



Apprentissage sensorimoteur et linguistique en robotique développementale et sociale

Pierre-Yves Oudeyer
Equipe projet INRIA-ENSTA FLOWERS

<http://www.pyoudeyer.com>

<http://flowers.inria.fr>

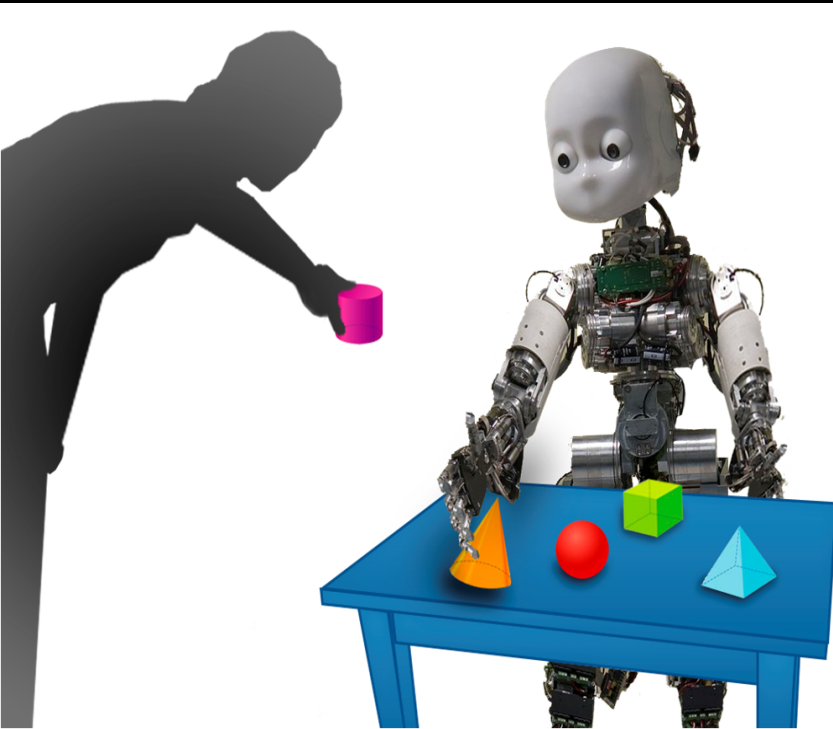
Robotique développementale et sociale



- L'objectif central est d'étudier les mécanismes qui permettent aux robots, une fois qu'ils sont sortis de l'usine et arrivés dans la "nature", d'apprendre par eux-mêmes ou en interaction avec des humains une variété de savoir-faire moteurs et sociaux et/ou linguistiques nouveaux;
- Exactement ce que les enfants humains sont capables de faire à partir de leurs capacités innées;
- Importer, formaliser, implémenter et expérimenter des théories et des mécanismes élaborés en psychologie développementale, en neurosciences cognitives, en biologie, et en linguistique cognitive;
- Grande dimensionalité et complexité des espaces sensorimoteurs: l'apprentissage *tabula rasa* et universel n'est pas possible;
- L'enfant résout ces problèmes grâce à des familles de contraintes développementales, dont l'étude et la modélisation, et la transposition en robotique constitue le cœur de l'activité de FLOWERS;

- Comprendre les processus de l'apprentissage eux-mêmes, i.e. le focus est sur la formation et l'acquisition des savoir-faire et non pas sur ces savoir-faire eux-mêmes;
- Comprendre les capacités et les limites de l'apprentissage (en particulier comprendre dans quelle mesure des principes venant du vivant peuvent permettre d'améliorer les techniques d'apprentissage) ainsi que leur articulation/complémentarité avec techniques d'ingénierie/automatique classiques;
- Confronter les théories du développement de l'enfant avec la réalité, évaluer leur cohérence logique, générer des hypothèses nouvelles;

Développement et apprentissage moteur



Quels savoir-faire apprendre

Découverte et utilisation de son propre corps:

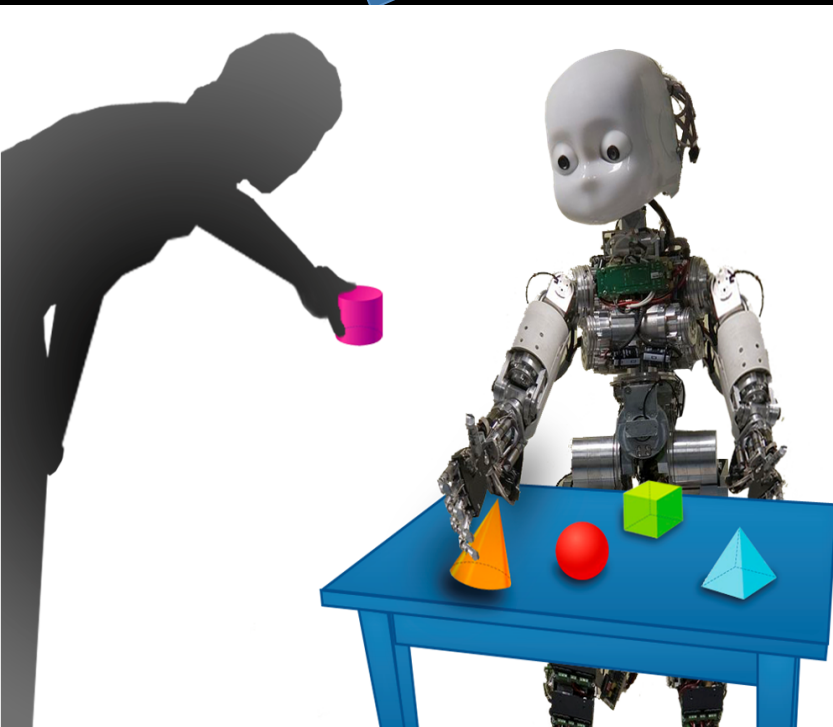
e.g. carte corporelle, coordination œil-main, locomotion

Découverte et utilisation d'objets physiques externes:

e.g. apprentissage des affordances (poussabilité, attrappabilité, roulabilité, jetabilité, ...)

Apprentissage de tâches motrices dépendant du contexte et coordonnées avec un humain

Développement et apprentissage des premiers éléments de langage



Quels savoir-faire et quelles représentations apprendre ?

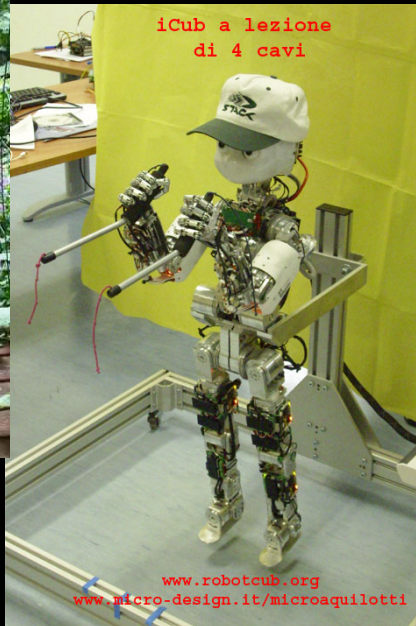
- Découverte d'invariants/abstractions audio-visuelles
e.g. apprentissage des phonèmes et des mots à partir de flux audio-visuels non-segmentés; apprentissage de proto-objets visuels à partir de données continues visuelle et/ou tactiles;
- Apprendre le sens/la sémantique des premiers mots;
- Apprendre en interagissant avec des humains non-ingénieurs;

Les défis de l'apprentissage dans le monde réel



L'apprentissage se fait au travers d'observations, d'interactions, d'essais-erreurs, i.e. mécanismes de recherche dans des espaces de solutions

→ Cela prend du temps dans le monde physique !

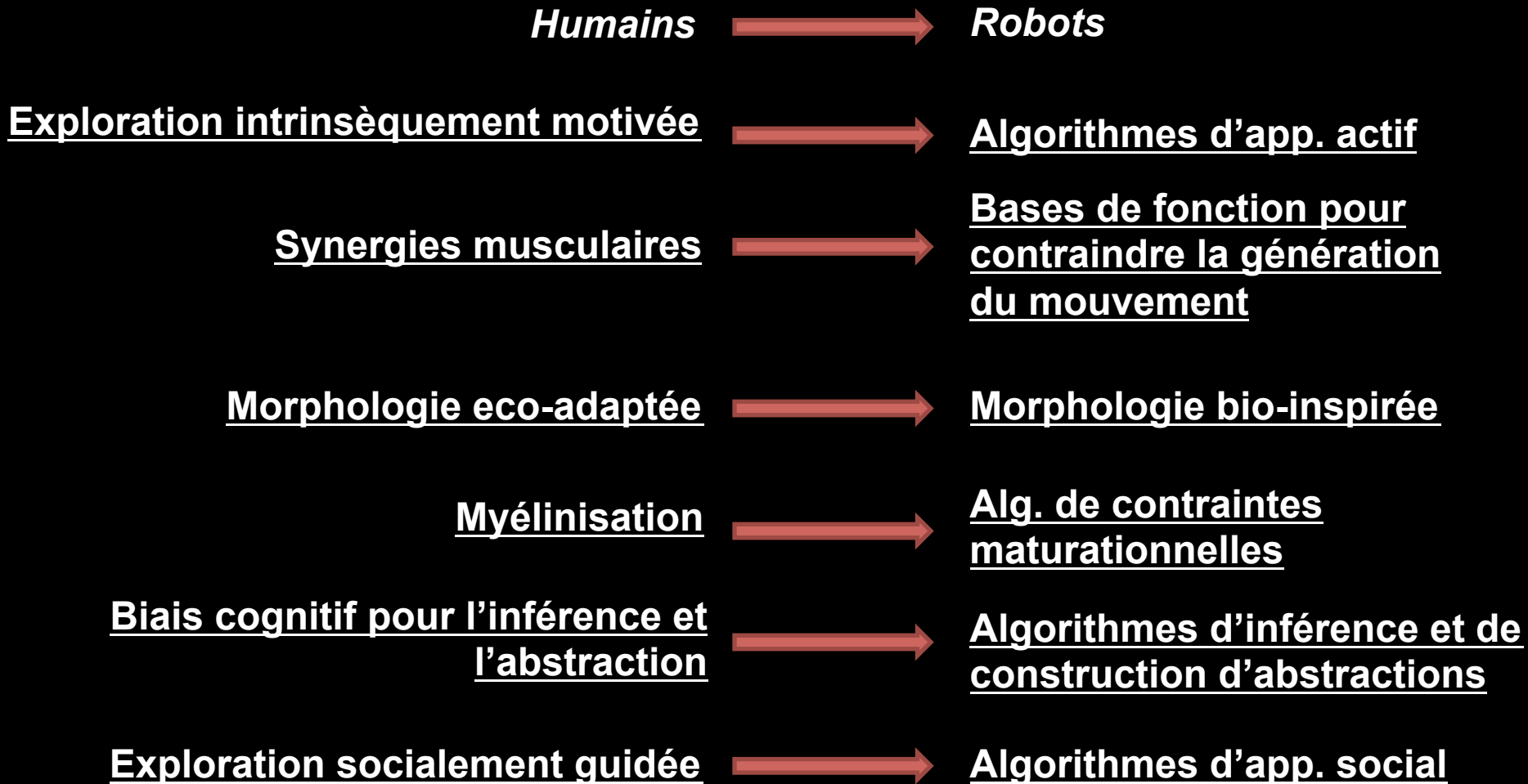


MAIS

- Les corps sont de très grande dimension;
- Il y a un nombre très grand et « ouvert » d'objets et de personnes avec qui interagir;
- Il y a une infinité de savoir-faire/activités apprenables;

→ Comment explorer? Quoi observer? Quoi apprendre dans la durée de temps d'une vie?

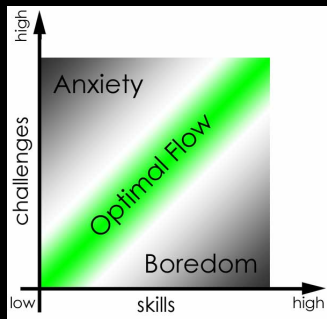
Mécanismes et contraintes développementales pour l'apprentissage moteur



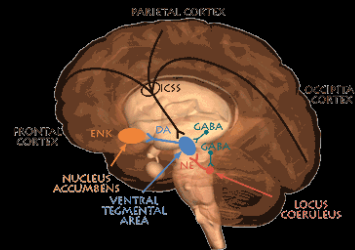
Exploration spontanée et motivations intrinsèques: la recherche de la complexité intermédiaire

Humains: motivations intrinsèques et circuits dopaminergiques

Psychologie
Développementale



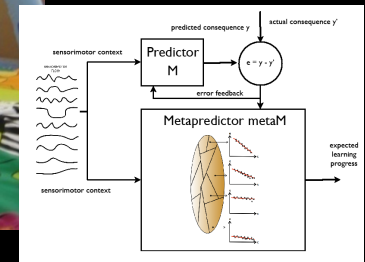
Neurosciences



Dayan and Belleine (2002),
Kakade and Dayan (2002),
Horvitz (2000)



Robots:



Modèles IAC, RIAC, SAGG-RIAC, McSAGG
(Oudeyer et al., 2005; Oudeyer et al., 2007;
Baranes and Kaplan, 2009; Baranes and
Kaplan, 2010a,b)

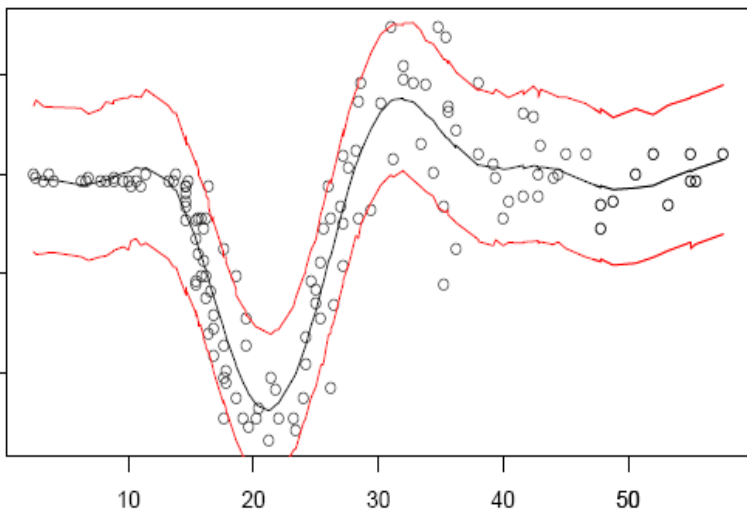
Algorithmique et modélisation qualitative du
développement sensorimoteur

→ Activités de complexité/difficulté
intermédiaire sont les plus
intéressantes;

→ Mécanisme de régulation de la
croissance de la complexité:
l'importance de commencer "petit"

Apprentissage actif/design optimal d'expériences et formulation RL

Y



- Un modèle à apprendre $X \rightarrow Y$ à partir de mesures/observations $\{(x_i, y_i)\}$ où X peut être state(t) x action(t) ou juste action(t) Y peut être state(t+1)

- Une fonction $I(x_i)$ est définie, mesurant l'intérêt informationnel d'obtenir le y_i associé à x_i (heuristique ou optimal par rapport à des critères variés)

- Sélection de l'action:

$$x_{choosen} = \operatorname{argmax}_{x_i \in X} \sum_{t=n+1}^{\infty} \gamma^t \tilde{I}(x_i)$$

- $I(x_i)$ peut être vu comme une récompense dans le formalisme RL qui peut alors être utilisé pour résoudre le problème de méta-optimisation

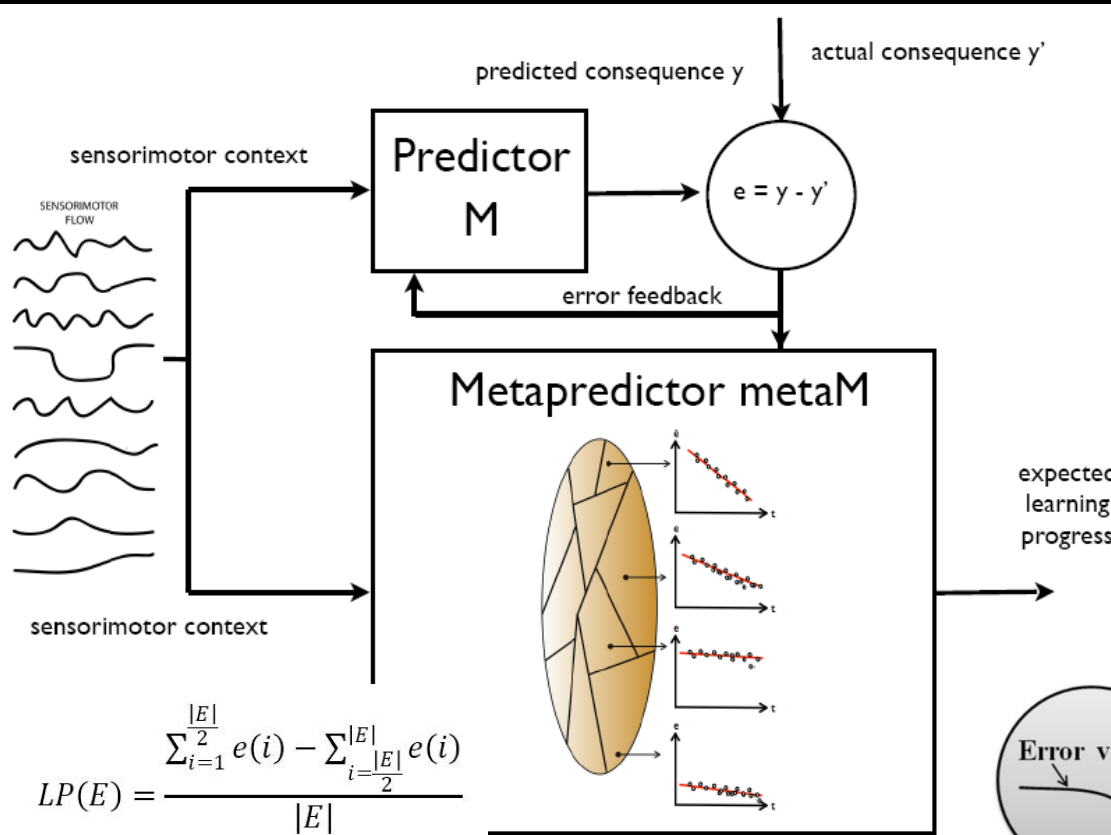
f

$(x_1, y_1) \rightarrow$ model 1
 $(x_2, y_2) \rightarrow$ model 2
 $(x_3, y_3) \rightarrow$ model 3
 \vdots
 $(x_n, y_n) \rightarrow$ model n

X

→ Quel x_{n+1} expérimenter ?

I(X) = dérivée « régionale » des erreurs en prédiction



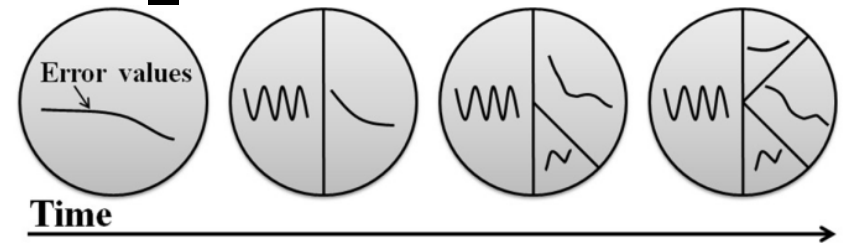
Optimiser le progrès en apprentissage, i.e. explorer les régions où les erreurs diminuent le plus vite

IAC, R-IAC (Intelligent Adaptive Curiosity) architecture(s)

split of φ_n into φ_{n+1} and φ_{n+2} is done by choosing j and v_j such that:

$$(LP(\{\mathbf{e}(t+1) | (\mathbf{SM}(t), \mathbf{S}(t+1)) \in \varphi_{n+1}\}) - LP(\{\mathbf{e}(t+1) | (\mathbf{SM}(t), \mathbf{S}(t+1)) \in \varphi_{n+2}\}))^2$$

is maximal, where

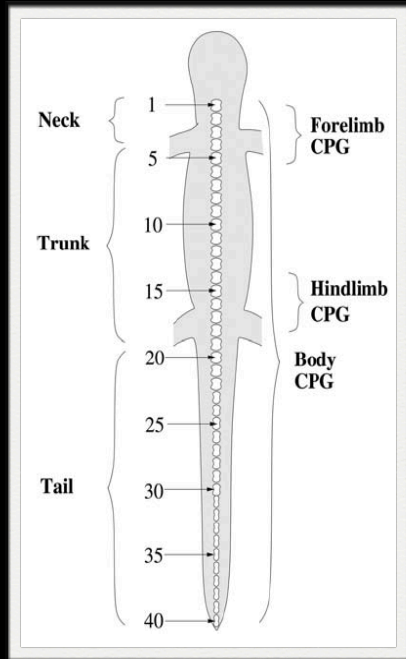


Synergies et primitive motrices

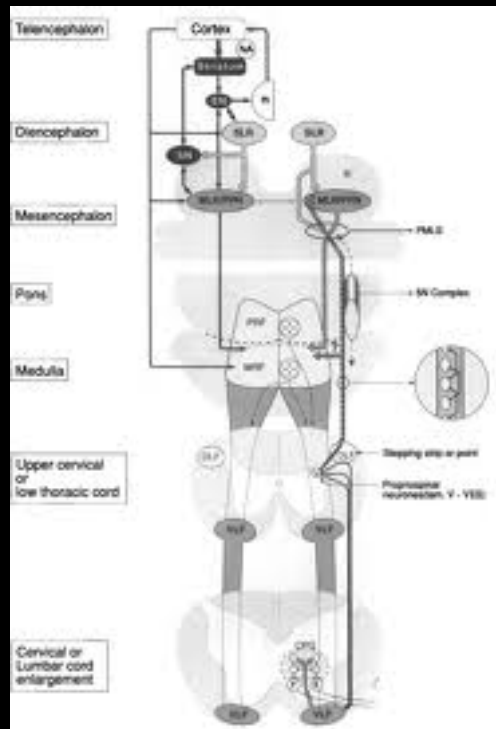
Humains: synergies musculaires



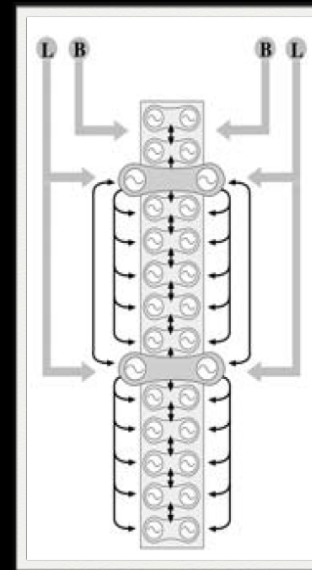
Robots:



(Ijspeert et al., 2005)



(Rossignol, 1996)



$$\tau \dot{v}_i = -\alpha \frac{(x_i - x_0)^2 + v_i^2 - E_i}{E_i} v_i - (x_i - x_0) \sum_j (a_{ij}(x_j - x_0) + b_{ij}v_j)$$

$$\tau \dot{x}_i = v_i$$

Etude et expérimentation:

- Formalisme DMP;
- MTRNN;
- Splines + champs de vecteurs;

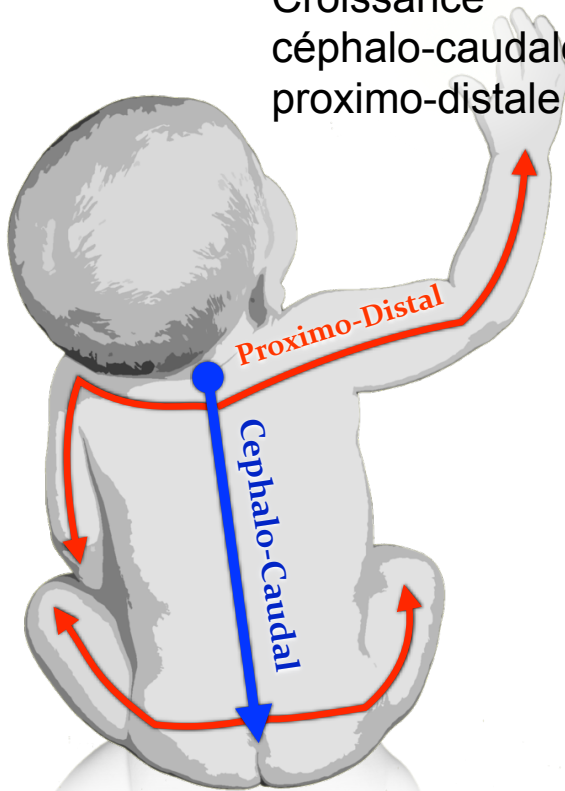
Processus maturationnels

Humains: maturation du système sensorimoteur



Robots:

Croissance céphalo-caudale et proximo-distale



(Eyre, 2003)

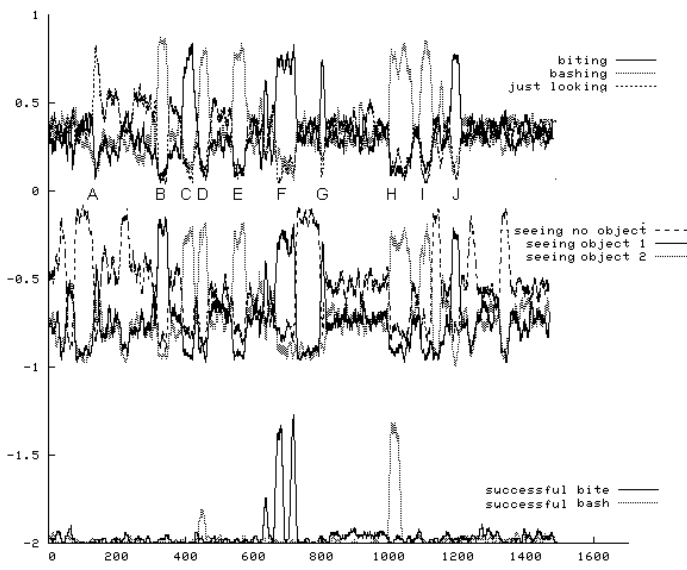
$$\psi(t+1) = \begin{cases} \psi(t) + \lambda \cdot \text{interest}(S') & \text{if } \text{interest}(S') > 0 \\ \psi(t) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$f(t) = \left(-\frac{(p_{max} - p_{min})}{\psi_{max}} \cdot \psi(t) + p_{max} \right)^{-1}$$

$$\varepsilon_D(t) = -\frac{(\varepsilon_{D_{max}} - \varepsilon_{D_{min}})}{\psi_{max}} \cdot \psi(t) + \varepsilon_{D_{max}}$$

$$r_i(t) = \psi(t) \cdot k_i \quad (7)$$

Where k_i represents an intrinsic value determining the difference of evolution velocities between each joint. Here we fix: $k_1 \geq k_2 \geq \dots \geq k_n$, where k_1 is the first proximal joint.

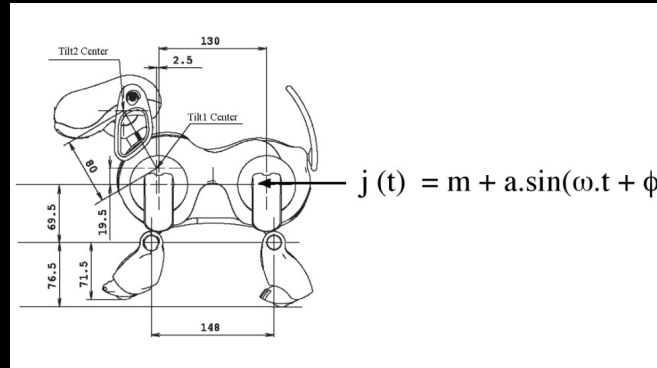
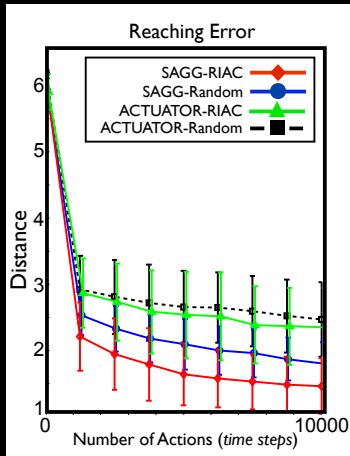


IEEE TEC, IEEE TAMd,
 Front. Neurobotics, RAS,
 SICE, Connect. Sc., ICDL,
 Epirob, Humanoids
 (Keynotes Epirob 2009, IEEE
 Alife 2011, Robolift 11,
 AAMAS 2011)

Infant and Child Dev.,
 Enfance, Cog. Syst.
 Research, Front.
 Neuroscience

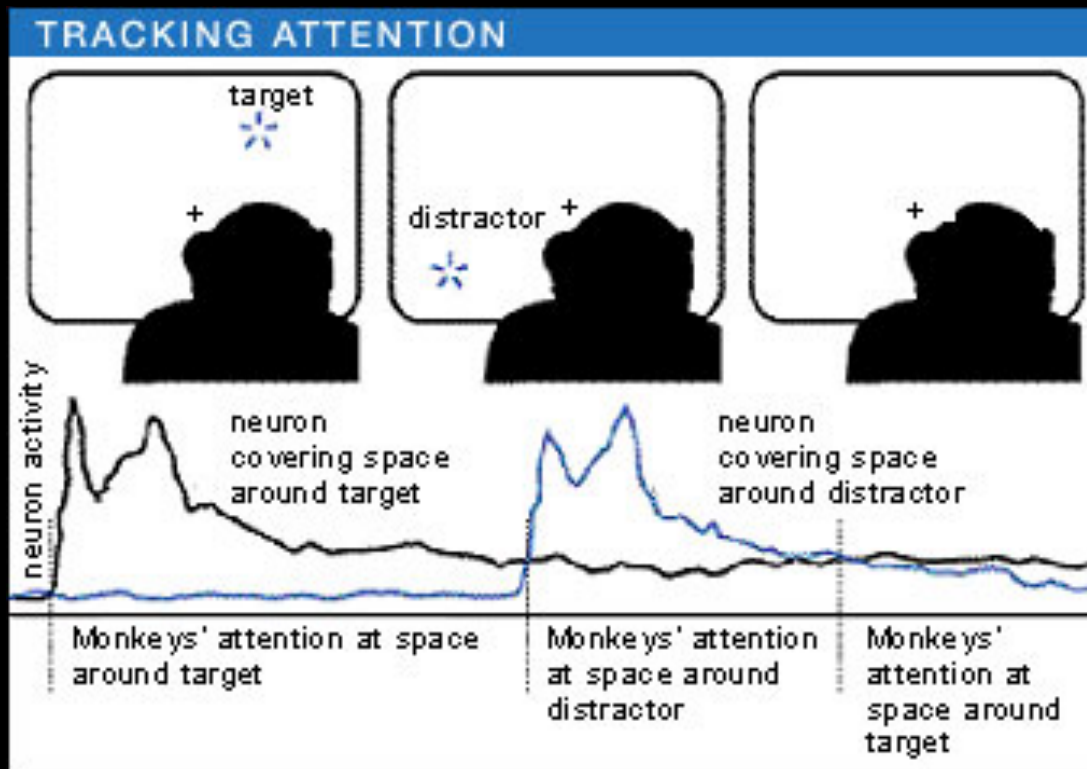
Revue philosophique de la
 France et de l'Étranger

Apprentissage d'affordances;
 Auto-organisation progressive du comportement (e.g. dualité diversité/régularité;
 Formation de structures de communication élémentaires, pré-curseurs du langage)



Apprentissage de la locomotion, 24 dimensions
 Bcp plus rapide et meilleure performances asymptotiques
 qu'algorithmes classiques d'exploration (active ou pas)

Modèles et expérimentations du système attentionnel/exploratoire visuel chez les singes



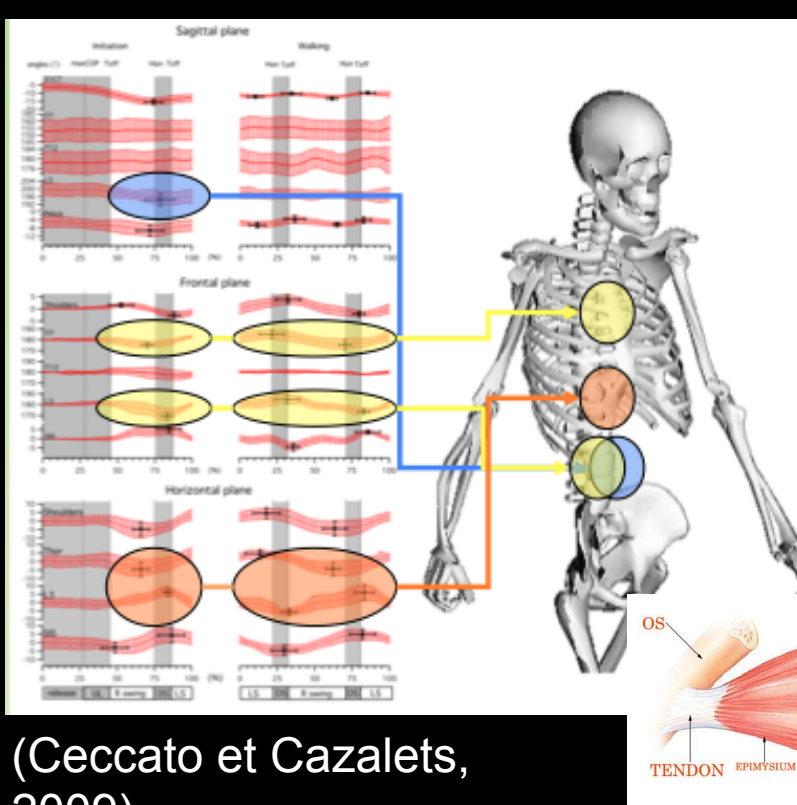
Jacqueline Gottlieb,
Department of Neuroscience
Columbia University

Contraintes morphologiques

Humains: rôle de la colonne vertébrale et de la flexibilité du corps



Robots



- Modélisation et exp. du tronc;
- Extension aux jambes;



(Ceccato et Cazalets, 2009)

Institut de Neurosciences Cognitives et Intégratives d'Aquitaine (Ly et Oudeyer, SIGGRAPH 2010, emerging technologies)

Contraintes morphologiques sur l'apprentissage de la marche: le rôle de la souplesse et de la colonne vertébrale

- Acroban (Olivier Ly), 32 DOFs
- Structure souple qui peut absorber et stocker de l'énergie (tendons élastiques, ressorts, moteurs)
- Torse semi-passif avec colonne vertébrale multi-articulée
- Primitive motrice d'équilibrage générique
- La marche comme une auto-perturbation
- Une interface homme-robot « auto-organisée », permettant de guider intuitivement le robot en le prenant par la main

Les mécanismes d'attention partagée dans l'apprentissage du langage

Humains et animaux: mécanismes de partage de l'attention



In robots:



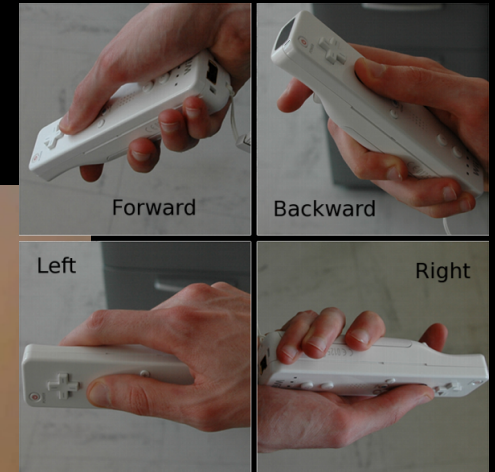
(Tomasello, 2003)



(Savage-Rumbaugh, 1986)



(Rouanet et al., 2009, 2010a,b, 2011)

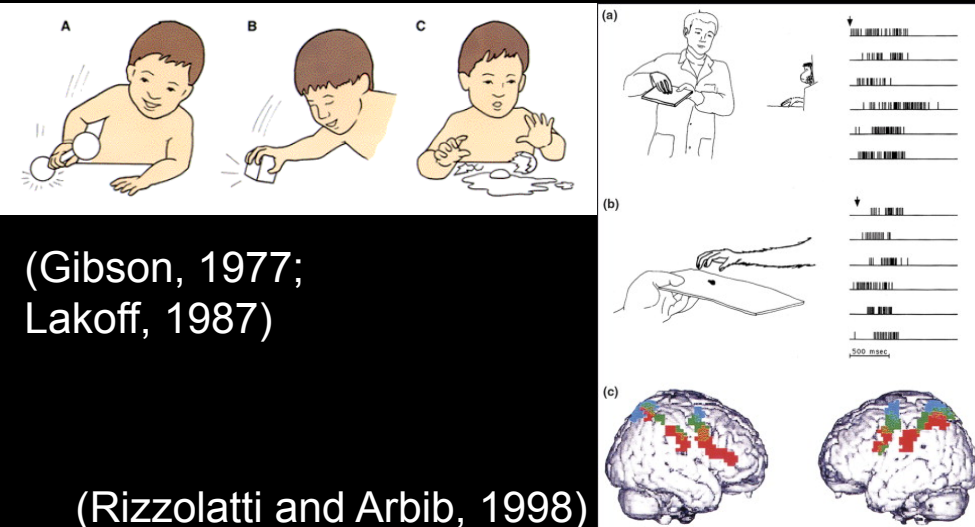


Représentation et inférence du sens des mots nouveaux

Humains: contraintes sur l'inférence du sens



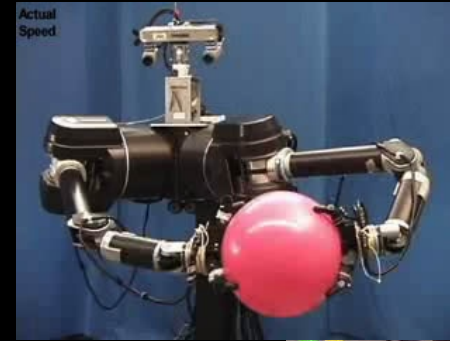
Robots:



(Gibson, 1977;
Lakoff, 1987)

(Rizzolatti and Arbib, 1998)

→ Pour contraindre l'espace de recherche des sens possibles, les humains ont un biais pour favoriser les représentations en termes d'affordances



- Etudier et comparer les formalismes de représentations des affordances (OACs, temporally extended policies, multimaps);
- Réutiliser toutes les techniques d'apprentissage moteur pour les apprendre;
- Introduire des mesures de similarités dans ces espaces pour pouvoir utiliser des alg. de catégorisation;
- Interfaces pour contrôler la complexité des exemples fournis par les humains;

FLOWERS in 2011, INRIA-ENSTA

Permanent members

Pierre-Yves Oudeyer (INRIA CR1, scientific responsible)

Manuel Lopes (INRIA CR2)

David Filliat (MdC, ENSTA)

(+ 1 new ENSTA recrutement to come)

Administrative assistant

Marie Sanchez

Delegation

Olivier Ly (MdC, Univ. Bordeaux I)

Engineers

Jérôme Béchu (INRIA)

Paul Fudal (INRIA)

Haylee Fogg (INRIA)

Postdocs

Stéphane Bazeille (ENSTA Postdoc)

Thomas Degris (INRIA Postdoc, arrival oct. 11)

PhD Students

Adrien Baranes (INRIA PhD) – leave sept. 11

Pierre Rouanet (INRIA PhD) – leave sept. 11

Thomas Cederborg (INRIA PhD)

Mai Nguyen (INRIA PhD)

Matthieu Lapeyre (INRIA PhD)

Olivier Mangin (Bourse AMX – Polytechnique)

Fabien Benureau (Bourse ENS Lyon)

Islem Jebari (ENSTA PhD)

Natalia Lyubova (ENSTA PhD)

Alexandre Chapoulie (ENSTA PhD)

Master Students

2 at INRIA, 1 at ENSTA

Collaborations interdisciplinaires

psychologie développementale

IMClever European project on Intrinsically motivated cumulative learning (motivations intrinsèques)

Philippe Rochat, Emory State University, US (découverte des cartes corporelles)

Linguistique

Louis ten Bosch, Radboud University, The Netherlands (prof. invité) (modèles de la découverte d'invariants moteurs, approche NMF)

Benjamin Bergen, USC, US (linguistique cognitive, modèles de représentation du sens et d'affordances)

Neurosciences cognitives et intégratives

Jacqueline Gottlieb, Columbia University, NY, US, (motivations intrinsèques, attention visuelle)

J-R. Cazalets, Inst. Neur. Int. De Bordeaux (Acroban, physiologie de la colonne vertébrale)

Ergonomie et facteurs humains

INRIA Iparla (interfaces)

Institut de Cognitique, Bordeaux (évaluation des interfaces)

Robotique

O. Sigaud, V. Padois ISIR, Univ. Paris VI (Operational space control)

H. Kozima, Miyagi Univ., Japan (Interactions homme-robot pour l'assistance à la personne, autisme)

Entreprises GOSTAI, Aldebaran Robotics, Robot Studio

Mécanique

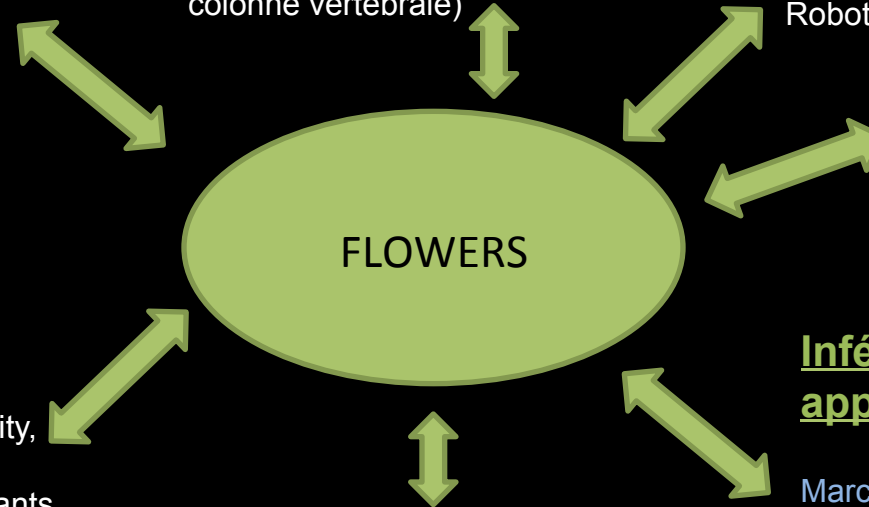
Alexandre Lasserre, lab. De mécanique, Bordeaux (conception mécanique, Acroban)

Inférence statistique et apprentissage automatique

Marc Toussaint, FU Berlin, Germany, (Inférence probabiliste pour la décision et la planification);

INRIA Alea, Pierre Del Moral, François Caron (méthodes de Monte-Carlo);

Andrew Barto, Univ. Mass., US (RL et théorie des options)



Coll. déjà commencées

Coll. déjà formellement planifiées (ERC, ANR, ...)