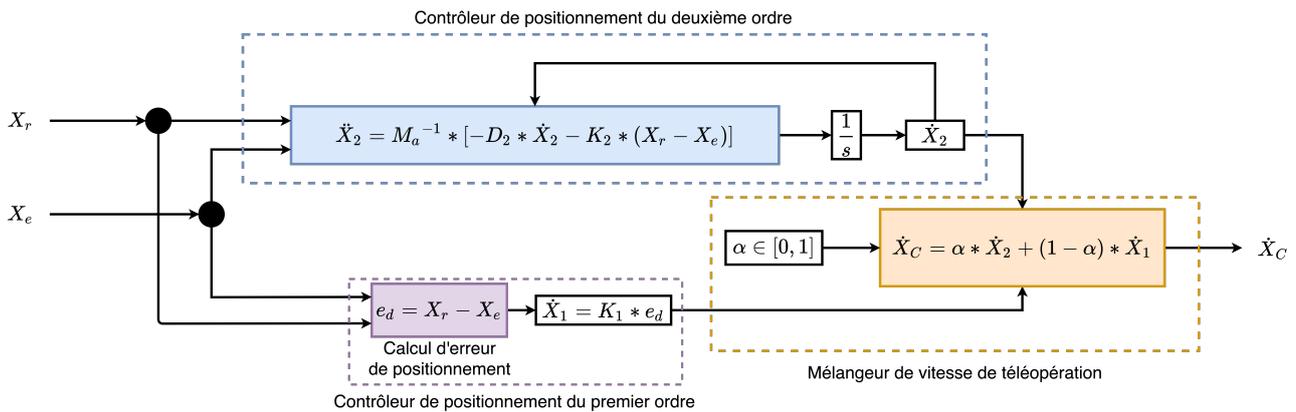


FIGURE 3.6 – Le contrôleur de la boucle de commande par téléopération

Des simulations de cette stratégie, pour une commande de position puis position et orientation, ont été réalisées, développées sous Matlab. Ladite stratégie a ensuite été validée expérimentalement sur robot, programmée sous ROS. Les résultats de ces simulations ainsi que de la validation expérimentale du contrôleur de téléopération sont présentés ci-après pour une valeur de $\alpha = 0,5$. Le choix de K_1 , K_2 et D_2 a été établi selon la même façon qu'un contrôleur PD, avec $K_1 = 0,7$, $K_2 = 0,35$ et $D_2 = 0,25$.

3.3.1.4 Simulation de la commande en téléopération

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulations de l'approche de téléopération proposée, appliquée au robot UR3.

3.3.1.4.1 Simulation d'une téléopération en position

La figure 3.7 illustre les résultats de la simulation d'une téléopération en position. Pour cette simulation, il a été demandé au robot simulé de se déplacer dans la direction de l'axe x du repère-robot dans le sens des abscisses décroissantes (graphe médian-gauche de la figure 3.7). L'objectif de la simulation est de montrer, d'une part la capacité du GIK à satisfaire des contraintes géométriques imposées sur le mouvement du robot et d'autre part le comportement stable du contrôleur lors d'un suivi de consigne.

Comme précédemment, la canne porte-sonde est composée de 3 segments orthogonaux de longueur $L_1 = 100$ mm, $L_2 = 100$ mm, $L_3 = 100$ mm et à une distance $d_1 = 100$ mm du capteur.

Le départ du mouvement se fait avec un centre d'outil de l'effecteur en position $[-222,3 \ -225 \ 183,4]$ mm. Celui-ci se déplace par pas de 1 mm dans le sens des abscisses décroissantes. Une contrainte géométrique C_1 , de type évitement de collision, a été imposée, fixant une limite basse $X = -400$ mm, que le robot ne doit pas franchir.

Le GIK fournit une référence qui respecte la borne inférieure de -400 mm, bien que la valeur désirée issue de la téléopération puisse franchir cette borne (Figure 3.7). La position limite de l'effecteur est atteinte à l'instant $t = 2,3$ s. Au même instant, la vitesse articulaire du robot se rapproche de zéro pour éviter tout soubresaut.

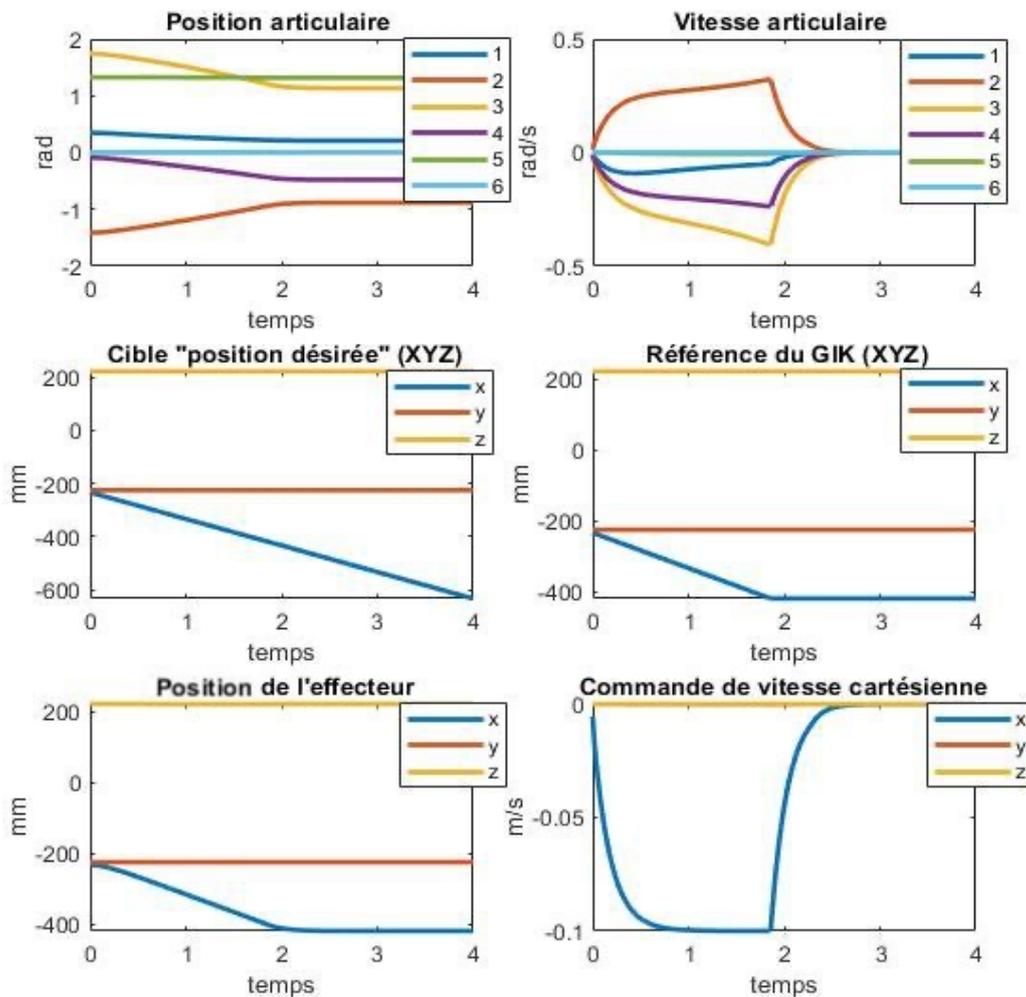


FIGURE 3.7 – Simulation de la téléopération en sens direct pour une commande de position dans l'espace cartésien

3.3.1.4.2 Simulation d'une téléopération en position et orientation

Cette simulation est une version étendue du cas précédent. Le robot démarre à la même position et orientation que précédemment, mais cette fois-ci il se déplace par pas de 1 mm le long de l'axe x du repère-robot et, simultanément, tourne autour de ce même axe avec un incrément de 0,1 degré.

On remarque que l'orientation de l'effecteur autour de l'axe x évolue bien comme prévu (Figure 3.8). On peut conclure que le modèle de commande téléopérée proposé permet d'assurer un asservissement en position et orientation du robot.

Ces simulations ont été prolongées par des expérimentations réelles avec le robot. Elles sont décrites dans les sections suivantes.

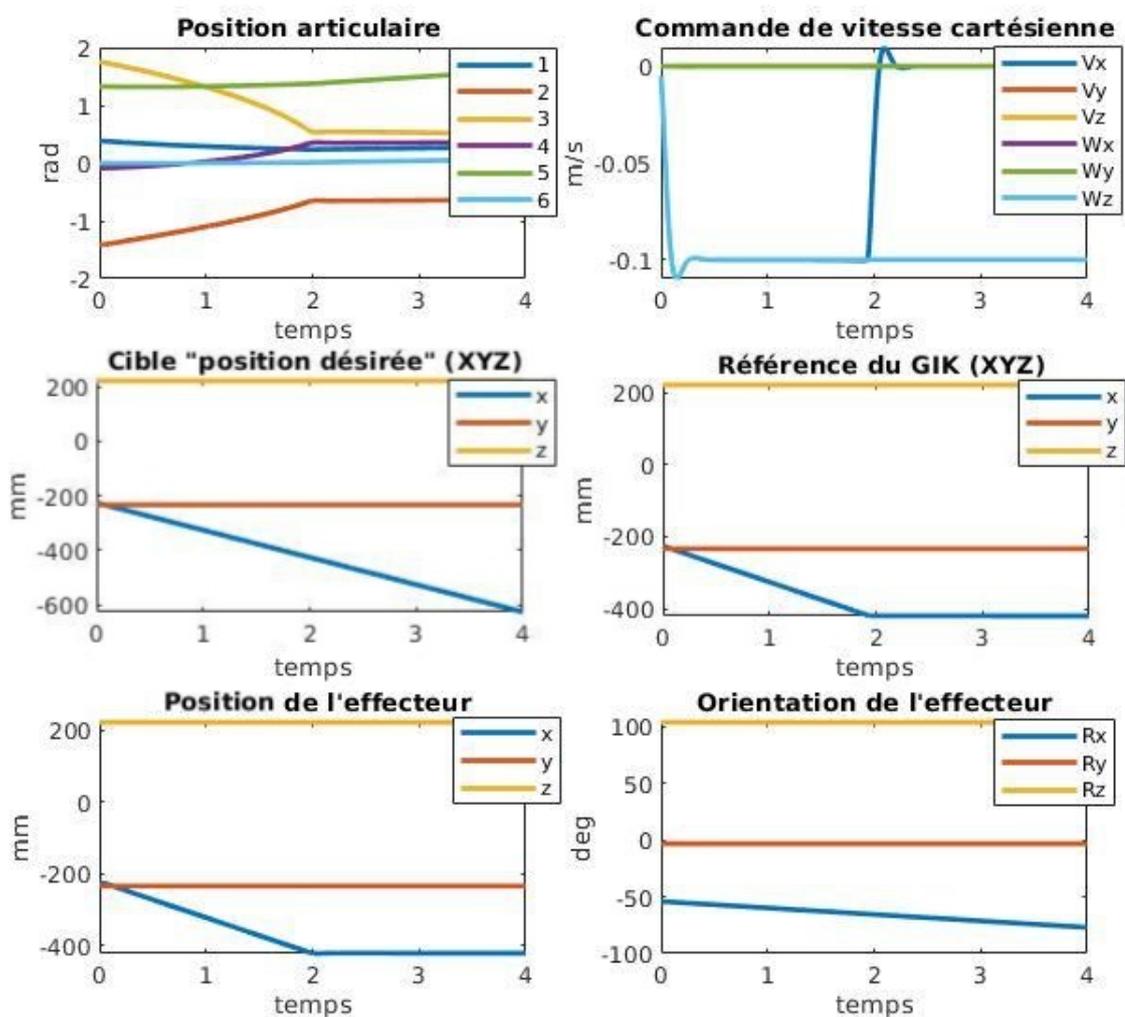


FIGURE 3.8 – Résultats de simulation d'une téléopération en sens direct, pour un contrôle en position et orientation dans l'espace cartésien

3.3.1.5 Implémentation de la commande téléopérée sur le robot UR3

Cette commande a été mise en œuvre sur le robot UR3, programmée sous ROS. Nous avons développé des nœuds dédiés pour implémenter le générateur de consigne et le contrôleur (Figure 3.3). Pour communiquer avec la baie de commande du robot, c'est un nœud ROS développé par Universal Robots qui a été utilisé.

La figure 3.9 correspond à une téléopération en position et la figure 3.10 à une téléopération en position et orientation.

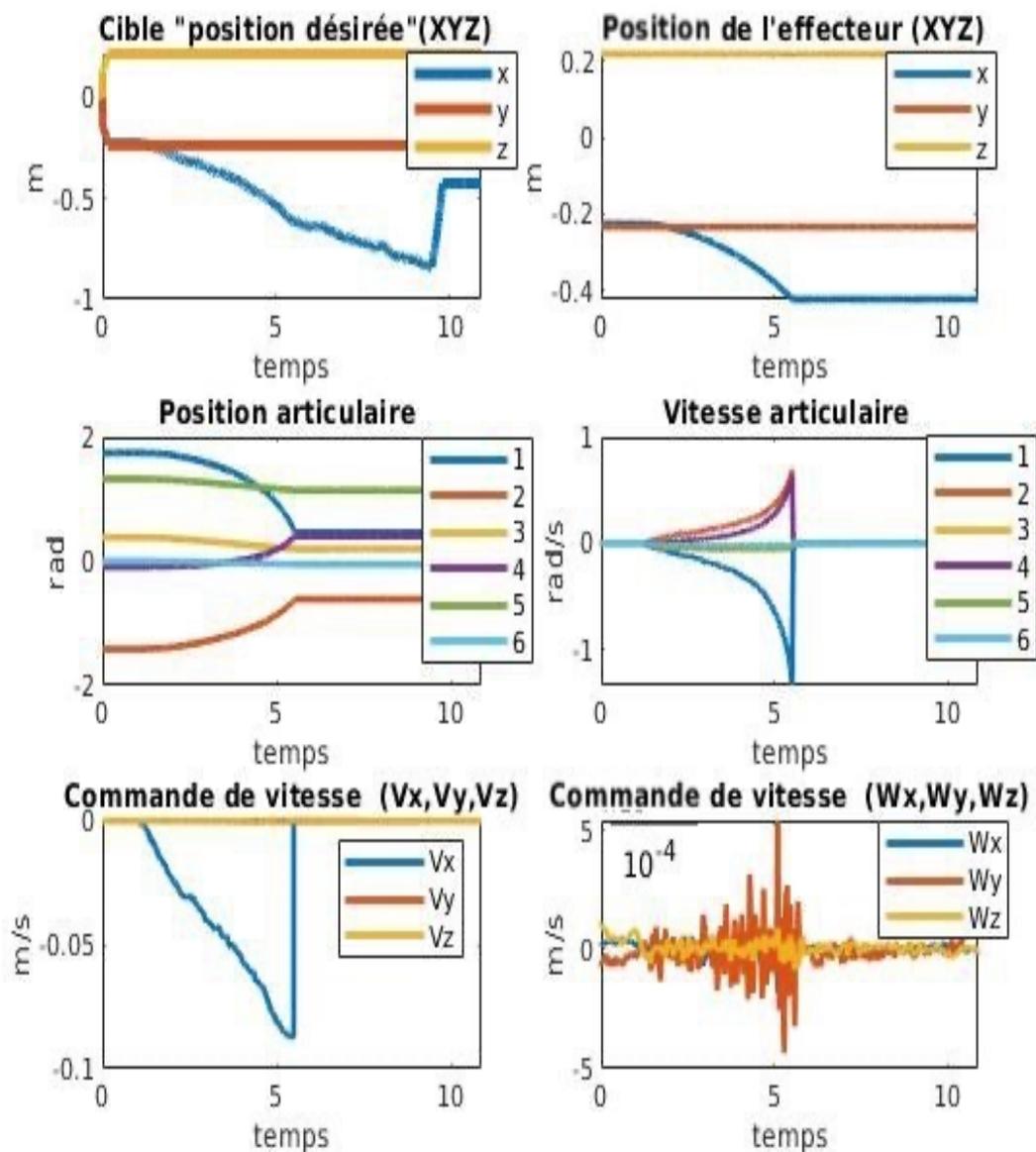


FIGURE 3.9 – Téléopération pour une commande en position du robot UR3

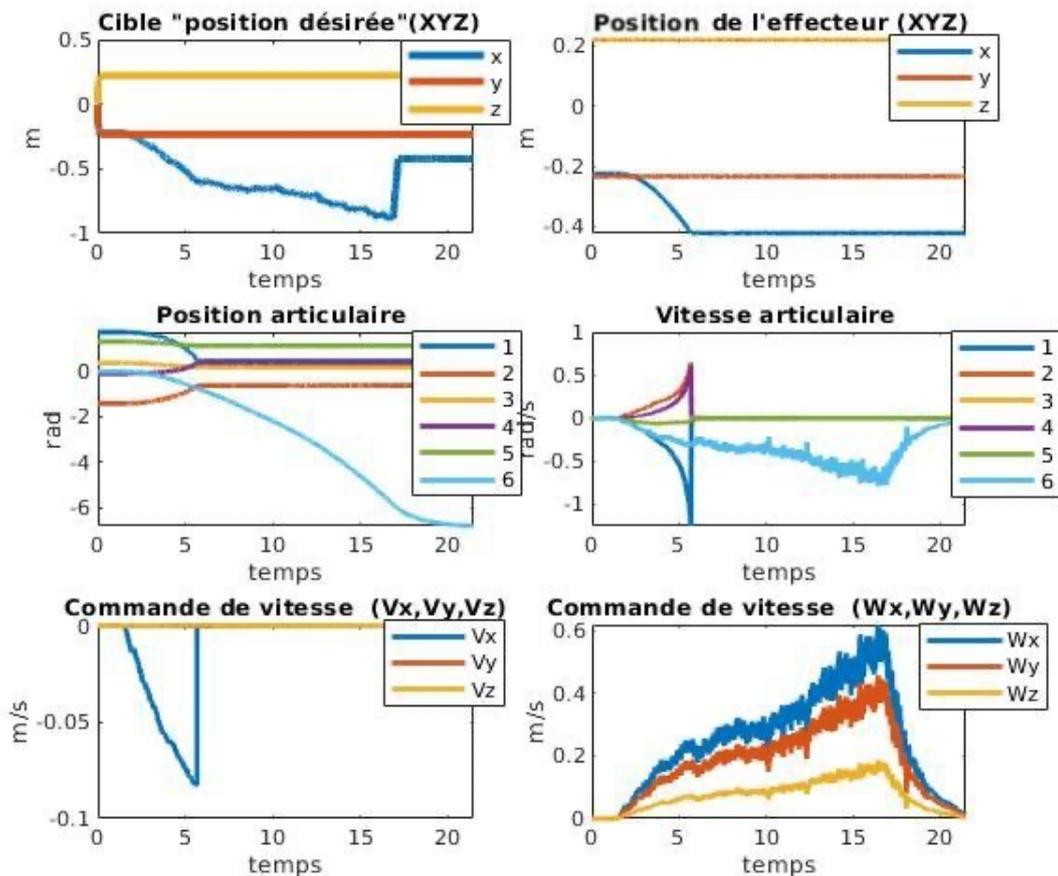


FIGURE 3.10 – Téléopération pour une commande en position et orientation du UR3

Les deux premiers graphes de chaque figure mettent en évidence l'effet de la contrainte géométrique C_1 imposée sur la position de l'effecteur de l'UR3 (une borne inférieure à -400 mm dans la direction x) : on observe qu'au bout de $5,5$ s l'effecteur du robot s'est bien arrêté à la position -400 mm alors que la position désirée, dans cette même direction, a quant à elle continué d'évoluer.

Sur les deux graphes, en position centrale de la figure, on peut remarquer :

- pour la téléopération en position, les vitesses articulaires s'annulent à $t = 5,5$ s,
- pour la téléopération en position et orientation, les mouvements articulaires persistent après $t = 5,5$ s. C'est particulièrement observable pour la variable articulaire q_6 .

Pour le second cas, le mouvement est dû au fait que les consignes d'orientations dans la direction x sont non-nulles.

Au travers ces expérimentations, il est montré que l'on peut contrôler indépendamment la position et l'orientation de l'effecteur du robot, malgré l'existence de contraintes de non collision.

Par ailleurs, les résultats obtenus lors des phases expérimentales sont semblables à

ceux qui l'ont été au préalable en simulation et présentés au paragraphe précédent. Les modèles de simulations numériques développés sous Matlab peuvent ainsi être exploités pour analyser et anticiper, dans une étape de conception préliminaire, les comportements que peut avoir le robot réel.

3.3.2 La téléopération avec retour d'effort

Au contrôleur de téléopération unilatéral, dit "en sens direct" (de l'opérateur vers le robot), présenté à la section 3.3.1, a été ajouté un retour d'effort vers l'interface haptique. Ce mode de téléopération est aussi dit en "sens inverse", il fait l'objet du présent paragraphe.

3.3.2.1 Modélisation des actions de contact humain-robot

Le capteur d'effort 6D, intégré au poignet du bras esclave, fournit les forces et les couples, mesurés à travers le porte-sonde et exprimés au lieu où ce capteur est positionné. Ces données sont traitées pour évaluer l'action de contact entre la sonde et le patient (dite action sonde-patient) et permettre de restituer au téléopérateur, situé au poste maître, un signal fidèle des efforts réellement appliqués sur ce patient.

Lors d'un examen échographique, la sonde est en contact direct avec la peau du patient. Ce contact est manifestement surfacique. La forme de cette surface dépend fortement de la forme de la sonde mais aussi de l'organe observé, du patient et des efforts qu'applique l'expert. Pour une modélisation simple de l'interaction, nous avons cependant considéré que ce contact sonde-patient est un contact ponctuel (voir figure 3.11). Nous formulons alors, bien que cela soit assez éloigné de la réalité, l'existence d'un plan tangent commun entre sonde et patient. Cette hypothèse nous permet de considérer une force d'interaction normale audit plan tangent. Ces hypothèses simplificatrices sont toutefois bien compatibles avec le fait que les actions tangentées et les moments de roulement et pivotement du contact sonde-patient sont faibles (et négligeables) devant l'action normale, du fait notamment de la présence de gel échographique entre la sonde et le corps du patient.

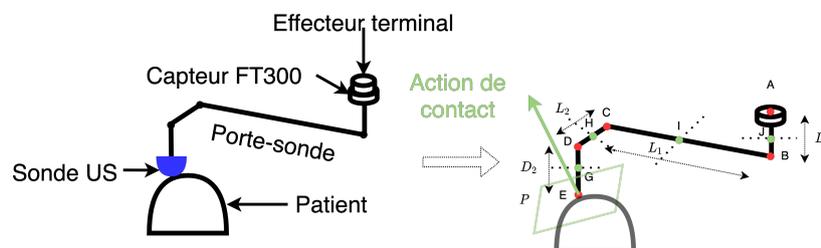


FIGURE 3.11 – Modélisation du contact sonde-patient

L'effort de contact patient vers sonde (schématisé figure 3.11), a pour composantes dans un repère $R_{10}(x_{10}, y_{10}, z_{10})$ attaché à la sonde :

$$(F_{x_{10}}, F_{y_{10}}, F_{z_{10}}).$$

Par ailleurs, le capteur d'effort mesure, en son point de fixation, les 6 composantes du torseur d'interaction, dans un repère R_6 attaché au capteur :

$$(F_{x_6}, F_{y_6}, F_{z_6}, M_{x_6}, M_{y_6}, M_{z_6}).$$

Pour estimer l'action de contact sonde-patient au point E, nous avons fait l'hypothèse d'une dynamique négligeable de la canne porte-sonde (son torseur dynamique ≈ 0) et considéré de ce fait que la somme des torseurs d'action appliqués au porte-sonde est le torseur nul :

$$\sum \{ \tau_{\rightarrow canne} \} = 0$$

La canne porte-sonde est soumise à 6 actions :

- Les poids P_1 , P_2 et P_3 des trois segments du porte-sonde et le poids P_4 de la sonde. Ces poids sont respectivement appliqués aux points : J, I, H et G de la canne porte-sonde.
- L'action de liaison avec le robot, notée action robot-canne. Le torseur d'action robot-canne est l'opposé du torseur établi à partir des 6 mesures du capteur (en application du principe des actions mutuelles; et d'où le signe moins dans les composantes du torseur correspondant, dans l'équation qui suit).
 F_6 et M_6 sont les composantes vectorielles du torseur issu des mesures du capteur. Il est important de rappeler que ces composantes sont exprimées dans le repère de l'effecteur du robot.
- L'action de contact patient-sonde. F_{10} et M_{10} sont les composantes vectorielles du torseur traduisant les actions qu'exerce le patient envers la sonde.

Ainsi, après un déplacement de tous les torseurs en E, on peut écrire :

$$\begin{Bmatrix} F_{10} \\ M_{10} \end{Bmatrix}_E + \begin{Bmatrix} P_4 \\ P_4 \wedge GE \end{Bmatrix}_E + \begin{Bmatrix} P_3 \\ P_3 \wedge HE \end{Bmatrix}_E + \begin{Bmatrix} P_2 \\ P_2 \wedge IE \end{Bmatrix}_E + \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_1 \wedge JE \end{Bmatrix}_E + \begin{Bmatrix} -F_6 \\ -(M_6 + F_6) \wedge AE \end{Bmatrix}_E = 0$$

Connaissant l'orientation de l'effecteur du robot (donc du capteur d'effort) par rapport au repère de base du robot, et celle de la sonde qui y est lié via une canne supposée rigide, on peut extraire de l'expression ci-dessus le vecteur F_{10} dans le repère R_{10} attaché à la sonde.

Soit F_{11} ($F_{x_{11}}, F_{y_{11}}, F_{z_{11}}$) cette même action sonde-patient, exprimée dans le repère du laboratoire clinique (le repère fixe de l'environnement). Connaissant l'orientation de la sonde par rapport au laboratoire par ses 3 composantes de rotation (α , β et γ autour des axes x, y, z du repère du laboratoire), on peut extraire l'expression du vecteur F_{11} dans le repère du laboratoire.

$$F_{11} = [-R_x(\alpha) * R_y(\beta) + R_z(\gamma)] * F_{10}$$

Ce vecteur de force estimé constitue le vecteur de retour d'effort qu'il s'agit de transmettre au poste maître afin de le restituer "dans la main" du téléopérateur.

3.3.2.2 Synthèse de la commande téléopérée avec retour d'effort

Dans cette section, l'action F_{11} établie dans la section 3.3.2.1 précédente, est utilisée comme consigne d'entrée pour le contrôle du dispositif haptique. Cette consigne F_{11} produit un déplacement du bras haptique qui est converti en force au niveau de la main de l'opérateur, reflétant ainsi, à cet opérateur, l'action de contact entre la sonde et le patient.

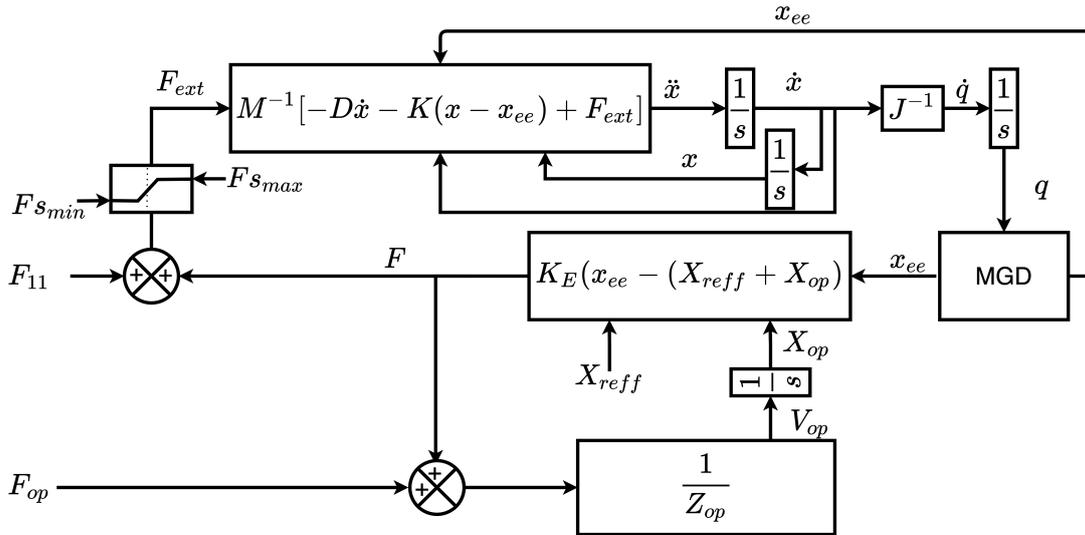


FIGURE 3.12 – Modèle de commande du bras maître pour la téléopération bilatérale

La figure ci-dessus montre la commande par retour d'effort, où :

- F_{11} et F sont des vecteurs 3×1 correspondant respectivement aux forces d'interaction sonde-patient et aux forces du contrôleur cartésien du dispositif haptique.
- Z_{op} , V_{op} et X_{op} représentent respectivement l'impédance du téléopérateur, la vitesse de la main de l'opérateur et sa position.
- X_{ref} est un point d'équilibre préalablement choisi pour placer le dispositif haptique en position de repos.
- M , D , K sont respectivement les matrices d'inertie, d'amortissement et de raideur du dispositif haptique
- J est une matrice 3×3 égale à $J = \frac{dX}{dq}$ où $X = \{X, Y, Z\}$ et $q = \{q_1, q_2, q_3\}$.
- J^{-1} est l'inverse de la matrice jacobienne géométrique réduite du dispositif haptique.

3.3.2.3 Simulation d'une téléopération avec retour d'effort

Nous simulons ici le comportement du dispositif haptique en téléopération avec retour de force. Le simulateur a été développé sous Matlab pour un contrôle en position.

— À l'instant $t = 1$ s

Le téléopérateur agit sur le bras haptique maître (graphe haut-gauche de la figure 3.13) et exerce une force F_{op} d'intensité 1 N dans la direction des abscisses positives (graphe bas-gauche), induisant une Force de control F d'intensité 1 N dans la direction des abscisses négatives ($F = -1$ N), (graphe médian gauche). Cette force provoque le déplacement de l'effecteur-maître de sa position initiale $X = +66$ mm à sa position finale $X = -84$ mm (les coordonnées Y et Z sont inchangées).

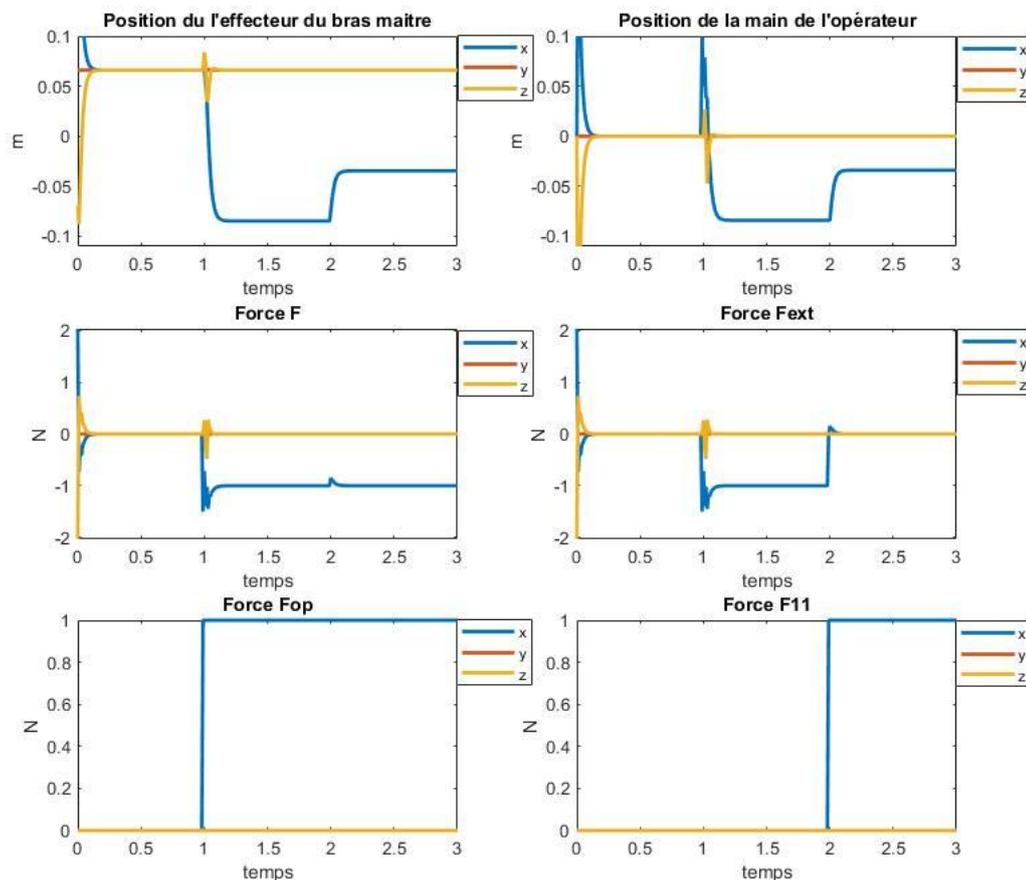


FIGURE 3.13 – Simulation du comportement du bras maître en réponse à un retour d'effort provenant du robot esclave.

En absence de toute force externe de rétroaction ($F_{11} = 0$ jusqu'à $t = 2$ s), (graphe bas-droite), la position de la main de l'opérateur demeure constante, tout comme la position de l'effecteur-maître. Dans cette situation, la force F_{ext} (somme de F et F_{11}) envoyée

au dispositif maître a pour valeur -1 N. Elle est uniquement composée de la force du contrôleur F (graphe médian-gauche).

— À l'instant $t = 2$ s

Un retour de force F_{11} d'intensité 1 N est simulé (venant du robot esclave, de direction X positif (graphe bas-droite). Ce retour de force se combine avec la force F exercée par l'opérateur. Le cumul des forces F_{11} et F , génère une force F_{ext} nulle sur le dispositif maître (graphe médian-droit).

Cette adaptation de F_{ext} de -1 N à 0 N, se manifeste par le décalage des positions de la main de l'opérateur et de l'effecteur-maître (graphes haut-gauche et haut-droit), qui sont restées figées à $X = -34$ mm après $t = 2$ s.

Dans la section suivante, nous simulons et validerons ce comportement pour une téléopération bilatérale liant un Phantom Omni et un UR3.

3.3.3 Téléopération bilatérale

Le modèle complet de l'architecture de commande téléopérée qui a été développé a été validé au travers diverses simulations et expérimentalement sur un robot UR3. La figure 3.14 illustre cette architecture pour une application de télé-échographie robotisée.

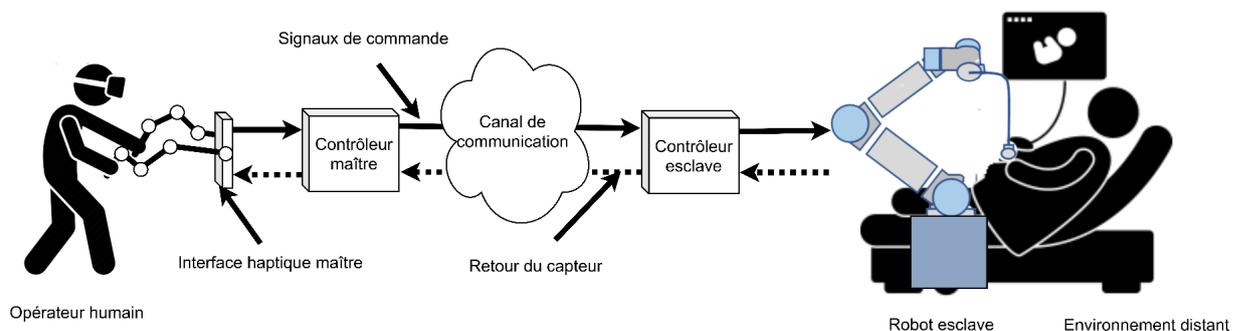


FIGURE 3.14 – Schéma fonctionnel d'une téléopération bidirectionnelle avec retour d'effort.

3.3.3.1 Simulation de la téléopération bilatérale

La téléopération bilatérale avec retour de force a été simulée pour le contrôle en position de l'effecteur. Des expérimentations réelles, menées dans des conditions semblables, sont détaillées plus loin.

Dans cette simulation, les forces et les déplacements sont considérés dans la direction de l'axe x .

- à partir de $t = 0,5$ s, le dispositif maître est soumis à une force d'intensité constante 2 N, de la part de l'opérateur,
- $t = 3$ s, un retour de force d'intensité 3 N est simulé.

Ce retour simulé compense la force de l'opérateur et entraîne le styilet du bras haptique dans la direction opposée au mouvement de l'opérateur.

Pour illustrer la contrainte C_1 d'évitement d'obstacle, une borne inférieure de déplacement a été fixée (en $x = -420$ mm). Sur les figures 3.15 et 3.16 on peut observer :

- Entre 0,5 et 3 s
 - La force F de l'opérateur, d'intensité 2 N (graphe médian-gauche de 3.15) est la seule à contribuer au mouvement du robot esclave.
 - Cela provoque le déplacement de l'interface maître de -0.1 m (graphe haut-gauche de 3.15).

Ce déplacement est interprété par le GIK (graphe médian-gauche de 3.16) et génère la consigne de déplacement du robot esclave (graphe médian-droite de 3.16), cela jusqu'à $t = 1,8$ s.

- À $t = 1,8$ s
 - Le GIK est confronté à la contrainte C_1 de non dépassement de la position -420 mm (graphe médian-gauche de 3.16). Le GIK bloque alors la consigne à cette valeur (graphe milieu-droite de 3.16).
 - Cela induit le déplacement du robot esclave, avec respect de C_1 (bas de 3.16). C_1 est prioritaire face au souhait du téléopérateur de continuer au-delà (graphe haut-gauche de 3.15).
- À partir de 3 s
 - Le capteur d'effort du robot esclave perçoit une force de 3 N (graphe bas-droite de 3.15).
 - F_{ext} passe à la valeur 1 N (graphe médian-droite de 3.15). F_{ext} est une combinaison de la force F générée par le contrôleur maître et du retour de force F_{11}
 - L'opérateur ressent alors une force antagoniste dans la main. Il réagit en bougeant l'effecteur maître de -0,1 à +0,05 m (graphe haut-gauche de 3.15).
 - Cela génère une nouvelle cible pour le robot esclave qui peut alors effectuer son mouvement, avec respect de la contrainte C_1 .

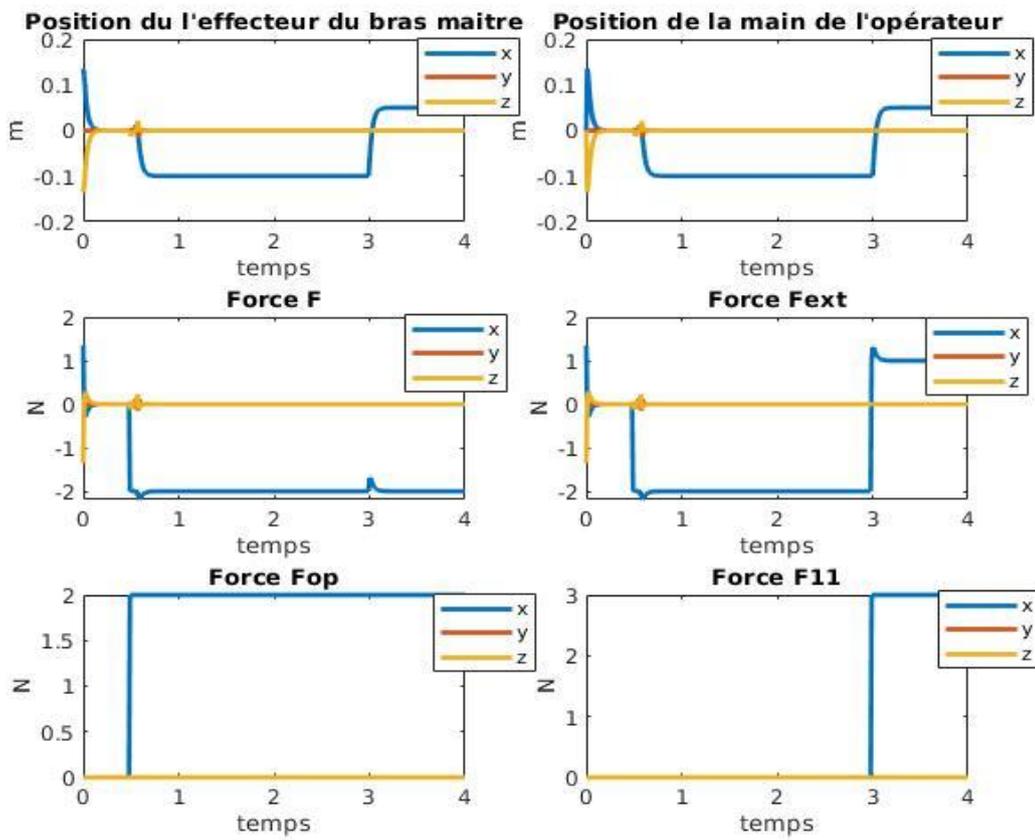


FIGURE 3.15 – Représentation des positions et forces au poste maître pour une téléopération avec retour d'effort

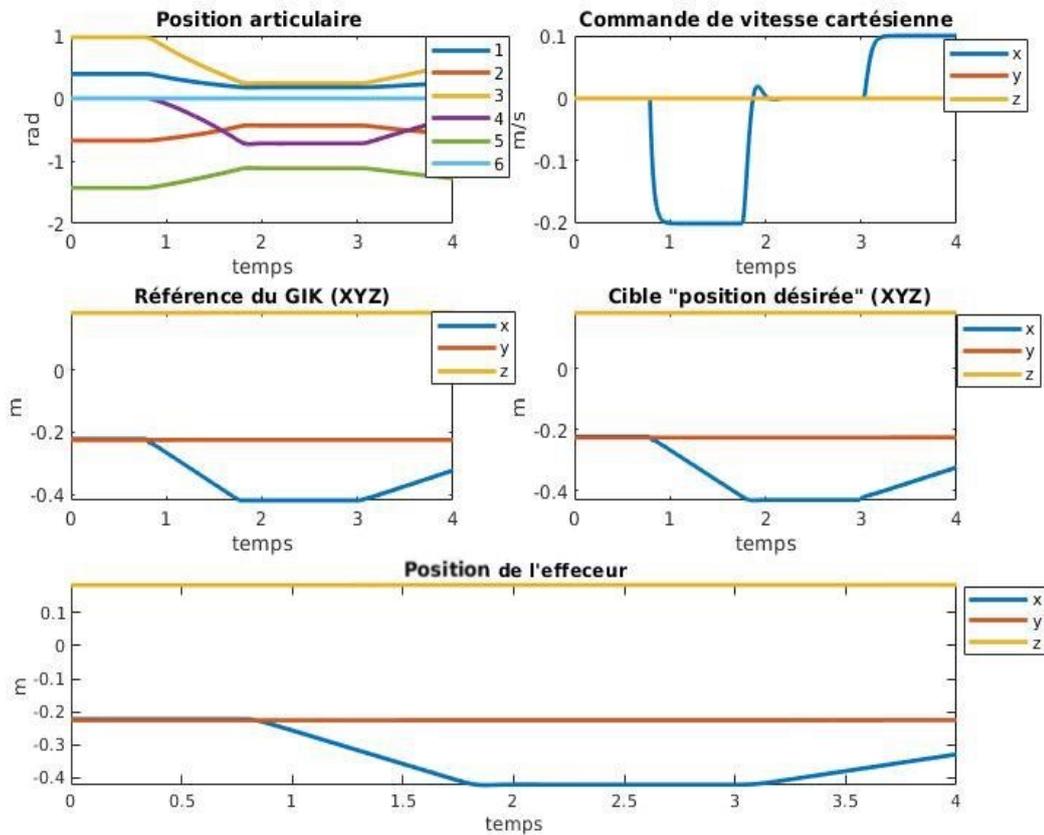


FIGURE 3.16 – Représentation des positions et forces au poste esclave pour une téléopération avec retour d'effort

Cette simulation illustre une téléopération bilatérale avec retour de force en présence de contraintes géométriques de type évitement d'obstacle.

- Il est à noter que lorsque le téléopérateur atteint une limite (du fait de la présence d'un obstacle par exemple), le robot esclave cesse son déplacement afin d'éviter la collision.
- Il est à souligner aussi que l'opérateur ne ressent que les forces traduisant le contact sonde-patient, sans perturbation liée à la gestion de la contrainte géométrique.

3.3.3.2 Implémentation de la commande bilatérale

Nous avons implémenté cette commande sur la chaîne complète composée du Phantom Omni et du robot UR3.

Le point (0, 0, -6 mm) a été choisi comme origine de référence pour l'effecteur maître. Une force d'intensité 10 N a été appliquée sur le capteur d'effort FT300 dans la direction de l'axe z négatif à l'instant $t = 2,5$ s. Cette force constitue la consigne à envoyer au bras maître pour appliquer le retour d'effort.

Les résultats obtenus au cours de cette expérimentation sont illustrés sur les figures 3.17 et 3.18.

- Jusqu'à 2,5 s
La consigne du maître est maintenue à 0 pour les coordonnées X et Y et à -6 mm pour la cote Z (position de référence maître).
- À $t = 2,5$ s
Le capteur d'effort, côté esclave, a observé la force qui lui était appliquée.

On constate alors un changement de la position du dispositif haptique selon la direction z, de -6 mm à -36 mm, en réponse à la force mesurée côté esclave. Ce changement de position de l'effecteur du bras maître, dû aux forces externes, est également observable sur la position cible du robot qui a continué à décroître jusqu'à $t = 8$ s (figure 3.17 en haut à gauche).

Le même phénomène, que celui décrit ci-dessus, se produit entre 8 s et 17 s, mais avec les forces externes désormais positives qui font que l'effecteur du dispositif maître se déplace vers le haut.

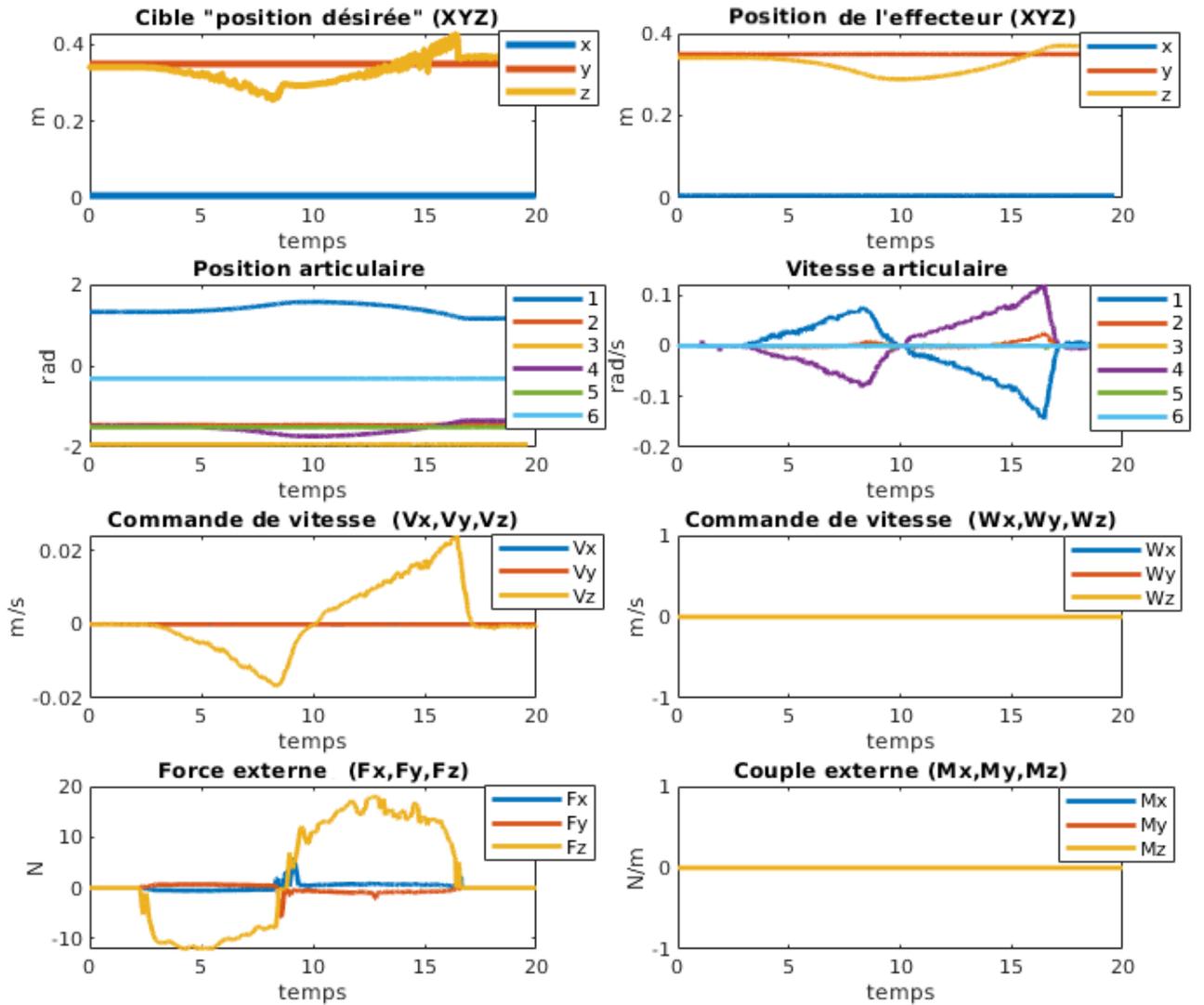


FIGURE 3.17 – Téléopération bilatérale : position du bras esclave (robot UR3)

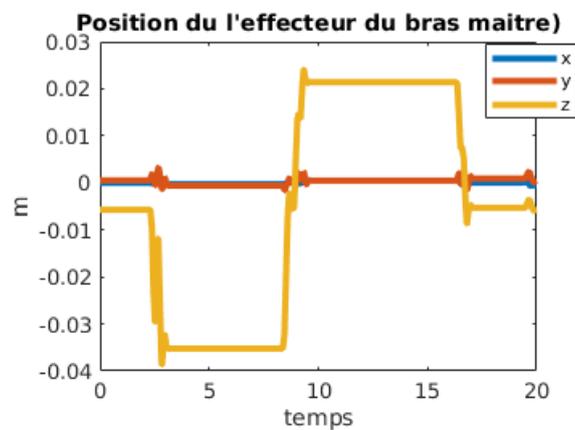


FIGURE 3.18 – Téléopération bilatérale : phénomènes au poste maître (Phantom Omni)

3.4 Synthèse et implémentation d'une commande en mode comanipulé

Dans la section ci-après, est présenté le principe de la commande que nous avons développée pour contrôler un robot dans le cadre d'une tâche de comanipulation par contact direct avec un opérateur humain, figure 3.19.

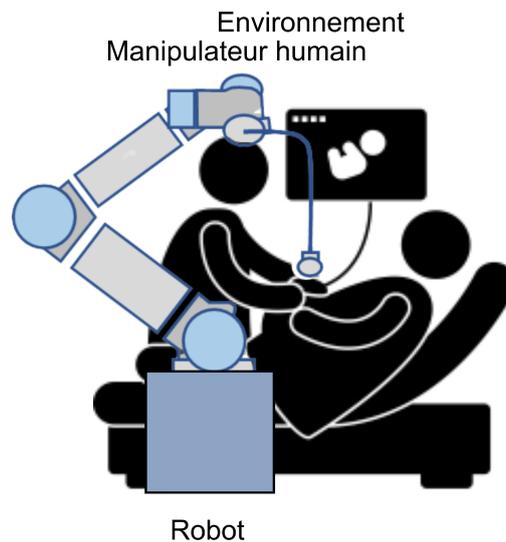


FIGURE 3.19 – Schéma fonctionnel d'un environnement de comanipulation

3.4.1 Synthèse de la loi de commande en admittance

La force qu'applique l'opérateur, directement sur le robot, constitue la source d'entrée qui va provoquer le mouvement du robot et donc le déplacement souhaité de l'effecteur. Ce déplacement de l'effecteur est exprimé dans l'espace cartésien.

Dans l'application qui nous concerne, le contrôle d'un robot porte-sonde échographique, on identifie deux contacts de type humain-robot :

- Le premier représente l'interaction médecin/robot,
- Le second représente l'interaction patient/robot.

Dans le cadre d'une commande classique, il faudrait un contrôleur spécifique pour chaque cas. Le contrôle d'admittance détaillé au chapitre 2 a permis de simplifier l'implémentation à un seul contrôleur en mesure de gérer les deux situations. La figure 3.20 et la figure 3.21 illustrent cette commande.

Sur la figure 3.21, F_{op} représente la force appliquée par l'opérateur au point de contact sonde-patient et transmise, via le bras de levier du porte-sonde, au capteur de force FT300. F_{mes} représente la mesure des éléments de réduction du torseur de force au centre du capteur.

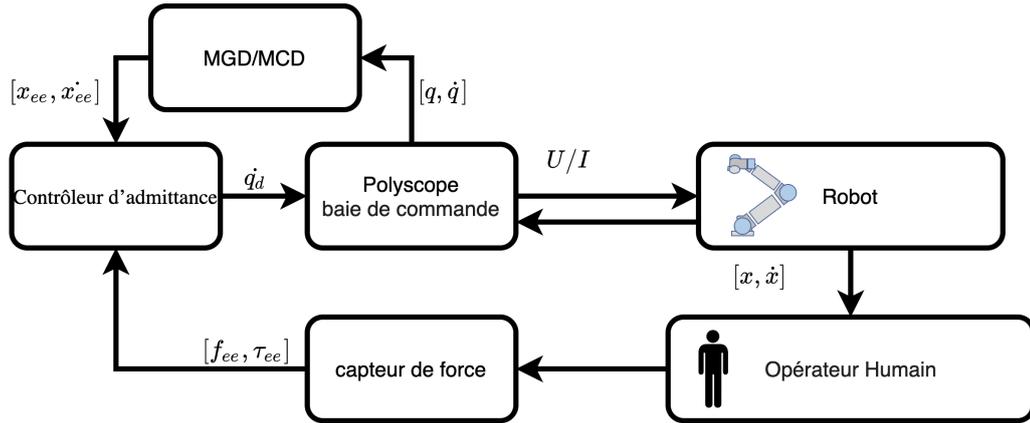


FIGURE 3.20 – Boucle de commande en admittance cartésienne pour le robot UR3

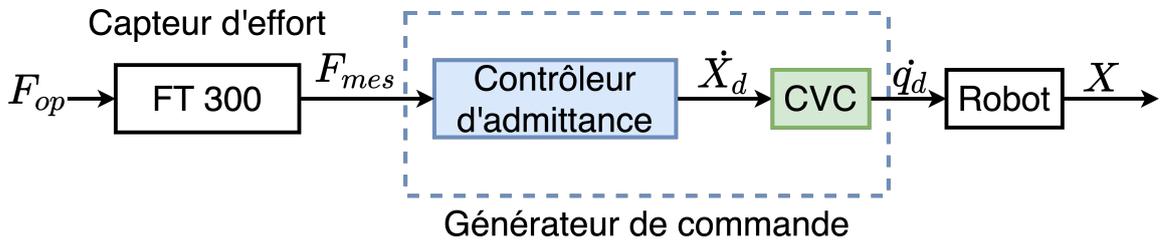


FIGURE 3.21 – Schéma de la commande en admittance appliquée au robot UR3

Le générateur de commande est la combinaison de 2 blocs en cascade : le premier est le contrôleur d'admittance, le second est un convertisseur de vitesse cartésien (noté CVC). Dans notre cas, et à la condition que le robot ne soit pas en situation singulière, le CVC n'est autre que le Modèle Cinématique Inverse.

\dot{q}_d , la sortie du CVC (voir figure 3.21), est définie comme suit à partir de la pseudo-inverse de la matrice jacobienne :

$$\dot{q}_d = J^+(q)\dot{X}_d + (I - J^+(q)J(q))\xi$$

$$\text{avec } \begin{cases} J^+ = J^T(JJ^T)^{-1} & \text{if } m < n \text{ Robot redondant} \\ J^+ = (JJ^T)^{-1}J^T & \text{if } m > n \text{ Robot sous-actionné} \\ J^+ = J_{dls} = \begin{cases} J^T(JJ^T + \mu^2 I_m)^{-1} \\ (JJ^T + \mu^2 I_m)^{-1}J^T \end{cases} & \text{if Robot à proximité d'une singularité} \end{cases}$$

où :

- J est la matrice jacobienne,
- $J^+ \in \mathbb{R}^{n \times m}$ la matrice pseudo-inverse de la jacobienne,
- $I \in \mathbb{R}^{n \times n}$ la matrice identité et
- ξ un vecteur $\in \mathbb{R}^n$, approprié pour optimiser une fonction coût ou un indice de performance.

Le vecteur ξ est défini ci-dessous comme un gradient :

$$\xi = \lambda \nabla H(q) \begin{cases} \lambda = 1 & \text{if } \max H(q) \\ \lambda = -1 & \text{if } \min H(q) \end{cases} \text{ avec } \nabla H(q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial H(q)}{\partial q_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{\partial H(q)}{\partial q_n} \end{bmatrix}$$

où le paramètre λ spécifie s'il s'agit d'une minimisation ou d'une maximisation de la fonction $H(q)$.

Nous avons défini le critère d'optimisation $H(q)$, afin d'améliorer l'indice de manipulabilité du robot tout en maximisant la distance aux singularités et en minimisant la distance aux points médians des articulations.

La fonction $H(q)$ est ainsi donnée par :

$$H(q) = H_{man} + H_{range} \Rightarrow \xi = \nabla H_{man} - \nabla H_{range} \text{ avec } \begin{cases} H_{man} = \sqrt{\det [JJ^T]} \\ H_{range} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{q_i - \bar{q}_i}{q_{M,i} - q_{m,i}} \right)^2 \end{cases}$$

où :

- H_{man} est le critère de manipulabilité,
- H_{range} est le critère d'optimisation du positionnement des articulations,
- N est le nombre d'articulations,
- q_i est la position de l'articulation d'indice i ,
- $q_{M,i}$ et $q_{m,i}$ sont respectivement les limites maximale et minimale de l'articulation i et
- \bar{q}_i la position médiane de l'articulation i : $\bar{q}_i = \frac{q_{M,i} + q_{m,i}}{2}$

La structure du contrôleur d'admittance ainsi développée est représentée par le schéma fonctionnel de la figure 3.22.

Les deux commutateurs, présents dans ce contrôleur, en assurent la flexibilité. Le comportement du robot est ainsi lié à leurs configurations.

- Le paramètre P_c est un vecteur 2×1 qui permet de définir un contrôle de position et/ou un contrôle d'orientation.
- Un critère C est défini, qui représente un élément de réglage pour filtrer les forces mesurées.

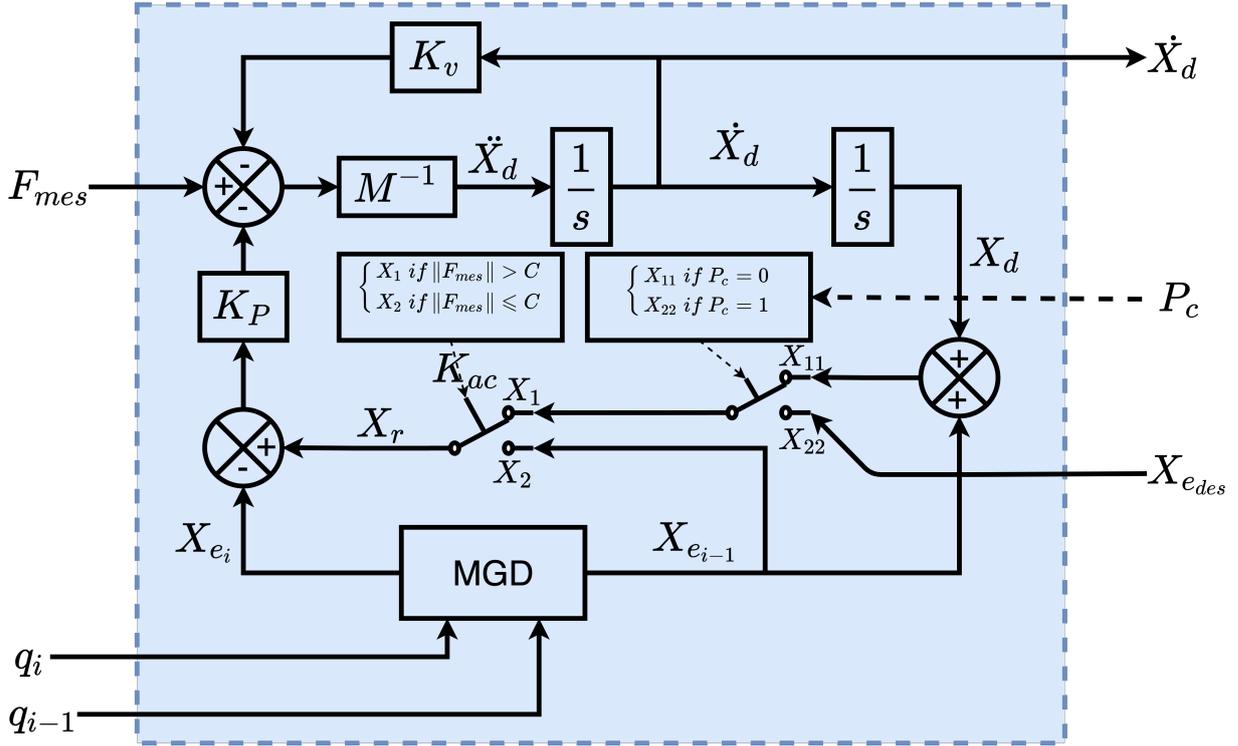


FIGURE 3.22 – Schéma fonctionnel du contrôleur d'admittance

Le contrôleur par admittance provoque le déplacement de la sonde si les forces exercées sur celle-ci par le patient dépassent les limites de force . Lorsque ces forces diminuent en dessous des seuils prédéfinis, la sonde revient à l'endroit initial de l'examen, définie par X_{edes} .

Un dépassement de force peut être observé si la surface de contact entre la sonde et le patient se modifie de façon importante, ce peut être le cas du fait des mouvements respiratoires lors d'une échographie cardiaque par exemple.

Le contrôleur d'admittance est défini comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{X}_d = M^{-1} [F_{mes} - K_v \dot{X}_d - K_p (X_r - X_{e_i})] \\ X_r = X_1 K_{ac} + X_2 (1 - K_{ac}) \\ X_2 = X_{e_{i-1}} \\ X_1 = X_{11} (1 - P_c) + X_{22} P_c \\ X_{11} = (X_d + X_{e_{i-1}}) \\ X_{22} = X_{edes} \\ K_{ac} = \begin{cases} 1 & \text{if } \|F_{mes}\| > C \\ 0 & \text{if } \|F_{mes}\| \leq C \end{cases} \end{array} \right. \rightarrow \dot{X}_d = \frac{1}{K_v} [F_{mes} - M \ddot{X}_d - K_p (X_r - X_{e_i})]$$

Ce contrôleur fournit au convertisseur de vitesse cartésien (CVC) la vitesse cartésienne nécessaire pour déplacer le robot lors d'un scénario de comanipulation. Vu que le robot n'accepte que des commandes de vitesse ou de position articulaire, le CVC a alors pour rôle de lui fournir ces données, établies à partir des vitesses cartésiennes. Le schéma fonctionnel du CVC est présenté à la figure 3.23.

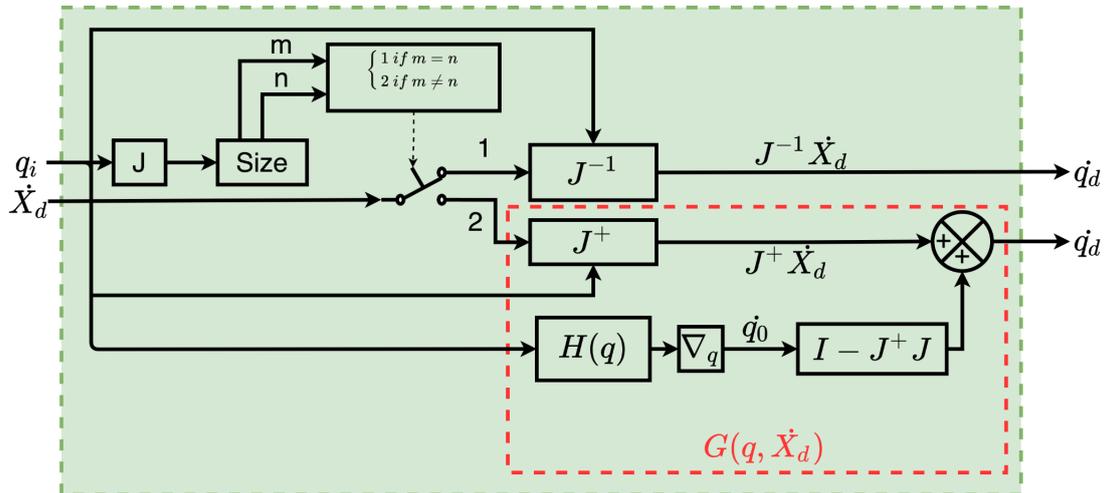


FIGURE 3.23 – Schéma fonctionnel du convertisseur de vitesse cartésien (CVC).

3.4.2 Phase expérimentale de la comanipulation en position

Dans cette section, est illustrée l'expérimentation qui a été menée, concernant la comanipulation en position réalisée à l'aide du contrôleur d'admittance général proposé (Figure 3.22).

Cet essai a été mené en sollicitant manuellement (par appui sur un porte-outil fixé sur le robot UR3) un mouvement en translation dans la direction x du repère-robot, pour un déplacement allant de -90 mm à + 9 mm. Il y a donc là interaction directe entre l'opérateur et le robot.

Le mouvement de l'effecteur du robot UR3 est visible (graphe haut-droite de la figure 3.24) en réponse à la force externe mesurée par le capteur d'effort fixé sur ce même effecteur (graphe bas-gauche).

Afin de correctement observer le contrôle de l'axe des x, au cours de cet essai, le mouvement du robot a été empêché selon les directions y et z en appliquant à ces derniers des contraintes cartésiennes de valeur constante (voir les deux graphes du haut).

Lorsque les forces externes, mesurées sur l'axe des x, dépassent 5N (graphe bas-gauche), une vitesse V_x est générée par le contrôleur d'admittance (graphe "commande de vitesse", à gauche) qui convertit la force en vitesse. C'est cette vitesse V_x qui joue le rôle de consigne. Elle a une valeur non nulle entre $t = 1$ s et $t = 15$ s. Le CVC

convertit V_x en vitesses articulaires (graphe "Vitesse articulaire" à droite) provoquant le déplacement de l'effecteur en compliance (graphe haut-gauche).

Cette expérience permet de valider le comportement compliant du robot face à une force d'interaction humaine lors d'une comanipulation en utilisant le contrôleur d'admittance généralisé.

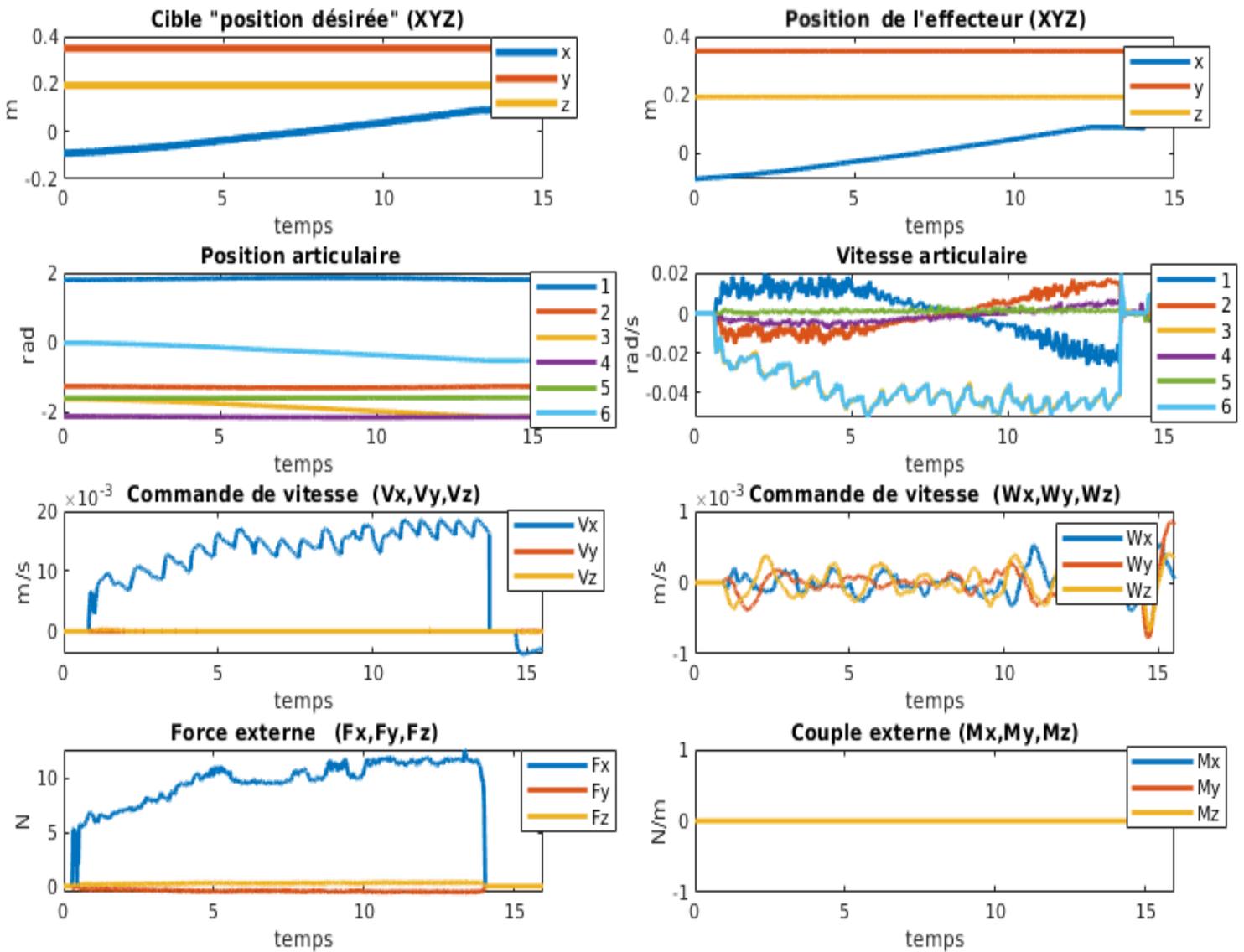


FIGURE 3.24 – Comanipulation sur l'axe X.

3.4.3 Comanipulation en position et orientation

La problématique de la comanipulation en orientation, notamment du fait que l'application médicale visée impose l'utilisation d'une canne porte-sonde de grande dimension, a soulevé deux aspects techniques importants.

- Le premier a été de s'assurer, qu'avec un bras de levier de 0,5 m, on ne risque pas de saturer le capteur d'effort concernant la mesure des moments.
- Le second est de faire que l'humain qui comanipule le robot puisse sans peine générer un couple sur l'outil.

Pour le premier point, compte tenu des spécifications "forces" qui ont été formulées, il a été facile de vérifier que le capteur FT300 utilisé ne risque pas de se mettre en saturation.

En effet, la plage de mesure de ce capteur est de 30 N.m pour les moments, ce qui fait que même avec le relativement long bras de levier que nous allons devoir utiliser, il faudrait exercer des forces de 60 N pour saturer le capteur. Soit 6 fois plus que l'intensité approximative qui a été spécifiée concernant la force exercée sur la sonde.

Pour le second point, il a vite été mis en évidence, sur le robot réel, la difficulté que rencontrerait un opérateur pour créer un couple sur la partie distale d'un outil long. S'agissant de l'application de télé-échographie comanipulée, on serait face à deux problèmes principaux si on laisse le médecin exercer des couples sur la sonde.

Le premier est que l'on rendrait l'exercice pénible à qui doit manipuler la sonde, que cela causerait éventuellement des risques de TMS, et que donc on démotiverait le personnel médical à la pratique robotique par comanipulation.

Le second problème concerne le fait que l'opérateur, dès lors qu'il peine à générer un couple sur la sonde, s'aide d'une seconde main pour faire bras de levier. Cette main, il peut alors la poser n'importe où, et malencontreusement sur le corps du robot, en amont du capteur d'effort. La mesure du torseur d'effort est alors perturbée; en guise de couple, le capteur reconnaît alors un couple et une force; le mouvement que prend le robot n'est pas celui attendu par l'opérateur qui comanipule.

Nous sommes partis du fait que si l'opérateur cherche un bras de levier, il serait plus adroit de lui en proposer un.

Un outil spécifique a alors été imaginé, puis réalisé en impression 3D. Il a été utilisé pour des validations en laboratoire, préalablement à une utilisation clinique. Cet outil est composé d'une tige en forme de T et présente une poignée à chaque extrémité (figure 3.25). Il se fixe sur l'organe terminal du robot (ici le UR3). Par un effet de bras de levier, cet outil permet à l'expert co-manipulateur d'exercer plus facilement des couples sur cet outil en utilisant ses deux mains.

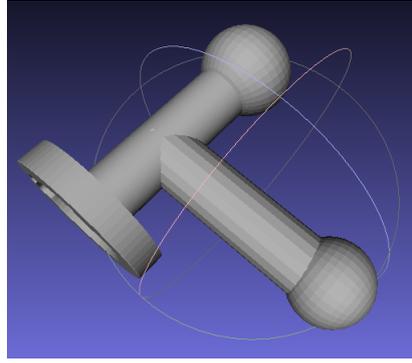


FIGURE 3.25 – Poignée à double prise pour la génération de couple en comanipulation

La précision de la mesure des six composantes du torseur d'efforts est primordiale pour une commande en comanipulation basée sur un contrôleur d'admittance. La solution suggérée, consistant à utiliser les deux mains pour appliquer un couple sur l'outil (la sonde dans la partie application) se traduit par la présence de deux torseurs d'actions (F_1, M_1) et (F_2, M_2) sur les poignées de l'outil.

La géométrie de cet outil permet d'écrire le torseur d'effort (F_6, M_6) au niveau du capteur (point A).

$$\begin{Bmatrix} F_6 \\ M_6 \end{Bmatrix}_A = \begin{Bmatrix} F_1 \\ M_1 + F_1 \wedge BA \end{Bmatrix}_A + \begin{Bmatrix} F_2 \\ (M_2 + F_2 \wedge CD) + F_2 \wedge DA \end{Bmatrix}_A + \begin{Bmatrix} P_G \\ P_G \wedge GA \end{Bmatrix}_A \quad (3.4)$$

où P_G est le poids propre de l'outil et G son centre de gravité.

La figure suivante montre la représentation schématisée de la poignée dans le plan XZ.

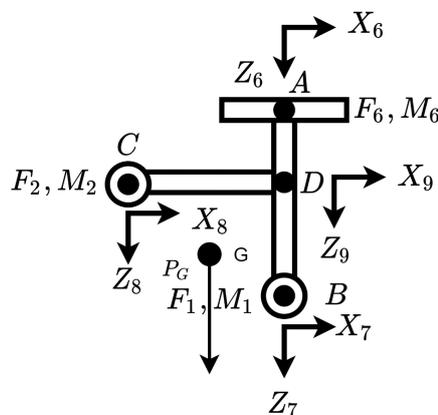


FIGURE 3.26 – Poignée à double prise dans le plan XZ

NB-3 :

i) Bien que le poids propre de l'outil soit faible sur la pièce de laboratoire qui a été imprimée, il convient de le conserver dans l'équation 3.4 pour l'utilisation de la canne porte-sonde longue.

ii) Les moments M_1 et M_2 appliqués sur les deux poignées sont a priori faibles devant les moments des forces F_1 et F_2 . Une observation et analyse du comportement de différents opérateurs sera nécessaire pour comprendre comment ils procèdent pour guider le bras comanipulé du robot.

iii) Des médecins échographistes ayant manipulé la canne porte-sonde longue ont exprimé que l'idée de la poignée est pertinente.

3.5 Enchaînement séquentiel de modes téléopérés et comanipulés

Les deux modes de commandes préalablement décrits peuvent maintenant être activés de façon alternée sur le même robot et pour la même application. Nous désignons cette pratique par le terme de télé-comanipulation séquentielle.

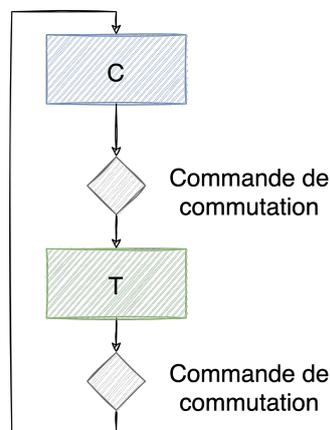


FIGURE 3.27 – Enchaînement séquentiel entre phases de comanipulation et de téléopération

Lors de phases de téléopération classiques, le robot esclave est chargé de reproduire les consignes émises par un instrument maître (joystick, outil haptique...) que manipule un opérateur distant. Lors de phases de comanipulation, le robot utilisé doit être conforme aux gestes émis par un opérateur humain localisé en proximité directe du robot et partageant le même environnement. Dans cette procédure particulière d'enchaînement séquentiel des deux modalités que nous proposons, c'est un asservissement de type "position" qu'il s'agit d'appliquer pour les phases téléopérées et de type "en effort" pour les phases comanipulées.

Le principe du mode alterné est inspiré de la stratégie de téléopération "move and wait" décrite au chapitre I et qui se déroule via le jeu d'une machine à états. Ainsi, ladite stratégie permet d'organiser l'exécution d'une tâche en une séquence de sous-tâches réparties, ici, entre téléopération et comanipulation.

L'évolution de ces sous-tâches est établie par un gestionnaire de priorités. La priorité est de forme binaire pour chaque phase, évitant de ce fait l'activation simultanée de deux phases distinctes. Le diagramme d'état, de par sa dynamique d'évolution, est l'outil approprié pour gérer cette répartition des 2 modes de commande. Téléopération et comanipulation sont ainsi présentes au sein d'une même loi de commande, mais activées séparément.

La démarche retenue, pour la synthèse d'une loi de commande hybride téléopération et comanipulation, s'appuie sur quatre principes que nous développons plus loin :

- l'unicité de la source de commande (pour chaque état du robot) ;
- le découplage temporel et spatial des états du robot ;
- la présence d'une commande d'activation (pour passer d'un mode à un autre) ;
- une activation du passage uniquement apportée par le poste téléopérateur.

L'unicité de la source de commande (pour chaque état du robot)

Un diagramme d'état se caractérise par la présence de différents modes de fonctionnement (ici 2) qui décrivent l'état du processus à un instant donné en réagissant à une commande d'activation permettant de passer de l'état $i-1$ à un état i à l'instant t .

Cette propriété synchronise la chaîne de commande dans le temps, par un agencement successif d'ordres d'activation. Pour notre application, le passage de l'état téléopéré à l'état comanipulé, suppose un contrôle séparé de chaque architecture concernée. Cette hypothèse, basée sur le découplage temporel de la tâche par la stratégie "move and wait", conduit à un contrôleur de type contrôle position/vitesse en téléopération et à un contrôle de type effort (ici par admittance) pour la comanipulation. Ces deux contrôleurs sont isolés et chacun fonctionne dans une boucle indépendante avec des consignes d'entrée différentes et des sorties de type commandes en vitesse dans l'espace opérationnel.

Le découplage temporel et spatial des états du robot

L'unicité de la source de commande permet de dissocier les états du robot selon le mode dans lequel il opère. Ainsi, comme résultat direct de cette séparation temporelle, une séparation spatiale entre téléopération et comanipulation est induite.

Chaque mode possède son propre espace de travail même si ces derniers partagent des sous-espaces communs, puisqu'à chaque changement de phase le robot subit une réinitialisation qui redéfinit son espace de travail pour le mode choisi.

Nous avons choisi d'introduire ces zones de réinitialisation pour garantir la sécurité et la stabilité de l'architecture de couplage séquentiel. Ces zones ont un double rôle. Le premier est d'interrompre l'exécution des commandes fournies au robot lors de changement de mode. Le second est d'assurer une transition permettant au robot ou au téléopérateur maître d'être en position d'attente avant le passage d'un mode à l'autre. Par exemple :

- laisser un temps pour mettre le bras haptique dans sa configuration de départ pour sécuriser le dispositif maître avant le passage en comanipulation.

Cette approche est une extension plus sûre de l'alternance instantanée proposée par la figure 3.27. Les zones de passage sont représentées par les carrés jaunes entre les phases C en vert et T en bleu (voir figure 3.28).

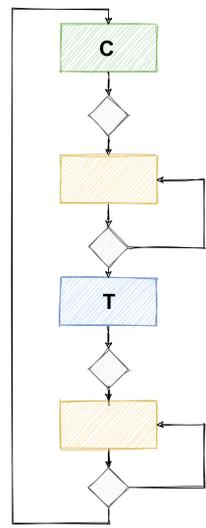


FIGURE 3.28 – Enchaînement séquentiel entre phases de comanipulation et de téléopération avec des zones de passages

L'introduction de ces états supplémentaires dans les changements de phase répond à la fois aux problèmes de couplage spatial et temporel entre les deux modes ainsi qu'à la question de savoir comment gérer la transition d'un mode à l'autre.

Étant donné que le contrôleur approprié est activé à un moment précis pour un état défini, il n'y a aucun risque d'instabilité ou de collision des commandes. L'utilisation du contrôleur séquentiel permet de jongler d'un mode à l'autre de manière simple. Elle permet également une mise en œuvre rapide car les contraintes cinématiques ou géométriques liées à la phase de transition sont gérées implicitement dans les contrôleurs séparés des blocs de commandes. Ce qui traite l'enjeu du caractère hétérogène des lois de commande gérant la téléopération et la comanipulation.

Pour illustrer notre approche, deux expériences ont été menées pour introduire le changement de phase de la comanipulation à la téléopération et réciproquement. Les résultats sont présentés dans la section qui suit.

3.5.1 Le mode C->T : Comanipulation vers Téléopération

L'expérience débute avec le robot en mode comanipulation, alors qu'un opérateur humain applique des forces sur l'effecteur en imposant au robot à se déplacer dans la même direction que celle de la force qui lui est appliquée. L'humain continue à appliquer les forces sur le robot jusqu'à ce qu'il atteigne la position désirée ; puis le robot reçoit une commande de commutation pour passer en mode téléopération alors que l'opérateur distant tente de ramener le robot à sa position initiale.

Cette expérience a été choisie pour illustrer la séquence d'actions qui doivent être effectuées lors d'un examen de télé-échographie assisté par robot.

- En premier lieu, le médecin positionne la sonde à ultrasons à une position approximative de la région à examiner en mode comanipulé.
- Le médecin distant envoie une commande de commutation pour le passage en mode téléopéré.

Cette expérience a été menée sur un seul axe, celui des X, elle peut toutefois être répétée à l'identique selon les 6 degrés de mobilité opérationnels.

Les résultats de cette expérience sont illustrés par la figure 3.29.

La figure 3.29 nous permet d'identifier les différents états que le robot a subis lors du passage de la comanipulation à la téléopération par la stratégie séquentielle développée. Le robot démarre dans un état initial connu et maintient sa position actuelle jusqu'à ce que le capteur de force commence à observer des forces significatives sur l'axe X, à $t=5s$. Le robot se trouve alors dans un mode de comanipulation, observable sur la courbe de vitesse cartésienne qui établit une corrélation entre les forces externes et la vitesse par le biais de la commande d'admittance.

Les fluctuations de la commande de vitesse V_x sont le résultat direct de la variation des forces mesurées sur F_x .

La zone entre $t = 20s$ et $t = 42s$ correspond à une transition pendant laquelle le robot est à l'arrêt et attend une commande de commutation pour passer de la comanipulation à la téléopération.

On peut constater, sur cette figure, que le robot a conservé sa dernière position acquise lors de la comanipulation, cela jusqu'à ce qu'une nouvelle commande de trajectoire soit reçue.

Comme aucune force externe n'est appliquée au robot après $t = 20s$, la commande après $t = 42s$ provient donc uniquement du contrôleur de téléopération.

À partir de cette expérience, nous pouvons affirmer que le mouvement du robot est stable, comme en témoigne la trajectoire de l'effecteur du robot. La robustesse de la stratégie séquentielle vis-à-vis des états transitoires pendant le changement de phase est obtenue par l'ajout d'états intermédiaires entre la comanipulation et la téléopération.

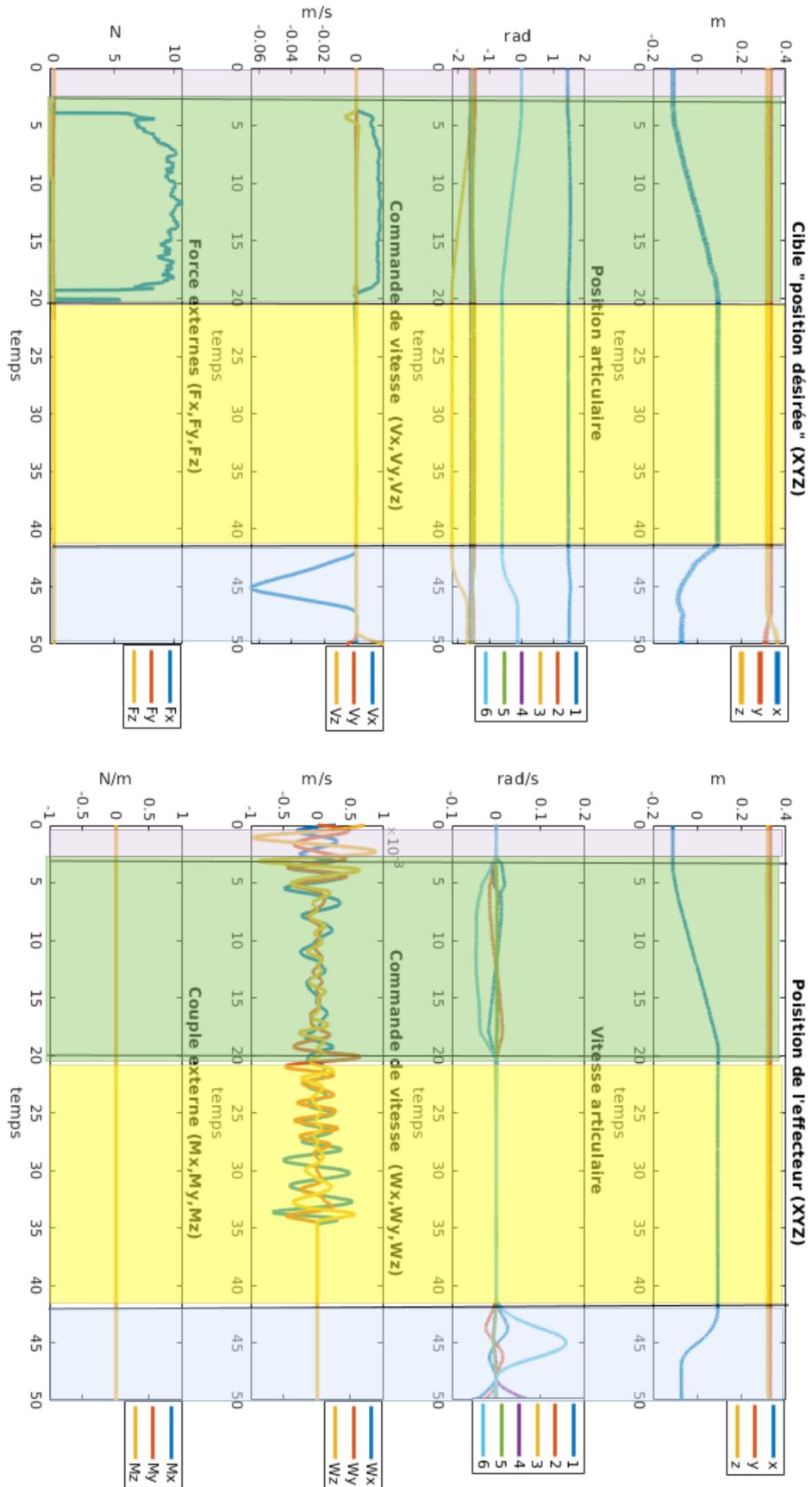


FIGURE 3.29 – Le mode C->T : Comanipulation vers Téléopération

3.5.2 Le mode T->C : Téléopération vers Comanipulation

Lors de l'expérience précédente, nous avons montré le passage de la comanipulation à la téléopération en utilisant l'approche séquentielle proposée sur une direction particulière (l'axe des X du repère-robot). Nous présentons ci-après (Figure 3.30) le passage de la téléopération à la comanipulation grâce à l'approche développée sur plusieurs axes X, Y et Z.

Dans cette expérience, l'état initial a duré 2,5 s.

À $t=2,5s$, la vitesse cartésienne de V_x , V_y et V_z augmente, tandis que la force et le moment externes sont nuls. Cela indique une commande de téléopération. Le robot reçoit un ordre sur les axes X, Y et Z, observé par le changement de la position de l'effecteur entre 2,5 s et 15 s.

On peut observer un changement de la position et de la vitesse des articulations pour cette période indiquant le déplacement du robot. Après 15s, ce changement de position et de vitesse articulaire devient nul, signalant ainsi un état stationnaire pour le robot, qui attend une commande externe.

Cet état correspond à la zone de transition où le robot est en position d'arrêt, attendant un ordre pour basculer en mode de comanipulation. À $t = 30s$, le robot passe en état de comanipulation, comme en témoigne la nouvelle commande de vitesse générée en réponse aux forces externes sur F_x .

Le robot reste dans cet état jusqu'à la fin de l'expérience. On peut alors observer une augmentation soudaine de la valeur du moment M_y , provoquant ainsi une commande de vitesse sur W_y pour compenser les perturbations sur l'orientation du robot.

Ce comportement est logique car le robot est téléopéré et comanipulé en position avec une orientation fixe : celle de l'état initial du robot.

On peut de plus observer une augmentation de la valeur de F_Z vers la fin de l'expérience, produisant un mouvement par comanipulation de l'effecteur sur l'axe Z.

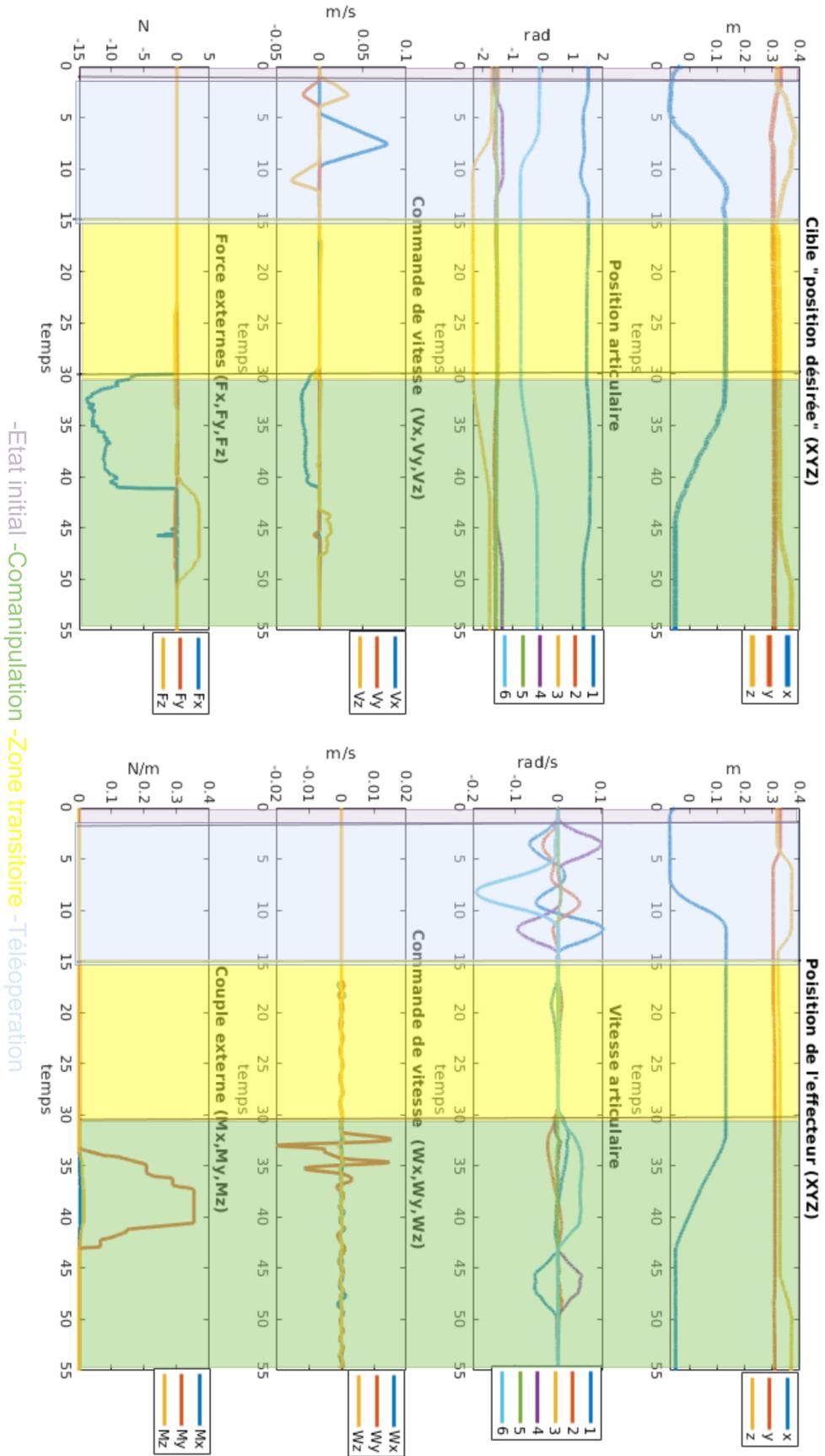


FIGURE 3.30 – Le mode T->C : Téléopération vers Comanipulation

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par détailler un mode de commande robotique par téléopération puis un second par comanipulation. Pour ces deux modes, les architectures fonctionnelles de commande ont été détaillées : le premier est une commande en vitesse du robot sous contraintes géométriques, le second une commande par admittance. Des simulations ont été réalisées et des expérimentations ont été effectuées en laboratoire sur la base des stratégies proposées.

L'application médicale qui nous a guidé est le positionnement d'une sonde échographique, pour laquelle les deux phases d'assistance robotique par téléopération et comanipulation sont nécessaires.

Nous avons ensuite intégré les deux modes de commande en question dans un unique contrôleur, adressant alternativement, sur un même robot, des phases comanipulées et d'autres téléopérées, montrant ainsi une combinaison inédite de deux approches structurellement différentes.

4

Commandes robotiques par “Comanipulation et Téléopération Combinées”

Le chapitre précédent s’est clôturé sur la proposition d’une méthode de commande présentant alternativement, sur un même robot et pour une même application, des phases téléopérées et des phases comanipulées.

La méthode ici proposée est de combiner les deux modalités concernées en transmettant simultanément au robot (et non plus alternativement), des consignes provenant de téléopération (T) et des consignes provenant de comanipulation (C).

Cela peut être une combinaison avec découplage spatial des deux modalités, comme par exemple le fait de comanipuler dans une direction et téléopérer dans le plan qui lui est perpendiculaire.

Cela peut être une combinaison structurelle où chaque direction de l’espace reçoit, en même temps, une commande de type (C+T).

Cela peut prendre la forme de bien d’autres combinaisons, hybrides des deux précédentes approches.

Quelques-unes de ces combinaisons sont modélisées dans ce chapitre. Des résultats issus de simulations et d’expérimentations menées sur un robot UR3 sont commentés.

Sommaire

4.1	Introduction	119
4.2	Le couplage entre téléopération et comanipulation	120
4.2.1	Modélisation de la combinaison téléopération et comanipulation	120
4.2.2	Différentes approches de la loi de commande TC^2	122
4.2.2.1	Combinaison spatiale de téléopération et comanipulation	122
4.2.2.2	Combinaison par mixage de téléopération et comanipulation	123
4.2.2.3	Combinaison par mixage variant avec le temps	123
4.2.3	Formulation générique de la combinaison TC^2	123
4.2.4	Détermination de la matrice de sélectivité	124
4.3	Simulations et expérimentations	125
4.3.1	Premier exemple : combinaison spatiale.	125
4.3.2	Deuxième exemple : combinaison par mixage isotrope, ($\alpha_1 = 1/2$)	129
4.3.3	Troisième exemple : commande avec mixage différent selon les directions de l'espace	132
4.3.4	Quatrième exemple : commande avec mixage fonction du temps	135
4.4	Conclusion	138

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté un mode de commande robotique alternant téléopération et comanipulation au sein d'une même application, ceci par commutation des deux modes de commande de base (dits T et C). Selon l'ordre de l'alternance considéré, nous avons appelé ce nouveau mode "T vers C" ou "C vers T". Le présent chapitre expose d'autres types de couplages, entre ces deux modes de commande sources, que l'on peut considérer, dans une approche imagée, comme deux ingrédients de base qu'il s'agit de combiner. Un schéma fonctionnel simplifié de cette architecture est présenté à la figure 4.1. Cette nouvelle forme de commande, plus globale que la précédente, nous l'avons intitulée "Téléopération et Comanipulation Combinées", à laquelle a été associé le sigle " TC^2 ".

Trois approches différentes sont pour cela envisagées.

- *i*) La première est une combinaison spatiale de téléopération et comanipulation. Elle consiste à téléopérer le robot dans un sous-espace de son espace opérationnel et le comanipuler dans le sous-espace qui lui est complémentaire. Par exemple, comanipuler en Z et téléopérer sur les 5 autres dimensions de l'espace opérationnel.
- *ii*) La deuxième approche est intitulée combinaison en mixage. La commande que reçoit la carte d'axes du robot est une somme pondérée de deux commandes : l'une provenant d'un téléopérateur, l'autre d'un comanipulateur. Chaque opérateur impliqué contribue ainsi, à sa façon, au positionnement du robot. Naturellement, les deux opérateurs sont en interaction permanente avec le robot : par voie directe pour la comanipulation et par retour d'effort pour la téléopération.

Cette deuxième approche peut faire l'objet d'une variante, avec deux téléopérateurs par exemple (voire plus) impliqués dans la chaîne globale.

- *iii*) La troisième approche est une hybride des deux premières. Le nombre de situations envisageables est alors multiple. Par exemple : mixer téléopération et comanipulation avec des poids identiques de valeur 0,5 suivant l'axe X, de valeurs respectives 0,1 et 0,9 suivant l'axe Y et de valeurs 0,8 et 0,2 suivant l'axe Z.

Enfin, cette troisième voie présente aussi une variante : lorsque les paramètres de pondération sont des fonctions du temps.

NB-1 : dans ce cas, la combinaison en alternance décrite au chapitre 3 devient un cas particulier (et simplifié) de cette dernière formule : les matrices de pondérations évoluent dans le temps mais sont indépendantes de la variable espace.

Dans la première approche (i), la combinaison est binaire : soit on téléopère, soit on comanipule! (mais pas de façon identique selon les directions de l'espace). Donc l'approche diffère de la commutation alternée proposée au chapitre 3. Concernant cette approche, on peut évoquer le principe de la commande hybride force/position, dont le

concept est proche de celui que nous proposons ici. Toutefois, en commande hybride force/position, ce n'est pas comme ici d'une commande combinant téléopération et comanipulation dont il s'agit.

Les deux approches ii) et iii) perdent cette caractéristique binaire : le robot peut simultanément avoir accès aux états de téléopération et de comanipulation.

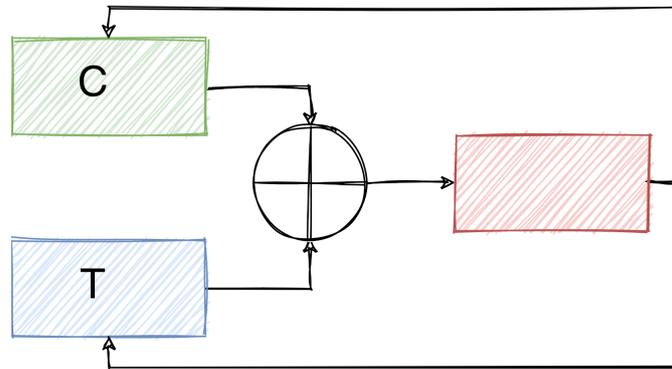


FIGURE 4.1 – Principe de la commande en téléopération et comanipulation combinée.

4.2 Le couplage entre téléopération et comanipulation

Cette section présente le principe de la stratégie proposée, inspiré du modèle de la commande hybride force/position. Des simulations ont été réalisées, puis des expérimentations ont été menées, en réel sur le robot UR3, dont les résultats ont permis de valider le concept global de commande combinée TC^2 .

4.2.1 Modélisation de la combinaison téléopération et comanipulation

La stratégie proposée intègre des schémas fonctionnels de commande en téléopération et comanipulation identiques à ceux qui ont été développés au chapitre 3. L'évolution du modèle de commande, par rapport à la stratégie séquentielle précédente, réside dans la manière dont les deux types de sorties (en l'occurrence C et T) sont fusionnées et dans quelles proportions elles le sont.

Dans une commande hybride force/position classique (section 2.4.2.5), les deux consignes de position et force sont de natures complémentaires. Ces deux consignes sont couplées à travers une matrice de poids S pour la commande en position et son

complément (I-S) pour la commande en force. Nous nous sommes inspirés de cette relation et avons établi une loi de contrôle semblable pour lier téléopération et comanipulation.

La combinaison des deux contrôleurs, présentés au chapitre 3, est en mesure de gérer à la fois les contraintes de force et de position liées à la comanipulation et à la téléopération, car chaque contrôleur traite séparément ses contraintes connexes avant de produire des commandes de vitesses cartésiennes.

L'importance du repère de travail

Ce repère (noté R_w) est celui dans lequel les deux modalités C et T sont combinées. Il est défini par l'application et diffère du classique repère robot (ou repère constructeur). Sa connaissance est nécessaire et fondamentale pour établir l'expression de la loi de commande.

NB-2 : *Pour comprendre cette nécessité, on peut penser à l'application où l'on souhaiterait téléopérer l'effecteur dans une direction quelconque de l'environnement et figer les autres déplacements. Il suffit alors de placer l'espace de travail R_w de façon cohérente avec la tâche (par exemple, désigner l'axe Z_w comme étant la direction de cette téléopération désirée).*

Afin de satisfaire cette condition, c'est dans le repère de travail R_w que doit être exprimée la commande, ainsi, pour les expressions qui vont suivre, lorsque l'on parle de vitesse cartésienne, c'est d'une vitesse dans l'espace R_w qu'il s'agit.

— L'asservissement en téléopération est défini comme suit :

$$\dot{X}_T = \sigma \left(\int M_a^{-1} (-D_2 \dot{X} - K_2 (X_r - X_e)) \right) + (1 - \sigma) (K_1 (X_r - X_e))$$

Où :

- \dot{X}_T est la commande de vitesse cartésienne, dans R_w , pour le mode téléopération,
- \dot{X} la vitesse cartésienne, dans R_w , de l'effecteur à l'instant $t = t - \delta_t$, avec δ_t le temps d'échantillonnage du contrôleur par téléopération,
- K_1 et K_2 sont respectivement les gains des deux contrôleurs de position internes intégrés dans le contrôleur global de téléopération (section 3.3.1.3),
- et D_2 le gain de vitesse pour le contrôleur d'ordre 2.
- M_a est une matrice de réduction de vitesse et σ un paramètre qui gère le taux de participation de chaque contrôleur de position dans la génération de la consigne de vitesse en téléopération.

— Par ailleurs, la commande de comanipulation s'écrit comme suit :

$$\dot{X}_C = \frac{1}{K_v} [F_{mes} - M\ddot{X}_d - K_p(X_r - X_{e_i})]$$

Où :

- \dot{X}_C est la commande de vitesse cartésienne, dans R_w , pour le mode de comanipulation,
- F_{mes} , M , K_p et K_v représentent respectivement les forces mesurées par le capteur d'effort, la matrice de masse apparente, la matrice de raideur cartésienne et la matrice d'amortissement cartésien.

Le couplage dynamique inspiré de la commande hybride force/position, permet une formulation de la commande TC^2 en combinant les deux lois de commandes précédentes comme suit (en faisant en sorte qu'il y ait "complémentarité à 1" entre téléopération et comanipulation) :

$$\dot{X} = S * \dot{X}_T + (I - S) * \dot{X}_C \quad (4.1)$$

Où S est une matrice de sélectivité diagonale, composée d'éléments α_1 à α_6 variant entre 0 à 1. Ces éléments caractérisent les combinaisons retenues selon les directions d'un repère de travail R_w choisi, de l'espace opérationnel à contrôler.

$$S = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_6 \end{bmatrix}$$

4.2.2 Différentes approches de la loi de commande TC^2

4.2.2.1 Combinaison spatiale de téléopération et comanipulation

— Exemple 1-1 : $\alpha_3 = 0$ et les 5 autres $\alpha_i = 1$

Dans cette situation, tous les éléments α_i de la matrice S , prennent des valeurs binaires 0 ou 1, alors le couplage correspond à ce que nous avons appelé plus haut une combinaison spatiale.

Dans cet exemple, le robot est en mode comanipulé sur la direction Z de R_w , téléopéré suivant les directions X et Y ainsi que suivant les 3 directions de rotation.

— Exemple 1-2 : $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ et les 4 autres $\alpha_i = 0$

Dans cet exemple, le robot est contrôlable en téléopération dans les directions X et Y de R_w et comanipulé ailleurs.

NB-3 : *Dans cette situation de combinaison spatiale, les comportements T ou C sont effectivement binaires dans les directions principales du repère R_w . Si on s'intéresse à la nature de la commande dans une direction quelconque de ce repère, le comportement est un mixage de T et C.*

4.2.2.2 Combinaison par mixage de téléopération et comanipulation

— Exemple 2-1 : tous les $\alpha_i = 0,5$

Si tous les paramètres alpha i sont égaux mais différents de 0 (auquel cas la commande serait de la téléopération pure) ou 1 (auquel cas la commande serait de la comanipulation pure), alors le robot subit une participation identique provenant de la téléopération et de la comanipulation et cela de la même façon dans toutes les directions de l'espace opérationnel.

La combinaison est un mixage homogène et isotrope de T et C. Aucune direction de l'espace R_w n'est pleinement téléopérée ou pleinement comanipulée.

— Exemple 2-2 : $\alpha_1 = 1$; $\alpha_2 = \alpha_3 = 0,5$; $\alpha_4 = 0,1$; $\alpha_5 = \alpha_6 = 0,9$.

Les α_i ont des valeurs constantes mais différentes selon les directions de l'espace. La combinaison est un mixage qui n'est ni homogène, ni isotrope, de T et C. Dans cet exemple, du fait de la valeur $\alpha_1 = 1$, la commande sera pleinement téléopérée dans la direction X de R_w . A contrario, dans aucune direction de R_w , la commande sera comanipulée (il aurait fallu un alpha i nul).

4.2.2.3 Combinaison par mixage variant avec le temps

Dans cette situation, les α_i n'ont pas des valeurs constantes : elles évoluent avec le temps (soit du fait d'un modèle déterministe d'évolution, soit en fonction d'événements que l'on peut identifier via des capteurs d'environnement). La combinaison reste de type mixage, même s'il n'est pas exclu, du fait des variations de S en fonction du temps, que le comportement soit momentanément de type combinaison spatiale.

4.2.3 Formulation générique de la combinaison TC^2

Pour des applications où un découplage serait envisagé entre le contrôle en position et celui en orientation, on peut compléter le modèle de l'équation 4.1 en y ajoutant une matrice B diagonale de découplage directionnel, telles que la loi de commande de TC^2 ,

s'écrive alors :

$$\dot{X} = (B * S) * \dot{X}_T + (I - (B * S)) * \dot{X}_C \quad (4.2)$$

NB-4 : La formulation (Eq 4.1) peut se faire avec l'écriture (Eq 4.2) en donnant à B la forme d'une matrice Identité.

Ainsi (Eq 4.2) peut devenir la forme générique : paramétrée par une matrice S de sélectivité et une matrice B de découplage directionnel.

Soit par exemple une matrice B diagonale, définie comme suit, où le paramètre bêta gère le type de contrôle position et/ou orientation.

$$B = \begin{bmatrix} \beta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-\beta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-\beta) \end{bmatrix}$$

Selon la valeur de β , le système peut présenter un contrôle sur les 3 ou les 6 degrés de liberté opérationnels.

Exemples 3 :

- Si $\beta = 1$, le robot est en contrôle de position.
- Si $\beta = 0$, le robot est en contrôle d'orientation.

En faisant varier les composantes α de la matrice S, on peut attribuer un contrôle de vitesse hybride dans l'espace opérationnel du robot où, $n = 3$ (pour $\beta = 1$ ou 0) ou $n = 6$ (pour $\beta=0,5$).

4.2.4 Détermination de la matrice de sélectivité

Pour atteindre un couplage dynamique entre la téléopération et la comanipulation il faut définir la matrice S. Compte tenu la définition globale de S, le vecteur de vitesse combinée, dans le repère R_w , est défini comme suit :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \beta * \alpha_1 * \dot{X}_{T_x} + (1 - \beta * \alpha_1) * \dot{X}_{C_x} \\ \beta * \alpha_2 * \dot{X}_{T_y} + (1 - \beta * \alpha_2) * \dot{X}_{C_y} \\ \beta * \alpha_3 * \dot{X}_{T_z} + (1 - \beta * \alpha_3) * \dot{X}_{C_z} \\ (1 - \beta) * \alpha_4 * \dot{X}_{T_\alpha} + (1 - (1 - \beta) \alpha_4) * \dot{X}_{C_\alpha} \\ (1 - \beta) * \alpha_5 * \dot{X}_{T_\beta} + (1 - (1 - \beta) * \alpha_5) * \dot{X}_{C_\beta} \\ (1 - \beta) * \alpha_6 * \dot{X}_{T_\gamma} + (1 - (1 - \beta) * \alpha_6) * \dot{X}_{C_\gamma} \end{bmatrix}$$

Les coefficients sont sélectionnés par l'utilisateur en fonction de l'application. Celui-ci définit ainsi quels axes sont contrôlés en téléopération et lesquels le sont en comanipulation.

4.3 Simulations et expérimentations

Nous avons développé un outil de simulation, sous Matlab, afin d'analyser le comportement d'un robot contrôlé par une commande TC^2 et évaluer les effets des différentes approches proposées précédemment. Par ailleurs, diverses lois ont été implémentées sur la plateforme matérielle constituée du Phatom Omni et du robot UR3, qui nous ont permis de mener un certain nombre d'expérimentations.

Nous commentons ici quelques résultats de ces expérimentations. Pour chaque expérimentation évoquée, sont aussi donnés les résultats de simulations réalisées avec la même loi de commande combinée.

Quatre scénarios de ce couplage ont été considérés, correspondant à différentes valeurs des paramètres α_i , fixées par l'utilisateur :

- Les α_i ont des valeurs binaires,
- Les α_i sont tous de valeur identique 0,5.
- Les α_i ont des valeurs comprises entre 0 et 1, prédéfinies par l'utilisateur.
- Les α_i varient en fonction du temps.

NB-6, choix de R_w : *pour simplifier l'observation des phénomènes issus de la combinaison, le repère de travail R_w a été choisi identique au repère robot.*

4.3.1 Premier exemple : combinaison spatiale.

Cette section présente une commande combinée TC^2 impliquant des valeurs binaires des α_i et une matrice B choisie de telle façon que la commande soit en position dans

Rw, sans modification d'orientation.

D'après le choix de S, le contrôle est en téléopération pour les axes X et Y et en comanipulation pour l'axe Z.

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{X}_{T_x} \\ \dot{X}_{T_y} \\ \dot{X}_{C_z} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Les figures 4.2 et 4.3 illustrent respectivement la simulation du comportement de cette loi de commande et les tests réalisés en réel sur robot.

La figure 4.2 illustre les commandes de vitesse en provenance du contrôleur de téléopération (courbes avec des marqueurs cercles-rouges, repérées V_{xT} , V_{yT} et V_{zT}), du contrôleur de comanipulation (coubes en jaune, repérées V_{xC} , V_{yC} et V_{zC}) ainsi que leur résultante (courbes en bleu reppérées V_x , V_y et V_z) par la strategie TC^2 .

La simulation, d'une durée de 1 s, laisse apparaître deux séquences.

— Entre 0 s et 0,5 s

Le robot est soumis aux deux commandes T et C :

— Une commande de déplacement incrémental de 10 mm sur les axes téléopérés :

- -10 mm sur X
- +10 mm sur Y entre 0 et 0,25 s
- -10 mm sur Y entre 0,25 et 0,5 s

— Une commande de force d'intensité de 10 N sur les axes contrôlés en comanipulation.

Ceci génère sur :

- l'axe X : une commande de vitesse de -0,2 m/s
- l'axe Y : une commande de vitesse qui varie entre +0,2 m/s et -0,2 m/s
- l'axe Z : une commande de vitesse de -0,2 m/s

— Entre 0,5 s et 1 s

Le robot est soumis à :

— Une force d'intensité de 10 N sur l'axe des X positifs.

- Une commande incrémentale de téléopération de :
 - 10 mm sur l'axe des X.
 - -10 mm sur Y entre 0,5 et 7,5 s
 - 10 mm sur Y entre 0,75 et 1 s

Ceci génère sur :

- l'axe X : une commande de vitesse de 0,2 m/s
- l'axe Y : une commande de vitesse qui varie entre -0,2 m/s et 0,2 m/s
- l'axe Z : une commande de vitesse de 0,2 m/s

Sur cette figure 4.2 on constate :

- Suivant X et Y, les commandes des vitesses transmises au robot (courbes bleues), sont celles générées par le contrôleur de téléopération pendant toute la simulation.
- Suivant l'axe Z, la commande de vitesse que le robot reçoit est uniquement constituée de la commande en provenance de la comanipulation.

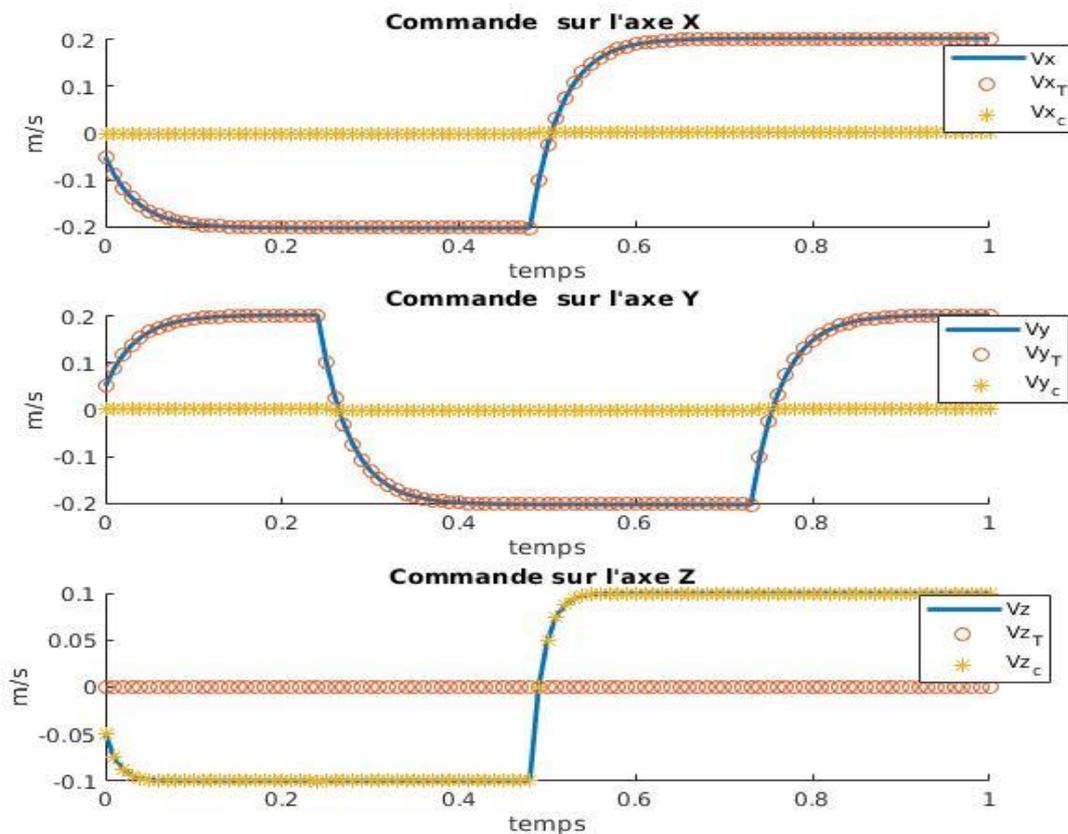


FIGURE 4.2 – Simulation de la commande combinée de T et C : contrôle en téléopération pour les axes X et Y et en comanipulation pour l'axe Z.

La figure 4.3 illustre le même type d'expérience que celle réalisée au préalable, mais cette fois réalisée en réel sur le robot UR3.

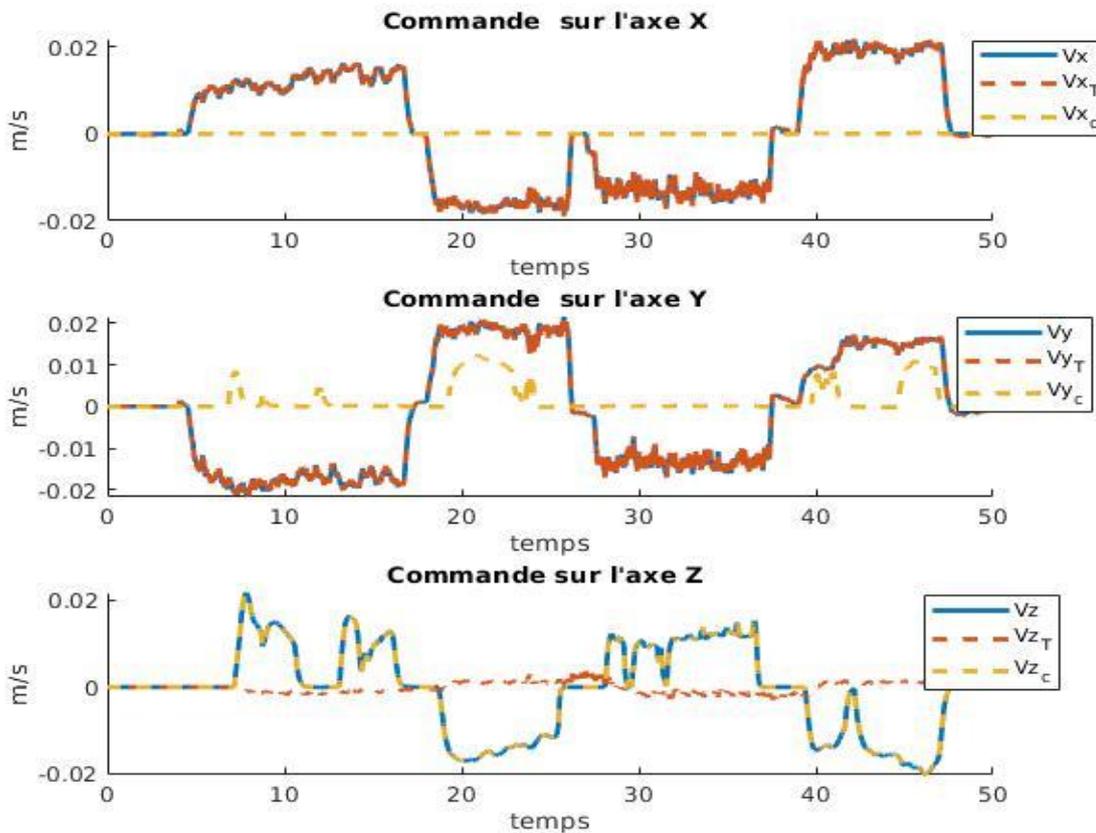


FIGURE 4.3 – Commande combinée de T et C du robot UR3 : contrôle en téléopération pour les axes X et Y et en comanipulation pour l'axe Z .

Après implémentation du contrôleur sur le robot, une procédure expérimentale a été mise en œuvre qui permet de combiner les consignes de position/vitesse issues d'un téléopérateur depuis son poste maître (le Phantom Omni) et les consignes de forces appliquées par un opérateur agissant de façon directe en comanipulation sur l'outil du robot. Les mêmes types de consignes que celles qui ont été générées lors de la simulation ont alors été appliquées par les opérateurs, dans la mesure du possible puisqu'il s'agit d'actions manuelles.

Le robot reçoit du Phantom Omni une commande de téléopération incrémentale en position qui varie entre -2 mm et 2 mm pour les axes X et Y . Cette commande, interprétée par le contrôleur de téléopération, induit des vitesses de téléopération entre $-0,02$ m/s et $+0,02$ m/s, pour les axes X et Y .

Par ailleurs, le robot est soumis à une force suivant l'axe Z , dont l'intensité reste

inférieure à 10 N (contrainte médicale du projet d'échographie robotisée). Toutefois des efforts perturbateurs sont créés, dans la direction Y en particulier, par l'opérateur qui comanipule le robot.

Le comportement observé en réel est semblable à celui de la simulation. Le découplage entre téléopération et comanipulation s'est effectué comme demandé par la matrice S. En particulier, observons que le contrôleur global a ignoré les consignes de vitesse de comanipulation parasites pourtant mises en évidence sur l'axe Y, paramètre V_{yC} (graphe médian figure 4.3).

Cette expérience valide le principe de la commande TC^2 quant à sa capacité à contrôler un robot simultanément en téléopération et comanipulation, avec un découplage spatial dépendant des directions.

4.3.2 Deuxième exemple : combinaison par mixage isotrope, ($\alpha_1 = 1/2$)

La matrice B a été choisie de façon que la commande soit en position suivant l'unique axe X de R_w , sans modification de mouvement ni en Y ni en Z, sans modification d'orientation.

De ce fait, la seule valeur significative de S est $\alpha_1 = 0,5$. Ainsi, pour le contrôle en position du robot suivant la direction X : les commandes de téléopération et comanipulation ont la même participation.

Dans cet exemple, le mixage est homogène mais non-isotrope.

$$S = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \dot{X} = 0,5 * \begin{bmatrix} \dot{X}_{T_x} + \dot{X}_{C_x} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

La figure 4.4 illustre la simulation qui a été réalisée, le robot étant soumis à deux actions :

- Une commande de téléopération de position incrémentale -10 mm suivant l'axe X
- Une force variable, évoluant entre +6 N et +10 N, puis entre -6 N et -10 N suivant X.

Ces deux consignes génèrent :

- Une commande de vitesse constante pour la téléopération, de valeur $-0,2\text{m/s}$,
- Une commande de vitesse variable entre $+0,1$ et $+0,2$ m/s lorsque les forces appliquées sont positives et de $-0,1$ et $-0,2$ m/s lorsque les forces appliquées sont négatives.

Quatre comportements différents peuvent être remarqués pour ce couplage :

- Un suivi de la consigne non nulle (téléopération) entre 0 et 0,1s.
- Une réduction de la consigne de vitesse entre 0,1 et 0,2 s
- Une consigne nulle entre 0,3 et 0,5 s ainsi qu'entre 0,8 et 1 s
- Une augmentation de la consigne de vitesse entre 0,5 et 0,7 s.

Dans le cas où on a une réduction de la consigne globale de vitesse, ou une vitesse globale nulle, la vitesse de la comanipulation est capable de compenser les vitesses de la téléopération.

Dans les deux autres cas, les vitesses provenant de la téléopération et de la comanipulation sont accumulées pour déterminer la consigne globale à appliquer au robot.

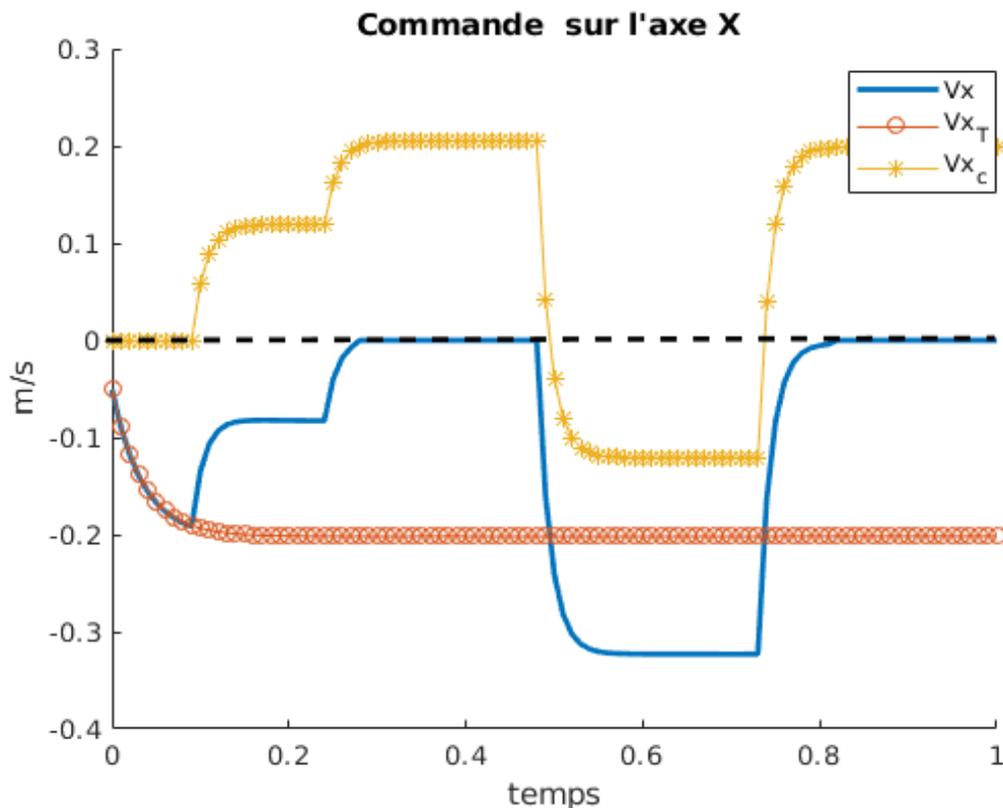


FIGURE 4.4 – Simulation de la commande combinée par mixage de T et C avec $\alpha=0,5$

Comme pour l'expérience préalable, après implémentation du contrôleur sur le robot UR3, la procédure expérimentale a permis de combiner les consignes issues du téléopérateur et les consignes de forces appliquées par le comanipulateur.

Les mêmes consignes que celles de la simulation ont alors été appliquées par les opérateurs, là aussi dans la mesure du possible puisqu'il s'agit d'actions manuelles. Le même comportement a été observé :

- Une commande en téléopération incrémentale de 10 mm sur l'axe X.
- Une force variable sur l'axe X entre -10 N et 10 N.

On obtient alors :

- Un suivi de la consigne non nulle (téléopération) entre 0 et 10 s.
- Un suivi de la consigne non nulle (comanipulation) entre 10 et 25 s.
- Une réduction de la consigne vitesse entre 30 et 40 s
- Une consigne nulle entre 45 et 55 s
- Une amplification de la consigne entre 70 et 80 s

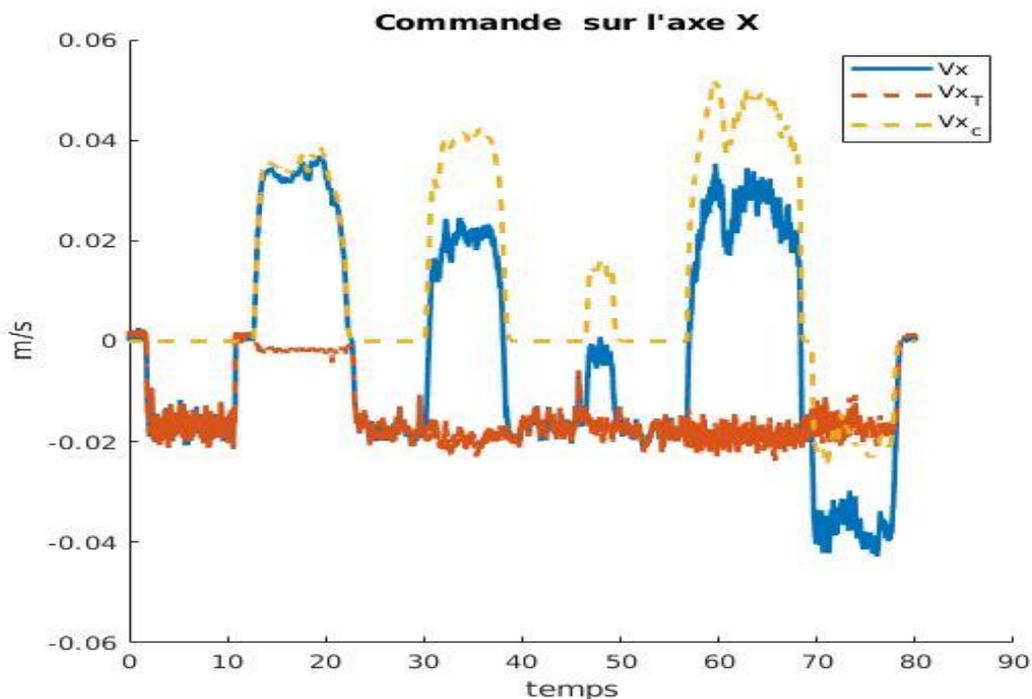


FIGURE 4.5 – Commande combinée du robot UR3 par mixage de T et C avec $\alpha=0,5$

Cette expérience a mis en évidence l'effet d'une répartition identique des commandes entre la téléopération et la comanipulation, ainsi que la façon dont la commande de vitesse résultante découle directement des deux commandes "de base". Les quatre comportements observés rendent l'interaction plus dynamique entre les phases de téléopération et de comanipulation, sans recours à une commande d'activation pour passer d'un état à l'autre.

De plus, l'expérience a montré qu'un robot peut prendre simultanément l'état téléopéré et l'état comanipulé, pour une même direction de l'espace, ce qui est fondamentalement nouveau par rapport à une commande classique de force/position.

4.3.3 Troisième exemple : commande avec mixage différent selon les directions de l'espace

Dans cette section, toutes les valeurs α_i sont constantes, mais non identiques sur tous les axes. Le mixage n'est pas isotrope.

L'expérience développée ici, est une version étendue de la précédente. Nous évaluons le potentiel de contrôle sur des axes multiples avec une distribution différente des gains entre la téléopération et la comanipulation.

Dans ce cas :

$$S = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \dot{X} = \begin{bmatrix} 0,5 * \dot{X}_{T_x} + 0,5 * \dot{X}_{C_x} \\ 0,1 * \dot{X}_{T_y} + 0,9 * \dot{X}_{C_y} \\ 0,8 * \dot{X}_{T_z} + 0,2 * \dot{X}_{C_z} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Comme au préalable, dans la simulation comme dans l'expérimentation, le robot est soumis aux mêmes conditions et aux mêmes commandes.

En simulation :

- Le robot reçoit une commande de position incrémentale sur les 3 axes X, Y et Z, de -10 mm, -10 mm et +10 mm respectivement.
Ceci génère une vitesse de téléopération sur les 3 axes de -0,2m/s, -0,2m/s et 0,2m/s respectivement sur les axes X, Y et Z (voir figure 4.6).
- Le robot est soumis à des forces variables sur les axes des X, Y et Z avec une force variant entre -6 et 10 N pour l'axe X , une force de 5 N sur l'axe Y et de 10 N sur l'axe Z.
Ceci génère une vitesse de comanipulation variable sur les 3 axes X, Y et Z (voir figure 4.6).

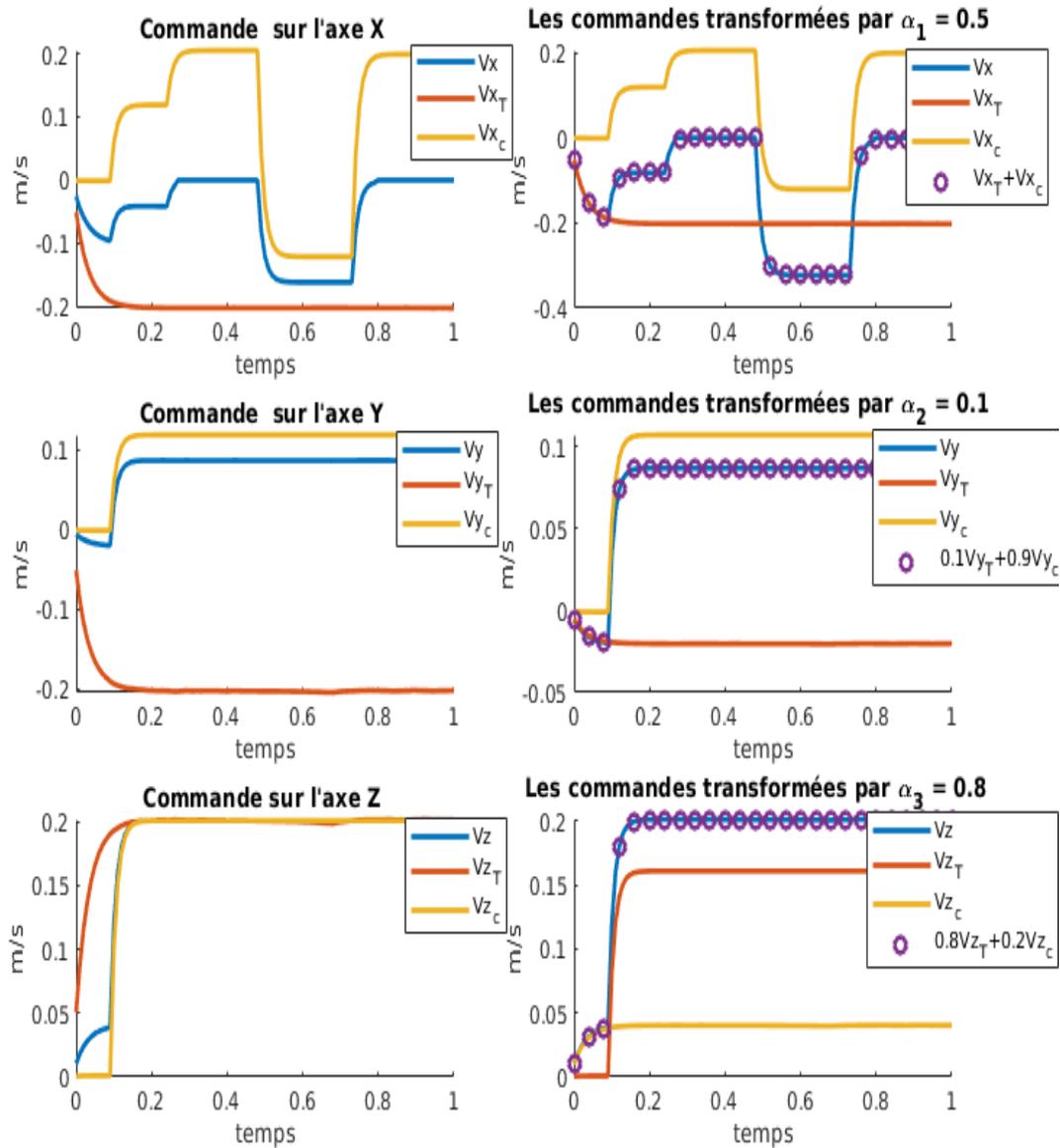


FIGURE 4.6 – Simulation de la commande combinée de T et C : avec gains différents entre téléopération et comanipulation.

Lors du test réel sur le robot :

Le robot UR3 reçoit des commandes de vitesses depuis les sites de téléopération et comanipulation. La commande du robot est déterminée par pondération des dites vitesses, par les poids des α_i voir figure 4.7.

Sur les figures 4.6 et 4.7, on peut constater que les consignes ayant les pondérations α_i les plus fortes ont en définitive le plus fort impact dans la génération des commandes à envoyer au robot, tandis que la commande suivant la direction X présente un comportement identique à celui de l'expérience précédente.

On peut ainsi observer et interpréter la possibilité de partager le contrôle de manière non-équilibrée entre téléopération et cobotique.

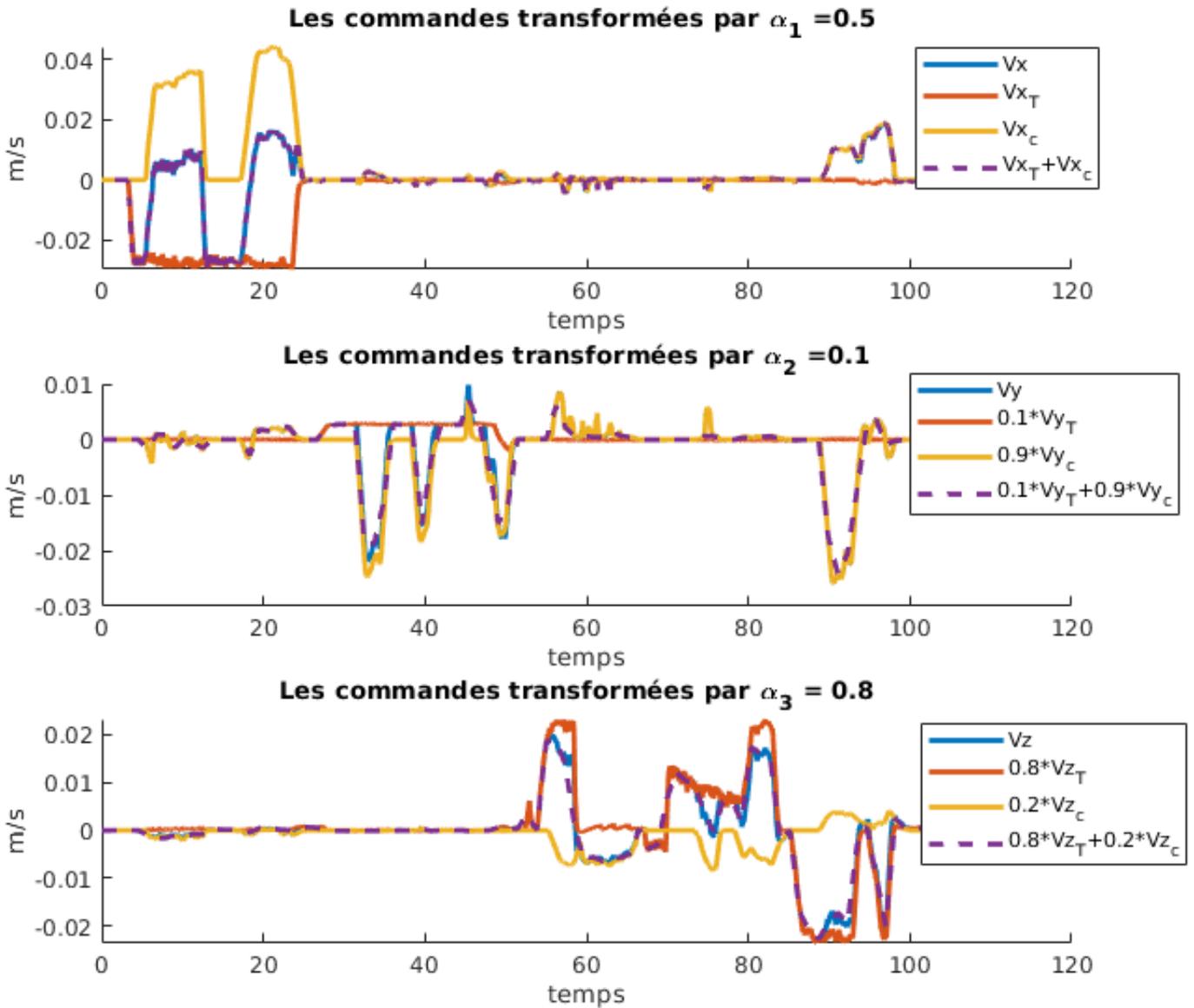


FIGURE 4.7 – Commande combinée de T et C : avec gains différents entre téléopération et comanipulation.

4.3.4 Quatrième exemple : commande avec mixage fonction du temps

Dans les trois expérimentations précédentes, les valeurs des paramètres α_i étaient constantes. Ici, les valeurs des α_i sont variables en fonction du temps. Elles sont, dans notre exemple, établies en fonction des forces mesurées.

Pour des raisons illustratives nous présentons cette stratégie avec un contrôle de position le long d'un seul axe : celui des X.

Dans ce cas :

$$S = \begin{bmatrix} \alpha_1(F_{ext}, t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \dot{X} = \begin{bmatrix} \alpha_1(F_{ext}, t) * \dot{X}_{T_x} + (1 - \alpha_1(F_{ext}, t)) * \dot{X}_{C_x} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Où α_1 est donné par l'algorithme suivant :

Algorithme 1 Calcul $\alpha_1(F_{ext}, t)$

Entrée: $d_1 = false, AX = 0, AXCount = 0, AXCount2 = 0, AX \in [0, 5, -0, 5]$

Sortie: $\alpha_1 = 0, 5 - AX$

```

AX ← 0
si d1 = false alors
  si abs(FX) > 5 alors
    si AX < 0,5 alors
      AX ← AX + 0,1
    sinon
      d1 ← true
      AX ← 0,5
    fin si
  fin si
sinon
  AXCount2 ← AXCount2 + 1
  si AXCount%2=1 alors
    si AX > -0,5 && AX ≤ 0,5 alors
      AX ← AX - 0,1
    sinon
      AXCount ← AXCount + 1
      si AXCount = 4 alors
        d1 = false
        AXCount = 0
      fin si
    fin si
  fin si
fin si

```

Cette expérimentation a été réalisée pour illustrer la faisabilité d'un paramètre variable dans le temps, au sein de la matrice de sélectivité, généralisant ainsi la fonction de couplage spatial à une fonction de couplage spatio-temporel pour établir une loi de commande robotique combinant téléopération et comanipulation.

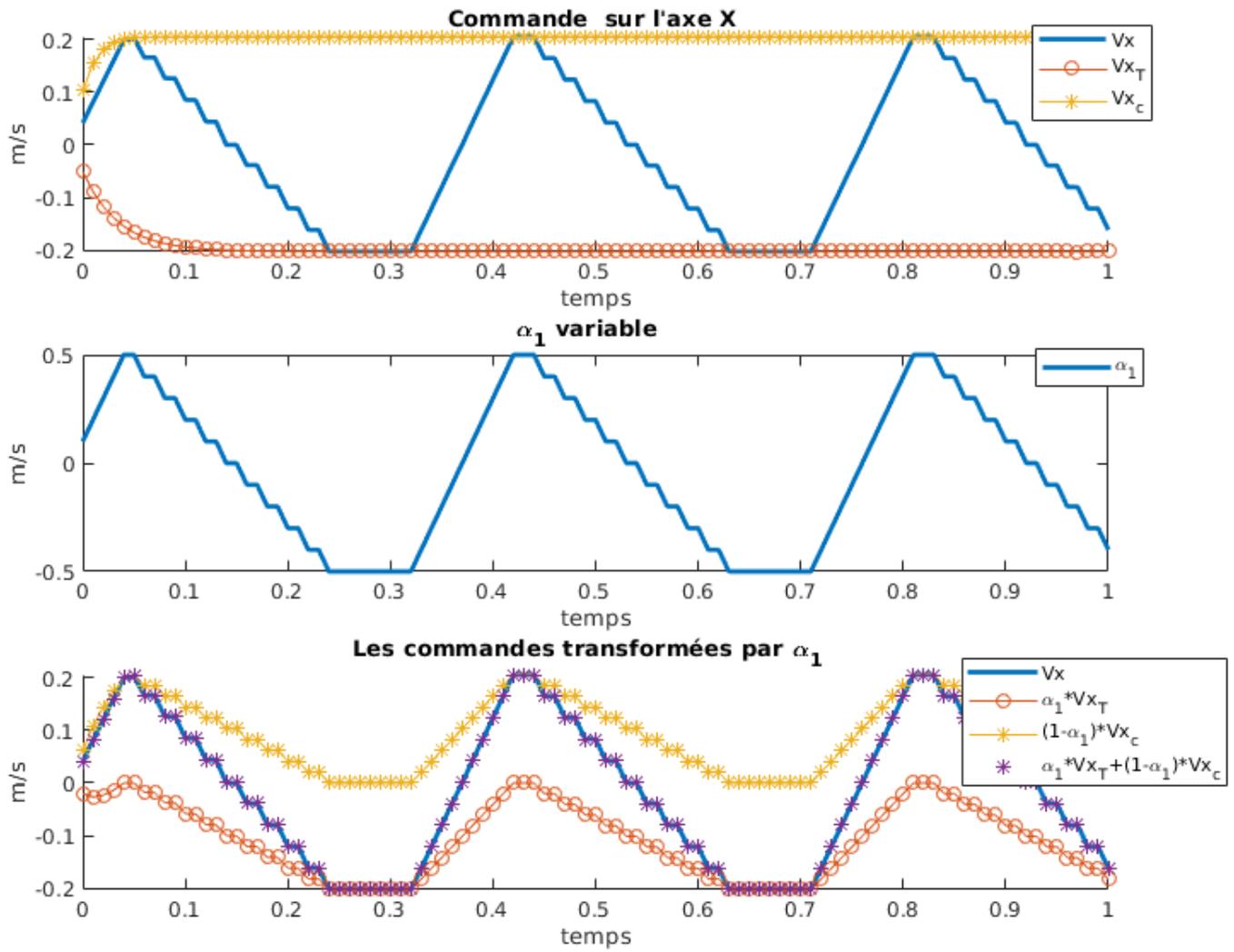


FIGURE 4.8 – Simulation de la commande combinée de T et C : gain α_1 variables entre téléopération et comanipulation sur l'axe X.

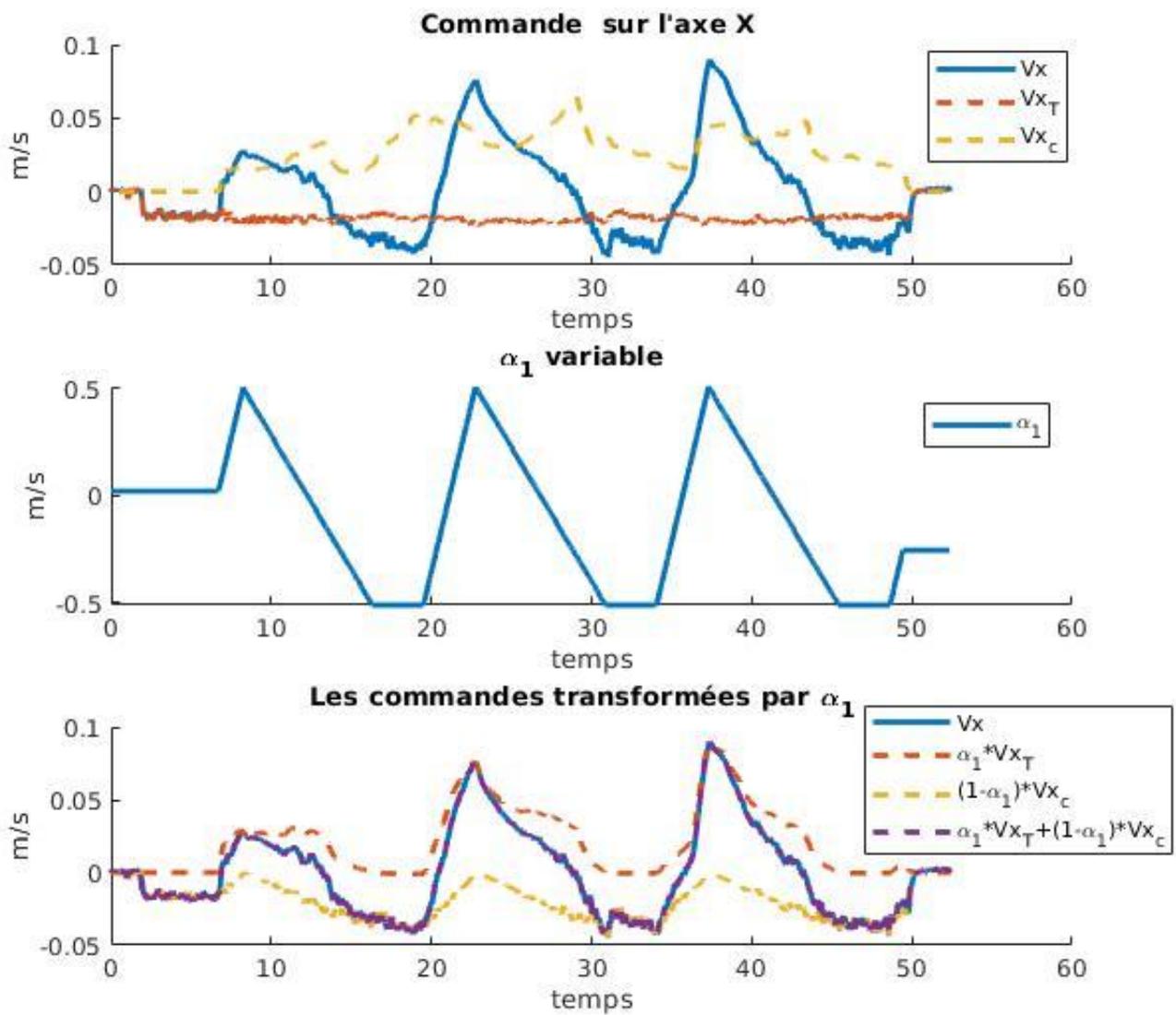


FIGURE 4.9 – Commande combinée de T et C : gain α_1 variables entre téléopération et comanipulation sur l'axe X.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé différents modes de commandes robotiques combinant téléopération et comanipulation. Une matrice de sélectivité a été définie, qui établit la manière dont les deux commandes élémentaires téléopération et comanipulation sont fusionnées pour générer la commande globale à appliquer au robot. Dans une première approche, dite commande spatiale, les différentes directions de l'espace-robot sont contrôlées séparément, soit en téléopération, soit en comanipulation. Dans la deuxième approche, dite par mixage, les mouvements du robot sont déterminés de façon identique dans toutes les directions, en additionnant de manière pondérée, les effets des consignes exprimées par le téléopérateur et le comanipulateur.

Dans une troisième approche, hybride des deux premières, la combinaison des modalités téléopération et comanipulation se fait par mixage et de façon variable selon la direction de l'espace, variable aussi en fonction du temps.

Des simulations de ces approches ont été réalisées et des expérimentations ont été effectuées sur robot UR3, validant l'idée de combiner téléopération et comanipulation dans un même contrôleur de robot, concept que nous avons désigné par commande TC^2 .

Conclusions et perspectives

L'enjeu de cette thèse était d'établir une passerelle entre téléopération et comanipulation, deux approches structurellement différentes et faisant partie de la plus large thématique que représente la commande robotique. Les deux premiers chapitres ont été consacrés à stabiliser les deux "semelles" de cette passerelle, à savoir préciser et solidifier, séparément, les deux techniques de commande que sont la téléopération et la comanipulation.

Dans le chapitre 3 nous avons proposé un premier rapprochement des deux modalités en intégrant, sur un même robot, pour une même application, un mode de contrôle appelant de façon alternée, des phases de fonctionnement en téléopération et d'autres en comanipulation.

Dans le quatrième chapitre a été proposée une forme générique de combinaison entre téléopération et comanipulation, conduisant d'ailleurs à plusieurs principes distincts de commande telles les combinaisons appelées : spatiale, par mixage ou variant en fonction du temps.

Notre analyse bibliographique des thématiques téléopération et comanipulation, puis l'analyse comparée des différences et des similitudes existantes entre les deux modalités, a mis en évidence la nécessité de considérer tout autant la question du retour d'effort dans la boucle téléopérée que celle de l'interaction humain-robot dans l'application robotique comanipulée. Si la robotique téléopérée peut parfaitement fonctionner sans retour de force (le robot de chirurgie Da Vinci en est un bel exemple), l'idée de fusionner téléopération et comanipulation ne peut se faire sans que le paramètre force soit présent dans les deux modalités (dans le retour d'effort pour l'une, dans l'interaction pour l'autre).

S'agissant de la cobotique dont l'objectif est d'accroître la sécurité au contact et notamment en cas de collisions robot-environnement ou robot-humain, nous avons proposé le concept de "Composant cobotique virtuel". Ce composant est une capsule logicielle intégrée dans la boucle de commande articulaire et qui confère à l'articulation

contrôlée, les mêmes propriétés que si elle était munie d'un composant élastique réel. Le modèle de commande proposé a été intégré sur le robot industriel UR3 de Universal Robots, programmé sous ROS. Deux types de collisions ont été envisagées : l'une sur un fantôme en matériaux flexible et l'autre sur une paume de main humaine. La technique proposée modifie la trajectoire du robot en cas de collision, contribuant à réduire de façon significative les forces d'interaction lors desdites collisions. Ce qui peut conduire à des robots plus sûrs et montre la faisabilité du concept de composant cobotique virtuel. Par ailleurs, un avantage supplémentaire de l'approche virtuelle (du fait qu'elle soit logique) est de pouvoir ajuster à la demande la rigidité du composant élastique.

Préalablement à la fusion des deux modalités de téléopération et comanipulation (ou modalités T et C), nous avons développé puis implémenté deux modes de commande, sur une même plateforme expérimentale composée d'un bras haptique (le Phantom Omni de Sensible) et du robot UR3. L'application considérée concerne le positionnement d'une sonde échographique par le robot : en mode téléopéré-bilatéral grâce au Phantom Omni, en mode comanipulé en exerçant des efforts sur la sonde (forces et couples), comme le fait un échographiste lors d'un examen diagnostique standard. Pour la partie téléopérée, nous avons synthétisé une commande en vitesse sous contraintes géométriques (dont pour les principales, la contrainte de non-collision et la contrainte d'atteinte de la position désirée). Pour la partie comanipulée, nous avons synthétisé un contrôleur par admittance intégrant un bloc dédié (le CVC) chargé de convertir la vitesse cartésienne en vitesse articulaire. Un point important a été résolu : le déplacement des mesures délivrées par le capteur d'efforts afin d'identifier les interactions sonde-patient lors de l'examen échographique. Compte-tenu des spécificités de l'application médicale à laquelle nous nous sommes attachés, il a fallu tenir compte de la caractéristique de grande longueur du porte-sonde-échographique. Un outil à poignée à double prise a été conçu et réalisé par fabrication additive afin d'anticiper l'utilisation clinique du dispositif. Il permet à l'opérateur comanipulant cet outil, de très facilement et sans peine, exercer des couples sur cet outil. Les deux modes de commande précités ont été combinés au sein d'un mode unique, alternant tour à tour les deux modalités de base C et T. Toutefois, du fait des conditions de passage d'un mode à l'autre, il a fallu distinguer l'enchaînement T vers C de son complémentaire C vers T.

La combinaison générique entre téléopération et comanipulation que nous avons proposée, appelée TC^2 , est une véritable fusion des deux modalités. Alors que dans l'approche précédente de la combinaison alternée, il persiste des phases pleinement téléopérées et certaines pleinement comanipulées, dans l'approche TC^2 , le positionnement du robot est issu à tout instant de deux expressions désirées : l'une

provenant d'un téléopérateur, l'autre d'un opérateur comanipulant le robot.

A l'image de ce qui se fait en commande hybride position/force, nous avons introduit la notion de matrice de sélectivité, désignée par S . Celle-ci établissant la manière dont les deux commandes élémentaires de téléopération et comanipulation sont fusionnées pour générer la commande globale à appliquer au robot. Selon la forme de cette matrice S , différentes natures de combinaisons apparaissent : dans une première, dite combinaison spatiale, les différentes directions de l'espace-robot sont contrôlées séparément en téléopération ou en comanipulation. Dans une autre approche, dite combinaison par mixage isotrope, les mouvements du robot sont déterminés de façon identique dans toutes les directions, en additionnant consigne téléopérée et consigne comanipulée. Dans une autre voie, plus globale, hybride des deux précédentes, certaines directions de l'espace sont "plutôt téléopérées", d'autres "plutôt comanipulées". Le critère "plutôt" étant tout simplement lié aux valeurs, non identiques, des éléments de la matrice S .

Une dernière voie que nous avons mise en évidence dans cette combinaison est de considérer les éléments de la matrice S comme des fonctions du temps. Dans une direction particulière de l'espace, une modalité téléopération peut devenir "plutôt téléopération", puis "plutôt comanipulation" etc.

Les diverses simulations et expérimentations réalisées sur la plateforme robotique que nous avons développée ont permis de valider le concept de la commande robotique, combinaison inédite a priori.

À l'issue de ces trois années de thèse, un certain nombre de travaux nous apparaissent nécessaires pour préciser, prolonger, exploiter si cela est possible, les propositions que nous avons ici formulées.

Comanipulation, comme téléopération avec retour d'effort imposent une excellente maîtrise des interactions outil-environnement (ici sonde-patient). Nous avons travaillé avec un robot UR3 de première génération sur lequel il a fallu intégrer un capteur d'effort additionnel (le FT300 de Robotiq). Le laboratoire vient de s'équiper d'un UR3e, robot de nouvelle génération, capable de fournir les couples articulaires et dispensant de ce fait d'intégrer un capteur d'effort. L'utilisation du nouveau robot fait donc office d'action prioritaire.

Concernant l'application comanipulée, nous avons mis en évidence l'intérêt de la poignée à double prise. La forme et les dimensions de cet outil doivent toutefois faire

l'objet d'études complémentaires afin de mieux comprendre comment un opérateur se sert dudit outil et en particulier pouvoir identifier s'il y a une influence du fait que cet opérateur soit droitier ou gaucher ou de toute autre caractéristique physiologique. Pour l'application d'échographie qui nous concerne, cette étude revêt un caractère fondamental, du fait notamment de la longueur importante du porte-sonde.

Un autre phénomène lié à cette longueur du porte-sonde est la sensibilité du facteur masse de la sonde. Nous avons constaté, lors de la procédure comanipulée, que quelques grammes en plus ou en moins modifient de façon significative les moments du poids au niveau du capteur. Il faudra par conséquent obtenir des caractéristiques précises des outils manipulés ou mettre en place une procédure d'identification automatique des paramètres masse et inerties comme proposé par certains constructeurs de robots industriels.

Concernant le poste maître, nous avons travaillé jusque-là avec un dispositif (Phantom Omni) dont les performances sont assez réduites. Notre objectif étant de travailler à l'enjeu de la combinaison téléopération et comanipulation, ce faible niveau de performance ne constituait pas un problème. Nous avons toutefois observé, lors d'expérimentations réalisées en milieu hospitalier, qu'un dispositif haptique de qualité, précis, avec 6 degrés de retour d'effort et un espace de travail supérieur à celui de l'Omni est nécessaire. Notre établissement devrait disposer prochainement d'un matériel répondant à ces attentes. Il restera à l'intégrer dans la plateforme robotique nouvelle version. Il restera aussi à harmoniser l'espace de travail du poste maître avec celui du poste esclave et travailler un certain nombre de questions, telles : ces deux espaces doivent-ils être identiques? Doit-on placer des murs virtuels dans l'espace haptique? Doit-on générer des forces répulsives à l'approche des frontières de l'espace de travail (maître versus esclave)?

Concernant plus particulièrement la question de la combinaison TC^2 , il sera intéressant de tester les nombreuses variantes possibles du modèle pour mieux comprendre l'influence de la matrice S. Un coefficient $\alpha_i = 0,1$ dans la matrice est-il significatif? Idem pour $\alpha_i = 0,9$? Il sera aussi important de comprendre comment se comporte un "couple" téléopérateur et comanipulateur. Qui prend l'ascendant sur l'autre? Quels paramètres favorisent ou inhibent cette ascendance?

Bibliographie

- [Akella1999] Prasad Akella, Michael Peshkin, Ed Colgate, Witaya Wannasuphprasit, Nidamaluri Nagesh, Jim Wells, Steve Holland, Tom Pearson et Brian Peacock. *Cobots for the automobile assembly line*. In Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C), volume 1, pages 728–733. IEEE, 1999.
- [Anderson1989a] R.J. Anderson et M.W. Spong. *Asymptotic stability for force reflecting teleoperators with time delays*. In Proceedings, 1989 International Conference on Robotics and Automation, volume 11, pages 1618–1625. IEEE Comput. Soc. Press, 1989.
- [Anderson1989b] R.J. Anderson et M.W. Spong. *Bilateral control of teleoperators with time delay*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 34, no. 5, pages 494–501, may 1989.
- [Ang1999] Marcelo H. Ang, Wei Lin et Ser-Yong Lim. *A walk-through programmed robot for welding in shipyards*. Industrial Robot : An International Journal, vol. 26, no. 5, pages 377–388, jul 1999.
- [Arbeille2003] Philippe Arbeille, Gérard Poisson, Pierre Vieyres, Jean Ayoub, Maryannick Porcher et Jean Louis Boulay. *Echographic examination in isolated sites controlled from an expert center using a 2-D echograph guided by a teleoperated robotic arm*. Ultrasound in Medicine and Biology, vol. 29, no. 7, pages 993–1000, 2003.
- [Arnaubec2015] Aurelien Arnaubec, Jan Opderbecke, Anne Gaelle Allais et Lorenzo Brignone. *Optical mapping with the ARIANE HROV at IFREMER : The MATISSE processing tool*. MTS/IEEE OCEANS 2015 - Genova : Discovering Sustainable Ocean Energy for a New World, 2015.

- [Bach-y Rita1998] Paul Bach-y Rita, Kurt A. Kaczmarek, Mitchell E. Tyler et Jorge Garcia-Lara. *Form perception with a 49-point electrotactile stimulus array on the tongue : A technical note.* Journal of Rehabilitation Research and Development, vol. 35, no. 4, pages 427–430, 1998.
- [Baumeyer2017] Julien Baumeyer. *Co-manipulation sûre d'un robot de protonthérapie.* Theses, Université d'Orléans, June 2017.
- [Bejczy1987] A. Bejczy et Z. Szakaly. *Universal computer control systems (UCCS) for space telerobots.* In Proceedings. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 4, pages 318–324. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1987.
- [Brooks1990] Frederick P. Brooks, Ouh Young Ming, James J. Batter et P. Jerome Kilpatrick. *Project GROPE. Haptic displays for scientific visualization.* Computer Graphics (ACM), vol. 24, no. 4, pages 177–185, 1990.
- [Burdea1992] Grigore Burdea, Jiachen Zhuang, Edward Roskos, Deborah Silver et Noshir Langrana. *A Portable Dextrous Master with Force Feedback.* Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol. 1, no. 1, pages 18–28, 1992.
- [Buzan1989] Forrest T. Buzan et Thomas B. Sheridan. *Model-based predictive operator aid for telemanipulators with time delay.* Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 1, pages 138–143, 1989.
- [Cagneau2008] B. Cagneau, G. Morel, D. Bellot, N. Zemiti et G. A. D'Agostino. *A passive force amplifier.* Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 2079–2084, 2008.
- [Campeau-Lecours2016] Alexandre Campeau-Lecours et Clement Gosselin. *An anticipative kinematic limitation avoidance algorithm for collaborative robots : Two-dimensional case.* In 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), volume 2016-Novem, pages 4232–4237. IEEE, oct 2016.
- [Card1983a] Stuart Card, Thomas P. Moran et Allen Newell. *The goms model of manuscript editing,* chapitre 5, pages 139–192. Chapman and Hall/CRC, 1983.

-
- [Card1983b] Stuart Card, Thomas P. Moran et Allen Newell. The human information-processor, chapitre 2, pages 23–100. Chapman and Hall/CRC, 1983.
- [Card1983c] Stuart Card, Thomas P. Moran et Allen Newell. The keystroke-level model, chapitre 8, pages 259–312. Chapman and Hall/CRC, 1983.
- [Casiez2004] Géry Casiez. *Contribution à l' étude des interfaces haptiques Le DigiHaptic : un périphérique haptique de bureau à degrés de liberté séparés*. Thèse de Doctorat, Ecole doctorale Sciences Pour l'Ingénieur, 2004.
- [Chiaverini1993] Stefano Chiaverini et Lorenzo Sciavicco. *The parallel approach to force/position control of robotic manipulators*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 9, no. 4, pages 361–373, 1993.
- [Clément1985] G. Clément, J. Vertut, R. Fournier, B. Espiau et G. André. *An overview of cat control in nuclear services*. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 713–718, 1985.
- [Colgate1996] J.E. Colgate, M.A. Peshkin et Witaya Wannasuphoprasit. *Nonholonomic haptic display*. In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 1, pages 539–544. IEEE, 1996.
- [Colgate2004] J.E. Colgate, M. Peshkin et S.H. Klostermeyer. *Intelligent assist devices in industrial applications : a review*. In Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453), volume 3, pages 2516–2521. IEEE, 2004.
- [Courrégés2005] Fabien Courrégés, Pierre Vieyres, Gérard Poisson et Cyril Novales. *Real-time singularity controller for a tele-operated medical echography robot*. 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS, pages 2222–2227, 2005.
- [Craig1979] J.J. Craig et M.H. Raibert. *A systematic method of hybrid position/force control of a manipulator*. In COMPSAC 79. Proceedings. Computer Software and The IEEE Computer Society's Third International Applications Conference, 1979., pages 446–451. IEEE, 1979.
-

- [Dawson1991] Darren Dawson, Zhihua Qu, W.-S. Lu et Q.-H. Meng. *Comments on "Impedance control with adaptation for robotic manipulations*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 7, no. 6, pages 879–881, dec 1991.
- [De Luca1994] A. De Luca et Costanzo Manes. *Modeling of robots in contact with a dynamic environment*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 10, no. 4, pages 542–548, 1994.
- [De Schutter1988] J. De Schutter et H. Van Brussel. *Compliant Robot Motion I. A Formalism for Specifying Compliant Motion Tasks*. The International Journal of Robotics Research, vol. 7, no. 4, pages 3–17, aug 1988.
- [Delgorge2005] Cécile Delgorge, Fabien Courrèges, Lama Al Bassit, Cyril Novales, Christophe Rosenberger, Natalie Smith-Guerin, Concepció Brù, Rosa Gilabert, Maurizio Vannoni, Gérard Poisson et Pierre Vieyres. *A tele-operated mobile ultrasound scanner using a light-weight robot*. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, vol. 9, no. 1, pages 50–58, 2005.
- [Diab2020] J. Diab, A. Fonte, G. Poisson et C. Novales. *PHRI safety control using a virtual flexible joint approach*. ICINCO 2020 - Proceedings of the 17th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, no. Icinco, pages 262–271, 2020.
- [Drury2003] Jill L. Drury, Jean Scholtz et Holly A. Yanco. *Awareness in human-robot interactions*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, volume 1, pages 912–918. IEEE, 2003.
- [Dupourqué1981] Vincent Dupourqué et al. *Les applications industrielles du projet Spartacus*. Bulletin de liaison de la recherche en informatique et automatique, INRIA, vol. 75, pages 4–12, 1981.
- [Essomba2012] T. Essomba, L. Nouaille, M. A. Laribi, G. Poisson et S. Zeghloul. *Design process of a robotized tele-echography system*. Applied Mechanics and Materials, vol. 162, pages 384–393, 2012.
- [Faverjon1987] Bernard Faverjon et Pierre Tournassoud. *A local based approach for path planning of manipulators with a high*

-
- number of degrees of freedom.* In Proceedings. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 4, pages 1152–1159. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1987.
- [Ferrell1965] William R. Ferrell. *Remote manipulation with transmission delay.* IEEE Transactions on Human Factors in Electronics, vol. HFE-6, no. 1, pages 24–32, sep 1965.
- [Ferrell1967] William R. Ferrell et Thomas B. Sheridan. *Supervisory control of remote manipulation.* IEEE Spectrum, vol. 4, no. 10, pages 81–88, oct 1967.
- [Ferretti2000] Gianni Ferretti, G. Magnani, Paolo Rocco, Flavio Cecconello et Gianmarco Rossetti. *Impedance control for industrial robots.* In Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065), volume 4, pages 4027–4032. IEEE, 2000.
- [Flash1985] T. Flash et N. Hogan. *The coordination of arm movements : an experimentally confirmed mathematical model.* The Journal of Neuroscience, vol. 5, no. 7, pages 1688–1703, jul 1985.
- [Fong1986] C. Fong, R. Dotson et A. Bejczy. *Distributed microcomputer control system for advanced teleoperation.* In Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 3, pages 987–995. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1986.
- [Funda1991] J. Funda et R. P. Paul. *A symbolic teleoperator interface for time-delayed underwater robot manipulation.* Oceans Conference Record (IEEE), vol. 3, no. Section 2, pages 1526–1533, 1991.
- [Funda1996] Janez Funda, R.H. Taylor, Benjamin Eldridge, Stephen Gomory et K.G. Gruben. *Constrained Cartesian motion control for teleoperated surgical robots.* IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 12, no. 3, pages 453–465, jun 1996.
- [Giraldi2003] Gilson Giraldi, Rodrigo Silva et Jauvane C. de oliveira. *Introduction to VR technology.* In IEEE Virtual Reality, 2003. Proceedings., page 302. IEEE Comput. Soc, 2003.
-

- [Glas2012] Dylan F. Glas, Takayuki Kanda, Hiroshi Ishiguro et Norihiro Hagita. *Temporal awareness in teleoperation of conversational robots*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A :Systems and Humans, vol. 42, no. 4, pages 905–919, 2012.
- [Goertz1947] RAY MOND C . Goertz. *HANDLE CONTROL SYSTEM*, 1947.
- [Goldberg1995] Ken Goldberg, Michael Mascha, Steve Gentner, Nick Rothenberg, Carl Sutter et Jeff Wiegley. *Desktop teleoperation via the World Wide Web*. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 1, no. March, pages 654–659, 1995.
- [Goodrich2007] Michael A. Goodrich et Alan C. Schultz. *Human-Robot Interaction : A Survey*. Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction, vol. 1, no. 3, pages 203–275, 2007.
- [Gosselin2013] Clement Gosselin, Thierry Laliberte, Boris Mayer-St-Onge, Simon Foucault, Alexandre Lecours, Vincent Duchaine, Noemie Paradis, Dalong Gao et Roland Menassa. *A Friendly Beast of Burden : A Human-Assistive Robot for Handling Large Payloads*. IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 20, no. 4, pages 139–147, dec 2013.
- [Gourdon1999] Alain Gourdon, Philippe Poignet, Gérard Poisson, Pierre Vieyres et Pierre Marche. *New robotic mechanism for medical application*. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM, pages 33–38, 1999.
- [Grollman2010] Daniel H. Grollman et Odest Chadwicke Jenkins. *Incremental learning of subtasks from unsegmented demonstration*. In 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pages 261–266. IEEE, oct 2010.
- [Guerrouad1989] Aïcha Guerrouad et Pierre Vidal. *S.M.O.S. : Stereotaxical microtelemanipulator for ocular surgery*. Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology - Proceedings, vol. 11 pt 3, pages 879–880, 1989.
- [Hannaford1988] Blake Hannaford, Pmlò Fiorini et Bilateral Impedance. *A detailed model of bi-lateral teleoperation*. In Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pages 117–121. IEEE, 1988.

- [Hannaford1989a] Blake Hannaford. *A Design Framework for Teleoperators with Kinesthetic Feedback*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 5, no. 4, pages 426–434, 1989.
- [Hannaford1989b] Blake Hannaford. *Stability and performance tradeoffs in bilateral telemanipulation*. In Proceedings, 1989 International Conference on Robotics and Automation, pages 1764–1767. IEEE Comput. Soc. Press, 1989.
- [Hashtrudi-Zaad2002a] K. Hashtrudi-Zaad et S.E. Salcudean. *Transparency in time-delayed systems and the effect of local force feedback for transparent teleoperation*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 18, no. 1, pages 108–114, 2002.
- [Hashtrudi-Zaad2002b] Keyvan Hashtrudi-Zaad et Septimiu E. Salcudean. *Bilateral parallel force/position teleoperation control*. Journal of Robotic Systems, vol. 19, no. 4, pages 155–167, apr 2002.
- [Hirzinger1987] G. Hirzinger. *The space and telerobotic concepts of the DFVLR ROTEX*. In Proceedings. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 4, pages 443–449. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1987.
- [Hirzinger1989] G. Hirzinger, J. Heindl et K. Landzettel. *Predictive and knowledge-based telerobotic control concepts*. In Proceedings, 1989 International Conference on Robotics and Automation, volume 58, pages 1768–1777. IEEE Comput. Soc. Press, 1989.
- [Hirzinger1993] G. Hirzinger, B. Brunner, J. Dietrich et J. Heindl. *Sensor-based space robotics-ROTEX and its telerobotic features*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 9, no. 5, pages 649–663, 1993.
- [Hockstein2007] N. G. Hockstein, C. G. Gourin, R. A. Faust et D. J. Terris. *A history of robots : From science fiction to surgical robotics*. Journal of Robotic Surgery, vol. 1, no. 2, pages 113–118, 2007.
- [Hoff1991] William A. Hoff, Lance B. Gatrell et John R. Spofford. *Machine-vision-based teleoperation aid*. Telematics and Informatics, vol. 8, no. 4, pages 403–423, 1991.
- [Hogan1984] Neville Hogan. *Impedance control of industrial robots*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 1, no. 1, pages 97–113, jan 1984.

- [Hogan1985a] Neville Hogan. *Impedance Control : An Approach to Manipulation : Part III—Applications*. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 107, no. 1, pages 17–24, mar 1985.
- [Hogan1985b] Neville Hogan. *Impedance Control : An Approach to Manipulation : Part II—Implementation*. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 107, no. 1, pages 8–16, mar 1985.
- [Hogan1985c] Neville Hogan. *Impedance Control : An Approach to Manipulation : Part I—Theory*. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 107, no. 1, pages 1–7, mar 1985.
- [Ikeura1995] Ryojun Ikeura et Hikaru Inooka. *Variable impedance control of a robot for cooperation with a human*. In Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 3, pages 3097–3102. IEEE, 1995.
- [Ikeura2002] Ryojun Ikeura, Tomoki Moriguchi et Kazuki Mizutani. *Optimal variable impedance control for a robot and its application to lifting an object with a human*. Proceedings - IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, pages 500–505, 2002.
- [Imaida2004] Takashi Imaida, Yasuyoshi Yokokohji, Toshitsugu Doi, Mitsushige Oda et Tsuneo Yoshikawa. *Ground–Space Bilateral Teleoperation of ETS-VII Robot Arm by Direct Bilateral Coupling Under 7-s Time Delay Condition*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 20, no. 3, pages 499–511, jun 2004.
- [Ino1993] S. Ino, S. Shimizu, T. Odagawa, M. Sato, M. Takahashi, T. Izumi et T. Ifukube. *A tactile display for presenting quality of materials by changing the temperature of skin surface*. In Proceedings of 1993 2nd IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pages 220–224. IEEE, 1993.
- [Jenkins1986] L. Jenkins. *Telerobotic work system-space robotics application*. In Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 3, pages

- 804–806. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1986.
- [Jlassi2014] Sarra Jlassi, Sami Tliba et Yacine Chitour. *An Online Trajectory generator-Based Impedance control for co-manipulation tasks*. In 2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), pages 391–396. IEEE, feb 2014.
- [Joly1997] Luc D. Joly. *Commande hybride position/force pour la teleoperation : une approche basee sur des analogies mecaniques*, 1997.
- [Kaber1999] David B. Kaber et Jennifer M. Riley. *Adaptive Automation of a Dynamic Control Task Based on Secondary Task Workload Measurement*. International Journal of Cognitive Ergonomics, vol. 3, no. 3, pages 169–187, jul 1999.
- [Khalil1986] W. Khalil et J. Kleinfinger. *A new geometric notation for open and closed-loop robots*. In Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 3, pages 1174–1179. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1986.
- [Khansari-Zadeh2012] S.M. Khansari-Zadeh, Klas Kronander et Aude Billard. *Learning to Play Minigolf : A Dynamical System-Based Approach*. Advanced Robotics, vol. 26, no. 17, pages 1967–1993, dec 2012.
- [Khatib1987] Oussama Khatib. *A unified approach for motion and force control of robot manipulators : The operational space formulation*. IEEE Journal on Robotics and Automation, vol. 3, no. 1, pages 43–53, feb 1987.
- [Kober2014] Jens Kober. *Learning motor skills : from algorithms to robot experiments*. it - Information Technology, vol. 56, no. 3, pages 141–146, jun 2014.
- [Kormushev2010] Petar Kormushev, Sylvain Calinon et Darwin G. Caldwell. *Robot motor skill coordination with EM-based Reinforcement Learning*. In 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pages 3232–3237. IEEE, oct 2010.
- [Kormushev2011] Petar Kormushev, Sylvain Calinon et Darwin G. Caldwell. *Imitation Learning of Positional and Force Skills Demonstrated*

- via Kinesthetic Teaching and Haptic Input*. Advanced Robotics, vol. 25, no. 5, pages 581–603, jan 2011.
- [Labrecque2014] Pascal D. Labrecque et Clement Gosselin. *Robotic force amplification with free space motion capability*. In 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pages 134–140. IEEE, may 2014.
- [Lamy2012] Xavier Lamy, Xavier Lamy, De Pilotage, Automatique Robotique, L Université Pierre, Marie Curie et Marie Curie. *Conception d ' une Interface de Pilotage d ' un Cobot*. Thèse de Doctorat, 2012.
- [Laranjeira2020] Matheus Laranjeira, Aurélien Arnaubec, Lorenzo Brignone, Claire Dune et Jan Opderbecke. *3D Perception and Augmented Reality Developments in Underwater Robotics for Ocean Sciences*. Current Robotics Reports, vol. 1, no. 3, pages 123–130, sep 2020.
- [Lawrence1993] D.A. Lawrence. *Stability and transparency in bilateral teleoperation*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 9, no. 5, pages 624–637, 1993.
- [Lederman1972] Susan J. Lederman et M. M. Taylor. *Fingertip force, surface geometry, and the perception of roughness by active touch*. Perception & Psychophysics, vol. 12, no. 5, pages 401–408, sep 1972.
- [Lee1985] S. Lee, G. Bekey et A. Bejczy. *Computer control of space-borne teleoperators with sensory feedback*. In Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 2, pages 205–214. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1985.
- [Lenzi2011] Tommaso Lenzi, Nicola Vitiello, Stefano Marco Maria De Rossi, Stefano Roccella, Fabrizio Vecchi et Maria Chiara Carrozza. *NEUROExos : A variable impedance powered elbow exoskeleton*. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 1419–1426, 2011.
- [Madhani1998] A.J. Madhani, Gunter Niemeyer et J.K. Salisbury. *The Black Falcon : a teleoperated surgical instrument for minimally invasive surgery*. In Proceedings. 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Innovations

-
- in Theory, Practice and Applications (Cat. No.98CH36190), volume 2, pages 936–944. IEEE, 1998.
- [Madni1983] Azad M. Madni, Yee yeon Chu et Amos Freedy. *Intelligent Interface for Remote Supervision and Control of Underwater Manipulation*. Oceans Conference Record (IEEE), 1983.
- [Maeda2001] Yusuke Maeda, Takayuki Hara et Tamio Arai. *Human-robot cooperative manipulation with motion estimation*. In Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No.01CH37180), volume 4, pages 2240–2245. IEEE, 2001.
- [Mahvash2005] Mohsen Mahvash et Vincent Hayward. *High-fidelity passive force-reflecting virtual environments*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 21, no. 1, pages 38–46, 2005.
- [Marescaux2002] J. Marescaux. *Nom de code : « Opération Lindbergh »*. Annales de Chirurgie, vol. 127, no. 1, pages 2–4, jan 2002.
- [Mason1981] Matthew T. Mason. *Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 11, no. 6, pages 418–432, 1981.
- [Massaro1990] Dominic W. Massaro et Donald A. Norman. *The Psychology of Everyday Things*. The American Journal of Psychology, vol. 103, no. 1, page 141, 1990.
- [McClamroch1988] N. Harris McClamroch et Danwei Wang. *Feedback Control of Position and Contact Force for a Two-Dimensional Mechanism Constrained to a Given Planar Contour*. In 1988 American Control Conference, volume 21, pages 930–934. IEEE, jun 1988.
- [Minsky1980] Marvin Minsky. *TELEPRESENCE*. OMNI magazine, no. June, pages 413–420, 1980.
- [Moore2003] Carl A. Moore, Michael A. Peshkin et J. Edward Colgate. *Cobot implementation of virtual paths and 3-D virtual surfaces*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 19, no. 2, pages 347–351, 2003.
- [Mörrtl2012] Alexander Mörrtl, Martin Lawitzky, Ayse Kucukyilmaz, Metin Sezgin, Cagatay Basdogan et Sandra Hirche. *The role of*
-

- roles : Physical cooperation between humans and robots*. The International Journal of Robotics Research, vol. 31, no. 13, pages 1656–1674, nov 2012.
- [Moulières-Seban2014] Théo Moulières-Seban, David Bitonneau, Jean-François Thibault, Jean-Marc Salotti et Bernard Claverie. *Les Interactions Homme Robot pour la Cobotique Industrielle*. Ergo’IA, no. December, 2014.
- [Moulières-Seban2017] Théo Moulières-Seban, David Bitonneau, Jean-Marc Salotti, Jean-François Thibault et Bernard Claverie. *Human Factors Issues for the Design of a Cobotic System*. In Advances in Intelligent Systems and Computing, volume 499, pages 375–385. 2017.
- [Mourioux2005] G. Mourioux, C. Novales, N. Smith-Guérin, P. Vieyres et G. Poisson. “a hands free haptic device for tele-echography”. 2005.
- [Nagai2003] Yukie Nagai, Koh Hosoda, Akio Morita et Minoru Asada. *A constructive model for the development of joint attention*. Connection Science, vol. 15, no. 4, pages 211–229, 2003.
- [Navarro2016] Benjamin Navarro, Andrea Cherubini, Aicha Fonte, Robin Passama, Gerard Poisson et Philippe Fraise. *An ISO10218-compliant adaptive damping controller for safe physical human-robot interaction*. In 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), volume 2016-June, pages 3043–3048. IEEE, may 2016.
- [Niemeyer1991a] G. Niemeyer et J.-J.E. Slotine. *Transient shaping in force-reflecting teleoperation*. In Fifth International Conference on Advanced Robotics ’Robots in Unstructured Environments, pages 261–266 vol.1. IEEE, 1991.
- [Niemeyer1991b] Gunter Niemeyer et Jean Jacques E. Slotine. *Stable Adaptive Teleoperation*. IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 16, no. 1, pages 152–162, 1991.
- [Nowak2003] Kristine L. Nowak et Frank Biocca. *The Effect of the Agency and Anthropomorphism on users’ Sense of Telepresence, Copresence, and Social Presence in Virtual Environments*. Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol. 12, no. 5, pages 481–494, 2003.

-
- [Ott2010] Christian Ott, Ranjan Mukherjee et Yoshihiko Nakamura. *Unified Impedance and Admittance Control*. In 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 554–561. IEEE, may 2010.
- [Ott2015] Christian Ott, Ranjan Mukherjee et Yoshihiko Nakamura. *A Hybrid System Framework for Unified Impedance and Admittance Control*. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 78, no. 3-4, pages 359–375, jun 2015.
- [Peshkin2001] M.A. Peshkin, J.E. Colgate, Witaya Wannasuphoprasit, C.A. Moore, R.B. Gillespie et Prasad Akella. *Cobot architecture*. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 17, no. 4, pages 377–390, 2001.
- [Poisson2019] Gérard Poisson et Laurence Nouaille. *Evolution des architectures mécaniques des robots médicaux*. 2019.
- [Pratt1995] Gill A. Pratt et Matthew M. Williamson. *Series elastic actuators*. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 1, pages 399–406, 1995.
- [Raibert1981] M. H. Raibert et J. J. Craig. *Hybrid Position/Force Control of Manipulators*. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 103, no. 2, pages 126–133, jun 1981.
- [Raju1989] G.J. Raju, G.C. Verghese et T.B. Sheridan. *Design issues in 2-port network models of bilateral remote manipulation*. In *Proceedings, 1989 International Conference on Robotics and Automation*, pages 1316–1321. IEEE Comput. Soc. Press, 1989.
- [Raugel2019] Ewen Raugel, Jan Opderbecke, Marie Claire Fabri, Lorenzo Brignone et Vincent Rigaud. *Operational and scientific capabilities of Ariane, Ifremer’s hybrid ROV*. *OCEANS 2019 - Marseille, OCEANS Marseille 2019*, vol. 2019-June, pages 1–7, 2019.
- [Reed2004] Kyle Reed, Michael Peshkin, J.E. Colgate et James Patton. *Initial studies in human-robot-human interaction : Fitts’ law for two people*. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA ’04. 2004*, volume 2004, pages 2333–2338 Vol.3. IEEE, 2004.
- [Salisbury1980] J. Salisbury. *Active stiffness control of a manipulator in cartesian coordinates*. In *1980 19th IEEE Conference on*
-

- Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes, volume 1, pages 95–100. IEEE, dec 1980.
- [Sato1987] Tomomasa Sato et Shigeoki Hirai. *Language-Aided Robotic Teleoperation System (LARTS) for Advanced Teleoperation*. IEEE Journal on Robotics and Automation, vol. 3, no. 5, pages 476–481, 1987.
- [Schmidtler2014a] Jonas Schmidtler, Christina Harbauer et Klaus Bengler. *Investigation of Human Behaviour in Pushing and Pulling Tasks for Direct Manipulation of a Collaborative Robot*. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter, no. October, 2014.
- [Schmidtler2014b] Jonas Schmidtler, Christin Hölzel, Verena Knott et Klaus Bengler. *Human centered assistance applications for production*. Procedia Manufacturing, no. July, 2014.
- [Secoli2011] Riccardo Secoli, Marie Helene Milot, Giulio Rosati et David J. Reinkensmeyer. *Effect of visual distraction and auditory feedback on patient effort during robot-assisted movement training after stroke*. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, vol. 8, no. 1, pages 1–10, 2011.
- [Sheridan1963] T.B. Sheridan et W.R. Ferrell. *Remote Manipulative Control with Transmission Delay*. IEEE Transactions on Human Factors in Electronics, vol. HFE-4, no. 1, pages 25–29, sep 1963.
- [Sheridan1978] Thomas B Sheridan, W. L. Verplank et T. L. Brooks. *Human/computer control of undersea teleoperators*. no. December 1978, 1978.
- [Sheridan1992] Thomas B. Sheridan. *Musings on Telepresence and Virtual Presence*. Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol. 1, no. 1, pages 120–126, jan 1992.
- [Siciliano1994] Bruno Siciliano, Stefano Chiaverini et Luigi Villani. *Force/position regulation of compliant robot manipulators*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 39, no. 3, pages 647–652, mar 1994.
- [Sigrist2013] Roland Sigrist, Georg Rauter, Robert Riener et Peter Wolf. *Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning : A review*. Psychonomic Bulletin and Review, vol. 20, no. 1, pages 21–53, 2013.

- [Simpson2004] B. D Simpson, R. S. Bolia et M. H. Draper. Spatial audio display concepts supporting situation awareness for operators of unmanned aerial vehicles, chapitre 6, pages 61–66. HPSAII, 2004.
- [Skaar1994] Steven B Skaar. Teleoperation and Robotics in Space. 1994.
- [Smith1994] Jennifer A Smith. *Impedance Control Implementations*. no. 1, pages 1216–1221, 1994.
- [Spong1987] M. W. Spong. *Modeling and control of elastic joint robots*. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME, vol. 109, no. 4, pages 310–319, 1987.
- [Steelman1969] Herbert Stanley Steelman. The Grope-1 System. Analysis of Friction and Backlash Problems. Master’s thesis, 1969.
- [Suleiman2016] Wael Suleiman. *On inverse kinematics with inequality constraints : new insights into minimum jerk trajectory generation*. Advanced Robotics, vol. 30, no. 17-18, pages 1164–1172, sep 2016.
- [Surdilovic1996] D Surdilovic et J Kirchhof. *A new position based force/impedance control for industrial robots*. In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 1, pages 629–634. IEEE, 1996.
- [Tachi2003] Susumu Tachi, Kiyoshi Komoriya, Kazuya Sawada, Takashi Nishiyama, Toshiyuki Itoko, Masami Kobayashi et Kozo Inoue. *Telexistence cockpit for humanoid robot control*. Advanced Robotics, vol. 17, no. 3, pages 199–217, 2003.
- [Taylor1995] R.H. Taylor, Janez Funda, Ben Eldridge, Steve Gomory, Kreg Gruben, David LaRose, Mark Talamini, Louis Kavoussi et James Anderson. *A telerobotic assistant for laparoscopic surgery*. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, vol. 14, no. 3, pages 279–288, 1995.
- [Tesla1898] Neclos Tesla. *Method of and Apparatus for Controlling Mechanism of Moving Wessels*, 1898.
- [Tian2020] Wei Tian, Mingxing Fan, Cheng Zeng, Yajun Liu, Da He et Qi Zhang. *Telerobotic spinal surgery based on 5g network : The first 12 cases*. Neurospine, vol. 17, no. 1, pages 114–120, 2020.

- [Tonietti2005] Giovanni Tonietti, Riccardo Schiavi et Antonio Bicchi. *Design and control of a variable stiffness actuator for safe and fast physical human/robot interaction*. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 2005, no. April, pages 526–531, 2005.
- [Vanderborght2013] B. Vanderborght, A. Albu-Schaeffer, A. Bicchi, E. Burdet, D. G. Caldwell, R. Carloni, M. Catalano, O. Eiberger, W. Friedl, G. Ganesh, M. Garabini, M. Grebenstein, G. Grioli, S. Haddadin, H. Hoppner, A. Jafari, M. Laffranchi, D. Lefeber, F. Petit, S. Stramigioli, N. Tsagarakis, M. Van Damme, R. Van Ham, L. C. Visser et S. Wolf. *Variable impedance actuators : A review*. Robotics and Autonomous Systems, vol. 61, no. 12, pages 1601–1614, 2013.
- [Vieyres2003] Pierre Vieyres, Gérard Poisson, Fabien Courrèges, Olivier Mérigeaux et Philippe Arbeille. *The TERESA project : From space research to ground tele-echography*. Industrial Robot, vol. 30, no. 1, pages 77–82, 2003.
- [Vilchis2001] G.Adriana Vilchis, Jocelyne Troccaz, Philippe Cinquin, Fabien Courrèges, Gérard Poisson et Bertrand Tondu. *Robotic Tele-Ultrasound System (TER) : Slave Robot Control*. IFAC Proceedings Volumes, vol. 34, no. 9, pages 425–430, 2001.
- [Wang Wei2004] Wang Wei et Yuan Kui. *Teleoperated manipulator for leak detection of sealed radioactive sources*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004, volume 2004, pages 1682–1687 Vol.2. IEEE, 2004.
- [Whitney1977] Daniel E. Whitney. *Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions*. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 99, no. 2, pages 91–97, jun 1977.
- [Yanco2004] H.A. Yanco et Jill Drury. *Classifying human-robot interaction : an updated taxonomy*. In 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No.04CH37583), volume 3, pages 2841–2846. IEEE, 2004.
- [Yoerger1987] D. Yoerger et J.-J. Slotine. *Supervisory control architecture for underwater teleoperation*. In Proceedings. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation,

- volume 4, pages 2068–2073. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1987.
- [Yokokohji1994] Y. Yokokohji et T. Yoshikawa. *Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling-formulation and experiment*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 10, no. 5, pages 605–620, 1994.
- [Yoon2004] W.-K. Yoon, Toshihiko Goshozono, Hiroshi Kawabe, Masahiro Kinami, Yuichi Tsumaki, Masaru Uchiyama, Mitsushige Oda et Toshitsugu Doi. *Model-Based Space Robot Teleoperation of ETS-VII Manipulator*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 20, no. 3, pages 602–612, jun 2004.
- [Yoshikawa1987] Tsuneo Yoshikawa. *Dynamic hybrid position/force control of robot manipulators—Description of hand constraints and calculation of joint driving force*. IEEE Journal on Robotics and Automation, vol. 3, no. 5, pages 386–392, oct 1987.
- [Yoshikawa1988] Tsuneo Yoshikawa, Toshiharu SUGIE et Masaki TANAKA. *Dynamic hybrid position/force control of robot manipulators. Controller design and experiment*. Journal of the Robotics Society of Japan, vol. 6, no. 5, pages 380–387, 1988.
- [Zeng1997] Ganwen Zeng et Ahmad Hemami. *An overview of robot force control*. Robotica, vol. 15, no. 5, pages 473–482, 1997.

Table des figures

1.1	Schéma de principe d'une téléopération bidirectionnelle [Mahvash2005] .	7
1.2	Robot porte-sonde-échographique Syrtech à 3 ddl (à gauche) (Figure 1.2a) et sonde fictive utilisée pour la téléopération de Syrtech (à droite) (Figure 1.2b).	10
1.3	1.3a Robot porte-sonde de Télé-Échographie Robotisée (TER). 1.3b Robot Teresa, à 4 ddl, imaginé pour des échographies spatiales (projet Agence Spatiale Européenne -ESA-). 1.3c Robot Otelo1, à 6 ddl, (projet européen Otelo). 1.3d Robot Estele à 4 ddl. 1.3e Robot Melody à 4 ddl. 1.3f Robot Prosit à 4 ddl.	11
1.4	1.4a Le gant haptique Dexmo. 1.4b Le Space Exoskeleton Controller (SPOC).	13
1.5	1.5a le Virtuose 6D, 1.5b le Phantom omni, 1.5c le Falcon.	14
1.6	Asservissement bilatéral position/position	19
1.7	Asservissement asymétrique - position/force	20
1.8	Le réseau à deux ports	23
1.9	1.9a le robot Zeus et son poste de téléopération. 1.9b Le robot Da Vinci et son poste de téléopération. 1.9c Le robot DLR Micro Surge. 1.9d Le robot Sina flex et son poste de téléopération.	26
2.1	les 6 modes de proximité humain-robot d'après YANCO	37
2.2	les 3 niveaux d'interaction humain/robot en industrie	38
2.3	Schémas d'organisation de l'équipe cobotique	40
2.4	les niveaux d'autonomie dans les applications robotiques [Goodrich-2008]	42
2.5	Schéma bloc de la commande en amortissement. Notations : s variable de Laplace, J matrice jacobienne, J^{-1} son inverse et J^T sa transposée	48
2.6	Schéma bloc de la commande en raideur active	49
2.7	Schéma bloc de la commande en impédance	52
2.8	Robot Orion dans le Gantry de protonthérapie (Baumeyer 2017)	53
2.9	Schéma bloc de la commande en admittance	54

2.10	Schéma bloc de la commande hybride en impédance et admittance	55
2.11	Schéma bloc de la commande hybride position/force	57
2.12	Schéma de principe du composant cobotique compliant. La partie droite entre θ et q peut être réelle ou virtuelle. L'écart entre la sortie θ du motoréducteur et la variable articulaire q est appelé "déviation angulaire interne".	58
2.13	Collision frontale entre l'effecteur du robot et la paume de la main : (a) position initiale du robot; (b) position avant collision; (c) position lors de la collision; (d) Phase de collision robot-environnement; (e) position juste après dégagement de la main; (f) position finale du robot.	62
2.14	Collision frontale entre l'effecteur du robot et la paume de la main : (a) variable articulaire q_2 ; (b) raideur virtuelle du ressort K_2 ; (c) forces externes F_{ext} . La période d'échantillonnage, comme l'unité des abscisses, sont sur cette figure de 0,001 s.	62
2.15	Data points	65
2.16	Collision frontale entre l'effecteur du robot et le fantôme flexible : (a) variable articulaire q_2 ; (b) raideur virtuelle du ressort K_2 ; (c) forces externes F_{ext}	65
3.1	les systèmes robotiques utilisés	76
3.2	Simulation sous Catia V5 de différentes configurations de l'ensemble robot & canne porte-sonde échographique lors d'une échographie de la carotide.	80
3.3	Modèle global de la commande en téléopération.	82
3.4	Le Générateur de consigne pour la commande en téléopération.	82
3.5	Comparaison des réponses du GIK (à droite) et du MGI (à gauche) pour générer des consignes articulaires (en simulation)	85
3.6	Le contrôleur de la boucle de commande par téléopération	86
3.7	Simulation de la téléopération en sens direct pour une commande de position dans l'espace cartésien	87
3.8	Résultats de simulation d'une téléopération en sens direct, pour un contrôle en position et orientation dans l'espace cartésien	88
3.9	Téléopération pour une commande en position du robot UR3	89
3.10	Téléopération pour une commande en position et orientation du UR3	90
3.11	Modélisation du contact sonde-patient	91
3.12	Modèle de commande du bras maître pour la téléopération bilatérale	93
3.13	Simulation du comportement du bras maître en réponse à un retour d'effort provenant du robot esclave.	94

3.14	Schéma fonctionnel d'une téléopération bidirectionnelle avec retour d'effort.	95
3.15	Représentation des positions et forces au poste maître pour une téléopération avec retour d'effort	97
3.16	Représentation des positions et forces au poste esclave pour une téléopération avec retour d'effort	97
3.17	Téléopération bilatérale : position du bras esclave (robot UR3)	99
3.18	Téléopération bilatérale : phénomènes au poste maître (Phantom Omni)	99
3.19	Schéma fonctionnel d'un environnement de comanipulation	100
3.20	Boucle de commande en admittance cartésienne pour le robot UR3	101
3.21	Schéma de la commande en admittance appliquée au robot UR3	101
3.22	Schéma fonctionnel du contrôleur d'admittance	103
3.23	Schéma fonctionnel du convertisseur de vitesse cartésien (CVC).	104
3.24	Comanipulation sur l'axe X.	105
3.25	Poignée à double prise pour la génération de couple en comanipulation	107
3.26	Poignée à double prise dans le plan XZ	107
3.27	Enchaînement séquentiel entre phases de comanipulation et de téléopération	108
3.28	Enchaînement séquentiel entre phases de comanipulation et de téléopération avec des zones de passages	110
3.29	Le mode C->T : Comanipulation vers Téléopération	112
3.30	Le mode T->C : Téléopération vers Comanipulation	114
4.1	Principe de la commande en téléopération et comanipulation combinée.	120
4.2	Simulation de la commande combinée de T et C : contrôle en téléopération pour les axes X et Y et en comanipulation pour l'axe Z.	127
4.3	Commande combinée de T et C du robot UR3 : contrôle en téléopération pour les axes X et Y et en comanipulation pour l'axe Z.	128
4.4	Simulation de la commande combinée par mixage de T et C avec $\alpha=0,5$	130
4.5	Commande combinée du robot UR3 par mixage de T et C avec $\alpha=0,5$	131
4.6	Simulation de la commande combinée de T et C : avec gains différents entre téléopération et comanipulation.	133
4.7	Commande combinée de T et C : avec gains différents entre téléopération et comanipulation.	134
4.8	Simulation de la commande combinée de T et C : gain α_1 variables entre téléopération et comanipulation sur l'axe X.	136
4.9	Commande combinée de T et C : gain α_1 variables entre téléopération et comanipulation sur l'axe X.	137

A.1	La représentation des paramètres de DH (convention initiale) modélisant le passage entre deux repères successifs R_n et R_{n-1}	2
A.2	La représentation des paramètres de DHm (convention modifiée) modélisant le passage entre deux repères successifs R_n et R_{n-1}	3
A.3	Schéma cinématique du robot UR3. La position ici illustrée correspond à celle des 6 variables articulaires θ_i nulles. Les orientations des 6 axes Z_i sont choisies compatibles avec les sens des rotations des 6 articulations.	4
A.4	Les différentes singularités des robots Universal Robots (UR)	6
A.5	Espace de travail des robots UR. La zone grise représente l'espace en proximité des frontières, la zone bleue est la zone recommandée où les aspects sont distincts.	8
A.6	Détermination du paramètre θ_1 , avec (x_0, y_0) comme plan de projection.	10
A.7	Détermination du paramètre θ_5 , avec (x_0, y_0) comme plan de projection.	11
A.8	Détermination du paramètre θ_6 , avec les coordonnées sphériques.	12
A.9	Détermination des paramètres θ_3 , θ_2 et θ_4	14

Liste des tableaux

1.1	Tableau récapitulatif du vocabulaire dédié-téléopération	28
3.1	Paramètres de Denavit-Hartenberg modifié du Phantom Omni de Sensible.	78
3.2	Paramètres DHm du robot porte-sonde échographique (robot UR3 à 6 ddl & canne porte-sonde échographique).	81
A.1	Tableau DH modifié du robot UR3.	5



Annexe 1 : Le robot UR3, modélisations
pour la commande

A.1 Tableau de Denavit-Hartenberg modifié (DHm) pour le robot UR3 de Universal Robots

La convention de Denavit-Hartenberg permet de spécifier le positionnement relatif de deux segments articulés consécutifs d'un robot polyarticulé, avec quatre paramètres seulement. Cela se fait avec une méthodologie particulière et une certaine restriction dans le choix des systèmes de coordonnées (des repères attachés auxdits segments). On trouve deux définitions légèrement différentes de cette convention.

- La convention de Denavit-Hartenberg, dite DH, introduite en 1955, par Jacques Denavit et Richard S. Hartenberg.

En utilisant cette première approche, chaque lien entre 2 segments consécutifs peut être décrit par une transformation de coordonnées du système de coordonnées courant (attaché au segment courant du robot - ci-dessous segment n), au système de coordonnées précédent (attaché au segment précédent du robot - ci-dessous segment $n-1$). La transformation homogène permettant un changement de coordonnées du repère n au repère $n-1$, et notée ${}^{n-1}T_n$, s'écrit comme ci-après à partir des 4 paramètres d_n , θ_n , a_n et α_n (voir figure A.1).

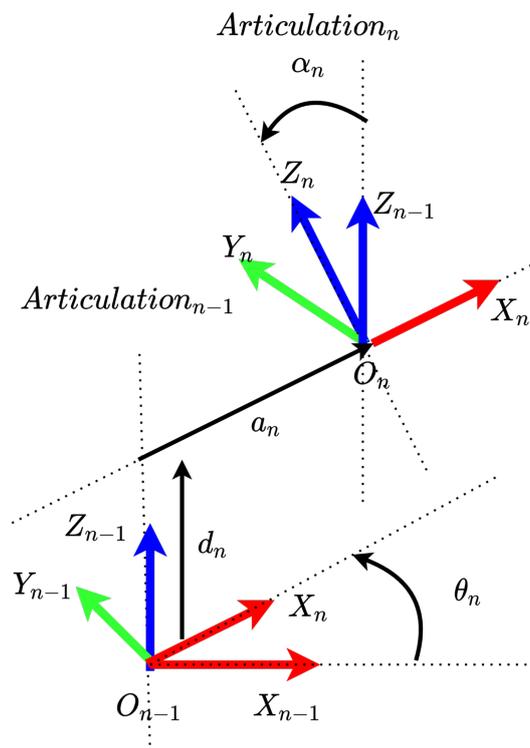


FIGURE A.1 – La représentation des paramètres de DH (convention initiale) modélisant le passage entre deux repères successifs R_n et R_{n-1} .

$${}^{n-1}T_n = \text{Trans}_{z_{n-1}}(d_n) \cdot \text{Rot}_{z_{n-1}}(\theta_n) \cdot \text{Trans}_{x_n}(a_n) \cdot \text{Rot}_{x_n}(\alpha_n)$$

$${}^{n-1}T_n = \begin{pmatrix} \cos(\theta_n) & -\sin(\theta_n).\cos(\alpha_n) & \sin(\theta_n).\sin(\alpha_n) & a_n.\cos(\theta_n) \\ \sin(\theta_n) & \cos(\theta_n).\cos(\alpha_n) & -\cos(\theta_n).\sin(\alpha_n) & a_n.\sin(\theta_n) \\ 0 & \sin(\alpha_n) & \cos(\alpha_n) & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

— La convention dite de “Denavit-Hartenberg modifiée”, notée DHm, aussi appelée convention de Khalil-Kleininger, et mise en valeur depuis 1986.

Par rapport à la convention DH classique, l’origine O_{i-1} et l’axe Z_{i-1} du repère R_{i-1} sont placées sur l’axe de l’articulation $i-1$ et non sur l’axe de l’articulation i (voir figure A.2).

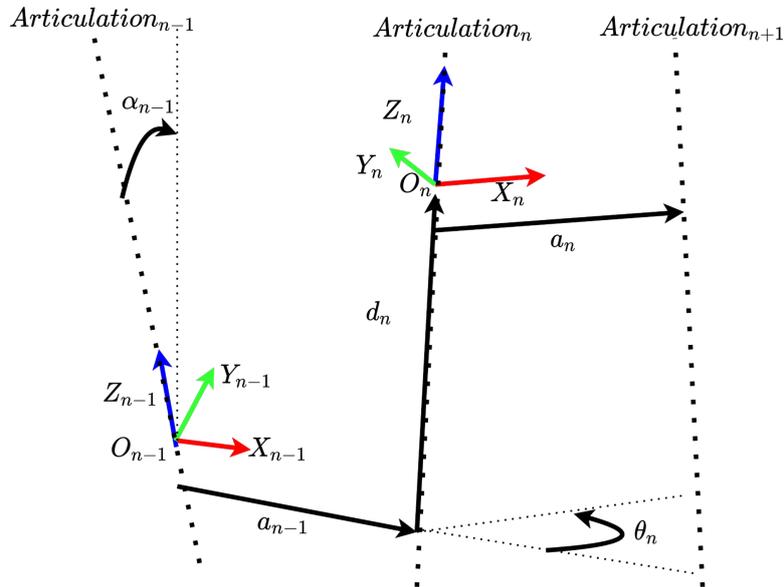


FIGURE A.2 – La représentation des paramètres de DHm (convention modifiée) modélisant le passage entre deux repères successifs R_n et R_{n-1} .

La matrice de transformation homogène ${}^{n-1}T_n$ est alors exprimée via les relations suivantes :

$${}^{n-1}T_n = Rot_{x_{n-1}}(\alpha_{n-1}).Trans_{x_{n-1}}(a_{n-1}).Rot_{z_n}(\theta_n).Trans_z(d_n)$$

$${}^{n-1}T_n = \begin{pmatrix} \cos(\theta_n) & -\sin(\theta_n) & 0 & a_{n-1} \\ \sin(\theta_n).\cos(\alpha_{n-1}) & \cos(\theta_n).\cos(\alpha_{n-1}) & -\sin(\alpha_{n-1}) & -d_n.\sin(\alpha_{n-1}) \\ \sin(\theta_n).\sin(\alpha_{n-1}) & \cos(\theta_n).\sin(\alpha_{n-1}) & \cos(\alpha_{n-1}) & d_n.\cos(\alpha_{n-1}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Dans ses documentations techniques, Universal Robots a utilisé la convention classique DH de 1955 pour décrire les relations mécaniques entre les différents segments de la chaîne cinématique pour ses cobots.

Comme la convention DHm est celle qui est maintenant la plus utilisée dans le domaine de la recherche et qu'elle est de notre point de vue celle qui présente le meilleur caractère générique, c'est celle que nous avons retenue au cours de nos travaux. Le tableau correspondant DHm du robot UR3 est donné ci-après.

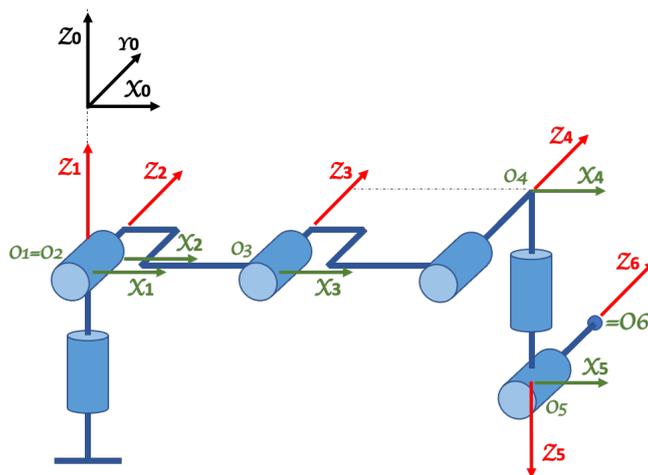


FIGURE A.3 – Schéma cinématique du robot UR3. La position ici illustrée correspond à celle des 6 variables articulaires θ_i nulles. Les orientations des 6 axes Z_i sont choisies compatibles avec les sens des rotations des 6 articulations.

Le schéma de la figure A.3 montre les positions des repères relatifs associés à chaque segment du robot UR3. Il est à noter que l'origine du repère R_0 , pour les premiers modèles des robots commercialisés par Universal Robots, n'est pas située à la base du robot, mais décalée selon l'axe Z. Pour l'UR3, ce décalage est de 400 mm vers le haut, comme visible sur le schéma.

A.2 Les singularités des robots Universal Robots (UR)

La norme ISO-10218, concernant les exigences de sécurité pour les robots industriels et dispositifs robotiques, définit une singularité robotique comme une "condition causée par l'alignement colinéaire de deux ou plusieurs axes du robot, entraînant un mouvement et des vitesses imprévisibles du robot", et doit donc être évitée. S'agissant des robots sériels, il existe trois types de singularités : les singularités de poignet, de coude et d'épaule. Ces 3 types sont possiblement rencontrés sur les robots UR, qui sont des robots

TABLEAU A.1 – *Tableau DH modifié du robot UR3.*

Unités du tableau : radians et mm				
Liaison	α_{i-1}	a_{i-1}	θ_i	r_i
1	0	0	θ_1	-248.1
2	$-\pi/2$	0	θ_2	0
3	0	243.65	θ_3	0
4	0	213.25	θ_4	112.35
5	$-\pi/2$	0	θ_5	85.35
6	$\pi/2$	0	θ_6	81.9

à 6 degrés de liberté :

1. La singularité de poignet : elle se produit lorsque les axes des articulations 4 et 6 deviennent parallèles. Elle peut provoquer une rotation non contrôlée de ces articulations. Pour les robots UR, cela correspond à $\theta_5=0^\circ$, $\theta_5=\pm 180^\circ$ ou $\theta_5=\pm 360^\circ$.
2. La singularité de coude : elle se produit lorsque les axes des articulations 2, 3 et 4 sont coplanaires, entraînant le blocage du coude en position. Pour les robots UR, cela correspond à $\theta_3=0^\circ$.
3. La singularité d'épaule : elle se produit lorsque le point d'intersection des axes des articulations 5 et 6 s'aligne sur le plan passant par les axes des articulations 1 et 2. On a alors une perte de mobilité en translation dans la direction des axes des articulations 2, 3 et 4 (qui sont 3 axes parallèles).

A.3 Le Modèle Géométrique Inverse (MGI) des robots Universal Robots

Le modèle géométrique inverse (MGI) donne les paramètres articulaires (angles θ_1 à θ_6), en se basant sur une position et orientation désirées du repère terminal, spécifiées par la transformation 0T_6 .

Il est important de rappeler que ce problème peut ne pas avoir de solution ou qu'il peut conduire à des solutions multiples. Concernant les robots Universal Robots, si les

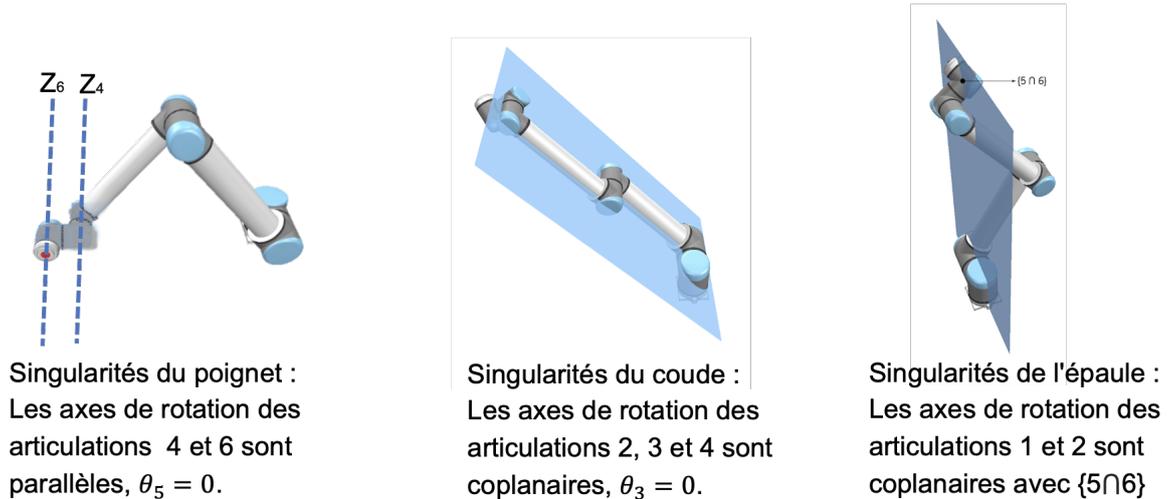


FIGURE A.4 – Les différentes singularités des robots Universal Robots (UR).

solutions sont multiples, elles sont alors soit au nombre de 4, soit au nombre de 8. Autrement dit, le robot UR3 peut présenter jusqu'à 8 aspects distincts pour une position et orientation demandées de l'organe terminal.

Les solutions que nous écrivons ci-après sont données, pour toutes les articulations, de façon que : $1 \text{ à } 6 \in [0, 2\pi[$.

La matrice de transformation 0T_6 peut s'écrire de deux manières.

D'une part comme défini à l'Annexe 1 :

$${}^0T_6 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \cdot {}^4T_5 \cdot {}^5T_6$$

D'autre part par la représentation suivante, où R est la matrice de rotation de l'effecteur et P le vecteur translation d'origine.

$${}^0T_6 = \begin{pmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Les éléments de cette matrice seront notés comme ci-dessous, suivant la notation dite "snap" :

$${}^0T_6 = \begin{pmatrix} {}^0s_{6,x} & {}^0n_{6,x} & {}^0a_{6,x} & {}^0P_{6,x} \\ {}^0s_{6,y} & {}^0n_{6,y} & {}^0a_{6,y} & {}^0P_{6,y} \\ {}^0s_{6,z} & {}^0n_{6,z} & {}^0a_{6,z} & {}^0P_{6,z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Notations utilisées concernant les points 3D de l'espace et leurs coordonnées homogènes

- On note O_n le point origine du repère R_n .
Exemple : O_5 est l'origine de R_5 .
Ce point possède 3 coordonnées, quel que soit le repère dans lequel il est exprimé.
C'est un point 3D.
- On associe à O_n , les coordonnées homogènes P_n .
- Les coordonnées homogènes P_n dans le repère R_i sont notées iP_n .
- Le vecteur s_n est le vecteur unitaire donnant la direction de l'axe x du repère R_n vu du repère R_i .
- Le vecteur n_n est le vecteur unitaire donnant la direction de l'axe y du repère R_n vu du repère R_i .
- Le vecteur a_n est le vecteur unitaire donnant la direction de l'axe z du repère R_n vu du repère R_i .

Exemple : les coordonnées homogènes P_5 dans R_0 sont notées 0P_5 .

- La matrice de transformation homogène jT_i permet le changement de coordonnées homogènes entre les repères R_i et R_j :

$${}^jP = {}^jT_i \cdot {}^iP$$

Exemple : les coordonnées homogènes P_5 dans R_0 s'obtiennent par :

$${}^0P_5 = {}^0T_6 \cdot {}^6P_5 \text{ à partir des coordonnées homogènes } P_5 \text{ dans } R_6$$

On peut aussi écrire :

$${}^0P_5 = ({}^0P_{5,x}, {}^0P_{5,y}, {}^0P_{5,z}, 1)^T$$

Remarque : la 4e colonne de 0T_6 représente les coordonnées homogènes P_6 :

$${}^0P_6 = ({}^0P_{6,x}, {}^0P_{6,y}, {}^0P_{6,z}, 1)^T$$

Le robot UR3 présente une structure mécanique qui force à établir le MGI de manière atypique, pour laquelle nous calculons les angles dans l'ordre suivant :

$$\theta_1, \theta_5, \theta_6, \theta_3, \theta_2, \theta_4.$$

Pour une position désirée du centre d'outil de l'organe terminal située à l'intérieur de l'espace du travail (une sphère dont une zone centrale tubulaire est inaccessible), et hors des singularités du robot, ce dernier présente 4 ou 8 aspects géométriques distincts, selon l'orientation désirée de cet organe terminal.

Globalement, en s'approchant des frontières de l'espace de travail, l'orientation du poignet devient de plus en plus contrainte : loin de ces frontières, toutes les orientations sont possibles (il y a alors 8 aspects), en proximité des frontières il n'est plus possible d'orienter l'organe terminal de façon quelconque. L'annexe 4 illustre ce comportement pour quelques exemples distincts.

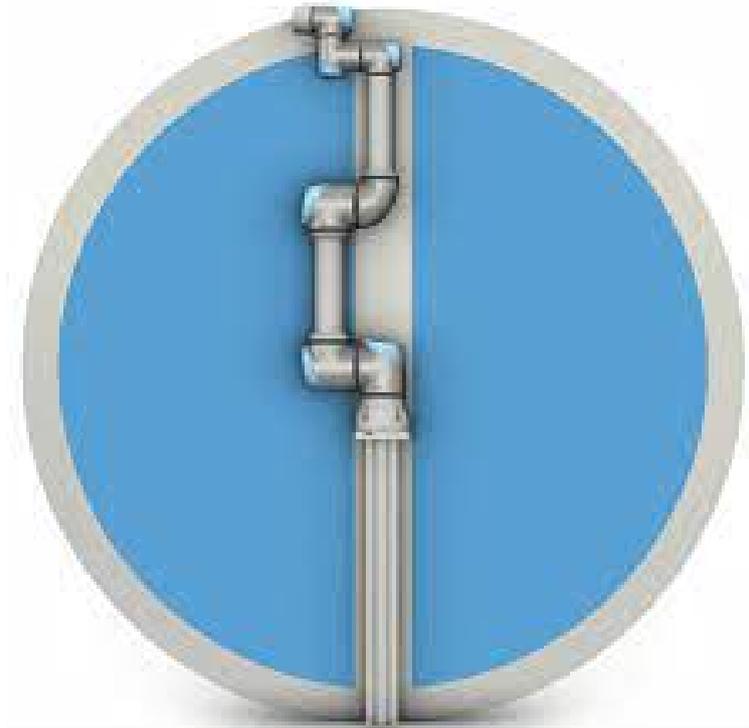


FIGURE A.5 – Espace de travail des robots UR. La zone grise représente l'espace en proximité des frontières, la zone bleue est la zone recommandée où les aspects sont distincts.

A.3.1 Détermination de θ_1

Le paramètre θ_1 est obtenu à partir de la figure A.6 et en particulier à partir des deux triangles rectangles OB^0P_5 (rectangle en B) et OC^0P_5 (rectangle en C), dans lesquels 0P_5 est la projection de O_5 (point origine du repère 5) dans le plan (x_0, y_0) .

La position du point 0O_5 (coordonnées homogènes) s'obtient à partir de la transformation 0T_6 et de l'expression de la position du point O_5 dans le repère R_6 (notée, 6O_5).

On a donc :

$$^0O_5 = ^0T_6 \cdot ^6O_5 \text{ avec } ^6O_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -d_6 & 1 \end{pmatrix}^T \text{ (voir figure A.6)}$$

$$^0O_5 = \begin{pmatrix} ^0p_{6,x} & ^0p_{6,y} & ^0p_{6,z} - d_6 \end{pmatrix}^T \quad ^0P_5 = ^0O_5 \text{ projeté sur le plans } (x_0, y_0) :$$

$$^0P_5 = \begin{pmatrix} ^0p_{6,x} & ^0p_{6,y} \end{pmatrix}^T$$

θ_1 peut s'écrire comme la somme de 3 angles :

$$\theta_1 = \alpha_1 + \beta_1 + \pi/2$$

L'angle α_1 est déterminé dans le triangle rectangle OB^0P_5 dont les 2 côtés sont $^0P_{5,x}$ et $^0P_{5,y}$ par la fonction atan2 :

$$\alpha_1 = \text{atan2}({}^0P_{5,y}, {}^0P_{5,x})$$

L'angle β_1 est déduit par le triangle OC^0P_5 formé de deux côtés des longueurs : $\|{}^0P_{5,(x,y)}\|$ et OC . On peut déduire de ce triangle que :

$$\cos(\beta_1) = d_4 / \|{}^0P_{5,(xy)}\|.$$

d'où on tire les 2 solutions pour β_1 :

$$\beta_1 = \delta_1 * \text{acos} \left(\frac{d_4}{\|{}^0P_{5,(x,y)}\|} \right) \Leftrightarrow \delta_1 * \text{acos} \left(\frac{d_4}{\sqrt{({}^0P_{5,x}^2 + {}^0P_{5,y}^2)}} \right) \text{ Avec :}$$

$$\delta_1 = \left\{ -1 ; 1 \right\}$$

NB : Ces deux solutions sont distinctes sauf pour $H=0$, auquel cas les 2 solutions sont identiques et nulles ($\beta_1 = 0$).

Alors :

$$\theta_1 = \text{atan2}({}^0P_{5,y}, {}^0P_{5,x}) + \delta_1 * \text{acos} \left(\frac{d_4}{\sqrt{({}^0P_{5,x}^2 + {}^0P_{5,y}^2)}} \right) + \pi/2 \quad (\text{A.1})$$

Les deux solutions pour θ_1 correspondent au fait que l'épaule peut se trouver en configuration "gauche" ou "droite". L'utilisation de la fonction atan2 est primordiale pour prendre convenablement en compte les signes et assurer un bon comportement quand ${}^0P_{5,x} = 0$. Par ailleurs, il est constaté que physiquement, aucune configuration du robot qui rend $\sqrt{({}^0P_{5,x}^2 + {}^0P_{5,y}^2)} \lll |d_4|$ n'est pas possible. Ainsi, les solutions du MGI existent toujours, dès lors que les solutions α_1 et/ou β_1 existent.

A.3.2 Détermination de θ_5

Le paramètre θ_5 est obtenu à partir de la figure A.7 et en particulier à partir des trois triangles rectangles OB^0P_6 (rectangle en B), OC^0P_6 (rectangle en C), et ${}^0P_6D^0P_5$ (rectangle en D), dans lesquels 0P_6 et 0P_5 sont les projections de O_6 (point origine du repère 6) et O_5 (point origine du repère 5) dans le plan (x_0, y_0) .

D'après la figure A3.3 :

$$\overrightarrow{CO} = -\overrightarrow{A^0P_6} = -(\overrightarrow{AD} + \overrightarrow{D^0P_6}); \text{ avec } \overrightarrow{AD} = d_4 \text{ et } \overrightarrow{D^0P_6} = d_6 \cdot \cos(\theta_5), \text{ donc}$$

$$\overrightarrow{CO} = -d_4 - d_6 \cdot \cos(\theta_5).$$

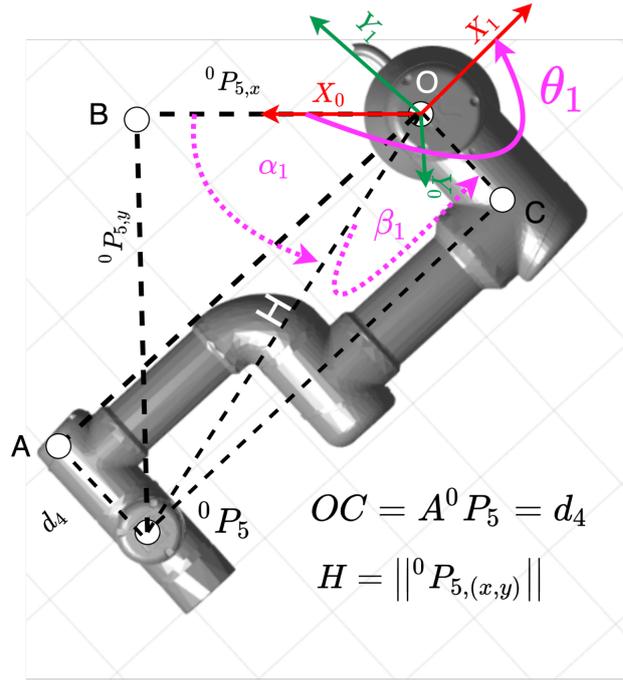


FIGURE A.6 – Détermination du paramètre θ_1 , avec (x_0, y_0) comme plan de projection.

Les deux triangles rectangles OB^0P_6 et OC^0P_6 partagent la même hypoténuse avec les extrémités O et 0P_6 fixes. On peut alors en déduire que le point C est le point B mais subit d'une transformation ; BO et B^0P_6 sont équivalentes aux projections de 0P_6 sur x_0 et y_0 du repère R_1 .

De plus, le point C du triangle OC^0P_6 est la projection du point 0P_6 sur y_1 du repère R_1 ; alors nous pouvons écrire :

$${}^1P_{6,y} = \overrightarrow{CO} = -d_4 - d_6 \cdot \cos(\theta_5).$$

Comme les deux repères R_1 et R_0 sont uniquement reliés par une rotation d'angle θ_1 selon Z ; nous pouvons donc exprimer 1P_6 en fonction d'une rotation de 0P_6 .

$${}^1P_6 = {}^0R_1^T \cdot {}^0P_6 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) & 0 \\ -\sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} {}^0P_{6,x} \\ {}^0P_{6,y} \\ {}^0P_{6,z} \end{pmatrix}$$

$${}^1P_{6,y} = -\sin(\theta_1) \cdot {}^0P_{6,x} + \cos(\theta_1) \cdot {}^0P_{6,y}$$

Les deux égalités de ${}^1P_{6,y}$ fournissent le système suivant :

$$-\sin(\theta_1) \cdot {}^0P_{6,x} + \cos(\theta_1) \cdot {}^0P_{6,y} = -d_4 - d_6 \cdot \cos(\theta_5)$$

Alors θ_5 :

$$\theta_5 = \delta_5 \cdot \text{acos} \left(\frac{\sin(\theta_1) \cdot {}^0P_{6,x} - \cos(\theta_1) \cdot {}^0P_{6,y} - d_4}{d_6} \right) \quad \text{Avec } \delta_5 = \left\{ -1 ; 1 \right\} \quad (\text{A.2})$$

Comme pour la détermination préalable, il existe deux solutions pour θ_5 , qui correspondent au fait que le poignet peut être dans la configuration "en dessus" ou "en dessous". Ceci est dû au fait que la somme $(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$ conduit, pour les deux solutions, à placer l'effecteur final dans la même position.

Il faut aussi noter qu'une solution est définie pour θ_5 à condition que la valeur dont il s'agit de déterminer l'arc cosinus (acos) ne dépasse pas 1 en valeur absolue.

Ce qui est équivalent à écrire :

$$|\sin(\theta_1) \cdot {}^0P_{6,x} - \cos(\theta_1) \cdot {}^0P_{6,y} - d_4| \leq d_6$$

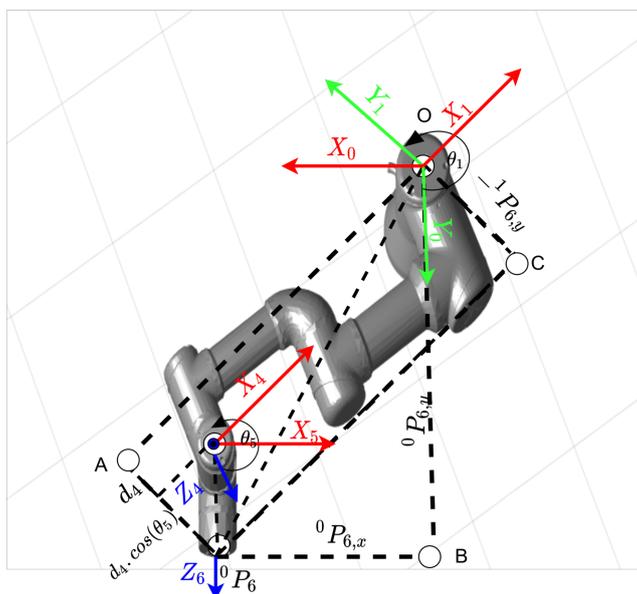


FIGURE A.7 – Détermination du paramètre θ_5 , avec (x_0, y_0) comme plan de projection.

A.3.3 Détermination de θ_6

Afin de trouver θ_6 , il faut noter que la position de l'axe y_1 vue du repère 6, peut être exprimée en coordonnées sphériques par l'intermédiaire des axes x_5 , y_5 et z_5 (voire figure A.8) :

$${}^6n_1 = [-\sin(\theta_5) \cdot \cos(\theta_6), \sin(\theta_5) \cdot \sin(\theta_6), -\cos(\theta_5)]$$

Pour obtenir θ_6 , nous identifions que 6n_1 est donné sous forme de rotation de θ_1 dans le plan (x, y) du repère 0, 6n_1 peut être exprimé depuis 6T_1 .

$$\begin{aligned}
{}^6T_1 &= {}^1T_6^{-1} \\
{}^6R_1 &= {}^6R_0 \cdot {}^0R_1 = {}^0R_6^T \cdot {}^0R_1 \\
{}^6n_1 &= [{}^6R_1(1,2), {}^6R_1(2,2), {}^6R_1(3,2)]
\end{aligned}$$

Nous pouvons en conclure que :

$$\theta_6 = \text{atan2} \left(\frac{{}^6n_{1,y}}{\sin(\theta_5)}, \frac{{}^6n_{1,x}}{\sin(\theta_5)} \right) \quad (\text{A.3})$$

Une telle solution est indéterminée si $\sin(\theta_5) = 0$. Dans ce cas, les axes des liaisons 2, 3, 4 et 6 sont alignés.

Ensuite, les axes 2, 3 et 4 peuvent seulement pivoter l'effecteur final (repère 6) autour du z_6 sans le déplacer. Ici la 6e articulation devient redondante, il suffit alors de donner une valeur arbitraire à θ_6 . Si les deux numérateurs des termes dont on calcule la fonction atan2 dans l'équation (3) sont nuls, la solution est également non définie. Dans ce cas, $\sin(\theta_5) = 0$ doit être nul, car les deux termes de l'équation 6y_1 sont égaux. En l'occurrence, la situation est identique à la situation précédente et θ_6 peut prendre n'importe quelle valeur arbitraire.

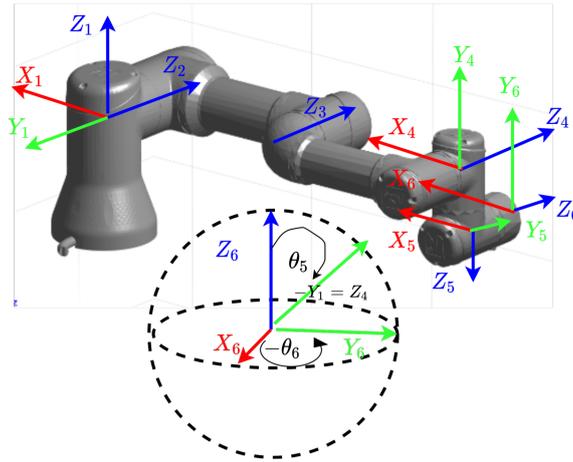


FIGURE A.8 – Détermination du paramètre θ_6 , avec les coordonnées sphériques.

A.3.4 Détermination de θ_3

Nous pouvons remarquer que les axes des trois articulations restantes (2, 3 et 4) sont parallèles et que l'ensemble constitue un manipulateur 3R planaire.

Il est alors possible d'exprimer 1T_4 (repère 4 par rapport au repère 1), puisque les étapes précédente nous ont fourni θ_1 , θ_5 et θ_6 , nous permettant ainsi de calculer leurs matrices de transformations homogènes 0T_1 , 4T_5 et 5T_6 respectivement.

D'après la figure Figure A.9 on tire que la longueur ${}^1p_{4,(x,z)}$ est déterminée à partir de l'angle α_3 . Cet angle α_3 peut être trouvé en utilisant la définition du cosinus dans le triangle ${}^0P_1^2P_3^3P_4$:

Les 2 triangles ${}^0P_1^2P_3^3P_4$ et ${}^0P_1X^3P_4$ rectangles en X partagent le même côté ${}^1P_{4(x,z)}$, alors en calculant la longueur de l'hypoténuse ${}^1P_{4(x,z)}$ on peut trouver l'angle voulu.

$$\|{}^1P_{4(x,z)}\| = \sqrt{{}^1P_{4,x}^2 + {}^1P_{4,z}^2}$$

Avec ${}^1P_{4,x}$ et ${}^1P_{4,z}$ les projections du point P_4 dans le repère R_1 , Il faut utiliser les transformations homogènes suivantes pour déterminer la position du point P_4 centre de l'articulation 4 dans le repère (x_1, z_1) .

$$\begin{aligned} {}^4T_6 &= {}^4T_5 \cdot {}^5T_6 \\ {}^1T_4 &= {}^1T_6 \cdot {}^4T_6^{-1} \\ \cos(\alpha_3) &= \frac{a_2^2 + a_3^2 - \|{}^1P_{4(x,z)}\|^2}{2 \cdot a_2 \cdot a_3} \end{aligned}$$

$$\text{Avec } \cos(\theta_3) = \cos(\pi - \alpha_3) = -\cos(\alpha_3)$$

$$\theta_3 = \delta_3 \cdot \text{acos} \left(\frac{a_2^2 + a_3^2 - \|{}^1P_{4(x,z)}\|^2}{-2 \cdot a_2 \cdot a_3} \right) \text{ Avec } \delta_3 = \left\{ -1 ; 1 \right\} \quad (\text{A.4})$$

Des solutions existent pour θ_3 , si l'argument de acos est inclus en $[-1, 1]$. Ceci est équivalent à $\|{}^1P_{4(x,z)}\| \in [||a_2 - a_3||, ||a_2 + a_3||]$. S'il existe des solutions, il y aura toujours deux solutions différentes, qui correspondent aux configurations "coude vers le haut" et "coude vers le bas".

A.3.5 Détermination de θ_2

L'angle θ_2 correspond à $\alpha_2 - \beta_2$ (voire figure A.9). α_2 , localisée dans le triangle ${}^0P_1^2P_3^3P_4$ est représenté au moyen des relations atan2 tandis que β_2 de triangle rectangle ${}^0P_1X^3P_4$ est représenté par une expression à partir de sinus :

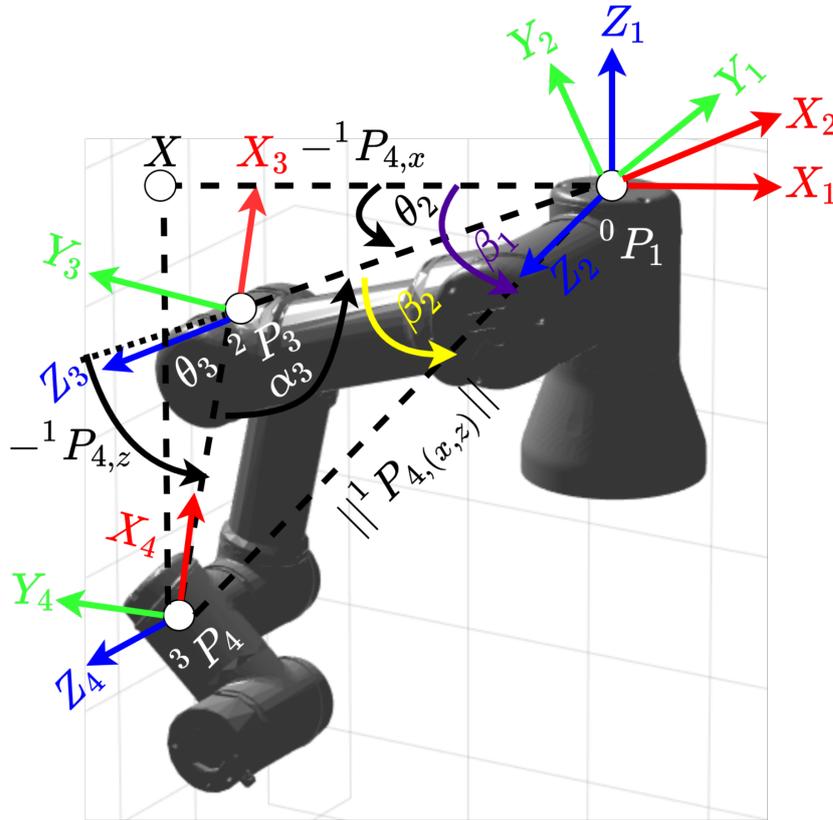
$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \text{atan2}(-{}^1p_{4,z}, -{}^1p_{4,x}) \\ \sin(\beta_2) &= \frac{-a_3 \cdot \sin(\alpha_3)}{\|{}^1P_{4(x,z)}\|^2} = \frac{-a_3 \cdot \sin(\pi - \theta_3)}{\|{}^1P_{4(x,z)}\|^2} = \frac{-a_3 \cdot \sin(\theta_3)}{\|{}^1P_{4(x,z)}\|^2} \\ \theta_2 &= \text{atan2}(-{}^1p_{4,z}, -{}^1p_{4,x}) - \text{asin} \left(\frac{-a_3 \cdot \sin(\theta_3)}{\|{}^1P_{4(x,z)}\|^2} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

A.3.6 Détermination de θ_4

Le dernier paramètre articulaire, soit θ_4 , est défini comme l'angle de passage de X_3 à X_4 mesuré autour de Z_4 .

θ_4 est donc dérivé de la matrice de transformation restante 3T_4 , en utilisant sa première colonne 3s_4 :

$$\begin{aligned}
{}^3T_6 &= {}^0T_3^{-1} \cdot {}^0T_6 \\
{}^3T_4 &= {}^3T_6 \cdot {}^6T_4 \\
{}^3s_4 &= [{}^3R_4(1,1), {}^3R_4(2,1), {}^3R_4(3,1)] \\
\theta_4 &= \text{atan2}({}^3s_{4,y}, {}^3s_{4,x})
\end{aligned} \tag{A.6}$$

FIGURE A.9 – Détermination des paramètres θ_3 , θ_2 et θ_4 .

A.3.7 Efficience et limites du présent modèle

Les solutions obtenues par le système des six équations préalablement définies constituent le Modèle Géométrique Inverse (MGI) du robot UR3.

Ce modèle est efficace dans une très large majorité de situations. Cependant, pour certains cas particuliers, le calcul n'aboutit pas à une solution pertinente, voire il fournit des solutions approchées. C'est le cas par exemple si on est très près de la frontière de l'espace de travail, ce peut être aussi le cas si la position opérationnelle que l'on cherche à atteindre a été calculée à partir d'une variable articulaire $\theta_5 = 0$. Nous illustrons ces limites dans l'Annexe 4 suivante.

Pour résoudre ce problème (autrement dit pour avoir un MGI pleinement robuste), nous avons développé un autre modèle géométrique inverse, via une autre approche. Cette

approche est la méthode dite de Paul. Le modèle de Paul fournit alors les solutions analytiques, donc les huit solutions attendues. Pour une question de lisibilité de la présente annexe, nous n’y détaillons pas le relativement “long” développement correspondant.

A.4 MGD, MGI et les 8 aspects du UR3

Le doctorant qui souhaiterait implémenter les MGD et MGI du robot UR3, à partir des expressions données en Annexes 1 et 3 précédentes, pourra commencer par s’assurer qu’il retrouve les résultats figurant dans les tableaux A4.1 à A4.3 suivants

Du MGD au MGI : exemples et enchaînement des deux modèles

En partant de quatre configurations articulaires particulières q_i , que nous avons choisies, nous avons commencé par établir les quatre positions opérationnelles X_i qui leur correspondent (via le MGD).

A partir de ces positions opérationnelles images (donc forcément valides), nous avons ensuite calculé la ou les solutions articulaires correspondantes pour chacun des quatre cas (via le MGI).

Les quatre configurations angulaires que nous avons choisies sont exprimées en degrés comme suit :

$$\begin{aligned} q_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & q_2 &= \begin{bmatrix} 20 & -60 & 100 & -30 & 60 & 20 \end{bmatrix} \\ q_3 &= \begin{bmatrix} 20 & -10 & -10 & 11 & 80 & 30 \end{bmatrix} & q_4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 60 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Il faut noter que pour q_1 , où toutes les variables angulaires sont nulles, nous avons la représentation cinématique de la figure A.3.

Calcul du MGD

Les quatre configurations q_i ont donné les quatre matrices de transformations homogènes suivantes.

$${}^0T_6(q_1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 456.9 \\ 0 & 0 & 1 & 194.25 \\ 0 & -1 & 0 & -333.45 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
{}^0T_6(q_2) &= \begin{bmatrix} 0.6573 & -0.4129 & 0.6304 & 267.2640 \\ -0.6268 & 0.1649 & 0.7615 & 260.4146 \\ -0.4184 & -0.8957 & -0.1504 & -270.5371 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^0T_6(q_3) &= \begin{bmatrix} 0.5048 & -0.1217 & 0.8546 & 457.8971 \\ -0.7239 & 0.4797 & 0.4959 & 301.3558 \\ -0.4703 & -0.8689 & 0.1541 & -204.5367 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^0T_6(q_4) &= \begin{bmatrix} -0.9524 & 0.3048 & 0 & 456.9 \\ 0 & 0 & 1 & 194.2500 \\ 0.3048 & 0.9524 & 0 & -333.45 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Calcul du MGI, cas 2

Nous montrons ci-dessous l'exemple du cas 2 (ayant pour entrée X_2 , image de q_2) qui conduit à trouver, via les expressions de l'annexe 3, huit configurations articulaires différentes $q_{2,i}$ (soit huit aspects), telles que $MGD(q_{2,i}) = MGD(q_2)$ pour tout i .

Naturellement, une de ces configurations (ici $q_{2,1}$) est identique à q_2 .

$$\begin{aligned}
q_{2,1} &= \begin{bmatrix} 20.0000 & -60.0000 & 100.0000 & -30.0000 & 60.0000 & 20.0000 \end{bmatrix} \\
q_{2,2} &= \begin{bmatrix} 20.0000 & -28.1993 & 107.1661 & 111.0332 & -60.0000 & -160.0000 \end{bmatrix} \\
q_{2,3} &= \begin{bmatrix} -114.8691 & 111.6010 & 106.6774 & -47.2175 & 75.4219 & -152.6944 \end{bmatrix} \\
q_{2,4} &= \begin{bmatrix} -114.8691 & -211.0063 & 100.4752 & 101.5920 & -75.4219 & 27.3056 \end{bmatrix} \\
q_{2,5} &= \begin{bmatrix} 20.0000 & 30.9326 & -100.0000 & 79.0674 & 60.0000 & 20.0000 \end{bmatrix} \\
q_{2,6} &= \begin{bmatrix} 20.0000 & 68.6596 & -107.1661 & -131.4935 & -60.0000 & -160.0000 \end{bmatrix} \\
q_{2,7} &= \begin{bmatrix} -114.8691 & 208.0621 & -106.6774 & 69.6760 & 75.4219 & -152.6944 \end{bmatrix} \\
q_{2,8} &= \begin{bmatrix} -114.8691 & -119.6750 & -100.4752 & -148.7890 & -75.4219 & 27.3056 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Les deux cas suivants mettent en évidence les défauts du modèle géométrique établi

par la méthode de l'annexe 3.

Calcul du MGI, cas 3

Nous montrons maintenant l'exemple du cas 3 (ayant pour entrée X_3 , image de q_3) qui donne, via l'utilisation de l'annexe 3, les huit configurations différentes représentées ci-dessous.

$$\begin{aligned}
 q_{3,1} &= \begin{bmatrix} 20.0000 & -19.3330 & 10.0000 & 0.3330 & 80.0000 & 30.0000 \end{bmatrix} \\
 q_{3,2} &= \begin{bmatrix} 20.0000 & 6.5170 & 0.0000 & 164.4830 & -80.0000 & -150.0000 \end{bmatrix} \\
 q_{3,3} &= \begin{bmatrix} -132.1826 & 173.4974 & 0.0000 & 15.7974 & 72.5228 & -154.3894 \end{bmatrix} \\
 q_{3,4} &= \begin{bmatrix} -132.1826 & -170.5509 & 11.1925 & 168.6532 & -72.5228 & 25.6106 \end{bmatrix} \\
 q_{3,5} &= \begin{bmatrix} 20.0000 & -10.0000 & -10.0000 & 11.0000 & 80.0000 & 30.0000 \end{bmatrix} \\
 q_{3,6} &= \begin{bmatrix} 20.0000 & 6.5170 & -0.0000 & 164.4830 & -80.0000 & -150.0000 \end{bmatrix} \\
 q_{3,7} &= \begin{bmatrix} -132.1826 & 173.4974 & -0.0000 & 15.7974 & 72.5228 & -154.3894 \end{bmatrix} \\
 q_{3,8} &= \begin{bmatrix} -132.1826 & -160.1055 & -11.1925 & -179.4073 & -72.5228 & 25.6106 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Parmi ces huit configurations, il se trouve que quatre sont aberrantes ($q_{3,2}; q_{3,3}; q_{3,6}$ et $q_{3,7}$). On peut mettre en évidence cette anomalie du fait que $MGD(q_{3,i}) \neq MGD(q_3)$ pour les quatre valeurs correspondantes de i . Cela signifie que la procédure décrite à l'Annexe 3 n'est pas bonne pour ce cas 3.

Le défaut du MGI vient ici du fait que la position opérationnelle choisie est très proche de la frontière de l'espace de travail du robot (voir figure A.5). Les configurations non retenues sont dues à la violation de la condition géométrique qui gère le calcul de q_3 :

$$\| {}^1p_{4,(x,z)} \| \in [\| a_2 - a_3 \|, \| a_2 + a_3 \|] \text{ (voir Annexe 3).}$$

Ainsi, il y a réduction des solutions du MGI. Nous ne retenons, en définitive, que seulement quatre solutions possibles.

Calcul du MGI, cas 4

On considère ici l'exemple de X_4 (image de q_4) qui, de la même façon qu'au-dessus, donne, via l'utilisation de l'annexe 3, les huit configurations différentes représentées ci-dessous.

$$q_{4,1} = \begin{bmatrix} -0.0000 & 12.1132 & 0.0000 & 98.3727 & 0.0000 & -50.4859 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
q_{4,2} &= \left[\begin{array}{cccccc} -0.0000 & -22.6806 & 67.1657 & -113.9993 & -0.0000 & 129.5141 \end{array} \right] \\
q_{4,3} &= \left[\begin{array}{cccccc} -152.3705 & 159.5141 & 0.0000 & 20.4859 & 152.3705 & -120.0000 \end{array} \right] \\
q_{4,4} &= \left[\begin{array}{cccccc} -152.3705 & 180.0000 & 0.0000 & 180.0000 & -152.3705 & 60.0000 \end{array} \right] \\
q_{4,5} &= \left[\begin{array}{cccccc} -0.0000 & 12.1132 & -0.0000 & 98.3727 & 0.0000 & -50.4859 \end{array} \right] \\
q_{4,6} &= \left[\begin{array}{cccccc} -0.0000 & 39.4261 & -67.1657 & -41.7745 & -0.0000 & 129.5141 \end{array} \right] \\
q_{4,7} &= \left[\begin{array}{cccccc} -152.3705 & 159.5141 & -0.0000 & 20.4859 & 152.3705 & -120.0000 \end{array} \right] \\
q_{4,8} &= \left[\begin{array}{cccccc} -152.3705 & 180.0000 & -0.0000 & -180.0000 & -152.3705 & 60.0000 \end{array} \right]
\end{aligned}$$

Cependant, parmi ces huit configurations, quatre sont de nouveau aberrantes ($q_{4,1}; q_{4,3}; q_{4,5}$ et $q_{4,7}$). On peut mettre en évidence cette anomalie, de la même façon qu'au dessus, par le fait que $MGD(q_{4,i}) \neq MGD(q_4)$ pour les 4 valeurs correspondantes de i . Par contre, l'origine du problème est différente.

Elle vient du fait que la composante θ_5 de la configuration q_4 qui a permis de calculer la position opérationnelle X_4 est nulle.

Remarque

Hors des conditions limitantes que nous venons de souligner, le MGI tel que défini en Annexe 3 peut donner satisfaction. Sinon, il faudra implémenter la méthode de Paul. Celle-ci est robuste mais bien "plus" longue à détailler.

Selon la situation, nous avons, dans nos travaux, utilisé l'une ou l'autre de ces deux approches.

B

Annexe 2 : Éléments de la norme ISO 10218

B.1 ISO 10218

Conformément à la norme internationale ISO 10218, les cobots présentent quatre caractéristiques fondamentales de sécurité :

— Arrêt de sécurité surveillé :

Cette fonctionnalité est employée pour les cobots destinés à travailler le plus souvent seuls, et ne laissant que rarement un humain intervenir dans leur espace de travail. Par exemple, si un opérateur doit apporter un ajustement à une pièce manipulée par le cobot ou retirer cette pièce de l'espace du cobot, le cobot cessera de bouger, mais pas complètement afin de reprendre ses activités dès le retrait de l'opérateur.

— Guidage manuel par les mains :

Le guidage par les mains est une fonction de collaboration permettant à un robot d'apprendre le trajet à suivre et de guider le robot littéralement à travers une séquence de mouvements nécessaires à la réalisation d'une tâche, comme les applications de type "pick and place".

— Surveillance de la vitesse et de la distance de séparation :

Pour les applications exigeant des interventions humaines plus fréquentes avec des cobots de plus grande taille, un dispositif de surveillance par vision laser peut être installé au sein du milieu de travail pour permettre au robot de détecter la proximité d'un humain, de façon similaire à un système d'arrêt contrôlé par sécurité. Grâce à la surveillance de la vitesse et de la distance de séparation, le robot ralentit de plus en plus à chaque fois qu'un humain s'approchera, et s'arrêtera complètement lorsque l'humain sera trop proche. Ces réponses peuvent être planifiées pour qu'un robot puisse les réaliser à différentes distances entre lui et l'opérateur humain. Au fur et à mesure que l'opérateur s'éloigne, le robot reprend sa tâche et accélère lentement son mouvement.

— Limitation de la puissance et de la force :

Les robots collaboratifs à limitation de force peuvent lire les forces dans leurs articulations, comme la pression, la résistance ou les impacts à l'aide de capteurs intégrés. Après avoir ressenti une perturbation, le robot s'arrête ou inverse sa course. La souplesse de ces robots et leurs temps de réaction très rapides dissipent autant que possible l'impact.

Joseph DIAB

Commande robotique hybride par téléopération et comanipulation : Application au positionnement d'une sonde échographique en milieu contraint.

Résumé :

Dans de nombreuses applications assistées par robot, notamment en milieu médical, il est courant de devoir alterner des phases où un humain est en interaction directe avec le robot (comanipulation) et certaines phases où cet humain en est par nécessité distant (téléopération).

Cette thèse traite de la commande des robots par combinaison des deux modalités de téléopération et comanipulation. Deux approches sont proposées : une combinaison temporelle d'une part puis une combinaison structurelle. La première correspond à un fonctionnement du robot avec alternance temporelle des phases comanipulées et téléopérées. La seconde consiste à contrôler le robot en combinant les deux modalités en question de façon simultanée à travers une matrice de sélectivité permettant ainsi de mixer deux voies d'entrées usuellement distinctes et séparées.

L'approche particulière proposée ici, est appliquée au positionnement d'une sonde échographique en milieu médical très contraint.

Mots clés : téléopération, comanipulation, combinaison temporelle, combinaison structurelle

**Hybrid robotic control by teleoperation and comanipulation:
Application to ultrasound probe positioning in a constrained
environment.**

Summary :

In many robot-assisted applications, especially in the medical field, it is common to have to alternate phases where a human is directly interacting with the robot (comanipulation) and some phases where this human is by necessity distant from it (teleoperation).

This thesis deals with the control of robots by combining the two modalities of teleoperation and comanipulation. Two approaches are proposed: a temporal combination on the one hand and a structural combination on the other. The first one corresponds to an operation of the robot with temporal alternation of comanipulated and teleoperated phases. The second consists of controlling the robot by combining the two modalities in question simultaneously through a selectivity matrix, thus allowing two usually distinct and separate input channels to be mixed.

The particular approach proposed here is applied to the positioning of an ultrasoundprobe in a highly constrained medical environment.

Keywords : teleoperation, comanipulation, temporal combination, structural combination



Laboratoire PRISME , Université d'Orléans
8 Rue Léonard de Vinci - 45072 Orléans



Joseph DIAB

Commande robotique hybride par téléopération et comanipulation : Application au positionnement d'une sonde échographique en milieu contraint.

Résumé :

Dans de nombreuses applications assistées par robot, notamment en milieu médical, il est courant de devoir alterner des phases où un humain est en interaction directe avec le robot et certaines phases où cet humain en est par nécessité distant. Dans le premier cas on regroupe des tâches telles que le pré-positionnement d'un instrument ou l'accompagnement du geste de l'expert alors que dans le second on considère des missions obligatoirement téléopérées du fait par exemple de l'obligation de protection des équipes médicales des dangers des rayons ionisants ou d'une opération impliquant un geste avec réduction d'échelle. Comanipulation et téléopération sont ainsi les deux modalités robotiques classiques qu'il convient de mixer.

Cette thèse aborde la problématique de la combinaison de ces deux modalités : combinaison temporelle d'une part puis combinaison structurelle. L'approche particulière ici proposée est appliquée au positionnement d'une sonde échographique en milieu médical très contraint.

La combinaison temporelle correspond à un fonctionnement du robot avec alternance temporelle de phases comanipulées et de phases téléopérées. Cette alternance induit différentes problématiques techniques pour lesquelles nous avons proposé des solutions. Il y a la question de la maîtrise des mouvements du robot, avec en particulier la continuité du geste : celle-ci doit être assurée lors des transitions entre les phases comanipulées et les phases téléopérées et réciproquement. Il y a aussi l'objectif de faire que les opérateurs impliqués dans une opération combinant téléopération et comanipulation bénéficient des mêmes ressentis dans leur contrôle du geste, quel que soit le mode par lequel le robot est momentanément contrôlé.

Une approche supplémentaire a été proposée qui consiste à contrôler le robot en combinant les deux modalités de téléopération et comanipulation de façon simultanée à travers une matrice de sélectivité permettant ainsi de mixer deux voies d'entrées usuellement distinctes et séparées.

Cette approche a été mise en œuvre en environnement médical pour positionner une sonde échographique portée par un robot collaboratif UR3 utilisé en combinant comanipulation et téléopération.

Mots clés : téléopération, comanipulation, combinaison temporelle, combinaison structurelle

Joseph DIAB

**Hybrid robotic control by teleoperation and comanipulation:
Application to ultrasound probe positioning in a constrained
environment.**

Summary :

In many robot-assisted applications, especially in the medical field, it is common to have to alternate phases where a human is in direct interaction with the robot and certain phases where this human is by necessity distant from it. In the first case, tasks such as the pre-positioning of an instrument or the accompaniment of the expert's gesture are grouped together, whereas in the second case, missions that are compulsorily teleoperated are considered, for example because of the obligation to protect medical teams from the dangers of ionising radiation or because of an operation involving a gesture with a scale reduction. Comanipulation and teleoperation are thus the two classical robotic modalities that should be mixed.

This thesis addresses the problem of combining these two modalities: temporal combination on the one hand and structural combination on the other. The particular approach proposed here is applied to the positioning of an ultrasound probe in a highly constrained medical environment.

The temporal combination corresponds to an operation of the robot with temporal alternation of comanipulated phases and teleoperated phases. This alternation leads to various technical problems for which we have proposed solutions. There is the question of the control of the robot's movements, with in particular the continuity of the gesture: this must be ensured during the transitions between the comanipulated phases and the teleoperated phases and vice versa. There is also the objective of ensuring that the operators involved in an operation combining teleoperation and comanipulation benefit from the same feelings in their control of the gesture, whatever the mode by which the robot is momentarily controlled.

An additional approach has been proposed which consists in controlling the robot by combining the two modalities of teleoperation and comanipulation simultaneously through a selectivity matrix thus allowing to mix two usually distinct and separate input channels.

This approach was implemented in a medical environment to position an ultrasound probe carried by a UR3 collaborative robot used in a combined comanipulation and teleoperation mode.

Keywords : teleoperation, comanipulation, temporal combination, structural combination