

Manipulation sous contraintes en environnements complexes

Vincent Padois, MCU
Chaire RTE de Robotique d'Intervention

Université Pierre et Marie Curie
Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (UMR CNRS 7222)



Introduction - Quelques éléments de contexte

Constat

- Robotique absente de nombreux domaines d'activités humaines (industrie, service)
- ↪ Complexité liée aux types d'activité et à la nature des environnements

Quelques exemples industriels

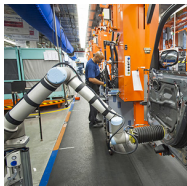
- Construction, maintenance et démantèlement de produits industriels
- Production manufacturière en îlots flexibles, BTP, production et transport d'énergie, construction navale et aéronautique, activités off-shore ...



???



Introduction - Quelques éléments de contexte



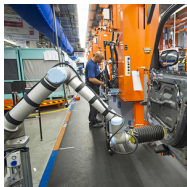
Limites de la robotique industrielle "classique"

- Peu de versatilité : trajectoires pré-définies
- Dangérosité intrinsèque : inertie importante, non-réversibilité mécanique
- Capacité de perception : nulles ou très limitées

Caractéristiques des contextes d'application potentielle de la Robotique

- Environnements très contraints et partiellement structurés/connus :
 - ▶ géométriquement
 - ▶ mécaniquement
 - ▶ dynamiquement
- Modes de fonctionnement multiples :
 - ▶ autonomes
 - ▶ télé-opérés
 - ▶ collaboratifs
 - ▶ mixte
- Contacts intrinsèquement présents
 - ▶ Systèmes sous-actionnées à base non fixe
 - ▶ Comanipulation
 - ▶ Actions mécaniques sur l'environnement

Introduction - Quelques éléments de contexte



Quels leviers pour la conception (au sens large) de robots pour ces applications ?

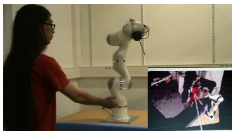
- Morphologie et caractéristiques mécatroniques
- Lois de commande
- Capacités perceptives
- Architectures de contrôle

Quels objectifs généraux de conception ?

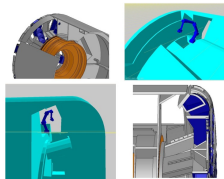
- Ergonomie physique et cognitive pour les utilisateurs
- Sécurité de l'environnement
- Capacités d'adaptation
- Performances

→ **Problèmes complexes !**

Plan de la présentation



Commande multi-tâches sous contraintes



Conception automatique de robots dédiés



Apprentissage et Adaptation

Commande multi-tâches sous contraintes

Système considéré

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{n}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = J_c(\mathbf{q})^T \boldsymbol{\chi}, \quad (1)$$

avec $\boldsymbol{\chi} = [\mathbf{w}_c^T \ \boldsymbol{\tau}^T]^T$:

- vecteur des couples moteurs ($\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{n_a}$)
- torseurs d'effort extérieures ($\mathbf{w}_c = [\mathbf{w}_{c,1}^T \ \dots \ \mathbf{w}_{c,n_c}^T]^T$)

Contraintes

- physique : (1)
- capacités motrices (couples moteurs et vitesses max);
- obstacles (butées articulaires, objets de l'environnement);
- torseurs d'efforts de contact (conditions d'existence du contact, intensité des forces).

$$G(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\boldsymbol{\chi} \leq \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}). \quad (2)$$

Quelques pré-requis non négligeables

- bonne connaissance du modèle du système
- capacités de perception et de traitement du signal

Commande multi-tâches sous contraintes

Tâches (dynamiques)

- Fonction de l'espace articulaire vers l'espace opérationnel
- Caractéristiques :
 - ▶ Repère lié au corps du robot : organe terminal, centre de gravité ...
 - ▶ Variable de tâche $\xi_i \in \mathbb{R}^{m_i}$
 - ▶ Modèle direct : $\ddot{\xi}_i = J_i(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \dot{J}_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}$
Tâche en effort : $\xi_i^* = \Lambda_i(\mathbf{q})^{-1}\mathbf{w}_i^*$
 - ▶ Trajectoire désirée $\xi_i^*(t)$ issue de :
 - ★ Planificateur global
 - ★ Planificateur en ligne type min-jerk
 - ★ Commande prédictive
 - ★ Primitives motrices apprises par démonstration
 - ★ Commande optimale (incrémentale)
 - ★ ...
 - ▶ Un contrôleur local en feedback (type P(I)D avec accélération de référence)
 $\ddot{\xi}_i^d = \ddot{\xi}_i^* + K_p \mathbf{e} + K_d \dot{\mathbf{e}} + K_i \int \mathbf{e} dt$
 - ▶ Un niveau d'importance hiérarchique α_i relativement aux autres tâches

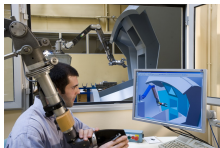
Commande multi-tâches sous contraintes

Tâches (dynamiques)

- Fonction de l'espace articulaire vers l'espace opérationnel
 - Caractéristiques :
 - ▶ Repère lié au corps du robot : organe terminal, centre de gravité ...
 - ▶ Variable de tâche $\xi_i \in \mathbb{R}^{m_i}$
 - ▶ Modèle direct : $\ddot{\xi}_i = J_i(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \dot{J}_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}$
Tâche en effort : $\xi_i^* = \Lambda_i(\mathbf{q})^{-1}\mathbf{w}_i^*$
 - ▶ Trajectoire désirée $\xi_i^*(t)$ issue de :
 - ★ Planificateur global
 - ★ Planificateur en ligne type min-jerk
 - ★ Commande prédictive
 - ★ Primitives motrices apprises par démonstration
 - ★ Commande optimale (incrémentale)
 - ★ ...
 - ▶ Un contrôleur local en feedback (type P(I)D avec accélération de référence)
 $\ddot{\xi}_i^d = \ddot{\xi}_i^* + K_p \mathbf{e} + K_d \dot{\mathbf{e}} + K_i \int \mathbf{e} dt$
 - ▶ Un niveau d'importance hiérarchique α_i relativement aux autres tâches
- Déterminer à chaque instant de commande le couple articulaire de consigne permettant de réaliser au mieux l'ensemble des tâches sous contraintes

Commande multi-tâches sous contraintes : l'exemple Telemach

Objectif : Loi de commande réactive sûre dans le cas d'obstacles fixes

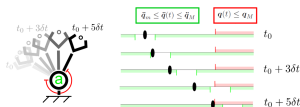
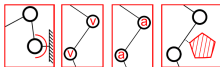


Réactive ?

- réactif \neq planifié
- Les objectifs opérationnels en temps réel
- Téléopération, asservissement référencé capteur extéroceptif,...

Intrinsèquement sûre ?

- Contraintes robot : limite en position, vitesse et couple/acc. articulaire
- Non collision avec l'environnement



Modélisation des contraintes \rightarrow garantir l'existence d'une solution

- Modifier leur expression afin d'assurer leur compatibilité a priori
- Connaissance des capacités d'accélération à tout instant (!)
- Vérif. en ligne de l'existence d'une trajectoire d'échappement

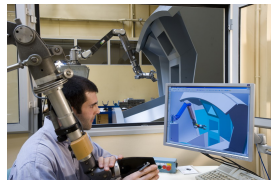
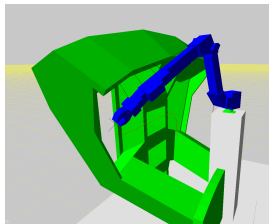
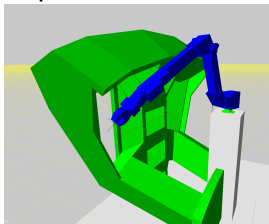
Commande multi-tâches sous contraintes : l'exemple Telemach

Résolution : Commande Compliant aux Contraintes

- Loi de commande itérative à 3 niveaux :
 - ▶ Tâche prioritaire : évitement passif
 - ▶ Tâche secondaire : suivi de l'objectif
 - ▶ Tâche tertiaire : évitement actif
 - ▶ Régularisation du problème d'inversion (Tikhonov)
 - ▶ Heuristique d'itération sur les contraintes pour déterminer celles à éviter passivement
- Hypothèse : existence d'une solution
- $\dot{q} = J_c^+ 0 + (J_0 P J_c)^+ \dot{\xi}_0^d + (J_c P \begin{bmatrix} J_c \\ J_0 \end{bmatrix})^+ (\dot{\xi}_c^d - J_c (J_0 P J_c)^+ \dot{\xi}_0^d)$

↪ LQP sous optimal

Quelques résultats



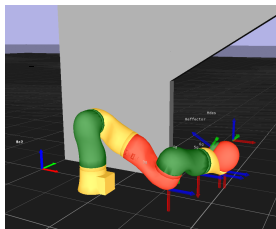
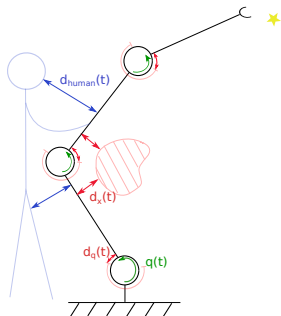
Commande multi-tâches sous contraintes : partage d'espace de travail

Objectif : Loi de commande réactive sûre pour le partage d'espace de travail humain / robot

- ↪ Difficulté : Capacités dynamiques du robot vs Sécurité de l'opérateur
- ↪ Contexte : transition continue entre phases autonomes et comanipulées.

! Approche énergétique

- ↪ Comportements "classiques" d'évitement (pas de contact) + ...
- ↪ ... Contact possible avec un niveau d'énergie max. pour le robot
- ↪ Généralisation : butées articulaires, obstacles de l'environnement.
- ↪ Énergie considérée pour chaque segment : Σ_c (non contact) + $\Sigma_{p,elastique}$ (contact)



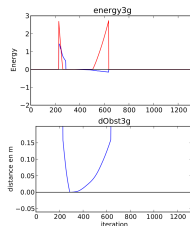
Commande multi-tâches sous contraintes : partage d'espace de travail

Loi de commande :

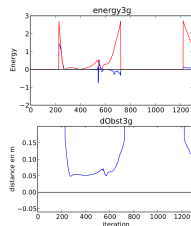
$$\min_{\chi, \ddot{q}} \frac{1}{2} \left(\beta \|\ddot{\xi}^d - J\ddot{q} + \dot{J}\dot{q}\|^2 + \delta \|E_{i/j}\|^2 \right)$$

s.t. $M(q)\ddot{q} + n(q, \dot{q}) = J_c(q)^T \chi$
 $G(q, \dot{q})\chi \leq h(q, \dot{q})$

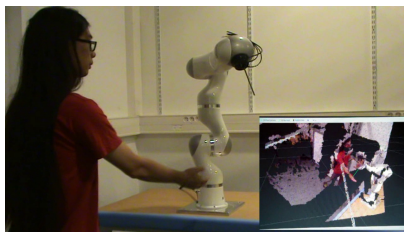
$$E_{i/j} \leq E_{limite}^j(d, d_{safe}, E_{safe}, d_{max}, k)$$



(a) Sans contrainte énergétique

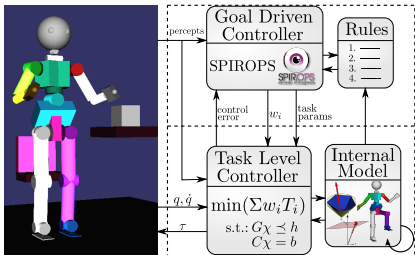


(b) Avec contrainte énergétique



Commande multi-tâches sous contraintes : activités complexes

Objectif : Génération d'activités complexes par combinaison et séquençement de tâches élémentaires



Spécificités :

- Hiérarchie de tâches gérée par pondération
- Tâches en effort, position, impédance
- Sélection des tâches actives et de leur importance relative via un moteur d'inférence flou
- Approche réactive excepté ...
- ... Génération par commande prédictive de $\ddot{\xi}_{CdG}^d$
- Mécanisme de rupture des contraintes de contact par insertion de tâches de transition

Limites

- Pas de hiérarchie stricte possible entre tâches
- Approche réactive : pas d'anticipation des perturbations notamment liées aux interactions à court/moyen terme entre tâches

Commande multi-tâches sous contraintes : hiérarchie de tâches

Objectif : Formalisme unique pour la définition de hiérarchies strictes ou non strictes et modification sans discontinuité du niveau de priorités entre tâches

● Approches existantes :

- ▶ Résolution analytique → problème pour la prise en compte des contraintes "inégalités"
- ▶ Résolution par optimisation sous contraintes (type QP)
- ▶ Dans les deux cas : hiérarchie (SoT) ou pondération mais pas d'approche englobant les deux points de vue

Approche par pondération

$$\left\{ \begin{array}{ll} \min_{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dot{\mathbf{q}}} & \frac{1}{2} [k_1 \|\mathbf{w}_1\|^2 + k_2 \|\mathbf{w}_2\|^2 + \varepsilon \|\dot{\mathbf{q}}\|^2] \\ \text{s.t} & \mathbf{w}_1 = \dot{\mathbf{x}}_1 - \mathbf{J}_1 \dot{\mathbf{q}} \\ & \mathbf{w}_2 = \dot{\mathbf{x}}_2 - \mathbf{J}_2 \dot{\mathbf{q}} \end{array} \right. \quad (3)$$

Approche par hiérarchie

$$\left\{ \begin{array}{ll} \min_{\mathbf{w}_1, \dot{\mathbf{q}}} & \frac{1}{2} [\|\mathbf{w}_1\|^2 + \varepsilon \|\dot{\mathbf{q}}\|^2] \\ \text{s.t} & \mathbf{w}_1 + \mathbf{J}_1 \dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{x}}_1 \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \min_{\mathbf{w}_2, \dot{\mathbf{q}}} & \frac{1}{2} [\|\mathbf{w}_2\|^2 + \varepsilon \|\dot{\mathbf{q}}\|^2] \\ \text{s.t} & \mathbf{w}_2 + \mathbf{J}_2 \dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{x}}_2 \\ & |\dot{\mathbf{x}}_1 - \mathbf{J}_1 \dot{\mathbf{q}}| \leq \mathbf{w}_1^* \end{array} \right. \quad (5)$$

Commande multi-tâches sous contraintes : hiérarchie de tâches

$$\begin{aligned} & \arg \min_{\ddot{\mathbf{q}}', \boldsymbol{\chi}} \sum_{i=1}^{n_t} \left\| \mathbf{f}_i \left(\ddot{\mathbf{q}}'_i, \ddot{\boldsymbol{\xi}}_i^d \right) \right\|^2 + \left\| \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}' \\ \boldsymbol{\chi} \end{bmatrix} \right\|_{Q_r}^2 \\ & \text{subject to} \end{aligned}$$

$$J_c(\mathbf{q})^T \boldsymbol{\chi} = M(\mathbf{q}) P \ddot{\mathbf{q}}' + \mathbf{n}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$$

$$G(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \begin{pmatrix} P \ddot{\mathbf{q}}' \\ \boldsymbol{\chi} \end{pmatrix} \leq \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}),$$

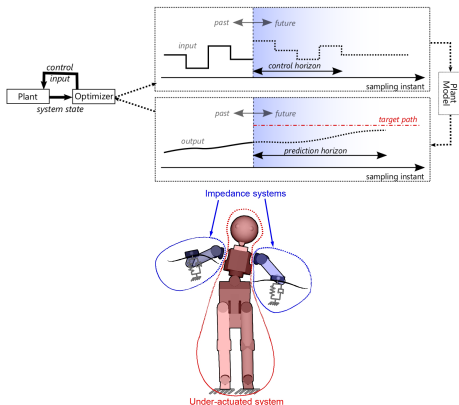
$$\text{with } \ddot{\mathbf{q}}' = \begin{bmatrix} \ddot{q}'_1 \\ \vdots \\ \ddot{q}'_{n_t} \end{bmatrix} \text{ and } P = [P_1(\alpha_1) \dots P_{n_t}(\alpha_{n_t})].$$

Spécificités :

- Définition **non** lexicographique de la notion de priorité
- Projection par défaut de la tâche i dans le noyau des autres
- Modification du projecteur associé à la tâche i : $i > j \leftrightarrow j > i$
- Possibilité d'échanger le niveau hiérarchique de deux tâches sans modifier le niveau hiérarchique de ces deux tâches par rapport aux autres
- Mécanisme d'insertion et de destruction de tâches
- Continuité de l'ensemble de ces mécanismes

Commande multi-tâches sous contraintes : apports de la commande prédictive

Objectif : robustesse de la solution au problème de commande multi-tâches sous contraintes



Principe général :

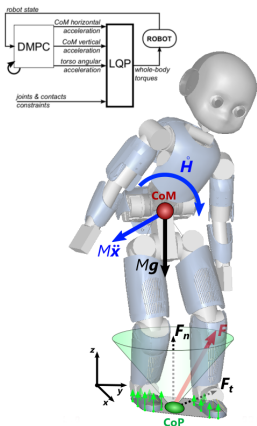
- Recherche d'un horizon de commande
- Utilisation d'un modèle simplifié de la dynamique du système à prévisualiser
- Locomotion : génération de trajectoires de références pour le centre de masse

Spécificités :

- Extension du modèle simplifié (ZMP) utilisé pour la locomotion
- Prévisualisation d'un effort de perturbation appliqué à l'OT (couplage avec un système impédant)
- Génération d'horizon de gains de contrôle de la tâche (adaptation de l'impédance)

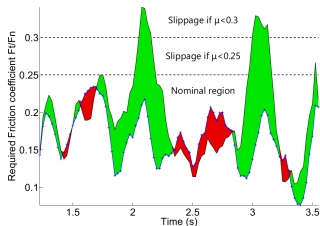
Commande multi-tâches sous contraintes : apports de la commande prédictive

Objectif : assurer la robustesse de la solution au problème de commande multi-tâches sous contraintes

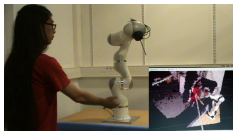


Spécificités :

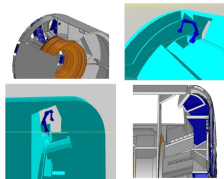
- Approche distribuée
- Compromis optimal entre plusieurs objectifs contradictoires pour le centre de gravité
- Minimisation du risque de basculement et optimisation des conditions d'adhérence
- Génération de trajectoires de référence pour l'accélération horizontale, verticale du CdM et pour l'accélération angulaire du torse



Plan de la présentation



Commande multi-tâches sous contraintes



Conception automatique de robots dédiés



Apprentissage et Adaptation

Conception automatique de robots dédiés

Objectif : Optimisation de la morphologie d'un robot manipulateur pour l'évolution en environnements complexes

Constat

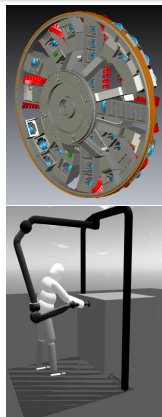
- Pas de solution intuitive
- Combinatoire importante
- Méthodes de conception "classique" inadaptées

↳ **Problème d'optimisation multi-objectifs (MO)**

Quel méthode d'optimisation ? ... sachant que :

- Recherche d'un arrangement de corps et liaisons
- Fonctions à optimiser de natures très différentes
- Évaluation au regard des tâches à effectuer par le robot → simulations
- Structure de l'espace "solution" n'est pas connue a priori
- Problème complexe et de grande taille

↳ **Optimisation par algorithme évolutionniste MO**

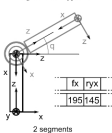


Conception automatique de robots dédiés

Type	Lengths (m)
10 : none	0 : 0.05
11 : rx	1 : 0.15
12 : ry	2 : 0.25
13 : rz	3 : 0.35
14 : ryx	4 : 0.45
15 : ryz	5 : 0.55
16 : rzy	6 : 0.65
17 : rzz	7 : 0.75
18 : rzx	8 : 0.85
19 : rxz	9 : 0.95
20 : ey	
21 : ez	

ex : gene 163
ryz length : 0.35

Fig. 3. Genotype table



Principe de représentation d'un robot

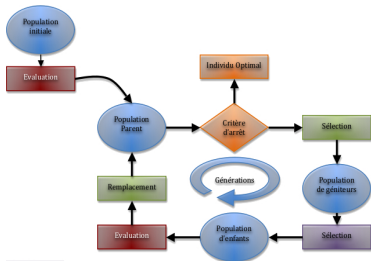
- Description d'un robot à partir d'un génotype
- Chaque gène code un corps et la liaison associé
- La valeur du gène tient compte du type de liaison et de la longueur du corps associé

Fonctions à optimiser

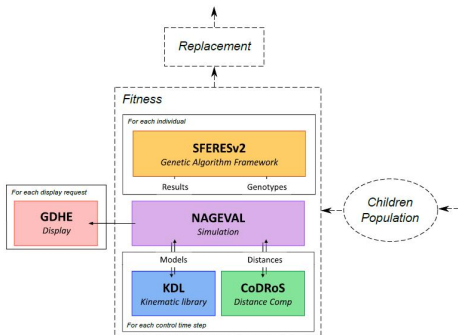
- Complexité de la solution
- Qualité d'exécution de la tâches
- "Ergonomie"

Principe général des algorithmes évolutionnistes

- Génération d'une population initiale de robots
- Évaluation des individus de la population
- Sélection des individus de la prochaine génération
- Opérations génétiques (mutation, croisement,...) sur les individus
- Mise à jour de la population



Conception automatique de robots dédiés

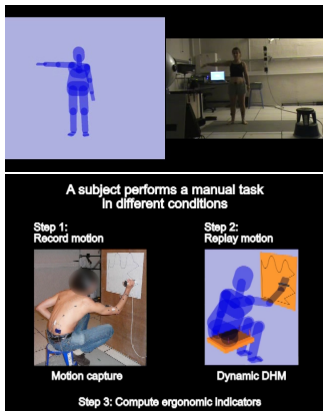


Mise en œuvre Telemach

- Algorithme NSGA2 dans le *framework* Sferes (par S. Doncieux et JB. Mouret, ISIR)
- Évaluation par simulations cinématiques / dynamiques des robots
- Suivi de trajectoires "représentatives" avec loi de commande réactive CCC

Conception automatique de robots dédiés

Objectif : Définition des critères de qualité ergonomique quantitatif pour un robot comanipulé assurant un bon compromis performance / ergonomie

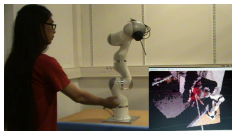


Approche

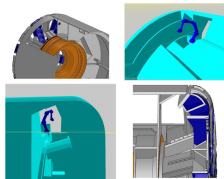
- Capture du mouvement et synthèse d'indicateurs ergonomiques
- Évaluation d'architectures par simulations physiques réalistes



Plan de la présentation



Commande multi-tâches sous contraintes



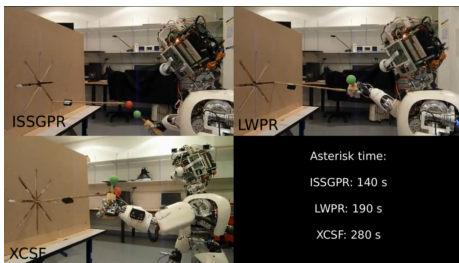
Conception automatique de robots dédiés



Apprentissage et Adaptation

Apprentissage et Adaptation (en quelques mots)

Objectif : Apprentissage et adaptation des modèles nécessaires à la commande du système



Problématique

- Infinité de possibilités du monde
- Besoin d'adaptation aux contextes inconnus
- Acquisition de compétences motrices optimales

Approche

- Apprentissage de modèles du système robot(+environnement)
- Approche incrémentale basée sur l'exploration
- Utilisation d'outils de régression
- Apprentissage de contrôleurs stables sur la base de mouvements de référence ...

Conclusions

- La manipulation en environnements contraints est un problème complexe !
- Nécessite des contributions scientifiques dans des domaines multiples :
 - ▶ conception
 - ▶ commande
 - ▶ perception
 - ▶ architecture de contrôle
- Du point de vue de la commande, des outils algorithmiques avancées existent ... :
 - ▶ combinaison et hiérarchisation de tâches
 - ▶ sous contraintes
 - ▶ commande prédictive (distribuée)
- ... mais sont dépendants de :
 - ▶ modèles réalistes du système et de son environnement : identification, apprentissage, adaptation
 - ▶ des moyens de perception
 - ▶ d'architectures décisionnelles
- Du point de vue de la conception :
 - ▶ possible d'explorer de manière automatique des solutions de conception dédiées
 - ▶ Objectifs quantitatifs de conception
 - ▶ Outils de simulation réalistes

Collaborations académiques et industrielles



Chaire de Robotique d'Intervention RTE/UPMC - 2011–2016



Projet ANR TELEMACH - 2008–2010



Projet FUI ROMEO2 - 2013–2017



Projet TELEMACH, ROMEO2, Simulateur physique



Projet ANR Equipex **robotex**

Réseau "Robotique Humanoïde et Interactions Naturelles"



Projet européen CODYCO - STREP FP7-ICT-2011.2.1 - 2013–2017

porté par l'Institut Italien de Technologie + University of Birmingham + TU Darmstadt + Institut Jožef Stefan + UPMC



Projet ANR MACSi - 2010–2013

porté par l'UPMC + INRIA Bordeaux + ENSTA + Gostai

Références



- S. Rubrecht, V. Padois, P. Bidaud and M. de Broissia : *Constraints Compliant Control : constraints compatibility and the displaced configuration approach*. IROS 2010.
- S. Rubrecht, V. Padois, P. Bidaud and M. de Broissia : *Constraint Compliant Control for a Redundant Manipulator in a Cluttered Environment*. ARK 2010
- S. Rubrecht, V. Padois, P. Bidaud, M. de Broissia, and M. Da Silva Simoes : *Motion safety and constraints compatibility for multibody robots*. Autonomous Robots 2012.
- J. Salini, V. Padois and P. Bidaud : *Synthesis of complex humanoid whole-body behavior : A focus on sequencing and tasks transitions*. ICRA 2011.
- J. Salini, V. Padois, P. Bidaud and A. Buendia : *A Goal driven perspective to generate humanoid motion synthesis*. CLAWAR 2011.
- J. Salini, S. Barthélemy, P. Bidaud and V. Padois : *Whole-Body Motion Synthesis with LQP-based Controller - Application to iCub*. Cognitive Systems Monographs : Modeling, Simulation and Optimization of Bipedal Walking, Springer Berlin Heidelberg, publisher. Vol 18 Pages 119-210, 2013.
- A. Ibanez, P. Bidaud and V. Padois : *Unified preview control for humanoid postural stability and upper-limb interaction adaptation*. IROS 2012.
- A. Ibanez, P. Bidaud and V. Padois : *Previewed impedance adaptation to coordinate upper-limb trajectory tracking and postural balance in disturbed conditions*. CLAWAR 2013.
- A. Ibanez, P. Bidaud and V. Padois : *A Distributed Model Predictive Control approach for robust postural stability of a humanoid robot*. ICRA2014.
- M. Liu, Y. Tan and V. Padois : *Generalized Smooth Hierarchical Control*. Soumis à IEEE Transactions on Robotics.
- S. Rubrecht, V. Padois and P. Bidaud : *Evolutionary design of a robotic manipulator for a highly constrained environment*. New Horizons in Evolutionary Robotics : extended contributions from the EvoDeRob workshop, volume 341 of Studies in Computational Intelligence, Springer, 2011.
- P. Maurice, Y. Measson, V. Padois and P. Bidaud : *Assessment of Physical Exposure to Musculoskeletal Risks in Collaborative Robotics Using Dynamic Simulation*. Romansy 2012.
- P. Maurice, Y. Measson, V. Padois and P. Bidaud : *Experimental assessment of the quality of ergonomic indicators for collaborative robotics computed using a digital human model*. Soumis à DHM 2014.
- O. Sigaud, C. Salaün and V. Padois : *On-line regression algorithms for learning mechanical models of robots : a survey*. Robotics and Autonomous Systems 2011.
- A. Droniou, S. Ivaldi, V. Padois and O. Sigaud : *Autonomous Online Learning of Velocity Kinematics on the iCub : a Comparative Study*. IROS 2012.
- S. Ivaldi, S.M. Nguyen, N. Lyubova, A. Droniou, V. Padois, D. Filliat, P.-Y. Oudeyer and O. Sigaud : *Object learning through active exploration*. IEEE Transactions on Autonomous Mental Development 2013.

Merci de votre attention.
Questions ?