

ED SMAER

Sujet de thèses 2014

Laboratoire : Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique : ISIR CNRS UMR 7222

Établissement de rattachement : Université Pierre et Marie Curie UPMC

Directeur de thèse et section CNU ou CNRS : A. Roby-Brami, DR INSERM

Codirection et section CNU ou CNRS : Nathanael Jarrassé, CR CNRS

Titre de la thèse : Prothèses du membre supérieur: intégration corporelle et extension des capacités sensorimotrices

Collaborations dans le cadre de la thèse : J. De Graaf, Institut des Sciences du Mouvement Etienne Jules Marey (ISM), UMR 7287, Aix Marseille Université, CNRS ; Institut Régional de Médecine Physique et Réadaptation de Nancy (IRR).

Rattachement à un programme : -

Le sujet peut être publié sur le site web de l'ED SMAER : OUI

Résumé du sujet :

Il existe un décalage saisissant et grandissant entre les structures prothétiques robotisées de membre supérieur et les approches employées pour la commande de ces dispositifs. D'un côté la course à l'anthropomorphisation génère des structures possédant de plus en plus de degrés de libertés et donc de paramètres à contrôler, alors que de l'autre, seules des approches limitées exploitant les signaux myo-électriques sont concrètement disponibles pour les patients. Des alternatives invasives sont actuellement à l'étude, mais la lourdeur de la chirurgie associée et le manque de résultats ne permettent de les envisager comme des solutions viables qu'à long terme. Le but de cette thèse est donc de développer et d'évaluer des approches alternatives de contrôle non-invasives, robustes et naturelles destinées aux patients appareillés d'une prothèse de membre supérieur. Pour cela, nous utiliserons les avancées récentes en robotique afin de synthétiser une commande à partir de la mesure d'articulations redondantes et non-contraignantes chez le patient (mouvements de la tête et des omoplates) en complément des signaux myo-électriques disponibles. De manière plus générale, nous travaillerons à la réduction de la dimensionnalité du contrôle en exploitant les connaissances des synergies articulaires du contrôle moteur humain au sein de la commande et l'adaptation automatique et bio-mimétique de paramètres afin de réduire la charge cognitive sur le patient. Les validations expérimentales seront faites à la fois sur des patients amputés appareillés et sur des sujets sains contrôlant un manipulateur robotique externe. Enfin, un soin particulier sera accordé à l'interaction avec les thérapeutes et les patients à chacune des étapes du projet.

Sujet développé

Contexte :

Naguère, les patients amputés de la main utilisaient des prothèses mécaniques à câbles qui permettaient des fonctions élémentaires par exemple l'ouverture-fermeture de la prothèse en tirant sur le câble par des mouvements de l'épaule opposée. Plus récemment ont été développées des prothèses myoélectriques, commandées par l'activité électromyographique (EMG) des muscles du moignon. Ces prothèses, assistées de régulation automatique, permettent une plus grande variété de mouvements et s'appliquent à un plus grand nombre de patients plus gravement amputés, aux dépens d'une complexité de la commande (chaque segment étant généralement commandé séparément et parfois séquentiellement). Nous assistons à l'heure actuelle à une explosion du nombre de dispositifs prothétiques robotisés à destination des patients amputés. L'anthropomorphisation grandissante de ces dispositifs, qu'on pourrait juger nécessaire pour le patient au premier abord, tend en réalité à complexifier ces prothèses (par l'ajout d'articulations robotisées notamment) et leur contrôle, au point de parfois les rendre inexploitable ou du moins incontrôlable. Toutefois, malgré cette sophistication technique, les prothèses myoélectriques même les plus automatiques restent peu utilisées par les patients^[1], probablement en raison de la charge cognitive importante que leur impose l'utilisation d'une prothèse et de la pauvreté de la communication sensorimotrice qu'offrent de tels dispositifs.

Il subsiste en effet un décalage saisissant entre la complexité mécanique et électronique des nouvelles prothèses, qu'elles soient le produit de laboratoires de recherche^[2] ou des quelques acteurs commerciaux du domaine^[3], et les approches actuellement disponibles pour permettre au patient de les contrôler. Malgré les recherches de nombreux laboratoires sur l'utilisation de signaux électromyogrammes (EMG) ou électroencéphalogramme (EEG) obtenus avec des électrodes placées respectivement sur des groupes de muscles ou sur la tête, les possibilités offertes par les approches non-invasives sont encore très limitées.

Considérons l'exemple représentatif d'un patient ayant été amputé au dessus du coude (amputation humérale, 33 % de la population d'amputés du membre supérieur^[4]). Ces patients sont généralement équipés au minimum d'une main myo-électrique (soit simple proposant une ouverture/fermeture ou un modèle plus avancée capable d'adopter différentes postures au travers d'un mode séquentiel) et d'une prothèse de coude passive (blocable avec cliquet ou via une commande) ou active myo-électrique. À cela peut venir s'ajouter un poignet myo-électrique possédant une prono-supination active. Un patient ainsi appareillé se retrouve ainsi avec au moins 3 degrés de liberté à commander (ou plus s'il s'agit d'une main complexe) au travers de signaux EMG, alors que généralement seuls deux de ces signaux sont disponibles sur le bras amputé (signal du biceps et du triceps). Le patient contrôle généralement sa prothèse au travers d'un mode séquentiel: il peut passer d'une articulation à une autre à l'aide d'une brève co-contraction (contraction simultanée de deux muscles antagonistes) de son bras, puis utiliser des contractions musculaires graduées d'un muscle donné pour piloter l'articulation sélectionnée. Ce principe rend la réalisation d'une tâche multi-articulaire, lente, complexe et non-naturelle car séquentielle. De plus, la commande myo-électrique, pourtant commune, souffre par ailleurs de nombreuses limitations : complexité de mesure et de traitement du signal EMG^[5], mais aussi lourdeur et difficulté d'utilisation pour le patient. En effet, la mesure est généralement faite avec des électrodes de surface ce qui génère un niveau de bruit important sur le signal, rendant complexe une analyse fine de ces signaux de commande. À cela s'ajoutent les problèmes de la variabilité du signal

EMG (dépendant de multiples conditions : température, sudation, etc.), de la difficulté de trouver des groupes musculaires pour prélever des signaux de commande sans gêner la motricité résiduelle du membre, de la complexité d'apprentissage pour le patient, et de la complexité de déchiffrement des informations de ces signaux, même après les progrès en traitement du signal de ces 50 dernières années. De plus, les études en psychophysologie montrent que lorsque nous effectuons un mouvement volontaire, il s'agit de contrôler les résultats du mouvement dans le cadre d'une action mais pas de commander séparément la contraction de muscles spécifiques. Plusieurs approches alternatives visant à contourner ces limitations sont à l'étude afin de permettre au patient de contrôler plus naturellement et finement sa prothèse, et d'offrir des solutions de contrôle pour les prothèses anthropomorphiques à venir qui posséderont encore plus d'articulations. Ces approches invasives (re-routage nerveux^[6] ou pose d'implants cérébraux^[7]), bien que prometteuses, ne peuvent pas encore être considérées comme des alternatives viables (lourdeur et complexité de la chirurgie, problème de l'invasivité et de la réaction du système nerveux, problème du long terme etc.).

Si l'on envisage une approche de commande strictement non-invasive, un obstacle de taille se dresse rapidement, celui de la dimensionnalité du contrôle. En effet, au vu du nombre croissant de degrés de liberté des prothèses, il va rapidement devenir impossible de trouver un nombre équivalent de signaux physiologiques distincts. En effet le nombre d'articulations redondantes sur lesquelles il est possible de prélever des informations est limité, le risque étant de finir par contraindre en retour d'autres fonctions motrices du patient.

En dehors de l'utilisation de mécanismes de sous-actionnement et de quelques approches dédiées aux mains prothétiques, aucune approche n'existe pour le membre supérieur dans son ensemble pour permettre de minimiser la complexité d'utilisation et d'étendre les capacités de contrôle du patient (capacité à pouvoir gérer à terme plus d'articulations robotisées).

Objectif :

Notre objectif est de faire l'interface entre les signaux capturant les intentions motrices des patients et les structures mécaniques sophistiquées des prothèses existantes. Notre hypothèse est que les avancées sur les commandes robotiques développées dans d'autres domaines (manipulateurs redondants, robotique humanoïde, mains robotisées dextres) pourraient nous permettre des avancées décisives dans le domaine de l'appareillage prothétique.

Plus précisément, **l'objectif de cette thèse est de développer et d'évaluer une approche de contrôle non-invasive, robuste et naturelle destinée aux patients appareillés d'une prothèse de membre supérieur.** Pour cela, nous souhaitons combiner le principe de la prothèse mécanique passive à câble et de la prothèse myo-électrique robotisée.

Concrètement, nous envisageons de considérer le cas d'un patient amputé au dessus du coude et équipé d'une prothèse à 3 degrés de libertés actifs (ouverture/fermeture main, pronosupination et coude) puis à terme de généraliser les outils mis au point à des configurations différentes et plus complexes.

Cette approche consistera à :

- 1) **exploiter, comme signal de commande, des données cinématiques d'articulations redondantes et non-critiques pour la réalisation de tâches motrices, en complément des signaux EMG ;**
- 2) **adapter et développer des approches innovantes de réduction de la dimensionnalité de la commande actuellement développées dans les laboratoires de robotique, dont notre équipe ;**

1) Commande par mouvements articulaires distincts : la possibilité d'exploiter de manière non-contraignante des signaux physiologiques alternatifs pour la commande de prothèse du membre supérieur sera étudiée. Concrètement, cette thèse se focalisera sur :

a) *l'utilisation de la posture de la tête* : La mesure de la posture de la tête est facilement accessible et cette mobilité est partiellement redondante avec celle des yeux, ce qui permettrait de l'exploiter comme un signal de commande sans contraindre la fonction d'orientation du regard. La relation entre la position de la tête et l'exécution des tâches sera donc analysée afin de déterminer des approches possibles. Plusieurs possibilités de contrôle basé sur ces relations évaluées lors de campagnes expérimentales seront implémentées et testées, d'abord sur des sujets sains pilotant un manipulateur robotique externe, puis sur des patients amputés pilotant une prothèse.

b) *l'utilisation de mouvements du complexe épaule/omoplate du bras opposé* : L'utilisation d'articulations intermédiaires redondantes du membre opposé est utilisée depuis de nombreuses années avec succès sur les prothèses mécaniques (utilisation d'un câble commandant l'ouverture/fermeture de la main prothétique). Une approche similaire à celle présentée pour les mouvements de la tête sera suivie, en utilisant cette fois la mesure des mouvements de l'épaule opposée au bras appareillé. Les mouvements redondants de l'épaule du patient (permis par l'articulation de l'omoplate) ainsi mesurés seront traduits en consigne de commande.

2) Réduction de la dimensionnalité afin d'imiter le système nerveux central humain qui contrôle des synergies articulaires (coordination entre des articulations) plutôt que chaque articulation séparément. En effet, pour un type de tâche dans un espace de travail donné, les coordinations entre les articulations du membre supérieur (épaule, coude, prono-supination) restent constantes, quelque soit la trajectoire du bras. A partir de l'étude des synergies chez le sujet sain, plusieurs aspects seront étudiés :

a) les différentes possibilités de couplage virtuels, dans le but de n'utiliser qu'un seul signal pour commander les mouvements de plusieurs articulations de la prothèse

b) la possibilité de "prédire" le mouvement de certaines articulations du bras en fonction de la mesure d'autres, afin, toujours, de limiter le nombre de signaux de commande à prélever sur le sujet.

Résultats attendus :

- Une approche de contrôle non-invasive, robuste et naturelle destinée aux patients appareillés d'une prothèse de membre supérieur offrant de meilleures performances que les modes de commandes (proportionnels ou séquentiels) actuels, et qui permettrait d'exploiter le potentiel des futures prothèses possédant de multiples articulations actives.

- Une plateforme de démonstration prothétique embarquée composée d'un coude, d'un poignet et d'une main permettant de qualifier les performances de cette approche de contrôle par rapport aux approches conventionnelles.

- Des approches de contrôle généralisable à la commande de dispositifs robotiques par un opérateur sain : pilotage d'un robot collaboratif à la manière d'un membre surnuméraire pour la réalisation d'une tâche interactive dans un cadre professionnel (chirurgie, manufacture etc.)

- Des connaissances sur le contrôle moteur humain et l'apprentissage de nouvelles compétences sensori-motrices.

- [1] Haute Autorité pour la Santé, service d'évaluation des dispositifs. *Évaluation des prothèses externes du membre supérieur, (révision des descriptions génériques de la liste des produits et prestations remboursables "orthoprothèses du membre supérieur"*. Juin 2010.
- [2] SD Harshbarger, *Revolutionizing Prosthetics 2009*. Presentation John Hopkins University, Applied Physics Laboratory. Octobre 2008.
- [3] TNO, Robotics for Healthcare, *Final report for the European Commission DG Information Society*. V5 . Octobre 2008.
- [4] JM André, J. Paysant. *Les amputés en chiffres : épidémiologie*. MPR et Appareillage, Nancy : 5-6-7 avril 2006.
- [5] M. Zecca, S. Micera, M. C. Carrozza, P. Dario, *Control of Multifunctional Prosthetic Hands by Processing the Electromyographic Signal*. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 30(4–6):459–485, 2002.
- [6] TA Kuiken et al. *Targeted Muscle Reinnervation for Real-time Myoelectric Control of Multifunction Artificial Arms*. *Journal of the American Medical Association, JAMA*. 301(6):619-628, 2009.
- [7] Hochberg LR, and al. *Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm*. *Nature*. 16;485(7398):372-5, Mai 2012.