

Problématiques et enjeux de la robotique interactive en milieux industriels complexes

Vincent Padois, Maître de Conférences
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 ?

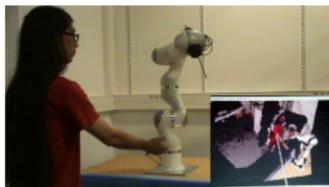
- Morphologie et caractéristiques mécatroniques
- Lois de commande
- Capacités perceptives
- Architectures de contrôle

Quels objectifs généraux de conception ?

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

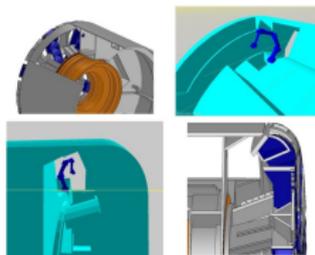
→ **Problèmes complexes !**

Plan de la présentation



Commande multi-tâches sous contraintes

- Environnement dans la boucle fermé
→ l'interaction avec l'environnement n'est pas un cas de défaut
- Réactivité
- Capacité à générer des activités complexes pour des systèmes redondants



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 extérieurs ($\mathbf{w}_c = [\mathbf{w}_{c,1}^T \ \dots \ \mathbf{w}_{c,n_c}^T]^T$)

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).

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

Tâches (dynamiques)

- Fonction de l'espace articulaire vers l'espace opérationnel
- Caractéristiques :
 - ▶ Repère lié au corps du robot : organe terminal, centre de gravité ...
 - ▶ Modèle direct : $\boldsymbol{\xi}_i = J_i(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \dot{J}_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}$
 - ▶ Trajectoire désirée $\boldsymbol{\xi}_i^*(t)$
 - ▶ Un niveau d'importance hiérarchique α_i relativement aux autres tâches

Quelques pré-requis non négligeables

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

Commande multi-tâches sous contraintes : l'exemple Telemach

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

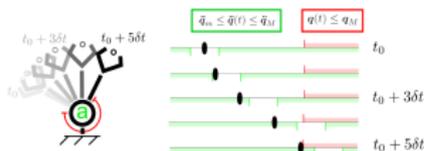
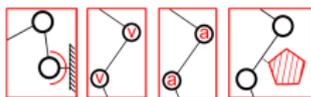


Réactive ?

- 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

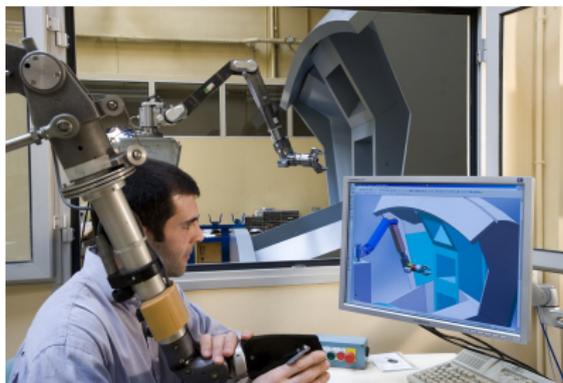
Commande multi-tâches sous contraintes : l'exemple Telemach

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

↪ **LQP sous optimal**

Quelques résultats



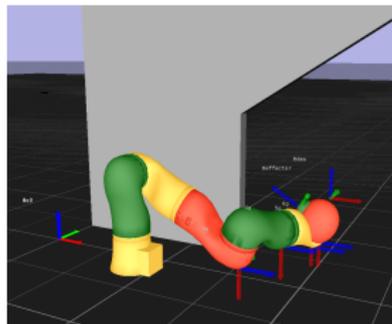
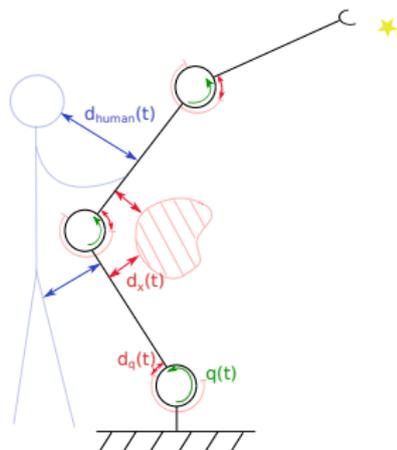
Commande multi-tâches sous contraintes : partage d'espace de travail

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

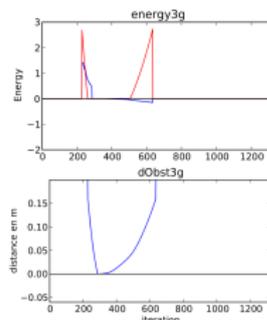
Loi de commande :

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

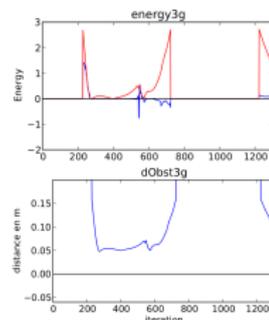
$$\text{s.t. } M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{n}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = J_c(\mathbf{q})^T \chi$$

$$G(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\chi \leq \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$$

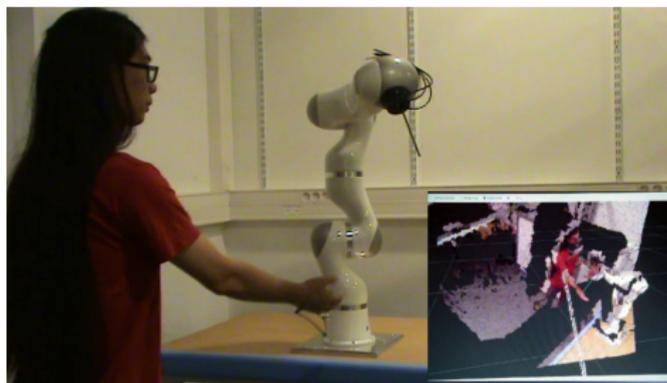
$$E_{i/j} \leq E_{limite}^j(d, d_{safe}, E_{safe}, d_{max}, k)$$



(a) Sans contrainte énergétique

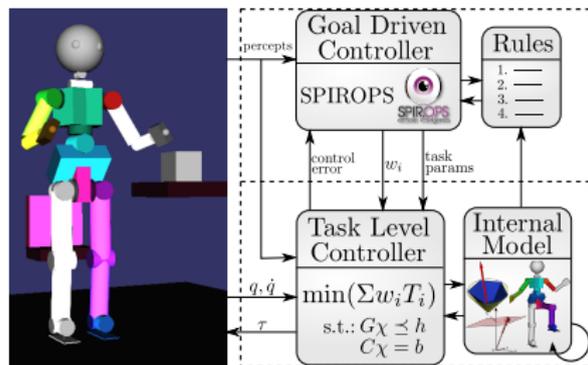


(b) Avec contrainte énergétique



Commande multi-tâches sous contraintes : activités complexes

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



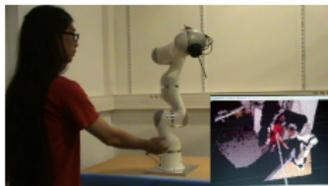
Spécificités :

- Hiérarchie de tâches (stricte ou par pondération)
- Tâches en effort, position, impédance
- Sélection des tâches actives et de leur importance relative via un moteur d'inférence flou
- Approche réactive et prédictive
- Mécanisme de rupture des contraintes de contact par insertion de tâches de transition

Limite

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

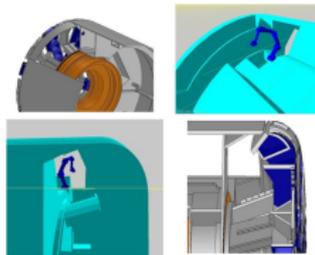
Plan de la présentation



Commande multi-tâches sous contraintes

Conception automatique de robots dédiés

- Explorer largement l'espace des solutions de conception
- Intégrer l'humain dans les critères de conception
- Simulations physiques réalistes, notamment d'opérateurs humains



Apprentissage et Adaptation

Conception automatique de robots dédiés

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

Constat

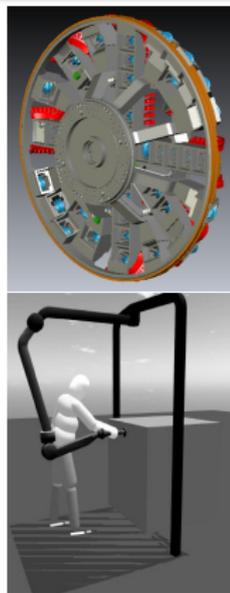
- Pas de solution intuitive
- Combinatoire importante
- Méthodes de conception "classique" inadaptées

↳ **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**

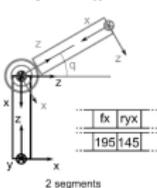


Conception automatique de robots dédiés

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 : rzx	6 : 0.65
17 : rzz	7 : 0.75
18 : ex	8 : 0.85
20 : ey	9 : 0.95
21 : ez	

ex : gene 163
ryz length : 0.35

Fig. 3. Genotype table



Principe de représentation d'un robot

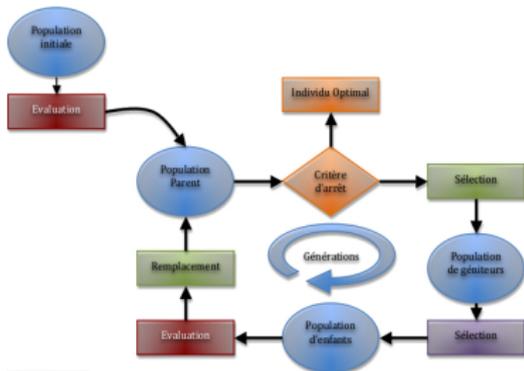
- Description d'un robot à partir d'un génotype
- Chaque gène code un corps et la liaison associé
- La valeur du gène tient compte du type de liaison et de la longueur du corps associé

Fonctions à optimiser

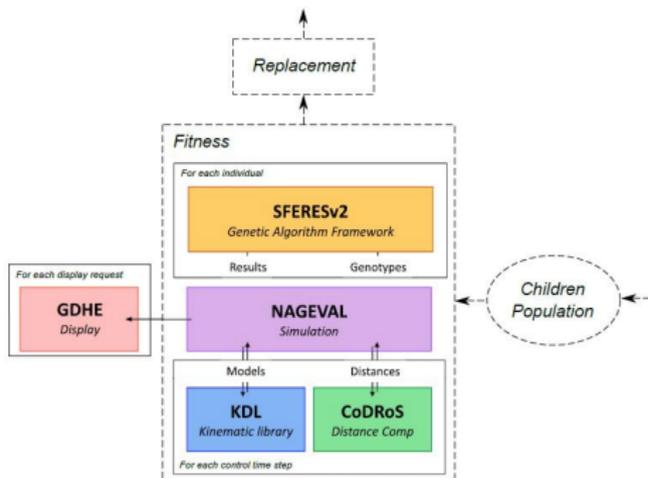
- Complexité de la solution
- Qualité d'exécution de la tâche
- "Ergonomie"

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

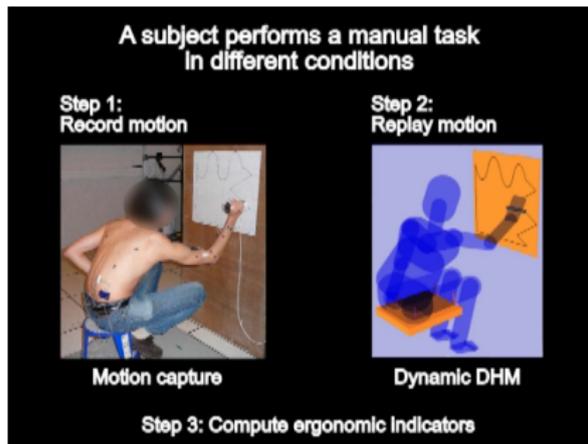
- Algorithme NSGA2 dans le *framework* Sferes (par S. Doncieux et JB. Mouret, ISIR)
- Évaluation par simulations cinématiques / dynamiques des robots
- Suivi de trajectoires "représentatives" avec loi de commande réactive CCC

Conception automatique de robots dédiés

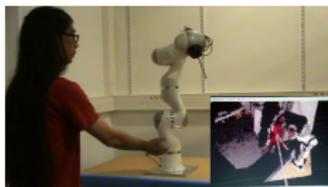
Objectif : Définition des critères de qualité ergonomique quantitatif pour un robot comanipulé assurant un bon compromis performance / ergonomie

Approche

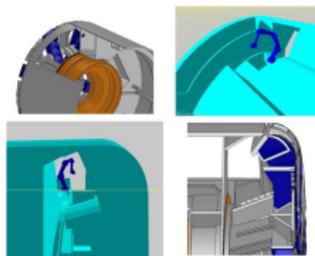
- Capture du mouvement et synthèse d'indicateurs ergonomiques
- Évaluation d'architectures par simulations physiques réalistes



Plan de la présentation



Commande multi-tâches sous contraintes



Conception automatique de robots dédiés



Apprentissage et Adaptation

Apprentissage et Adaptation (en quelques mots)

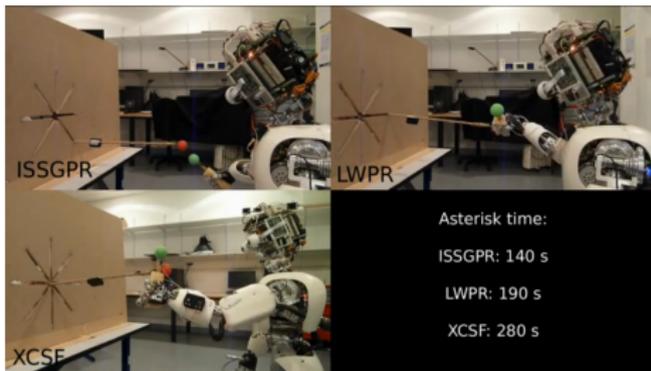
Objectif : Apprentissage et adaptation des modèles nécessaires à la commande du système

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 robotique interactive en milieux industriels complexes 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 ?