

Commande dynamique pour la coordination tâche/posture des humanoïdes

vers la synthèse d'activités complexes

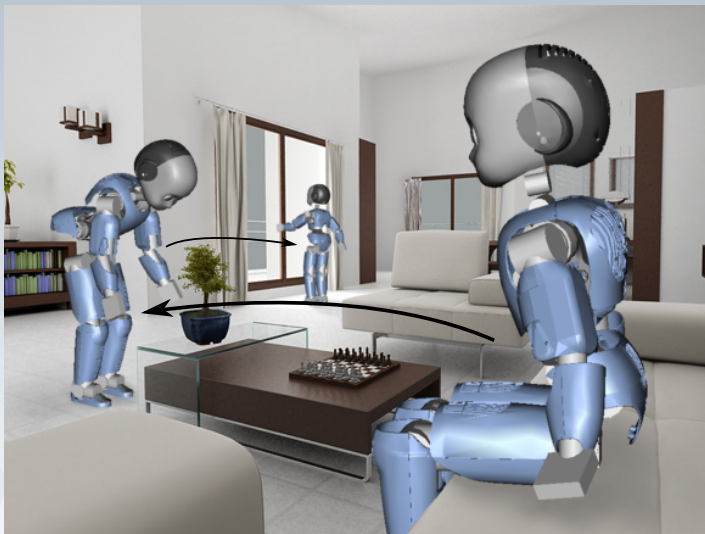


Joseph Salini

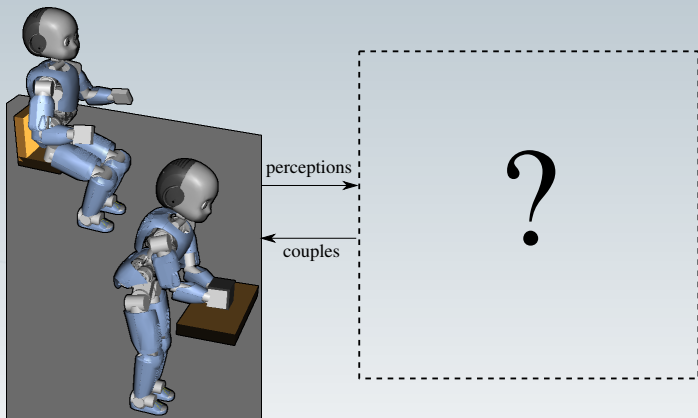
15 Juin 2012

Thèse encadrée par Philippe Bidaud & Vincent Padois

Contexte : la synthèse d'activités humanoïdes



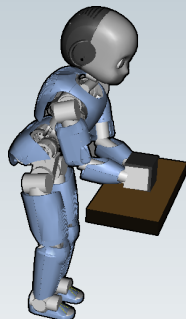
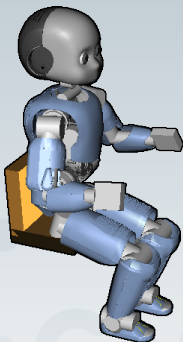
Problématique



Problématique

Planification [Latombe1991]

- Mouvement sans a priori
- Recherche dans l'espace des configurations



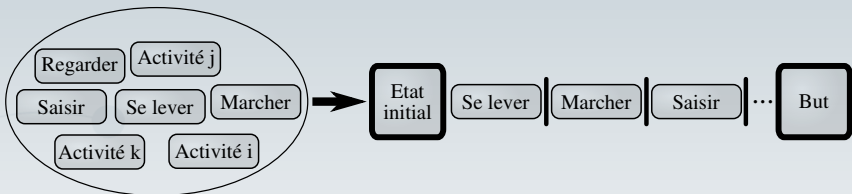
Approche par activités

- Découper le mouvement en activités
- Sélectionner ces activités
- Générer les activités : obtenir la commande

Approche : Contrôle haut-niveau

Approche

Étant donné un répertoire d'activités plus ou moins élémentaires, on cherche à atteindre un **objectif** haut-niveau.

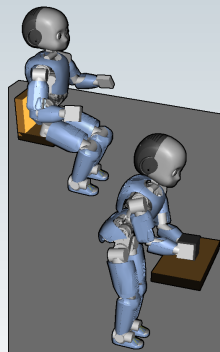
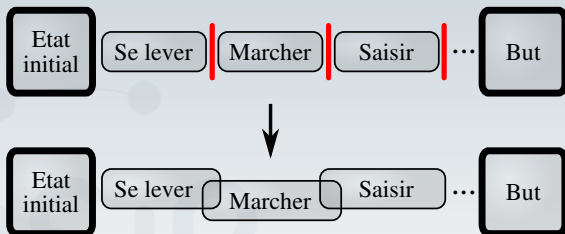


- Machine à états finis [Kolen2001]
- Méthode de planification [Cambon2009]

Problématique : Transitions

But

Enchaîner les activités et obtenir un mouvement **fluide** du robot.

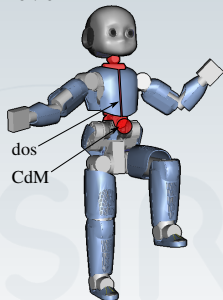


Problématique : Contrôle bas-niveau

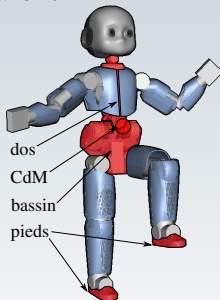
But

Réaliser les **activités** élémentaires soumises à des contraintes en contrôlant plusieurs tâches

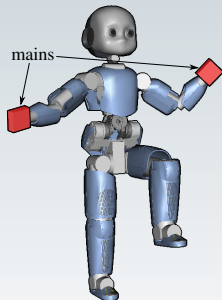
Se lever :



Marcher :



Saisir :



Plan

I Formulation du problème dynamique

- utilisation d'un Programme Linéaire Quadratique (LQP)

II Synthèse d'activités

- utilisation d'une stratégie basée sur des pondérations
- gestion des transitions

III Moteur de décision : sélection des activités et transitions

- utilisation du programme Spirops fondé sur la logique floue

IV Conclusions et perspectives

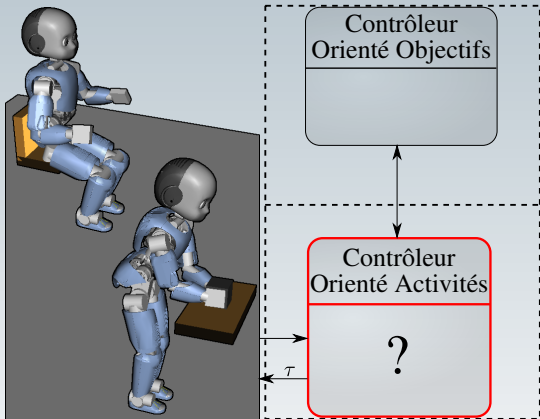
Contrôleur orienté activités

I Contrôle dynamique

- 1 Contraintes
- 2 Tâches
- 3 Résolutions
- 4 Résultats

II Gestion des transitions

III Prise de décision



1-Contraintes : équations du mouvement

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{n}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{g}(\mathbf{q}) + S\boldsymbol{\tau} + J_c(\mathbf{q})^T \mathbf{w}_c$$

- \mathbf{q} , $\dot{\mathbf{q}}$ coordonnées généralisées
- M masse généralisée
- \mathbf{n} effets non-linéaires
- \mathbf{g} force de gravité généralisée
- S matrice de sélection
- J_c Jacobienne des contacts
- $\boldsymbol{\tau}$ couples articulaires
- \mathbf{w}_c les efforts de contact
- $\ddot{\mathbf{q}}$ accélérations généralisées

1-Contraintes : équations du mouvement

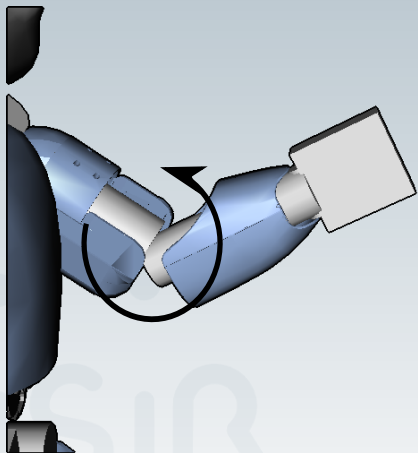
$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{n}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{g}(\mathbf{q}) + S\boldsymbol{\tau} + J_c(\mathbf{q})^T \mathbf{w}_c$$

- \mathbf{q} , $\dot{\mathbf{q}}$ coordonnées généralisées
- M masse généralisée
- \mathbf{n} effets non-linéaires
- \mathbf{g} force de gravité généralisée
- S matrice de sélection
- J_c Jacobienne des contacts
- $\boldsymbol{\tau}$ couples articulaires
- \mathbf{w}_c les efforts de contact
- $\ddot{\mathbf{q}}$ accélérations généralisées

$$M\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{n} = \mathbf{g} + S\boldsymbol{\tau} + J_c^T \mathbf{w}_c \quad \mathbb{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ \mathbf{w}_c \\ \ddot{\mathbf{q}} \end{bmatrix}$$

$$M\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{n} = \mathbf{g} + J_\chi^T \boldsymbol{\chi} \quad \boldsymbol{\chi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ \mathbf{w}_c \end{bmatrix}$$

1-Contraintes : limites articulaires



$$\begin{array}{ccccccc}
 -\tau_{max} & \preceq & \tau & \preceq & \tau_{max} \\
 q_{min} & \preceq & q_t & \preceq & q_{max} \\
 \dot{q}_{min} & \preceq & \dot{q}_t & \preceq & \dot{q}_{max} \\
 \ddot{q}_{min} & \preceq & \ddot{q} & \preceq & \ddot{q}_{max}
 \end{array}$$

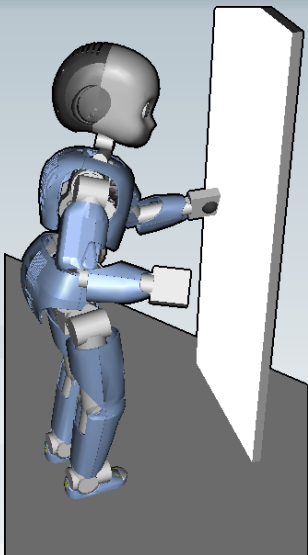


$$\begin{array}{ccccccc}
 -\tau_{max} & \preceq & \tau & \preceq & \tau_{max} \\
 q_{min} & \preceq & q_{t+h}(\ddot{q}) & \preceq & q_{max} \\
 \dot{q}_{min} & \preceq & \dot{q}_{t+h}(\ddot{q}) & \preceq & \dot{q}_{max} \\
 \ddot{q}_{min} & \preceq & \ddot{q} & \preceq & \ddot{q}_{max}
 \end{array}$$



$$\begin{array}{ccccccc}
 -\tau_{max} & \preceq & \tau & \preceq & \tau_{max} \\
 B_{min} & \preceq & \ddot{q} & \preceq & B_{max}
 \end{array}$$

1-Contraintes : interactions



Fermeture cinématique

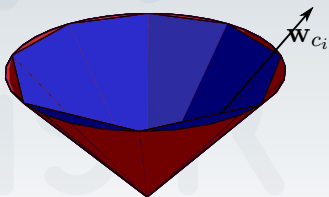
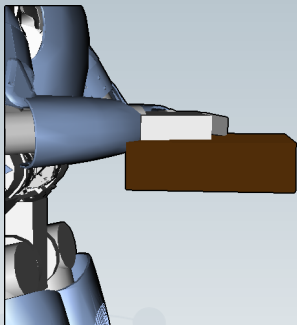
$$\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j = \mathbf{0}$$

$$(\mathbf{J}_i - \mathbf{J}_j)\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}$$



$$(\mathbf{J}_i - \mathbf{J}_j)\ddot{\mathbf{q}} + (\dot{\mathbf{J}}_i - \dot{\mathbf{J}}_j)\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}$$

1-Contraintes : interactions



Contacts frictionnels

Pour chaque contact c_i :

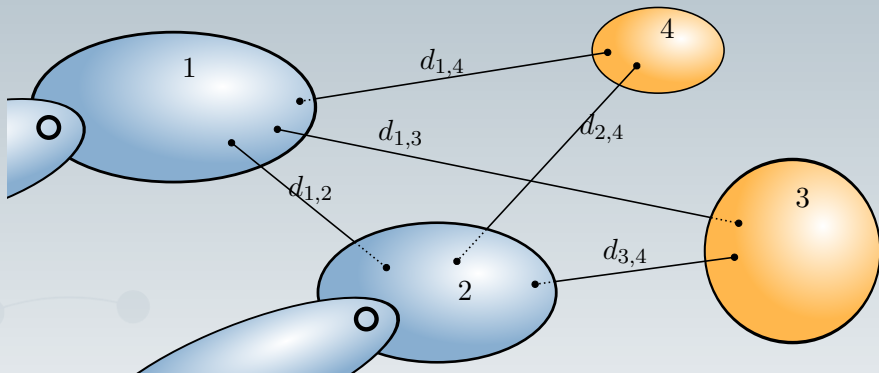
rupture du contact :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{w}_{c_i} = \mathbf{0} \end{array} \right.$$

contact sans glissement :

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{c_i} \ddot{\mathbf{q}} + \dot{J}_{c_i} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \\ C_{c_i} \mathbf{w}_{c_i} \preceq \mathbf{0} \end{array} \right.$$

1-Contraintes : évitement d'obstacles



$$0 \leq d_{i,j} \quad \forall (i,j) \quad \implies \quad \mathbf{0} \preceq f(\mathbf{q})$$

2-Tâches : définition & fonction de coût

Définition d'une tâche

Contrôler un ensemble de Degrés de Liberté (DdL) : minimiser une erreur de poursuite.

« Approche par fonctions de tâches » [Espiau1990]

Plusieurs tâches à réaliser

Fonction de coût : construite à partir de l'ensemble des tâches

2-Tâches : définition générique

Tâches génériques

$$T(\mathbf{X}) = \| E\mathbf{X} - \mathbf{f} \|^2$$



Accéléérations

articulaire : $(\ddot{\mathbf{q}} - \ddot{\mathbf{q}}^{des})$

cartésien : $(J\ddot{\mathbf{q}} + \dot{J}\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{t}}^{des})$

Efforts

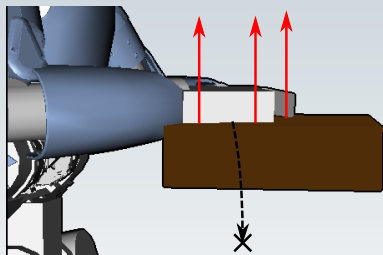
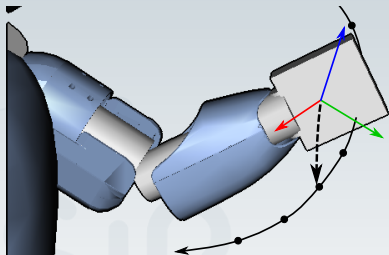
articulaire : $(\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}^{des})$

cartésien : $(\mathbf{w}_c - \mathbf{w}_c^{des})$

$$\text{Contrainte } (A\mathbf{X} = \mathbf{b}) \approx \text{Tâche } \| A\mathbf{X} - \mathbf{b} \|^2$$

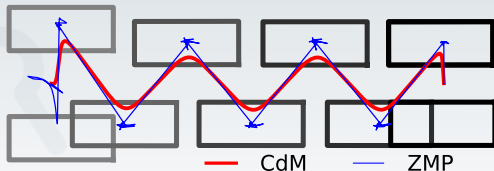
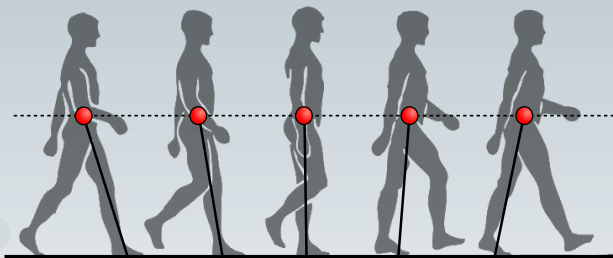
2-Tâches : asservissement de tâches

- Proportionnel-Dérivé
- Impédance



2-Tâches : asservissement de tâches

- Quadratique [Wieber2006]



3-Résolution : programme linéaire quadratique

- Méthodes analytiques, projection sur les noyaux [Sentis2007]
- LP [Barthelemy2008], SOCP [Park2007], ...

LQP [Kanoun2009b], [Collette2009], [Abe2007]

$$\begin{aligned} \min_{(\mathbf{x})} \quad & \frac{1}{2} \left(\mathbf{x}^\top P \mathbf{x} + \mathbf{q}^\top \mathbf{x} + r \right) \\ \text{s.t. :} \quad & G \mathbf{x} \preceq \mathbf{h} \\ & A \mathbf{x} = \mathbf{b} \end{aligned}$$

- Optimisation d'une fonction coût **quadratique**
- Respect de contraintes **linéaires**

3-Résolution : stratégies multitâches

Hierarchie

pour $i=1..n$:

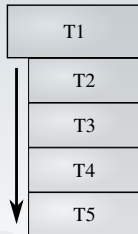
$$\min_{(\mathbf{X})} T_i(\mathbf{X}) + w_0 T_0$$

$$\text{s.c.} \quad \begin{cases} G\mathbf{X} \preceq \mathbf{h} \\ A_i\mathbf{X} = \mathbf{b}_i \end{cases}$$

$$A_{i+1} \leftarrow A_i \cup E_i$$

$$\mathbf{b}_{i+1} \leftarrow \mathbf{b}_i \cup (E_i \mathbf{X}_i^*)$$

- Pas de perturbations
- Résout n LQP
- Valeur discrètes

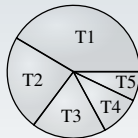


Pondération

$$\min_{(\mathbf{X})} \sum_i (w_i \cdot T_i(\mathbf{X})) + w_0 T_0$$

$$\text{s.c.} \quad \begin{cases} G\mathbf{X} \preceq \mathbf{h} \\ A\mathbf{X} = \mathbf{b} \end{cases}$$

- Couplage entre les tâches
- Résout 1 seul LQP
- Valeurs réelles



3-Résolution : formalisme

$$M\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{n} = \mathbf{g} + S\boldsymbol{\tau} + J_c^T \mathbf{w}_c$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ \mathbf{w}_c \\ \ddot{\mathbf{q}} \end{bmatrix}$$

variable **redondante**

$$M\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{n} = \mathbf{g} + J_\chi^T \boldsymbol{\chi}$$

$$\boldsymbol{\chi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ \mathbf{w}_c \end{bmatrix}$$

variable **indépendante**

$$A_1 \mathbf{X} \leq \mathbf{b}_1$$

$$\|E_1 \mathbf{X} - \mathbf{f}_1\|^2$$

\Rightarrow contraintes \Rightarrow

\Rightarrow tâches \Rightarrow

$$A_2 \boldsymbol{\chi} \leq \mathbf{b}_2$$

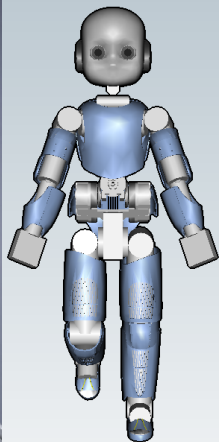
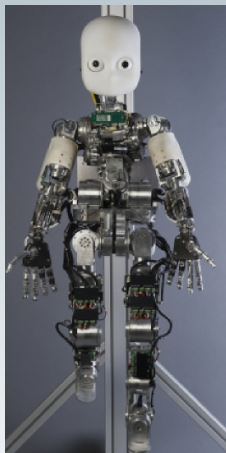
$$\|E_2 \boldsymbol{\chi} - \mathbf{f}_2\|^2$$

- facile à écrire
- problème redondant (+ grand)

- plus de calcul nécessaire
- problème réduit

4-Résultats : cadre expérimental

- Robot humanoïde : **iCub**
 - « open source »
 - 32 DdL considérés
- Simulateur : **Arboris-python**
 - Prototypage rapide
 - Pas de temps réel
- Résolution : **CvxOpt** [Cvxopt]
 - Optimisations convexes
 - Méthode de points intérieurs



4-Résultats : exemples basiques

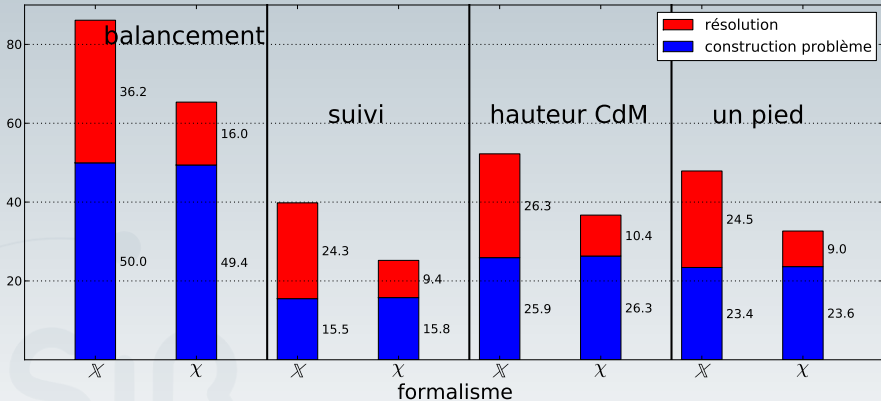
plusieurs simulations basiques

4-Résultats : évitement d'obstacle & impédance

évitement d'obstacle & contrôle en impédance

4-Résultats : formalismes \mathbb{X} et χ

Temps de calcul suivant le formalisme (ms)



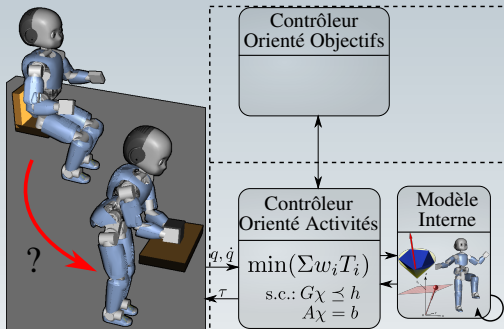
Gérer les transitions

I Contrôle dynamique

II Gestion des transitions

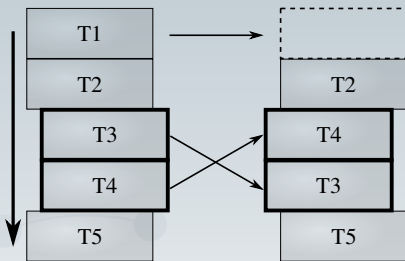
- ① Ensemble des tâches
- ② Ensemble des contraintes

III Prise de décision

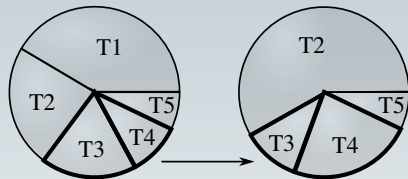


1-Transition de tâches : description

Hierarchie :



Pondération :

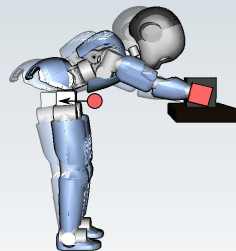
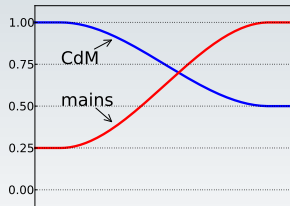
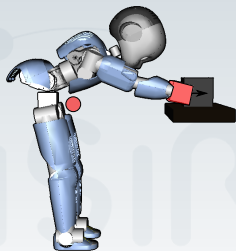
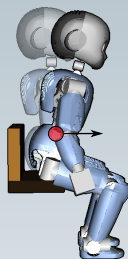
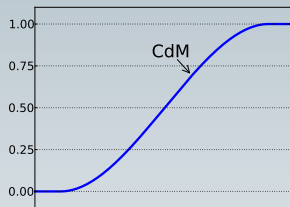
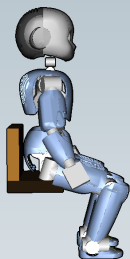


- transitions discontinues
- techniques existantes [Keith2011]

- transitions continues

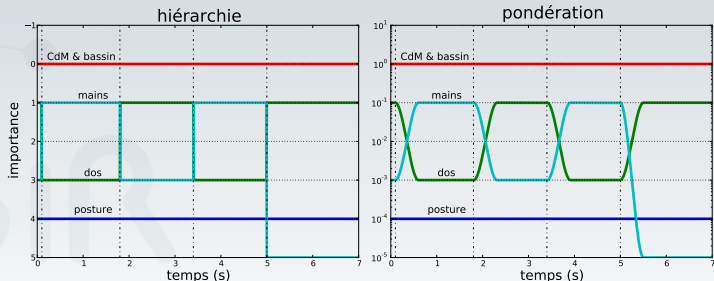
1-Transition de tâches : approche

évolution des pondérations :

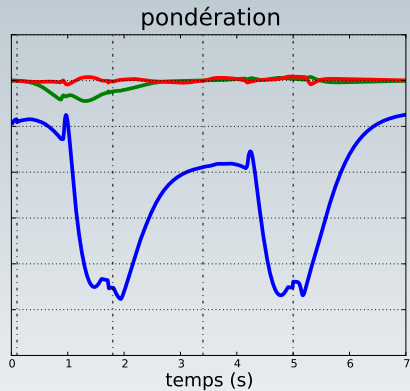
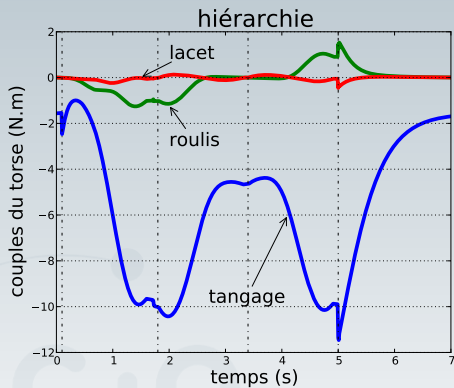


1-Transition de tâches : résultats

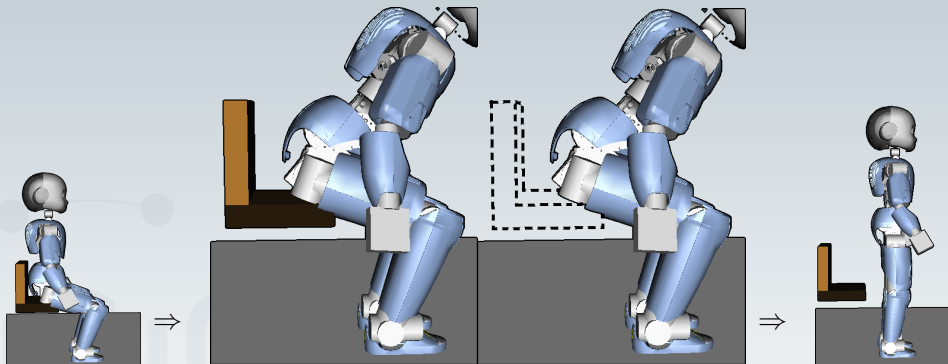
Transitions avec hiérarchie/pondération



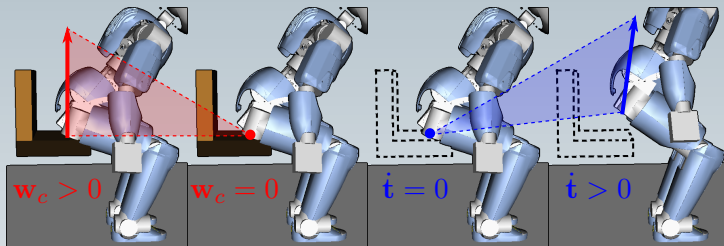
1-Transition de tâches : résultats



2-Transition de contraintes : description

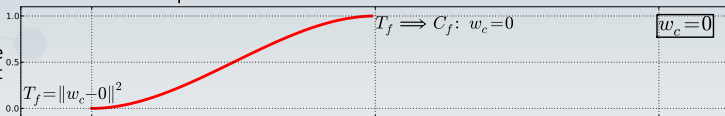


2-Transition de contraintes : approche

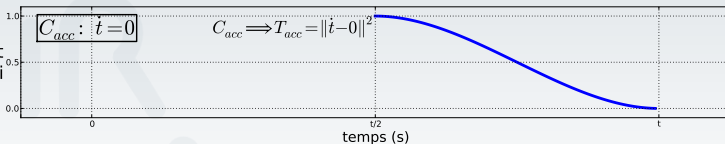


pondération des tâches liées aux contraintes

rupture de contact

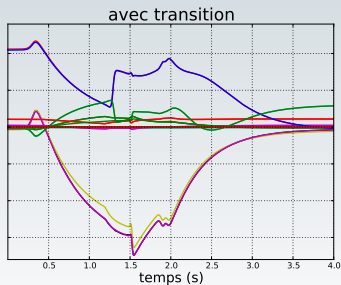
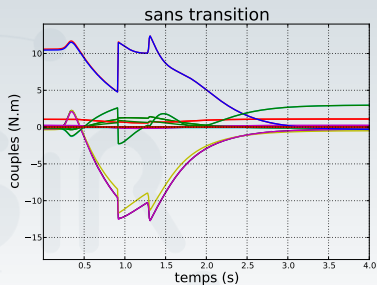


contact établi



2-Transition de contraintes : résultats

Se lever : sans & avec transition



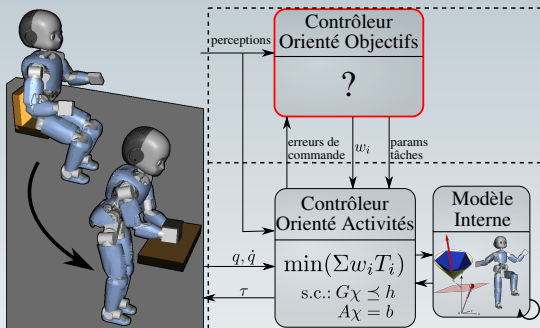
Contrôleur orienté objectifs

I Contrôle dynamique

II Gestion des transitions

III **Prise de décision**

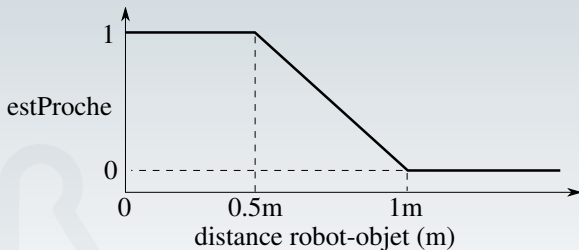
- ① Processus de décision
- ② Résultats



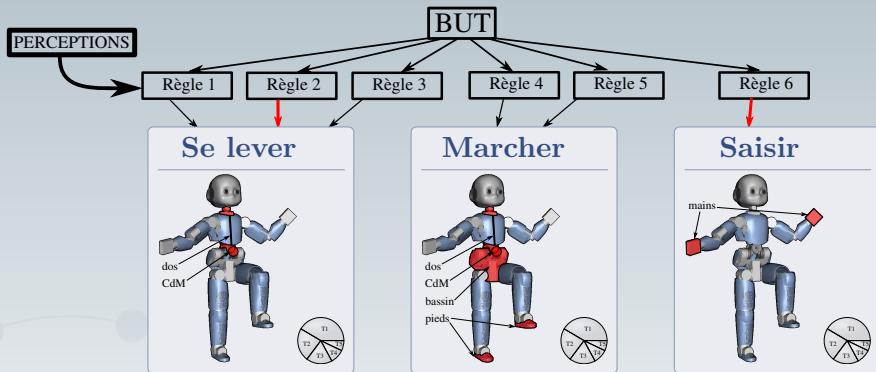
1-Prise de décision : approche

Fondée sur la logique floue

- Variables floues \Rightarrow valeurs **continues**
- utilisation de variables **symboliques**
- relative simplicité de mise en œuvre



1-Prise de décision : règles floues



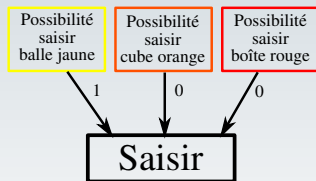
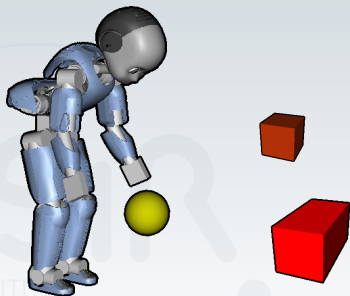
Règles :

- règle logique : si **condition** vraie, génère **activité** (paramètres)
- logique floue : pour cet **intérêt** (%), génère **activité** (paramètres)

1-Prise de décision : possibilité

Intérêt : possibilité de réaliser l'activité

- activité : saisir
- **possibilité** : proximité de l'objet
- paramètres : position de l'objet, position des poignées

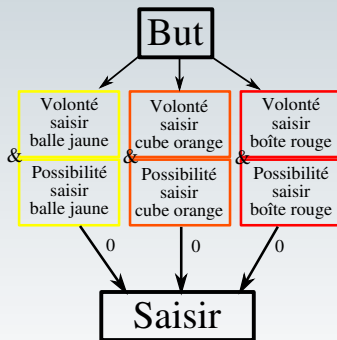
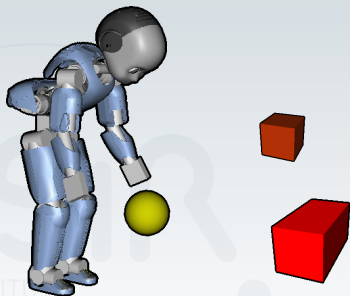


1-Prise de décision : volonté

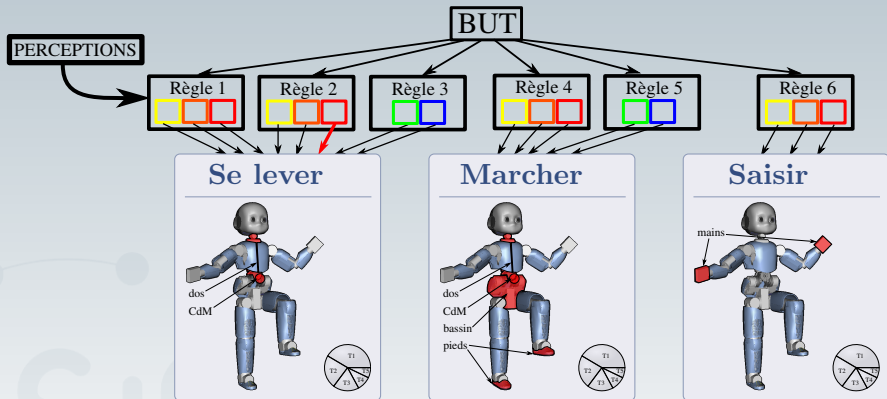
But : Prendre la boîte rouge !

Intérêt : volonté de réaliser l'activité

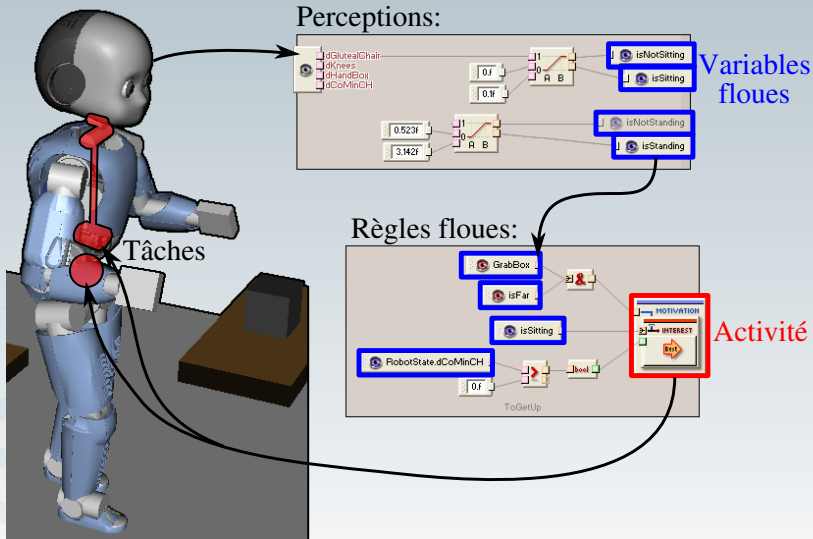
volonté : interaction & forme & couleur



1-Prise de décision : prise de décision

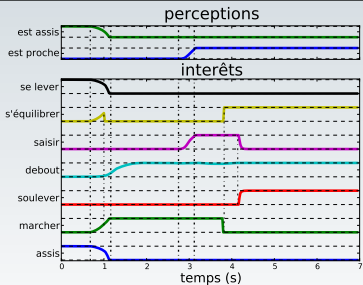
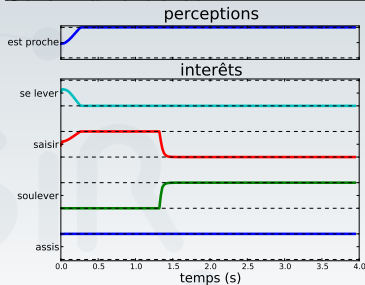


1-Prise de décision : SpirOps

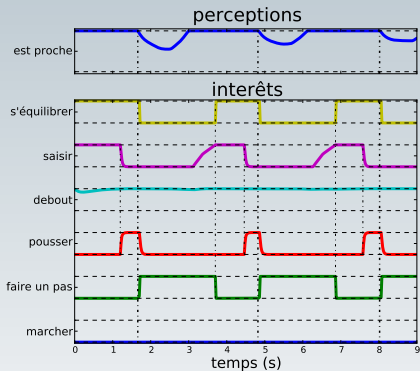
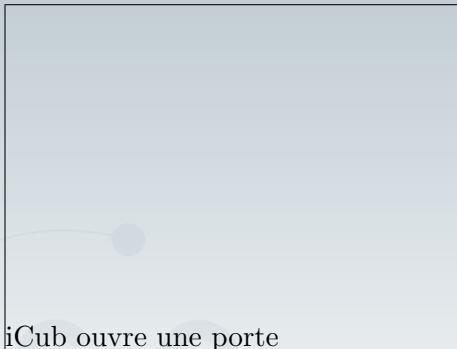


2-Résultats : conditions géométriques

Saisir une boîte

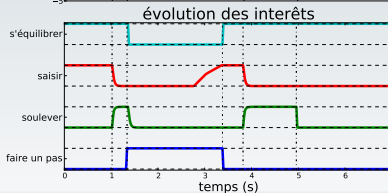
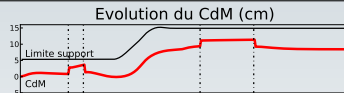
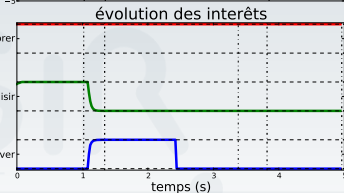
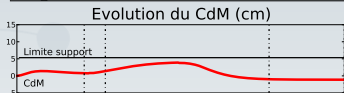


2-Résultats : conditions géométriques

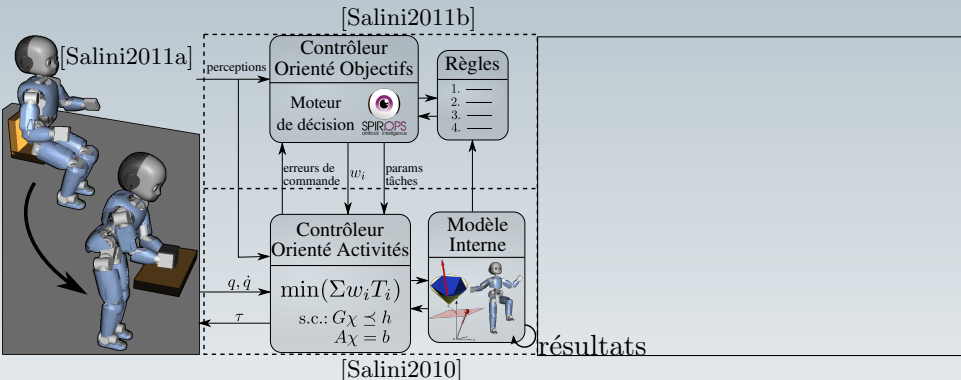


2-Résultats : conditions dynamiques

déplacer une boîte



Conclusions



- Contrôle dynamique avec programme d'optimisation
- Transition entre activités
- Moteur de décision : sélection des activités et transitions

Perspectives

Résolution du problème d'optimisation

- Résolution du LQP : méthode des contraintes actives
- Autres programmes : SOCP, SDP
- Intégration directe des contraintes d'égalités
- Stratégie hybride : hiérarchie/pondération

Perspectives

- Optimisation des pondérations
- Synthèse d'activités dans des environnements plus complexes
- Utilisation pour des applications graphiques
- Intégration sur un vrai robot

Merci beaucoup pour votre attention !

