

Offre de thèse au LORIA (Nancy)

Simulation prédictive humain-exosquelette

Contexte

Les exosquelettes pour l'assistance au geste professionnel constituent une solution prometteuse pour soulager physiquement les travailleurs effectuant des activités pénibles et réduire ainsi la prévalence des troubles musculo-squelettiques d'origine professionnelle [1, 2]. Cependant, la conception d'exosquelettes destinés à assister des tâches spécifiques reste un processus difficile, long et itératif, qui nécessite de multiples tests avec des utilisateurs humains. Dans ce contexte, **la simulation numérique du système humain-exosquelette peut faciliter la co-conception de la structure mécanique et de la loi de commande du dispositif**. Une telle simulation permettrait en particulier de prédire les effets biomécaniques sur l'humain des choix de conception et de commande tout au long du processus de conception, sans nécessiter de prototype physique du dispositif ni d'expériences sur des sujets humains [3, 4]. Un tel outil est notamment crucial lorsqu'on cherche à optimiser des paramètres de conception. [5]. D'autre part, les techniques état de l'art de commande d'exosquelettes font de plus en plus souvent appel à des méthodes d'intelligence artificielle pour prédire le mouvement de l'utilisateur et fournir une assistance adéquate. Mais cela nécessite des données d'entraînement qui, dans le cas d'interactions humain-exosquelette sont rarement disponibles et coûteuses à acquérir. La **simulation physique du système couplé humain-exosquelette peut ainsi permettre de générer des données synthétiques pour l'entraînement des modèles** [6, 7].

Plusieurs équipes de recherche, dont l'équipe Hucebot du LORIA, ont proposé des outils pour la simulation dynamique humain-exosquelette [8, 9, 10]. Ces approches permettent de simuler les mouvements et d'estimer les efforts internes de l'humain avec assistance, sans nécessiter de données expérimentales acquises avec l'exosquelette. Toutefois un verrou majeur subsiste qui nuit à la fiabilité de telles simulations : la **synthèse de mouvements humains réalistes en présence d'une assistance de type exosquelette**. Dans les travaux cités, les mouvements de l'humain sont générés soit à partir de données expérimentales de mouvement humain sans assistance, soit à partir de techniques de synthèse de mouvement basées sur des principes d'optimalité (contrôle optimal, non-linear model predictive control, apprentissage par renforcement) établis pour des gestes sans assistance. Or l'utilisation d'un exosquelette est susceptible de modifier la posture et les mouvements de l'humain par rapport à une situation sans exosquelette [11, 12, 13, 14]. Mais aucun modèle n'a été proposé à ce jour pour représenter cette adaptation motrice.

Objectif

L'objectif de cette thèse est de **simuler la modification du mouvement humain induite par l'utilisation d'un exosquelette**. Cela permettra d'établir des modèles prédictifs du mouvement humain avec assistance, nécessaires à une synthèse de mouvement réaliste. Le projet se concentrera sur les exosquelettes d'assistance au membre supérieur (ex : assistance à l'épaule), qui sont les plus communs pour les applications professionnelles, car les troubles musculo-squelettiques touchent principalement le membre supérieur.

Méthodologie envisagée

La synthèse de mouvements humains s'appuie généralement sur des méthodes de contrôle optimal [15] ou des approches basées données [16, 17]. Le contrôle optimal inverse (IOC) [18, 19] ou l'apprentissage par renforcement inverse (IRL) [20] permettent d'identifier des critères d'optimalité d'un mouvement à partir d'une quantité restreinte de données expérimentales. Ces critères peuvent ensuite être utilisés pour synthétiser des mouvements dans des situations non vues expérimentalement (dans la limite où le geste reste d'une nature proche des gestes étudiés). Toutefois, lorsqu'un exosquelette est ajouté, deux éléments peuvent changer, affectant tous deux le résultat du problème d'optimalité : le modèle interne du système et/ou la fonction de coût [12, 21].

Dans cette thèse nous utiliserons des techniques basées sur des principes d'optimalité (IOC/IRL), afin de déterminer si et comment des modifications de fonction de coût peuvent prédire la modification du mouvement humain lors de l'utilisation d'un exosquelette, en fonction du niveau de modélisation adopté pour le système humain-exosquelette.

La première phase de la thèse consistera en l'acquisition de données expérimentales de mouvements (cinématiques et dynamiques) réalisés avec et sans exosquelette, afin de quantifier et caractériser les modifications posturales induites par l'exosquelette. Les activités visées sont le travail les bras levés et la manipulation de charges, qui constituent les principales activités où les exosquelettes d'assistance au geste professionnel peuvent être utilisés. On s'intéressera en particulier à l'adaptation motrice en fonction de la charge portée avec et sans exosquelette.

Une analyse IOC ou IRL sera ensuite menée sur les données collectées afin d'identifier et de comparer les critères d'optimalité biomécaniques pertinents dans les cas avec et sans exosquelette. Les fonctions coût candidates, ainsi que la représentation de la dynamique du système nécessaire pour l'IOC/IRL dépendent du niveau de modélisation choisi pour le système humain-exosquelette. On comparera donc différents niveaux de modélisation, en particulier des modèles purement squelettiques (sans muscles) et des modèles musculo-squelettiques, afin de déterminer le modèle le plus approprié au compromis entre temps de calcul et généralisation des conclusions. On explorera l'inclusion d'un coût de confort lié aux efforts à l'interface humain-exosquelette dans la fonction coût, ce qui ouvrira des questions sur la modélisation de la transmission des efforts entre l'humain et l'exosquelette.

Etant donné la variabilité du mouvement humain, il est possible que différentes stratégies soient observées parmi les sujets. L'analyse IOC/IRL pourra alors être complétée par une analyse de type clustering, afin de mettre en évidence et de caractériser différentes stratégies motrices. Les résultats obtenus seront enfin validés en confrontant les résultats de la simulation prédictive utilisant les modèles d'adaptation motrice développés avec des données expérimentales différentes de celles de la prise de données initiale. Pour cela, on synthétisera des mouvements du système humain-exosquelette, avec du contrôle optimal ou apprentissage par renforcement, en utilisant les fonction coûts identifiées auparavant, et on comparera la cinématique et la dynamique du mouvement obtenu aux données expérimentales.

Profil recherché

- *Formation* : Master ou diplôme d'ingénieur en Robotique (avec un intérêt pour la biomécanique) ou en Biomécanique (avec une composante computationnelle et un intérêt pour la simulation) ;
- *Compétences* : Modélisation des systèmes poly-articulés (cinématique et dynamique), commande robotique, programmation C++/Python, des connaissances en commande optimale et apprentissage par renforcement seront appréciées, des connaissances en biomécanique et analyse du mouvement humain sont un plus ;
- *Langue* : Anglais ou français.

Encadrement et environnement d'accueil

Le travail de thèse sera réalisé dans l'équipe Hucebot du LORIA (Laboratoire Lorrain de Recherche en Informatique et ses Applications), à Nancy (<https://team.inria.fr/hucebot/>). La thèse sera co-encadrée par Pauline Maurice de l'équipe Hucebot, et Charles Pontonnier de l'équipe Combo du laboratoire IRISA à Rennes (<https://team.inria.fr/combo/>) :

- Pauline Maurice : pauline.maurice@loria.fr ;
- Charles Pontonnier : charles.pontonnier@irisa.fr

Le(la) doctorant(e) sera inscrit(e) à l'Ecole Doctorale IAEM (Informatique, Automatique, Electronique-Electrotechnique, Mathématiques et Sciences de l'Architecture) de l'Université de Lorraine.

Candidature

Pour candidater, merci d'envoyer les documents suivants à Pauline Maurice (adresse mail ci-dessus), en indiquant "[PhD Human-exo simulation] Application" en objet du mail :

- votre CV ;
- une lettre de motivation expliquant votre intérêt pour le sujet ;
- vos relevés de notes de Master 1 et 2 (ou équivalent) ;
- une copie de votre rapport de stage de M2 (ou équivalent), ou à défaut de stage de M1 ;

Seules les candidatures contenant toutes les pièces demandées seront étudiées (sauf justification). Les personnes intéressées peuvent néanmoins contacter les encadrants par email en amont de leur candidature pour toute question.

Références

- [1] M. P. De Looze, T. Bosch, F. Krause, K. S. Stadler, and L. W. O'sullivan, "Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load," *Ergonomics*, vol. 59, no. 5, pp. 671–681, 2016.
- [2] J. Theurel and K. Desbrosses, "Occupational exoskeletons : overview of their benefits and limitations in preventing work-related musculoskeletal disorders," *IIEE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, vol. 7, no. 3-4, pp. 264–280, 2019.
- [3] C. L. Dembia, A. Silder, T. K. Uchida, J. L. Hicks, and S. L. Delp, "Simulating ideal assistive devices to reduce the metabolic cost of walking with heavy loads," *PloS one*, vol. 12, no. 7, p. e0180320, 2017.
- [4] L. Zhou, Y. Li, and S. Bai, "A human-centered design optimization approach for robotic exoskeletons through biomechanical simulation," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 91, pp. 337–347, 2017.
- [5] P. Maurice, V. Padois, Y. Measson, and P. Bidaud, "Human-oriented design of collaborative robots," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 57, pp. 88–102, 2017.
- [6] A. O. Souza, J. Grenier, F. Charpillat, P. Maurice, and S. Ivaldi, "Towards data-driven predictive control of active upper-body exoskeletons for load carrying," in *2023 IEEE International Conference on Advanced Robotics and Its Social Impacts (ARSO)*, pp. 59–64, IEEE, 2023.
- [7] S. Luo, M. Jiang, S. Zhang, J. Zhu, S. Yu, I. Dominguez Silva, T. Wang, E. Rouse, B. Zhou, H. Yuk, et al., "Experiment-free exoskeleton assistance via learning in simulation," *Nature*, vol. 630, no. 8016, pp. 353–359, 2024.
- [8] N. Haraguchi, A. Nasr, K. A. Inkol, K. Hase, and J. McPhee, "Human and passive lower-limb exoskeleton interaction analysis : Computational study with dynamics simulation using nonlinear model predictive control," in *2023 62nd Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers (SICE)*, pp. 844–849, IEEE, 2023.
- [9] M. Harant, M. B. Näf, and K. Mombaur, "Multibody dynamics and optimal control for optimizing spinal exoskeleton design and support," *Multibody System Dynamics*, vol. 57, no. 3, pp. 389–411, 2023.
- [10] A. O. Souza, A. Bucchieri, F. Charpillat, S. Ivaldi, and P. Maurice, "Exosim : Towards physics-based modeling and validation of human-exoskeleton interaction," in *DAWR 2025-IEEE EMBC Workshop-Design and Assessment Wearable Robotics*, 2025.
- [11] O. Dubois, A. Roby-Brami, R. Parry, and N. Jarrassé, "Short term after-effects of small force fields applied by an upper-limb exoskeleton on inter-joint coordination," in *2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 959–965, IEEE, 2024.
- [12] N. Sylla, V. Bonnet, G. Venture, N. Armande, and P. Fraisse, "Assessing neuromuscular mechanisms in human-exoskeleton interaction," in *2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 1210–1213, IEEE, 2014.

- [13] P. Maurice, F. Cuny-Enault, and S. Ivaldi, "Influence of a passive back support exoskeleton on simulated patient bed bathing : results of an exploratory study," *Ergonomics*, vol. 66, no. 6, pp. 859–873, 2023.
- [14] A. Delgado-Llamas, J. Marin-Bone, and J. J. Marin-Zurdo, "Can we simulate the biomechanical effects of exoskeletons prior to workstation implementation ? application of the forces ergonomic method," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 94, p. 103409, 2023.
- [15] E. Todorov, "Optimality principles in sensorimotor control," *Nature neuroscience*, vol. 7, no. 9, pp. 907–915, 2004.
- [16] X. B. Peng, P. Abbeel, S. Levine, and M. Van de Panne, "Deepmimic : Example-guided deep reinforcement learning of physics-based character skills," *ACM Transactions On Graphics (TOG)*, vol. 37, no. 4, pp. 1–14, 2018.
- [17] G. Tevet, S. Raab, S. Cohan, D. Reda, Z. Luo, X. B. Peng, A. H. Bermano, and M. van de Panne, "Closd : Closing the loop between simulation and diffusion for multi-task character control," *arXiv preprint arXiv :2410.03441*, 2024.
- [18] B. Berret, E. Chiovetto, F. Nori, and T. Pozzo, "Evidence for composite cost functions in arm movement planning : an inverse optimal control approach," *PLoS computational biology*, vol. 7, no. 10, p. e1002183, 2011.
- [19] K. Mombaur and D. Clever, "Inverse optimal control as a tool to understand human movement," in *Geometric and numerical foundations of movements*, pp. 163–186, Springer, 2017.
- [20] M. Sabbah, F. Bečanović, S. Mehrdad, L. Righetti, B. Watier, and V. Bonnet, "Minimal observations inverse reinforcement learning for predicting human box-lifting motions," in *2025 IEEE-RAS 24th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 491–498, IEEE, 2025.
- [21] D. Verdel, O. Bruneau, G. Sahm, N. Vignais, and B. Berret, "The value of time in the invigoration of human movements when interacting with a robotic exoskeleton," *Science Advances*, vol. 9, no. 38, p. eadh9533, 2023.