

Christine Azevedo Coste
Inria, Université de Montpellier
860 rue Saint Priest
34095 Montpellier Cedex 5

Rapport pour la soutenance de thèse de Manelle MERAD.

Investigations on upper limb prosthesis control with an active elbow.
ED «Sciences Mécanique, Acoustique, Électronique et Robotique » Université de Pierre et Marie Curie. Sous la direction de : Agnès ROBY-BRAMI et Nathanaël JARRASSÉ.

Le mémoire de thèse rédigé en anglais comporte cinq parties et une courte conclusion. En annexe diverses informations complémentaires sont disponibles.

La première partie du document introduit le travail de thèse et pose le contexte et l'état de l'art de façon détaillée et informative. La candidate s'intéresse aux prothèses du membre supérieur dans les situations d'amputations transhumérales. Plus précisément la thèse traite des problématiques liées au contrôle des prothèses coude-poignet myoélectriques et aux limitations fonctionnelles des approches existantes : d'une part les approches conventionnelles qui associent des combinaisons de contractions musculaires volontaires à des séquences articulaires et d'autre part des approches plus avancées qui restent encore cantonnées à l'état de prototypes de recherche. Dans les solutions conventionnelles le coude est généralement utilisé pour positionner l'avant-bras puis verrouillé pendant que le poignet est contrôlé. Les solutions actuellement investiguées s'intéressent au traitement avancé des données d'EMG de surface de façon à extraire des informations plus riches qu'une simple détection de seuil de contraction. La reconnaissance de patrons d'activation musculaire permet de piloter diverses combinaisons de mouvements articulaires. Plusieurs équipes de recherche ont développé des approches qui restent limitées à des situations de laboratoire car trop sensibles aux modifications inhérentes à l'utilisation d'EMG de surface. Manelle MERAD introduit ensuite d'autres types de capteurs qui ont été plus ou moins considérés pour remplacer les mesures EMG. Dans la suite les centrales inertielles seront utilisées pour analyser les mouvements du segment de bras résiduel.

La candidate s'intéresse ensuite aux approches tentant de restaurer des coordinations inter-articulaires (épaule/coude/poignet) plus naturelles qui nécessiteraient moins de compensations du reste du corps (tronc).

L'introduction de la thèse se termine par une section qui pose les objectifs et contributions de la thèse : proposer une approche de contrôle basée mouvement qui automatise les mouvements du coude en fonction de la tâche à effectuer. La thèse s'intéresse plus précisément à valider l'approche dans le contexte d'une tâche d'approche de cible.

L'introduction est soignée et apporte les informations nécessaires à la compréhension des motivations et du travail réalisé. Page 3, un peu plus d'information sur les amputations, leur origine et prévalence serait intéressante. La figure I.1 pourrait être complétée en indiquant les pourcentages représentés par chaque type d'amputation et surtout en ajoutant les amputations de doigts. Quelle population est concernée par des amputations des 2 bras ?

La deuxième partie du mémoire décrit le cadre expérimental et les protocoles. La candidate indique en préambule qu'une étude bibliographique lui a permis de sélectionner la tâche d'atteinte comme l'une des quatre tâches principales dans la réalisation d'AVQs (activités de la vie quotidienne). Quelques références bibliographiques seraient utiles ici. Manelle MERAD explique que les amputés transhuméraux ne réalisent généralement pas cette tâche d'approche de cible avec leur prothèse ou lorsqu'ils le font c'est par le biais de compensations posturales très coûteuses.

La thèse va s'intéresser à évaluer l'intérêt d'une coordination épaule/coude. Cette partie de la thèse présente le cadre expérimental utilisé pour les diverses expérimentations conduites dans la thèse. En annexe les avis des comités d'éthique locaux sont disponibles (Université Paris Descartes / Chalmers Univ. Goteborg Sweden). Il semblerait qu'aucune déclaration complémentaire n'ait été effectuée (ANSM, CNIL...). L'équipement utilisé est également décrit. Le mouvement relatif du bras par rapport au tronc est calculé à partir des orientations de deux centrales inertielles positionnées respectivement sur le bras et le tronc. Les orientations (quaternions) sont directement fournies par un algorithme embarqué dans les IMUs (Madgwick). Il serait pertinent de préciser les informations principales et hypothèses de l'algorithme afin de permettre au lecteur de généraliser les propos : type de capteurs utilisés (accéléromètres...), notamment si les magnétomètres sont utilisés ce qui pourrait avoir des conséquences pratiques importantes. Une dérive de l'orientation calculée est-elle observée après un certain temps d'utilisation, comment cela est pris en compte pour l'utilisation dans le cadre de la thèse ?

La troisième partie introduit la modélisation des coordinations inter-articulaires épaule-coude. La candidate décrit la méthode qui lui a permis de modéliser la relation entre les mouvements de l'épaule et les mouvements du coude dans une tâche d'approche de cible chez des sujets valides. Un jeu de données a été enregistré sur 14 individus équipés de centrales inertielles (tronc/bras) et de marqueurs passifs pour la reconstruction de la cinématique de la partie supérieure du corps via un système de capture vidéo du mouvement. Les systèmes de mesure n'étant pas synchronisés, comment le recalage des données a-t-il été fait par la suite ? L'utilisation d'IMUs pour calculer la cinématique de l'épaule a été évaluée, il aurait été intéressant de considérer cela sur une période d'acquisition plus longue pour observer une éventuelle dérive. Quatre approches de régression ont été testées pour modéliser la relation entre les mouvements du coude et de l'épaule. Les différents modèles ont été testés en simulation. L'importance du jeu de données d'entraînement des algorithmes sur la qualité de prédiction a été mise en avant.

La quatrième partie du mémoire présente les résultats de l'utilisation des quatre modèles génériques présentés dans le chapitre 3 pour le contrôle d'une prothèse de coude par des sujets valides. 10 volontaires ont été équipés d'une orthèse sur laquelle était fixée une prothèse de coude. La prothèse était contrôlée à partir d'un des 4 modèles sélectionnés de façon randomisée. Les performances en termes de précision et durée du mouvement et de



stratégies compensatoires mises en œuvre ont été évaluées (MOCAP et Wii board). Le mouvement du coude était contrôlé à partir du mouvement de l'épaule obtenu via les 2 IMUs selon l'un des 4 modèles de coordination épaule/coude identifiés par ailleurs. Les participants ont pu utiliser de façon appropriée le système et réaliser la tâche d'atteinte de cible. Les performances n'étaient pas significativement différentes d'un modèle à l'autre. Par ailleurs l'utilisation de la prothèse restreint le mouvement de l'épaule ce qui baisse les performances des modèles basés sur la dérivée temporelle des angles de l'épaule.

La cinquième partie présente les résultats du travail de recherche sur le contrôle d'un coude prothétique chez des sujets amputés. 6 sujets amputés ont participé à l'étude. Le modèle de régression RBFN identifié sur les sujets valides a été utilisé. Pourquoi ne pas avoir refait un modèle avec des sujets équipés d'une orthèse limitant leurs mouvements d'épaule ? La tâche d'atteinte de cibles a été effectuée avec une prothèse utilisant un contrôle myoléctrique conventionnel et avec la stratégie de commande proposée dans cette thèse. Les 6 participants sont parvenus à réaliser la tâche avec les deux contrôleurs. D'un point de vue qualitatif l'approche défendue dans la thèse semble prometteuse et est bien perçue par les participants. Les limitations principales de l'étude sont l'absence d'un protocole d'entraînement et l'utilisation d'un modèle basé sur des sujets valides sans contrainte de mouvement de l'épaule liée à l'utilisation d'une prothèse.

Le manuscrit se lit facilement, la rédaction est claire, synthétique et didactique. J'ai apprécié l'honnêteté scientifique de la candidate dans la présentation de ses résultats. Un travail expérimental conséquent a été mené auprès de sujets valides et amputés en France et en Suède avec une grande qualité de conception et de réalisation des protocoles.

Une discussion générale aurait pu compléter la conclusion du document en prenant un peu de recul par rapport au travail de thèse, en apportant des pistes et perspectives concrètes pour poursuivre l'étude mais aussi pour le domaine de recherche en général. Dans quelle mesure les personnes ayant une amputation d'un seul bras seraient-elles amenées à utiliser de façon importante le bras équipé d'une prothèse des tâche d'approche ? Quelles possibilités pour appliquer la coordination articulaire à des tâches bi-manuelles (bras valide / amputé). En introduction, la candidate rappelle que les amputations du membre supérieur sont peu répandues. Les résultats issus de la présente thèse pourraient-ils être étendus au delà de l'amputation transhumérale ?

En conclusion de ce rapport, je tiens à souligner l'originalité de l'approche proposée dans cette thèse et l'intérêt pour les personnes amputées de bénéficier à termes d'une alternative à l'utilisation d'EMG de surface et d'une solution intuitive pour contrôler les mouvements du coude de façon coordonnée avec les mouvements d'épaule.

Je donne un avis très favorable à la soutenance de cette thèse.

Montpellier, le 5 novembre 2017

Invia