

Contrôle sensorimoteur naturel d'un bras artificiel

AYMAR de RUGY

Univ. Bordeaux, CNRS, INCIA, UMR 5287, F-33000 Bordeaux, France

Un contrôle naturel de prothèse en réalité virtuelle

Lorsqu'ils sont entraînés sur des données suffisamment riches, les réseaux de neurones artificiels sont capables de reproduire les comportements humains les plus probables, une vertu que certains pourront qualifier d'intelligence. Nous avons déjà montré (1, 2) qu'une intelligence artificielle de ce type est capable de reproduire la configuration des articulations manquantes chez une personne amputée du bras, d'une manière qui permet à cette dernière de saisir et déplacer des objets aussi facilement qu'avec un bras naturel dans un

environnement virtuel (Figure 1, Vidéo 1 et 2). En effet, un réseau de neurones entraîné sur une base de mouvements naturels parvient à prédire les articulations du coude jusqu'au poignet à partir des seuls mouvements d'épaule d'un utilisateur et de la position et orientation dans l'espace de l'objet que celui-ci souhaite saisir. Le passage de cette preuve de concept en situation de réalité virtuelle à un monde physique soulève cependant de nombreuses difficultés. Dans les sections suivantes, nous illustrons comment certaines de ces difficultés peuvent être surmontées par des approches bio-inspirées.

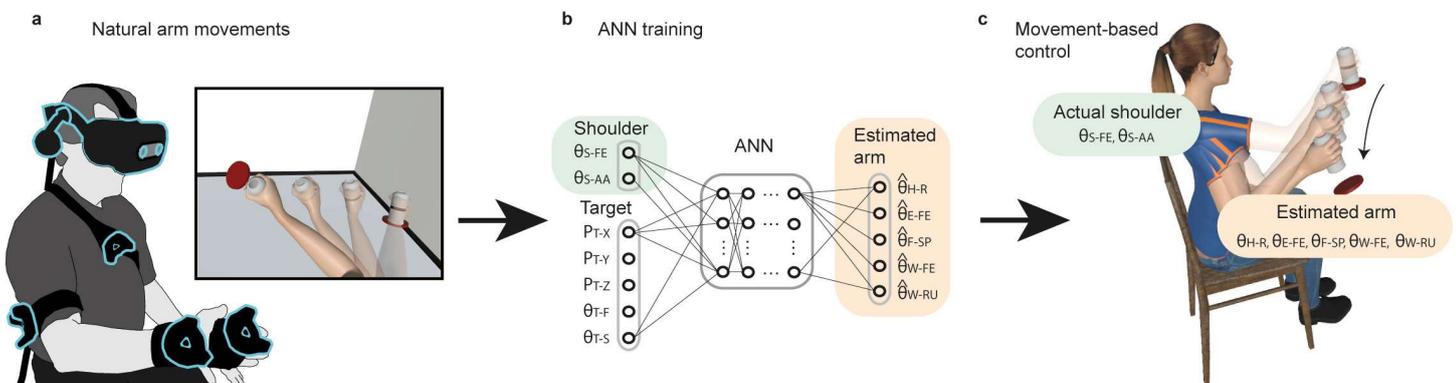


Figure 1 : Contrôle à base de mouvements résiduels et d'information contextuelle. **a.** Des mouvements naturels de bras sont enregistrés sur des participants impliqués dans la prise et le placement d'une bouteille dans un large espace en réalité virtuelle. **b.** Un réseau de neurones artificiels (Artificial Neural Network, ANN) est entraîné sur ces mouvements pour reconstruire les degrés de liberté distaux (orange) à partir des degrés de liberté proximaux (vert) et des informations sur la cible du mouvement (position et orientation de la bouteille). **c.** Contrôle de prothèse basé sur le mouvement : le participant exécute la même tâche à l'aide d'un bras hybride reproduisant en temps réel ses propres mouvements d'épaule (angles verts), et en utilisant les prédictions du réseau pour les articulations restantes de bras (angles orange). D'après (1).

Vidéo 1 : <https://www.youtube.com/watch?v=XPllkrjwTtc> Exemple de participant effectuant la tâche de prise et déplacement d'objet avec son bras valide en environnement virtuel, en téléopération simple.

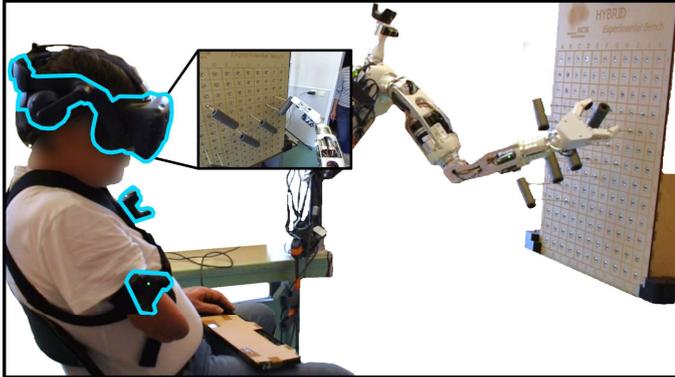
Vidéo 2 : <https://www.youtube.com/watch?v=Utoa9aYWRK0> Exemple de patient amputé transhuméral effectuant la même tâche sans difficulté avec notre nouveau contrôle de prothèse

Un premier test en robotique de téléopération

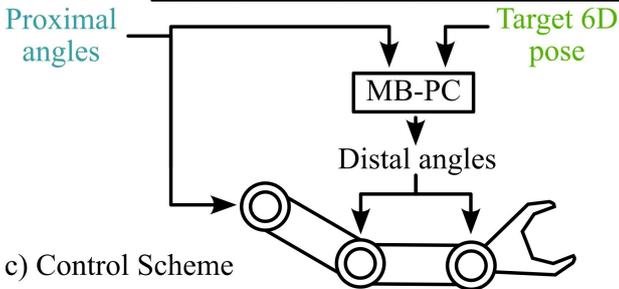
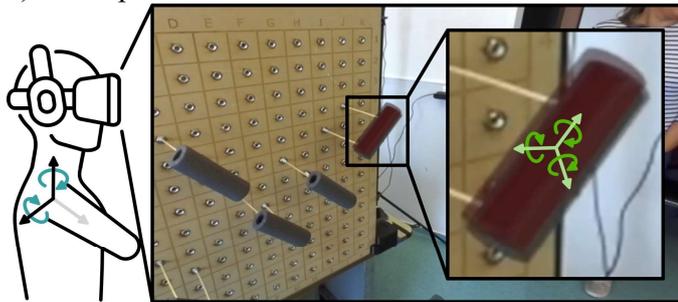
Le robot humanoïde Reachy, développé par la compagnie Pollen Robotics pour pouvoir être commandé en vision égocentré, nous a permis de tester un nouveau contrôle de prothèse dans le monde physique. Sur ce dispositif (Figure 2, Vidéo 3), l'opérateur voit à travers les yeux du robot dont la vue est projetée dans le casque de réalité virtuelle qu'il porte, et auquel les mouvements de la tête du robot sont asservis. Après avoir identifié la position de

l'objet que l'opérateur souhaite saisir à l'aide d'outils de vision artificielle guidée par le regard (3), celui-ci contrôle l'épaule de Reachy par ses propres mouvements d'épaule, alors que le reste du bras est contrôlé par les prédictions du réseau de neurones entraîné préalablement sur mouvements naturels. L'efficacité du contrôle est ensuite démontrée par des performances et des évaluations d'utilisabilités comparables obtenues chez des participants valides et amputés (4).

a) Experimental Setup



b) Participant View



c) Control Scheme

Figure 2. Téléopération en vision égocentré du robot Reachy avec contrôle de prothèse sur les articulations distales du bras.
 a. Le patient amputé équipé du casque et des traqueurs de réalité virtuelle commande le bras du robot Reachy pour attraper des cylindres en mousse en face de lui. b. vue du participant, avec la position et l'orientation du cylindre qu'il doit attraper identifiées par vision artificielle aidée de son regard (cf référentiel vert). c. Le réseau de neurones appelé « Movement-Based Prosthesis Control » (MB-PC) prédit les mouvements distaux sur la base de la pose en 6 dimensions (3 positions et 3 orientations) cible et des mouvements d'épaule, et applique ces derniers sur le bras robotiques. D'après (4).

Vidéo 3 : <https://www.youtube.com/watch?v=OUepbeQpBOg>
 Principe de contrôle et illustration de l'étude sur patients amputés et valides téléopérant le robot Reachy.

Une transformation sensorimotrice bio-inspirée

Alors que l'intention de mouvement obtenue par vision artificielle aidé du regard peut être accessible dans le référentiel de la tête de l'opérateur, le contrôle de prothèse illustré précédemment opère dans un référentiel centré sur son épaule. Si le passage d'un référentiel à l'autre ne pose pas de difficulté en réalité virtuelle ni sur Reachy, où l'on connaît précisément la position des éléments virtuels ainsi que la chaîne cinématique, cette transformation est plus difficile à obtenir en situation réelle du fait de la biomécanique complexe de la nuque et de l'épaule. Inspirée des transformations sensorimotrices et du codage spatial multisensoriel par population de neurones (5), nous proposons une méthode effectuant la transformation tête-épaule nécessaire (6), et l'adaptant en temps réel aux mouvements et à la morphologie

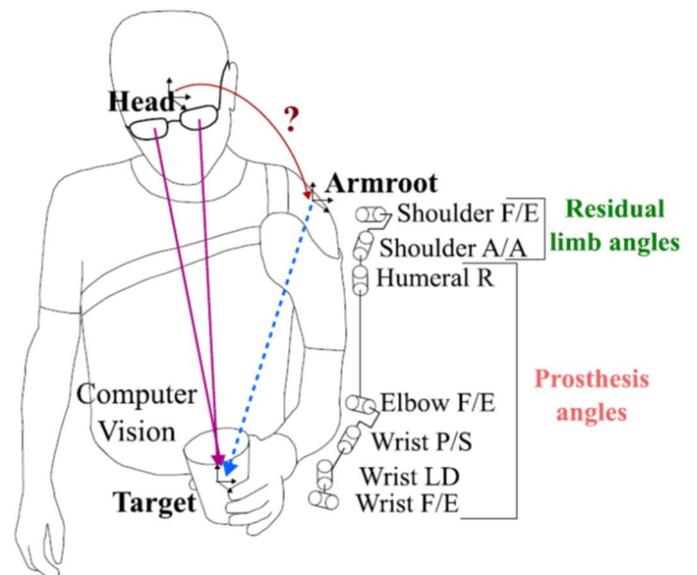


Figure 3 : Transformation de référentiel de la tête à l'épaule.
 Partant de la position de la main disponible visuellement dans le référentiel de la tête, la méthode remonte au référentiel de l'épaule à partir de la cinématique de la prothèse, et code la relation tête-épaule dans une carte spatiale bio-inspirée. D'après (6).

Vidéo 4 : <https://www.youtube.com/watch?v=SQNKJrkQBxE>
 Adaptation de la carte spatiale bio-inspirée pour la transformation de référentiel de la tête à l'épaule, illustrée lors de la télé opération en vision égocentré du robot Reachy.

spécifique de chaque participant. Cette méthode part de la position de la main prothétique disponible visuellement dans le référentiel de la tête, remonte au référentiel de l'épaule à partir de la cinématique connue de la prothèse (proprioception artificielle), et code la relation tête-épaule ainsi obtenue dans une carte spatiale adaptative bio-inspirée (Figure 3 et Vidéo 4). Une expérience sur participants valides et amputés a ensuite permis de montrer l'efficacité de cette méthode pour le bon fonctionnement de notre contrôle de prothèse (6).

Vers l'intégration des régulations spinales dans le contrôle de bras artificiel

Si les développements illustrés précédemment montrent qu'il est en principe possible de contrôler une prothèse de bras pour attraper des objets, les interactions physiques avec le monde requièrent souplesse et robustesse vis-à-vis de perturbations. Dans ce contexte, on sait que les propriétés mécaniques du système musculo-squelettique combinés aux boucles sensorimotrices de bas niveau dans la moelle épinière sont essentielles à la production

de mouvements coordonnés, et aux réponses fonctionnelles observées en cas de perturbations (7, 8). Nous avons montré par simulation qu'un réseau spinal couplé à un modèle musculo-squelettique réaliste du bras est capable de générer intrinsèquement les activités musculaires et neuronales complexes responsables de la production de mouvements coordonnés (Figure 4) (9). De simples commandes à palier, réglant l'activité de base des neurones spinaux (SET) et le déclenchement du mouvement (GO), suffisent en effet pour que le système produise seul les activités nécessaires, en vertu de la transformation en continu des afférences sensorielles qu'il génère et reçoit en commandes motrices adaptées. Un problème majeur reste cependant de trouver les commandes simples (SET et GO) permettant à ce système de générer des mouvements valides, l'espace des paramètres étant trop large pour une exploration systématique, et trop complexe pour les algorithmes d'optimisation à base de gradient. Ce verrou a été levé en utilisant une technique d'exploration à base de curiosité inspirée du babillage des enfants, proposée en robotique développementale et apprentissage automatique inspiré

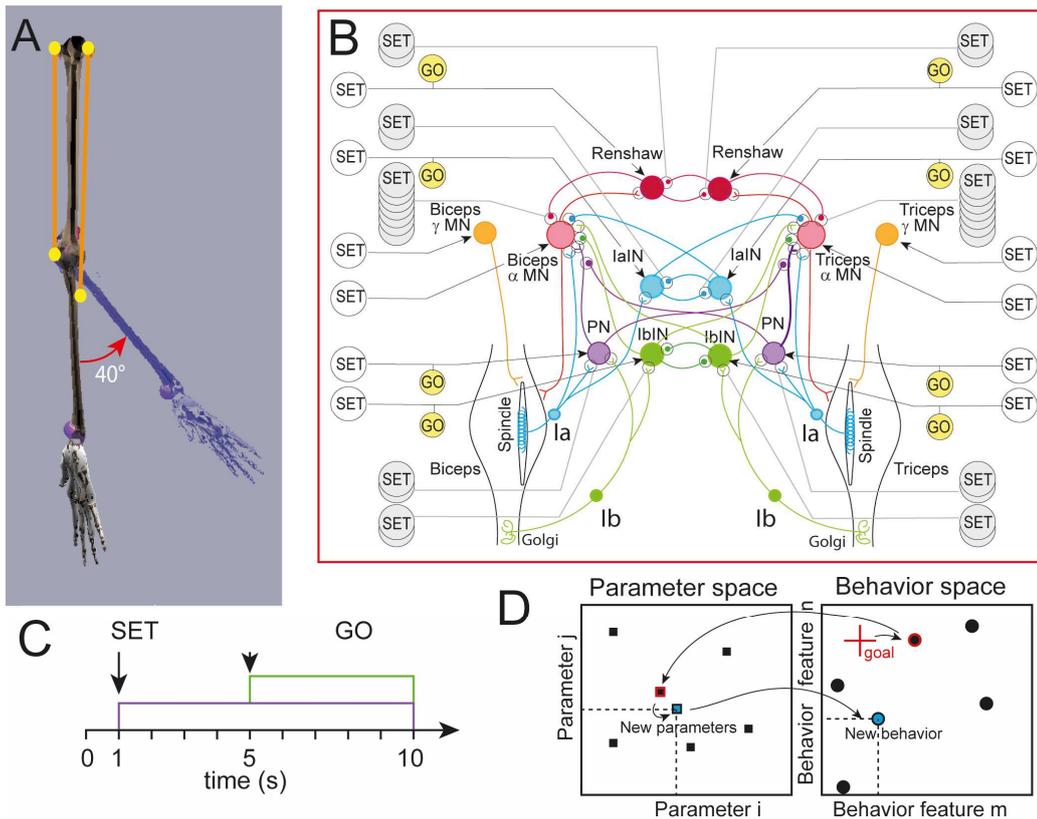


Figure 4. Modèle neuro-mécanique et principe de contrôle par régulation spinale. **A.** Système musculo-squelettique. **B.** Système sensorimoteur, comprenant les principaux motoneurones, interneurones et leurs afférences sensorielles. **C.** Commandes simples SET et GO à palier utilisées pour contrôler le réseau sensorimoteur. Les commandes SET ajustent les niveaux d'activité des neurones pour amener le réseau dans un état prêt à déclencher le mouvement (sans produire le mouvement lui-même). Les commandes GO lancent le mouvement. Les commandes SET et GO sont les paramètres de l'espace des paramètres. **D.** Algorithme d'exploration « Goal Exploration Process (GEP) ». Pour un nouvel objectif demandé dans l'espace des comportements (croix rouge), l'algorithme recherche le comportement valide le plus proche, récupère les paramètres associés à ce comportement, et les rejoue en appliquant une petite variation aléatoire, de manière à produire un nouveau comportement. D'après (9).

par la biologie et les neurosciences (10). A partir de petites variations aléatoires appliquées dans l'espace des paramètres, l'algorithme identifie de proche en proche une variété de comportements physiologiques, i.e., reproduisant une trajectoire de moindre secousse (*minimum jerk*) optimal d'un point de vue énergétique, avec un patron d'activité musculaire classiquement observé chez l'homme et l'animal (*triphasic muscle pattern*) (9). Branché en permanence sur le comportement qu'il produit, ce système est en mesure de répondre au plus vite à un imprévu comme le font nos réflexes spinaux (8), et devrait être capable de reproduire fidèlement les régulations spinales en réponse à des perturbations.

Bien que des articulations à raideur variable pilotées par des muscles artificiels intégrant des éléments élastiques existent en robotique bio-inspirée (11), leur contrôle avec les outils classiques de robotique reste un problème majeur. Les récents progrès en intelligence artificielle fournissent des outils permettant de composer avec les non-linéarités de ces systèmes, mais les réseaux de neurones artificiels profonds qu'ils impliquent sont très coûteux en calcul et en énergie, représentent une approche « boîte noire » difficilement interprétable et généralisable, et sont souvent couplés à des apprentissages par renforcement eux-mêmes extrêmement gourmands en expériences et données d'apprentissage. Nous pensons que le principe de contrôle bio-inspiré illustré ici offre un fort potentiel pour l'intégration des régulations spinales et des propriétés de l'appareil musculo-squelettique en robotique et pour les interfaces homme-robot.

Conclusion

Si les approches présentées ici illustrent l'intérêt des outils d'intelligence artificielle pour le contrôle de prothèses et de bras robotiques, elles montrent également que la compréhension fine des mécanismes sensorimoteurs naturels est indispensable à leur bonne intégration dans le contrôle d'un bras artificiel. Dans ce contexte, nous sommes persuadés que les étapes de modélisation et de test visant à cette bonne intégration sont de nature à améliorer de manière interactive notre compréhension des mécanismes de contrôle sensorimoteur naturels.

aymar.derugy@u-bordeaux.fr

Références

- (1) E. Segas et al. (2023) *eLife*, 12: p. RP87317.
- (2) E. Segas, et al. (2024) *Biomimetics*, 9 (9):9.
- (3) I. González-Díaz et al. (2024) *IEEE J. Biomed. Health Inform*, p 1-17.
- (4) V. Leconte et al. (2024) *TechRxiv*
doi: 10.36227/techrxiv.172253934.48844352/v2
- (5) A. Pouget et al. (2002) *Nat Rev Neurosci*, 3(9):741-747.
- (6) B. Lento, V. (2024) *IEEE Robot Autom Lett*, 9(9):7875-7882.
- (7) G. Raphael et al. (2010) *J. Neurosci*, 30(28):9431-9444.
- (8) J. Weiler et al. (2019) *Nat Neurosci*, 22(4):529-533.
- (9) D. Cattaert et al. (2023) *bioRxiv*, doi: 10.1101/2023.12.22.572982.
- (10) J. Gottlieb & P.-Y. Oudeyer (2018) *Nat. Rev. Neurosci* 19(12):758-770.
- (11) C. Richter et al. (2016) *IEEE Robot. Autom. Mag.* 23(4):128-137.