

Thierry Pozzo

Contribution U887 INSERM Motricité.Plasticité

TITRE

LA COGNITION MOTRICE ET SES APPLICATIONS MEDICALES

1) Contexte théorique

L'existence de voies nerveuses différenciées pour traiter les signaux sensoriels et moteurs, conduit habituellement les études neurophysiologiques et comportementales à dissocier les processus de l'action et de la perception. Ce type de description a sans aucun doute influencé notre compréhension du système nerveux central. Pourtant il est désormais admis qu'en plus de la commande motrice, la production de l'action engage simultanément des mécanismes de prédiction sensorielle ainsi que l'activation de zones nerveuses sensorielles (Rizzolatti 2005). Enfin, des avancées récentes en neurosciences montrent que la perception visuelle n'est pas seulement le résultat d'une stimulation exogène mais qu'elle dépend des compétences motrices pouvant être rappelées à l'observation du mouvement (Jeannerod 2001).

Ce projet est construit autour de 3 axes de recherches complémentaires :

La perception est étudiée à partir de l'apport théorique récent des neurones miroirs (MNs) (Rizzolatti 1996) et l'hypothèse d'une simulation mentale de l'action à l'observation. L'inférence du mouvement, les réponses motrices subliminales induites lors de l'imagerie mentale implicite (l'empathie posturale) et l'apprentissage par observation sont étudiés. Dans ce contexte la compréhension des mécanismes perceptifs aide en retour à décrire le contenu de la commande motrice.

L'action est étudiée selon une approche expérimentale et les méthodes de simulation numérique. Cette dernière consiste à transformer les observations empiriques en formalismes mathématiques afin de favoriser l'application robotique et le développement de techniques pouvant compenser le handicap moteur et sensoriel.

2) La perception du mouvement biologique : une approche comportementale des neurones miroirs

L'objectif, est méthodologique et théorique, consiste : a) développer une méthode pour quantifier les manifestations comportementales de l'empathie, b) définir le type de contexte sensoriel favorisant la cognition sociale, et c) étudier les limites des processus d'empathie et les mécanismes qui associent la perception au répertoire moteur.

La manipulation du contexte visuel (plus ou moins riche dans la scène visuelle présentée aux sujets), pourraient réduire progressivement l'écart entre l'observateur et l'acteur, et favoriser la résonance motrice et faciliter la mise au point de solutions thérapeutiques pour le réentraînement à l'équilibre par ex.

2.1) Inférence du mouvement, reconstruction de trajectoires cachées et imagerie motrice implicite

La qualité des interactions sociales ou encore la survie des espèces en situation de compétition nécessitent la préservation de l'information visuelle lorsque celle-ci est interrompue par accident. Plusieurs mécanismes sont impliqués lorsque l'on demande à un observateur d'estimer la position finale de la main d'un acteur qui va saisir un objet caché derrière un mur.

Un mécanisme local, qui calcule la trajectoire à venir sur la base des entrées visuelles disponibles et leur intégration mathématique est une possibilité pour faire cette estimation et prédire la position future de la main observée (Acti-Grosso and Stucchi 2003). Cette solution est couramment utilisée en vision artificielle pour extrapoler la trajectoire de mouvements prédictibles par les lois de la physique newtonienne. Ce premier niveau s'appuie uniquement sur les phénomènes locaux. Ainsi, la position perçue de l'objet sur la rétine est extrapolée sur sa trajectoire conduisant l'observateur à percevoir la cible systématiquement en avant de sa position réelle.

L'utilisation de signaux extra rétiniens (ex., les modèles internes du mouvement) est une autre voie d'abord pour expliquer la capacité humaine à inférer le mouvement.

Nos résultats (Pozzo et al. 2006) suggèrent un rappel des modèles internes de l'action lors de l'observation de mouvement partiellement occultés. Nous utiliserons ce résultat pour réactiver les aires motrices de sujets dépendants ou hypoactifs.

Des interfaces graphiques permettant l'animation de séquences de mouvement choisis pour leur valeur évocatrice du mouvement et leur capacité à induire l'imagerie motrice implicite seront développées pour une rééducation à l'hôpital ou à domicile. La réalité virtuelle simplifiée sera utilisée afin de fournir le contexte visuel permettant la meilleure immersion. L'application doit contribuer à 1) prévenir la dépendance des sujets âgés hypoactifs, 2) réduire les coûts de santé en développant l'entraînement autonome. Ce projet fait partie des objectifs fixés dans le cadre du projet TecSan financé par l'ANR et conduit en collaboration avec l'Institut Image de Châlons (LE2I/CNRS et ENSAM www.ai.cluny.ensam.fr). L'imagerie motrice explicite est déjà utilisée en routine pour la rééducation des patients (Page 2001, Jackson, 2001, Fansler 1985, Morganti et al. 2003). Ce programme propose une méthodologie qui n'est pas dépendante des processus attentionnels comme c'est le cas en imagerie motrice explicite (Skoura et al. 2005) et qui est facile à mettre en œuvre avec des patients.

2.2) Apprentissage par observation

Chez les amputés, l'absence de segment corporel n'empêche pas l'existence d'activation de zones corticales responsables du codage sensorimoteur du membre inexistant pouvant provoquer des douleurs (ou aplasie de membre fantôme). La perception visuelle de congénères a été suggérée pour expliquer ce type de représentation qui montre l'importante plasticité des cartes corticales et l'effet puissant du couplage perception-action. Ainsi l'idée d'un rappel de représentations motrices sans lien avec l'expérience motrice de l'observateur (c'est-à-dire sans signaux sensoriels ou moteurs issus de l'exécution du mouvement, comme c'est le cas pour de nouvelles habiletés motrices) ouvrent de nouvelles perspectives aux méthodes d'apprentissage.

Si des primitives sont extraites aux cours de l'approche empirique, on peut alors faire l'hypothèse qu'un affichage privilégiant les invariants du mouvements codés sous la forme de primitives favorisera l'apprentissage par observation et la mise en correspondance des systèmes d'action et de perception.

La même idée est utilisée pour l'apprentissage de robot par imitation du mouvement humain. Par exemple, l'action perçue du professeur peut être renvoyée vers un ensemble de

primitives implantées dans la mémoire du robot. La primitive la plus proche du mouvement perçu est ensuite ajustée par apprentissage pour améliorer la performance du robot. Enfin, l'apprentissage basé sur des algorithmes de renforcement (couramment utilisé en « *machine learning* ») doit être envisagé afin de dériver une fonction d'optimisation à partir du mouvement observé.

3) Contrôle modulaire des mouvements naturels et applications robotiques

L'extraction des synergies motrices par l'étude des signaux électromyographique au cours de mouvements habituels ainsi que l'élaboration de modèle de contrôle est désormais un aspect important de la robotique humanoïde. Notre idée est d'utiliser l'approche robotique qui consiste à introduire des fonctions de coût pour optimiser le contrôle et résoudre le problème d'indétermination des systèmes à plusieurs degrés de liberté. Les fonctions d'optimisation qui sont testées et simulées sont comparées aux résultats expérimentaux afin de déterminer les lois pouvant être utilisées par le SNC pour piloter la main et le corps vers une cible spatiale. Les résultats sont ensuite implémentés lors de la conception de robots bipèdes afin d'améliorer leur fonctionnalité en condition écologique.

L'approche expérimentale consiste à mettre en évidence l'existence de primitives motrices identifiées à différents niveaux du système nerveux sous la forme abstraite de couplages angulaires et de synergies musculaires.

Une décomposition des patterns musculaires en une combinaison de synergies, permettrait de vérifier l'hypothèse d'un contrôle du mouvement basé sur l'utilisation d'un nombre réduit de modules eux-mêmes ajustés par les retours sensoriels. Ce type de solution pourrait ensuite trouver une application pour contrôler des robots multiarticulés.

En outre, un simulateur de mouvement basé sur une procédure itérative d'apprentissage de solutions motrices respectant les contraintes musculo-squelettiques et l'objectif de la tâche (atteindre la cible et maintenir son équilibre) selon l'optimisation de fonctions de coût, est développé. Différentes fonctions d'optimisation, ayant fait leurs preuves pour modéliser les mouvements du bras, sont testées et le résultat est comparé aux données enregistrées. La proximité des 2 résultats nous permet de définir les variables du contrôle du plan moteur. Ainsi les fonctions classiquement utilisées pour les mouvements du bras (minimum jerk, torque change, active torque change...) ainsi que les fonctions inspirées par nos résultats expérimentaux (couplage temporel, maximisation de l'exploitation de la force gravitaire, couplage temporel doigt et centre de masse...) sont appliqués au simulateur. Ces fonctions sont testées séparément ou bien de façon combinée en ajustant le poids de chacune d'elles. (Tagliabue et al. 2007, Berret et al. 2008).

4) Références

- 1) Actis-Grosso R, Stucchi N (2003) Shifting the start: backward mislocation of the initial position of a motion. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 29: 675-691
- 2) Baker CI, Keysers C, Jellema T, Wicker B, Perrett DI (2001) Neuronal representation of disappearing and hidden objects in temporal cortex of the macaque. *Exp Brain Res* 140: 375-381
- 3) Berret B, Gauthier JP, Papaxanthis C (2007) How humans control arm movements. *J of Mathematical Sciences* (in press).
- 4) Bizzi E, Cheung VCK, d'Avella A, Saltiel P, Tresch MC (2007) Combining modules for movement. *Brain Research Reviews*, in press
- 5) De Valois RL, De Valois KK (1991) Vernier acuity with stationary moving Gabors. *Vision Research* 31: 1619-1626
- 6) Erlhagen W (2003) Internal models for visual perception. *Biological Cybernetics* 88: 409-417
- 7) Fadiga L, Fogassi L, Pavesi G, Rizzolatti G (1995) Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study. *Journal of Neurophysiology* 73: 2608-2611
- 8) Fansler CL, Poff CL, Sheppard KF (1985). Effects of mental practice on balance in elderly women. *Phys Ther* 65, 1332-1338

- 9) Iacoboni M (2005) Neural mechanisms of imitation. *Curr Opin Neurobiol* 15: 632-637
- 10) Indovina I, Maffei V, Bosco G, Zago M, Macaluso E, Lacquaniti F (2005) Representation of visual gravitational motion in the human vestibular cortex. *Science* 308: 416-419
- 11) Jackson PL, Lafleur M F, Malouin F, Richards C, Doyon J (2001) Potential role of mental practice using motor imagery in neurologic rehabilitation. *Arch Phys Med Rehabil* 82, 1133-1141
- 12) Jeannerod M (2001) Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *NeuroImage* 14: 103-109
- 13) Kerlirzin Y, Pozzo T, Dietrich G, Vieilledent S (1999) Effects of kinematics constraints on hand trajectory during whole-body lifting tasks. *Neurosci Lett* 277: 41-44
- 14) McIntyre J, Zago M, Berthoz A, Lacquaniti F (2001) Does the brain model Newton's laws? *Nat Neurosci* 4: 693-694
- 15) Miall RC (2003) Connecting mirror neurons and forward models. *NeuroReport* 14: 2135-2137
- 16) Morganti F, Bulla D, Daggioli A, Castelnovo G, Bulla D, Vettorello M, Riva G (2003). The use of technology-supported mental imagery in neurological rehabilitation: a research protocol. *Cyberpsychol Behav* 6, 421-427
- 17) Nijhawan R (1994) Motion extrapolation in catching. *Nature* 370: 256-257
- 18) Oztop E, Kawato M, Arbib MA (2006) Mirror neurons and imitation: A computationally guided review. *Neural Networks* 19: 254-271
- 19) Paccalin C, Jeannerod M (2000) Changes in breathing during observation of effortful actions. *Brain Res*, 862, 194-200
- 20) Page SJ, Levine P, Sisto SA, Johnston M V (2001) Mental practice combined with physical practice for upper-limb motor deficit in subacute stroke. *Phys Ther* 81, 1455-1462.
- 21) Papaxanthis C, **Pozzo T**, Popov KE, McIntyre J (1998) Hand trajectories of vertical arm movements in one-G and zero-G environments. Evidence for a central representation of gravitational force. *Exp Brain Res* 120: 496-502
- 22)
- 23) Patron J, Stapley P, Pozzo T (2002) Evidence of short-term adaptation to microgravity of neuromuscular synergy during a whole body movement. *J Gravit Physiol* 9: P167-168
- 24) Patron J, Stapley PJ, Pozzo T (2004) Temporal relationship between postural and focal components of a whole-body reaching movement: a study case of short-term adaptation in microgravity condition. *J Gravit Physiol* 11: P23-24
- 25) Patron J, Stapley P, Pozzo T (2005) Human whole-body reaching in normal gravity and microgravity reveals a strong temporal coordination between postural and focal task components. *Exp Brain Res* 165: 84-96
- 26) Pozzo T, McIntyre J, Cheron G, Papaxanthis C (1998) Hand trajectory formation during whole body reaching movements in man. *Neurosci Lett* 240: 159-162
- 27) Pozzo T, Ouamer M, Gentil C (2001) Simulating mechanical consequences of voluntary movement upon whole-body equilibrium: the arm-raising paradigm revisited. *Biol Cybern* 85: 39-49
- 28) Pozzo T, Stapley PJ, Papaxanthis C (2002) Coordination between equilibrium and hand trajectories during whole body pointing movements. *Exp Brain Res* 144: 343-350
- 29) Pozzo T, Papaxanthis C, Petit JL, Schweighofer N, Stucchi N (2006) Kinematic features of movement tunes perception and action coupling. *Behav Brain Res* 169:75-82
- 30) Preston S.D, de Waal F.B.M (2002) Empathy: its ultimate and proximate bases. *Behavioral and Brain Sciences*, 25: 1-72
- 31) Rizzolatti G (2005) The mirror neuron system and its function in humans. *Anat Embryol (Berl)* 210: 419-421
- 32) Rizzolatti G, Fadiga L, Gallese V, Fogassi L (1996) Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive Brain Research* 3: 131-141
- 33) Saygin AP, Wilson SM, Hagler Jr DJ, Bates E, Sereno MI (2004) Point-light biological motion perception activates human premotor cortex. *J. Neurosci* 24: 6181-6188
- 34) Saunier G, Papaxanthis C, Vargas C, Pozzo T (2007) Inference of complex human motion requires internal models of action: behavioral evidence. *Exp Brain Res (DOI, sous presse)*
- 35) Schmidt M, Schieppati M, Pozzo T (2006) Effect of the fatigue on the precision of a whole body pointing task. *Neuroscience* 139:909-920
- 36) Skoura X, Papaxanthis C, Vinter A, Pozzo T (2005) Mentally represented motor actions in normal aging. I. Age effects on the temporal features of overt and covert execution of actions. *Behav Brain Res* 165: 229-239
- 37) Stapley P, Pozzo T (1998) Does the centre of mass remain stable during complex human postural equilibrium tasks in weightlessness? *Acta Astronaut* 43: 163-179

- 38) Stapley P, Pozzo T, Grishin A (1998) The role of anticipatory postural adjustments during whole body forward reaching movements. *Neuroreport* 9: 395-401
- 39) Stapley PJ, Pozzo T, Cheron G, Grishin A (1999) Does the coordination between posture and movement during human whole-body reaching ensure center of mass stabilization? *Exp Brain Res* 129: 134-146
- 40) Stapley P, Pozzo T, Grishin A, Papaxanthis C (2000) Investigating centre of mass stabilisation as the goal of posture and movement coordination during human whole body reaching. *Biol Cybern* 82: 161-172
- 41) Tagliabue M, Pedrocchi A, Gower V, Ferrigno G, Pozzo T (2004) Whole body pointing movements in transient microgravity: preliminary results. *J Gravit Physiol* 11: P39-40
- 42) Tagliabue M, Pedrocchi A, Pozzo T, Ferrigno G (2007) A mathematical tool to generate complex whole body motor tasks and test hypotheses on underlying motor planning. *Medical & Biological Engineering & Computing* (DOI, sous presse).
- 43) Ting LH, MacPherson JM (2005) A limited set of muscle synergies for force control during a postural task. *J Neurophysiol*, 93, 609-622
- 44) Thompson JC, Clarke M, Stewart T, Puce A (2005) Configural processing of biological motion in human superior temporal sulcus. *J Neurosci* 25: 9059-9066
- 45) Umiltà MA, Kohler E, Gallese V, Fogassi L, Fadiga L, Keysers C, Rizzolatti G (2001) I know what are you doing: a neurophysiological study. *Neuron* 31: 155-165