

Stage de M2 : Modèle unifié de la neuromécanique humaine par le contrôle optimal stochastique

English title : Unified Stochastic Optimal Control Model of Human Neuromechanics

Durée : 6 mois,

Lieu : Plateau de Saclay (CIAMS, L2S ou UMA)

Mots clés : Modélisation du contrôle moteur humain - Neurosciences du mouvement – Robotique humaine – Contrôle optimal – Contrôle stochastique

Encadrants:

Bastien Berret (CIAMS, Université Paris-Saclay) : bastien.berret@universite-paris-saclay.fr

Yacine Chitour (L2S, Université Paris-Saclay) : yacine.chitour@lss.supelec.fr

Frédéric Jean (UMA, ENSTA Paris) : frederic.jean@ensta-paris.fr

Sujet du stage :

L'une des caractéristiques du comportement moteur humain est notre capacité à contrôler l'interaction physique avec l'environnement. Celle-ci dépasse de loin les capacités des robots les plus avancés. Pour autant, notre compréhension des processus neuromécaniques qui permettent le contrôle de l'interaction physique est encore très restreinte, ce qui est une limitation importante pour de nombreuses applications, en particulier dans le domaine de l'interaction homme-robot (exosquelettes, prothèses, cobots etc.). En effet, être capable de prédire la réponse humaine aux entrées externes induites par l'environnement permettrait d'optimiser l'action des robots qui interagissent physiquement avec le système neuromusculaire humain.

Les données expérimentales indiquent que les humains apprennent à contrôler l'interaction physique en combinant trois stratégies (Burdet et al., Nature, 2001) : 1) une planification des forces nettes ; 2) une planification de l'impédance mécanique (ex : raideur articulaire) basée sur la co-activation de paires de muscles agonistes et antagonistes ; 3) un contrôle rétroactif basé sur l'estimation d'état et les retours sensoriels. Cette dernière stratégie est limitée par le bruit sensoriel de la proprioception et de la vision et par les délais présents dans tout le système nerveux central. Ces trois stratégies sont mises à jour au fur et à mesure de l'adaptation à l'environnement et contribuent à réduire les écarts entre l'entrée sensorielle prévue et reçue pour corriger les erreurs et réaliser la tâche voulue avec succès. Malheureusement, à l'heure actuelle, aucune théorie du contrôle moteur n'est en mesure de rendre compte simultanément de toutes ces stratégies dans un même cadre mathématique, ni d'expliquer comment ces stratégies sont combinées au sein du système nerveux central en fonction de la tâche à accomplir.

Dans ce projet, nous proposons de développer de nouveaux outils mathématiques pour prédire le contrôle optimal de la force, de l'impédance et des réponses par rétroaction, lorsque les humains régulent leur interaction physique avec l'environnement. L'idée est de converger vers un cadre théorique "tout en un" qui permettrait de prédire quand il faut co-contracter les muscles et quand il faut plutôt utiliser des rétroactions (et dans quelles proportions), en fonction des caractéristiques de la tâche (instabilité, incertitude etc.).

D'un point de vue mathématique, l'enjeu est de produire une modélisation permettant de coupler du contrôle optimal en boucle ouverte (pour la planification, Berret & Jean, Plos Comp Biol, 2020 et Automatica, 2020) avec du contrôle en boucle fermée (la rétroaction, Berret et al., Plos Comp Biol, 2021), le tout dans un contexte stochastique/incertain et avec des retards sur les mesures. Ce type de modélisation aurait des applications bien au-delà du seul contrôle moteur humain, notamment en robotique.

Ce stage pourra déboucher sur une thèse de doctorat en collaboration avec le Professeur Etienne Burdet à l'Imperial College London (<https://www.imperial.ac.uk/human-robotics>).

Références :

Burdet E, Osu R, Franklin DW, Milner TE, Kawato M (2001) The central nervous system stabilizes unstable dynamics by learning optimal impedance. **Nature** 414:446–449.

Berret B, Jean F (2020a) Efficient computation of optimal open-loop controls for stochastic systems. **Automatica**, 115:108874.

Berret B, Jean F (2020b) Stochastic optimal open-loop control as a theory of force and impedance planning via muscle co-contraction. **PLoS Computational Biology** 16:e1007414.

Berret B, Conessa A, Schweighofer N, Burdet E (2021) Stochastic optimal feedforward-feedback control determines timing and variability of arm movements with or without vision. **PLoS Computational Biology** 17:e1009047.

Profil recherché : Etudiant en Master2 ou grande école d'ingénieurs avec :

- une orientation en mathématiques appliquées ou en automatique ;
- si possible des connaissances en théorie du contrôle, optimisation, probabilités, méthodes numériques ;
- un intérêt pour la robotique et les neurosciences.