

Ecole doctorale SMAER  
Sciences Mécaniques, Acoustique, Electronique, Robotique

**Sujet de thèse - campagne 2017**

Laboratoire : ISIR

Etablissement de rattachement : UPMC-CNRS UMR7222

Titre de la thèse : ***Simulation biomécanique de la marche bipède saine et altérée pour l'aide aux réparations chirurgicales des enfants atteints de paralysie cérébrale***

Directeur de thèse : Faïz Ben Amar

Mail de contact : [amar@isir.upmc.fr](mailto:amar@isir.upmc.fr)

Codirection éventuelle : Vincent Padois (Mdc HDR), [Vincent.Padois@upmc.fr](mailto:Vincent.Padois@upmc.fr)

Collaborations dans le cadre de la thèse : Fondation Ellen-Poidatz (Dc Eric Desailly)

Rattachement à un programme :

Cotutelle envisagée :

Si oui avec quelle université & quel laboratoire :

Le sujet peut-il être publié sur le site web de l'ED SMAER : Oui

***Résumé du sujet :***

La Paralysie Cérébrale (PC) est susceptible d'engendrer des troubles de la marche dès l'enfance. La chirurgie multi-sites vise à les corriger en traitant les déformations orthopédiques consécutives aux troubles neuro-moteurs. Pour aider à la décision de ces réparations, il serait très utile de doter les médecins d'outil de simulation personnalisée de la marche préopératoire du patient et surtout de prédire la qualité de la marche après modifications chirurgicales. Les objectifs de cette thèse sont de proposer des modèles de simulation de marches stables à de multiples allures, qu'elles soient pathologiques ou normales. Ceci va nécessiter le développement de modèles musculosquelettiques personnalisés permettant de tenir compte des déformations et autres anomalies géométriques mais également des anomalies dynamiques résultantes des troubles de commandes neuromusculaires des patients. Cette modélisation personnalisée aboutie, différentes modalités de synthèse de marche seront évaluées, une analyse de sensibilité du système sera menée et les critères d'optimisation seront identifiés en regard des données réelles mesurées chez les patients et les sujets étudiés. La synthèse de la marche consiste en un problème d'optimisation corps complet sous contraintes. Les méthodes de collocation directe devraient pouvoir répondre à ce besoin par leur facilité de prise en compte des contraintes clairsemées (sparses) dans ce type de problème et leur compatibilité avec la formulation type LCP qui est très pratique et utile pour la description du contact avec ou sans frottement sec.

**ED SMAER (ED391)**

Tour 45-46 Bureau 205- case courrier 270- 4, place Jussieu - 75252 PARIS Cedex 05

☎: 01 44 27 40 71

[ed391@listes.upmc.fr](mailto:ed391@listes.upmc.fr)

# Ecole doctorale SMAER

## Sciences Mécaniques, Acoustique, Electronique, Robotique

### Sujet développé

La motivation première de ce projet de recherche est l'amélioration de la prise en charge thérapeutique des enfants atteints de Paralyse Cérébrale (PC). La PC a une incidence de 2,4/1000 naissances. Il s'agit de la pathologie neurologique pédiatrique la plus fréquente. Une des conséquences habituelles d'une telle déficience est un trouble de la marche. Ce trouble est au départ expliqué par des anomalies de la commande et du tonus musculaire, souvent de type spastique. Secondairement des déformations orthopédiques s'installent aggravant le handicap et pouvant remettre en question les acquisitions fonctionnelles. L'acquisition d'une autonomie de marche et la conservation de celle-ci à l'âge adulte est un facteur de qualité de vie des enfants atteints de PC. Les traitements proposés ont pour objectif de permettre cette acquisition ou ce maintien. Parmi ceux-ci, la chirurgie multi-étagée vise à améliorer la marche des enfants PC en corrigeant les déformations orthopédiques consécutives aux troubles neuro-moteurs. Cette chirurgie très spécialisée associe en un seul temps opératoire de multiples gestes chirurgicaux à plusieurs étages articulaires et ou segmentaires tels que l'ostéotomie pelvienne, fémorale, tibiales, des os des pieds ; des allongements musculaires des ischio-jambiers, des fléchisseurs de hanche, des muscles de la jambe ; des abaissements de rotules ou des transferts musculotendineux... La combinaison de ces différents gestes au sein du programme chirurgical relève d'une démarche hautement spécialisée de façon à tenir compte des spécificités de chaque patient. En l'état actuel des pratiques, deux types d'examen sont réalisés pour aider à la décision thérapeutique : l'examen clinique et l'Analyse Quantifiée de la Marche (AQM). Mais actuellement, il n'existe pas de solution satisfaisante permettant de simuler l'effet d'un traitement. Les modèles dits robotiques s'appuient tous sur des critères d'optimisation qui conditionnent la solution obtenue et ont recours à des modèles dynamiques simplifiés. Les modèles dits régressifs sont quant à eux globaux, ne permettent pas de prédire l'effet qualitatif du traitement et la nature de l'organisation cinématique de la motricité post-traitement. Notre objectif n'est pas de produire une animation cinématique, ou des simulations musculosquelettiques susceptibles par des approches inverses de renseigner sur les activations et actions musculaires mais de synthétiser tant cinématiquement que dynamiquement de la marche humaine.

En robotique, le principal objectif dans la synthèse de marche est de pouvoir générer des commandes motrices articulaires afin de produire un cycle de marche stable et à moindre coût énergétique. Les algorithmes utilisés sont issus des techniques de l'optimisation de systèmes dynamiques généralement non-linéaires (grandes rotations) et irréguliers (discontinuités des vitesses lors du début et fin du contact). Ces approches hors-ligne et coûteuses en temps de calcul optimisent en général la consommation énergétique tout en assurant le respect des contraintes dynamiques, cinématiques, d'actionnement et du contact.

D'autres approches plus orientées vers l'implémentation de contrôleur temps réel utilisent un modèle beaucoup plus simple tel que le LIP (Linear Inverted Pendulum) qui permet de générer sur un horizon de temps glissant la trajectoire du centre de gravité en cohérence avec celle du centre de pression, et par la suite les trajectoires articulaires grâce à la connaissance des conditions instantanées d'appui. Cette méthode assimile le modèle bipède à une masse unique concentrée en un point et néglige entièrement les moments inertiels. Ces contrôleurs font partie des commandes prédictives basées modèles MPC qui permettent de prendre en compte et d'anticiper les futures variations brusques de consignes. Du fait de leur prise en compte des conditions courantes à chaque pas de temps, elles sont réactives et robustes aux perturbations. Malgré cette robustesse, les marches ainsi générées restent en général très éloignées des marches « fluides » observés chez l'humain.

Si des méthodes de contrôle permettent un bon suivi de trajectoires, elles nécessitent un bon réglage, sous peine d'avoir des marches instables. Dans le cas de l'optimisation, poser le problème reste une question ouverte, et l'algorithme de résolution est toujours d'une importance cruciale pour la solvabilité du problème.

La première tâche de la thèse consiste à développer une formulation paramétrique des contraintes cinématiques et dynamiques de chaque articulation. Ces contraintes actuellement établies sous forme de constantes, reflèteront ainsi de façon plus réalistes, bien qu'encore très simplifiées, les problématiques d'extensibilité musculotendineuses, de spasticité et de faiblesse musculaire qui dépendent bien entendu du sujet modélisé mais dont l'impact sur la dynamique de la marche doit être considéré. La première solution consiste à ajouter au modèle articulaire existant un actionnement de type série élastique et antagoniste permettant d'accéder à deux variables de commande par articulation à savoir la raideur et le couple d'équilibre.

La partie principale de la thèse s'attèlera au développement d'un outil d'optimisation de trajectoires du système dynamique corps complet, à partir de méthodes tels que les méthodes de collocation directes. Cette dernière discrétise à

---

**ED SMAER (ED391)**

Tour 45-46 Bureau 205- case courrier 270- 4, place Jussieu - 75252 PARIS Cedex 05

☎: 01 44 27 40 71

[ed391@listes.upmc.fr](mailto:ed391@listes.upmc.fr)

# Ecole doctorale SMAER

## Sciences Mécaniques, Acoustique, Electronique, Robotique

la fois les entrées de commande et les paramètres d'état, et transcrit le problème d'optimisation dans une forme discrète en une seule étape. Cela aboutit à un problème de programmation non-linéaire et clairsemé (sparse). L'avantage principal de ces méthodes est leur faculté de prise en compte des contraintes, qui sont bien utiles pour la personnalisation des paramètres spécifiques des patients. Aussi, cette méthode est compatible avec les contraintes linéaires complémentaires (LCP) qui sont largement utilisées pour la représentation autonome du modèle hybride (continue-discret) des contacts unilatéraux et frictionnels.

L'étude de la sensibilité du modèle, mise en place après la « personnalisation » menée est également une étape qui nous permettra d'identifier quels sont les paramètres de commande, de contrôle et/ou d'optimisation du système dont la variance est la plus affectée par la variété des troubles de marche et des caractéristiques anatomophysiologiques des sujets.

On cherchera aussi à procéder à une optimisation supervisée du modèle géométrique du patient afin de maximiser un score de la marche représentant la symétrie et la fluidité de l'allure. Les variables géométriques d'optimisation seront bien entendu définies par l'utilisateur (à terme par le chirurgien). In fine l'introduction de modifications de modèle géométrique et ou de contraintes anatomophysiologiques nous permettra d'étudier la cohérence entre effet attendu par le chirurgien, effet simulé et effet réel enregistré chez le patient en post-opératoire.

### Références :

Santos AP, Ben Amar F, Bidaud P, Desailly E. Gait synthesis for an anthropomorphic human model with articulated feet. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2015 Aug 5;1–2.

Galarraga C OA, Vigneron V, Dorizzi B, Khouri N, Desailly E. Predicting postoperative knee flexion during gait of cerebral palsy children. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2015 Aug 3;1–2.

Galarraga COA, Vigneron V, Dorizzi B, Khouri N, Desailly E. Predicting surgery effect on knee kinematics in cerebral palsy. *Gait Posture.* 42:S2–3.

Delp SL, Anderson FC, Arnold AS, Loan P, Habib A, John CT, et al. OpenSim: Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2007 Nov;54(11):1940–50.

Thelen DG, Anderson FC, Delp SL. Generating dynamic simulations of movement using computed muscle control. *J Biomech.* 2003;36:321–8.

Ibanez A, Bidaud P, Padois V. Automatic Optimal Biped Walking as a Mixed-Integer Quadratic Program. In: Lenarčič J, Khatib O, editors. *Advances in Robot Kinematics* [Internet]. Springer International Publishing; 2014 [cited 2015 Oct 14]. p. 505–16. Available from: [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-06698-1\\_52](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-06698-1_52)

Salini J, Barthélemy S, Bidaud P, Padois V. Whole-Body Motion Synthesis with LQP-Based Controller – Application to iCub. In: Mombaur K, Berns K, editors. *Modeling, Simulation and Optimization of Bipedal Walking* [Internet]. Springer Berlin Heidelberg; 2013 [cited 2016 Apr 4]. p. 199–210. (Cognitive Systems Monographs).

Kajita S, Kanehiro F, Kaneko K, Fujiwara K, Harada K, Yokoi K, et al. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point. In: *Robotics and Automation, 2003 Proceedings ICRA'03 IEEE International Conference on* [Internet]. IEEE; 2003 [cited 2014 Apr 1]. p. 1620–6. Available from: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=1241826](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1241826)

Xiang Y, Arora JS, Abdel-Malek K. Optimization-based prediction of asymmetric human gait. *J Biomech.* 2011 Feb;44(4):683–93.

Merlhiot X, Le Garrec J, Saupin G, Andriot C. The XDE mechanical kernel: Efficient and robust simulation of multibody dynamics with intermittent nonsmooth contacts. In: *The 2nd Joint International Conference on Multibody System Dynamics.* 2012.

---

**ED SMAER (ED391)**

Tour 45-46 Bureau 205- case courrier 270- 4, place Jussieu - 75252 PARIS Cedex 05

☎: 01 44 27 40 71

[ed391@listes.upmc.fr](mailto:ed391@listes.upmc.fr)

# Ecole doctorale SMAER

## Sciences Mécaniques, Acoustique, Electronique, Robotique

Salini J, Barthélemy S, Bidaud P. LQP controller design for generic whole body motion. Climbing Walk Robots Support Technol Mob Mach [Internet]. 2009 [cited 2016 Apr 7]; Available from: <http://sites.isir.upmc.fr/www/files/clawar2009.pdf>

Vukobratović M, Juricic D. Contribution to the Synthesis of Biped Gait. IEEE Trans Biomed Eng. 1969;16(1).

Wieber P-B. Trajectory free linear model predictive control for stable walking in the presence of strong perturbations. In: Humanoid Robots, 2006 6th IEEE-RAS International Conference on [Internet]. IEEE; 2006 [cited 2015 Nov 1]. p. 137–42.

Desailly E, Sebsadji A, Yepremian D, Hareb F, Khouri N. Simulation of muscle retraction in cerebral palsy. Validation of a decision support system for surgical lengthening of contracted muscles. Comput Methods Biomech Biomed Engin. 2012 Sep;15(sup1):263–5.

Hicks JL, Delp SL, Schwartz MH. Can biomechanical variables predict improvement in crouch gait? Gait Posture. 2011 juin;34(2):197–201.

Sullivan K, Richards J, Miller F, Castagno P, Lennon N. Predicting the outcome of surgery for children with cerebral palsy using pre-operative gait analysis. Gait Posture. 1995;3(2):92.

Hersh LA, Sun JQ, Richards JG, Miller F. The prediction of post-operative gait patterns using neural networks. Gait Posture. 1997;5(2):151.

---

**ED SMAER (ED391)**

Tour 45-46 Bureau 205- case courrier 270- 4, place Jussieu - 75252 PARIS Cedex 05

☎: 01 44 27 40 71

[ed391@listes.upmc.fr](mailto:ed391@listes.upmc.fr)