

Evaluation des capacités biomécaniques humaines : mesure et modélisation des couples articulaires maximaux à l'articulation glénohumérale

De nombreux postes de travail dans l'industrie impliquent une activité répétitive et pénible pour les opérateurs qui entraîne gêne, fatigue musculaire et finalement des pathologies comme les troubles musculo-squelettiques (TMS) liés au travail (Madeleine 2010; Gallagher and Barbe 2022). Ces derniers constituent la première cause de maladie professionnelle en France. Pour prévenir de tels risques professionnels, la démarche de prévention intégrée à la conception fixe, au concepteur du poste de travail, l'objectif d'obtenir le niveau de risque résiduel le plus faible possible pour le futur opérateur. En Europe, cette approche est formalisée par la "Directive Machines", qui s'applique à tous les équipements de travail utilisés en Europe (Directive 2006), qu'il s'agisse d'un outil manuel, d'un robot collaboratif ou d'une machine spéciale faisant partie d'une chaîne de production industrielle complète. A ce jour, des outils logiciels de Modèles Humains Numériques (MHN) sont disponibles pour aider les concepteurs d'équipements de travail à évaluer les facteurs de risques biomécaniques, très tôt dans le processus de conception. Par exemple, ils intègrent des outils et calculent des indices ergonomiques tels que RULA (McAtamney and Corlett 1993), REBA (Hignett and McAtamney 2000), EAWS (Schaub et al. 2012) ou OCRA (Occhipinti 1998). Ils permettent également de calculer des quantités biomécaniques (forces de réaction et couples articulaires internes) et de les comparer à des bases de données d'efforts admissibles, mais aussi de simuler l'apparition de la fatigue musculaire. Cette dernière réduit la capacité de production de force des opérateurs et modifie leurs postures et leurs mouvements (Ma et al. 2010) (Ma et al. 2010; Rashedi and Nussbaum 2015; Savin et al. 2021). Les couples articulaires maximaux exerçables sont des quantités qui ont une grande influence lors du calcul de tels indices ergonomiques ou dans l'implémentation de modèles de simulation de la fatigue. Bien que l'enregistrement de ces données soit très complexe, une grande quantité de données a été recueillie et publiée dans la littérature (Mital and Kumar 1998, 2000; Kotte et al. 2018). Cependant, ces données peuvent changer radicalement en fonction de l'opérateur (âge, sexe, anthropométrie) et de la tâche à accomplir (posture corporelle prescrite, durée et fréquence)(Mital and Kumar 1998). De plus, ces valeurs de référence ont été principalement mesurées dans des conditions très spécifiques (généralement uniquement en condition statique) et ne sont pas exhaustives (mesurées pour seulement quelques valeurs d'angles articulaires). Les logiciels commerciaux de MHN tels que Delmia Human® (Dassault Systèmes), Tecnomatix Jack / Process simulate ® (Siemens) ou 3DSSPP® (Université du Michigan) fournissent des abaques avec des valeurs de référence de couples articulaires maximaux pour le membre supérieur et le tronc, basés sur de telles données expérimentales. Cependant, les outils disponibles de MHN font généralement de fortes hypothèses sur les mouvements (approximation quasi-statique) et ignorent totalement plusieurs phénomènes physiologiques et musculaires importants tels que la dépendance des couples articulaires aux couplages posturaux intra et inter-articulaires. Les dépendances des couples articulaires aux vitesses articulaires du fait de la géométrie (notamment la présence de muscles pluri articulaires) et aux caractéristiques biomécaniques de la force musculaire sont également négligées. Ainsi, les moments articulaires exerçables maximaux disponibles pour les concepteurs de postes de travail souffrent de fortes approximations qui peuvent conduire à une forte sous-estimation potentielle des risques professionnels. Il s'agit là d'une limite majeure des fonctionnalités des MHN dans le domaine de la prévention des risques professionnels.

Dans ce cadre, afin de répondre à ces enjeux d'amélioration des outils de MHN pour l'analyse ergonomique du poste de travail et la robotique collaborative, l'objectif du projet est de développer et de valider des outils de modélisation des capacités biomécaniques des individus, en termes de couples articulaires maximaux en fonction des caractéristiques des sujets, de la tâche à exécuter pour un ensemble de postures et de mouvements. Sur la

base d'un modèle musculosquelettique, la représentation mathématique adéquate pour l'enveloppe des couples articulaires qui tient compte des spécificités du système musculosquelettique est un polytope convexe et plus particulièrement un zonotope dont les caractéristiques dépendent à la fois de la posture du modèle, de sa géométrie musculosquelettique et des caractéristiques musculaires (Rezzoug et al. 2021; Skuric et al. 2022). Pour ce projet, le membre supérieur a été choisi en premier lieu en considérant l'articulation glénohumérale (entre l'humérus et la scapula) car l'incidence des TMS est la plus importante au niveau de cette articulation.

Le programme du stage comprendra les éléments suivants :

- Construction de notre propre base de données de couples articulaires maximaux de l'articulation glénohumérale au travers de l'utilisation du banc SHIVA de l'équipe Robioss (Crolan et al. 2021; Decatoire et al. 2022, Raynaud et al. 2021),
- Identification des paramètres de modèles musculosquelettiques équivalents sur la base de mesures de couples articulaires.
- Validation des prédictions à l'aide de données de la littérature et sur la base des mesures de couples articulaires maximaux.

L'objectif à terme est d'intégrer le formalisme des polytopes de couple dans des logiciels de MHN afin d'enrichir la gamme d'indicateurs biomécaniques fiables permettant d'évaluer les risques de TMS professionnels, de simuler de manière plus fidèle la fatigue musculaire et de mieux caractériser les capacités motrices humaines de manière plus générale pour les MHN, la robotique collaborative et la rééducation assistée.

Profil / prérequis

- Master 2 en cours ou dernière année d'école d'ingénieur en biomécanique/robotique ;
- Bonne connaissance de la mécanique des solides rigides, de la modélisation polyarticulée et éventuellement des modèles biomécaniques humains ;
- Une connaissance des techniques de mesure du mouvement humain à l'aide de systèmes optoélectroniques serait appréciée ;
- Intérêt pour l'expérimentation et l'analyse du mouvement humain ;
- Langues : Anglais indispensable (bibliographie, documentation du logiciel).

Les qualités recherchées chez le stagiaire sont la rigueur scientifique, la curiosité, l'autonomie et l'esprit d'initiative.

Lieu de stage et encadrement

Le stage se déroulera à Poitiers dans l'équipe ROBIOSS de l'Institut Pprime sous la direction de Nasser Rezzoug (MCF HDR), Antoine Eon (MCF) et Arnaud Decatoire (Ingénieur de recherche).

Déroulement du stage

La durée maximale du stage est de 6 mois. En fonction des disponibilités du candidat, il pourra débuter dès janvier 2024. Le temps de travail hebdomadaire est de 35 heures. Le stage est indemnisé (pour mémoire, cette indemnisation s'élevait à environ 560 € / mois en 2023).

Merci d'envoyer votre CV avec 2 références, une lettre de motivation et les relevés de notes du M1 et M2 ou de l'école d'ingénieur à Nasser Rezzoug (nasser.rezzoug@univ-poitiers.fr), Antoine Eon (antoine.eon@univ-poitiers.fr), and Arnaud Decatoire (arnaud.decatoire@univ-poitiers.fr).

Références bibliographiques

- R. Crolan, A. Eon, P. Laguillaumie, A. Decatoire, C. Scotto, Y. Blandin. Learning an arm movement on a mechatronic device: influence of visual feedbacks occurrence, congrès ACAPS, pp 80, 2021.
- J. Raynaud, A. Eon, P. Laguillaumie, C. Scotto, Y. Blandin and A. Decatoire. *A mechatronic device for subject-specific rehabilitation protocol: Application to post-surgical reconstruction of the anterior cruciate ligament.* (2021) Abstracts 46ème Congrès Société Biomécanique, Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 24:sup1, S1-S325, DOI:10.1080/10255842.2021.1978758
- A. Decatoire, A. Eon, P. Laguillaumie. Brevet FR3115467A1 ; WO2022084283A1 - DISPOSITIF DE RÉÉDUCATION, D'ENTRAÎNEMENT OU DE PRÉPARATION PHYSIQUE, CNRS, Université de Poitiers, 2022-04-28
- Directive M. 2006. Directive 2006/42 of the European Parliament and of the council on machinery. EC of the European Parliament and of the Council of. 17.
- Gallagher S, Barbe MF. 2022. MSDs as a Fatigue Failure Process. *Musculoskeletal Disorders.* p. 207-228.
- Hignett S, McAtamney L. 2000. Rapid Entire Body Assessment (REBA). *Applied Ergonomics.* 31(2):201-205.
- Kotte SHP, Viveen J, Koenraadt KLM, The B, Eygendaal D. 2018. Normative values of isometric elbow strength in healthy adults: a systematic review. *Shoulder & elbow.* 10(3):207-215.
- Ma L, Chablat D, Bennis F, Zhang W, Guillaume F. 2010. A new muscle fatigue and recovery model and its ergonomics application in human simulation. *Virtual and Physical Prototyping.* 5(3):123-137.
- Madeleine P. 2010. On functional motor adaptations: from the quantification of motor strategies to the prevention of musculoskeletal disorders in the neck–shoulder region [<https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.2010.02145.x>]. *Acta Physiologica.* 199(s679):1-46.
- McAtamney L, Corlett EN. 1993. RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics.* 24(2):91-99.
- Mital A, Kumar S. 1998. Human muscle strength definitions, measurement, and usage: Part I--Guidelines for the practitioner. *International Journal of Industrial Ergonomics.* 22(1-2):101-121.
- Mital A, Kumar S. 2000. Human muscle strength definitions, measurement, and usage: Part II-The scientific basis (knowledge base) for the guide. *International Journal of Industrial Ergonomics.* 22(1-2):123-144.
- Occhipinti E. 1998. OCRA: a concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs *Ergonomics.* 41(9):1290-1311.
- Rashedi E, Nussbaum MA. 2015. A review of occupationally–relevant models of localised muscle fatigue. *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation.* 5(1):61-80.
- Rezzoug N, Hernandez V, Gorce P. 2021. Upper-Limb Isometric Force Feasible Set: Evaluation of Joint Torque-Based Models. *Biomechanics.* 1(1):102-117.
- Savin J, Gaudez C, Gilles MA, Padois V, Bidaud P. 2021. Evidence of movement variability patterns during a repetitive pointing task until exhaustion. *Applied Ergonomics.* 96:103464.
- Schaub KG, Mühlstedt J, Illmann B, Bauer S, Fritzsche L, Wagner T, Bullinger-Hoffmann AC, Bruder R. 2012. Ergonomic assessment of automotive assembly tasks with digital human modelling and the 'ergonomics assessment worksheet' (EAWS). *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation.* 3(3-4):398-426.
- Skuric A, Padois V, Rezzoug N, Daney D. 2022. On-Line Feasible Wrench Polytope Evaluation Based on Human Musculoskeletal Models: An Iterative Convex Hull Method. *IEEE Robotics and Automation Letters.* 7(2):5206-5213.