

# Commande bio-inspirée de robots pour des tâches rythmiques en interaction avec l'environnement

## *Bio-inspired control of robotic systems in rhythmic interaction tasks with the environment*

**Mots clés (fr) :** robotique ; systèmes hybrides ; oscillateurs non linéaires ; contrôle moteur humain

**Début de thèse prévisionnel :** 01/10/2018

**Localisation :** CentraleSupélec - Campus Paris-Saclay (Gif-sur-Yvette)

**Encadrants :** Pedro Rodriguez-Ayerbe (directeur, CentraleSupélec – L2S), Maria Makarov (CentraleSupélec – L2S), Isabelle Siegler (Univ. Paris Sud, CIAMS)

### Contexte

Ce projet de recherche se positionne à l'interface entre l'Automatique et les Sciences du mouvement humain (neurosciences). Il vise à modéliser le contrôle du membre supérieur humain dans un geste sensorimoteur rythmique finalisé, à savoir la frappe cyclique de balle (<https://www.universite-paris-saclay.fr/fr/actualite/quand-la-balle-rebondit-hors-du-cours>). Cette modélisation contribue d'une part à la compréhension du mouvement humain et à son analyse à l'aide d'outils de l'automatique, et d'autre part au développement de stratégies de commande bio-inspirées innovantes pour des systèmes robotiques anthropomorphes en interaction avec l'environnement, pour des applications en co-manipulation et assistance robotique.

Ce projet de recherche s'inscrit dans le cadre d'une collaboration scientifique entre des enseignants-chercheurs du L2S (CentraleSupélec, CNRS, Université Paris-Sud) et du CIAMS (Université Paris-Sud). Les deux équipes sont partenaires dans l'axe thématique « Homme artificiel bio-inspiré » de la Structure Fédérative FédéV des Sciences du Mouvement (<http://fedev.universite-paris-saclay.fr/>).

### Travaux antérieurs

Ce projet s'appuie sur les travaux réalisés dans la thèse interdisciplinaire (IDI2014, FCS Paris-Saclay) de Guillaume Avrin [Avrin2017] qui propose, pour la tâche « benchmark » de frappe cyclique de balle, un modèle comportemental innovant fondé sur un oscillateur de Matsuoka, jouant le rôle de réseau spinal rythmique (Central Pattern Generator, CPG). Ce schéma s'affranchit de tout modèle interne, contrairement à de nombreux correcteurs plus classiques en neurosciences comme ceux issus de la théorie du contrôle optimal [Ronsse et al. 2010], [Kulchenko and Todorov 2011]. Une analyse de stabilité asymptotique est menée pour le système dynamique hybride défini par le couplage entre le système neuro-musculo-squelettique et la balle [Avrin2016-ACC, Avrin2017-ICINCO]. La pertinence du modèle est validée par comparaison aux données expérimentales [Avrin2017-JNP]. L'architecture de contrôle proposée reproduit efficacement les patrons de mouvement observés chez les personnes valides, y compris lorsque la tâche est soumise à des variations paramétriques (accélération gravitationnelle, coefficient de restitution du système balle-raquette).

### Objectifs de la thèse

Dans la perspective d'un transfert des modèles de comportement ainsi mis en évidence vers des applications robotiques réalistes en interaction dynamique avec l'environnement (situations d'impact ou contact), le modèle développé doit être complété par des stratégies du contrôle des efforts employés pour réaliser le mouvement, par exemple des mécanismes de régulation d'impédance du bras. Comprendre comment les propriétés dynamiques du bras sont régulées au cours du mouvement pour préparer les phases d'impact de la balle est également un enjeu dans le champ des sciences du mouvement humain. L'impédance du bras humain en prévision d'un impact lors d'une interception d'une balle a été étudiée dans [Tsuji et al. 2008]. Cette étude a montré une phase d'adaptation de l'impédance et de la trajectoire de référence en fonction de l'environnement. Dans des études très récentes, des bras robotisés utilisés par des participants pour réaliser des gestes finalisés (ex : travaux de peinture) ont été également équipés de capteurs en leur extrémité pour mesurer le contrôle de l'impédance du membre supérieur en ce point-là [Erden and Billard 2015]. Pour l'analyse de la variation d'impédance du bras le cas d'étude initial sera ici étendu à l'interaction avec une balle pesante, dans un objectif de généralisation aux interactions

dynamiques avec l'environnement. Une étude expérimentale de mesure de l'impédance du bras humain est envisagée au moyen d'un dispositif robotisé avec capteur d'effort (équipement de recherche mutualisé UFR STAPS / L2S obtenu sur AAP ERM 2017 de l'Université Paris Sud).

Dans le but de proposer des structures de commande innovantes pour la robotique, une préoccupation de premier plan sera la traduction de principes bio-inspirés mis en évidence dans le modèle précédent, en une loi de commande applicable à un système mécatronique et généralisable à la commande multivariable. On cherchera également à développer une méthodologie d'analyse de la stabilité et de la robustesse des lois de commande ainsi proposées.

## Profil et compétences recherchées

- Automatique : automatique avancée classique, stabilité de systèmes non linéaires
- Robotique : des connaissances antérieures en robotique de manipulation (modèle dynamique, commande) serait un plus mais ne constitue pas de prérequis spécifique, mise à niveau possible en début de thèse
- Intérêt pour les sciences du mouvement, capacité à se positionner sur une thématique fortement interdisciplinaire (automatique – robotique – sciences du mouvement humain), esprit de synthèse
- Capacité à présenter les résultats techniques en français et en anglais, à l'écrit comme à l'oral
- Goût pour l'expérimentation

## Références

**[Avrin2017]** Guillaume Avrin. "Modélisation du contrôle moteur humain lors de tâches rythmiques hybrides et application à la commande de robots anthropomorphes". Thèse soutenue le 04/10/2017. ED 566 Sciences du sport, de la motricité et du mouvement humain (2S2MH). Co-directeurs : Isabelle A. Siegler (CIAMS), Pedro Rodriguez-Ayerbe (L2S).

**[Avrin2017-JNP]** Guillaume Avrin, Isabelle Anne Siegler, Maria Makarov, Pedro Rodriguez-Ayerbe. "Model of rhythmic ball bouncing using a visually controlled neural oscillator". *Journal of Neurophysiology*. 9 Aug. 2017, DOI: 10.1152/jn.00054.2017

**[Avrin2017-ICINCO]** G. Avrin, M. Makarov, P. Rodriguez-Ayerbe, I. A. Siegler. "Dynamic stability of repeated agent-environment interactions during the hybrid ball-bouncing task". ICINCO 2017. Spain, Madrid, July 26-28, 2017

**[Avrin2016-ACC]** G. Avrin, M. Makarov, P. Rodriguez-Ayerbe, I. A. Siegler. "Particle Swarm Optimization of Matsuoka's oscillator parameters in human-like control of rhythmic movements". American Control Conference (ACC). Boston, MA, USA, 6-8 Juillet 2016. DOI: 10.1109/ACC.2016.7524938.

**[Kulchenko and Todorov 2011]** Kulchenko P, Todorov E (2011) First-exit model predictive control of fast discontinuous dynamics: Application to ball bouncing. Proc IEEE Int Conf Robot Autom 2144–2151. doi: 10.1109/ICRA.2011.5980196

**[Erden and Billard 2015]** Erden MS, Billard A (2015) End-Point Impedance Measurements Across Dominant and Nondominant Hands and Robotic Assistance with Directional Damping. IEEE Trans Cybern 45:1146–1157. doi: 10.1109/TCYB.2014.2346021

**[Ronsse et al. 2010]** Ronsse R, Wei K, Sternad D (2010) Optimal control of a hybrid rhythmic-discrete task: the bouncing ball revisited. J Neurophysiol 103:2482–93. doi: 10.1152/jn.00600.2009

**[Tsuji et al. 2008]** Tsuji T, Tanaka Y (2008) Bio-mimetic Impedance Control of Robotic Manipulator for Dynamic Contact Tasks. Robot Auton Syst 56:306–316. doi: 10.1016/j.robot.2007.09.001

# Bio-inspired control of robotic systems in rhythmic interaction tasks with the environment

**Keywords (en):** robotics ; hybrid systems ; nonlinear oscillators ; human motor control

**Start of the project:** 01/10/2018

**Localization:** CentraleSupélec - Campus Paris-Saclay (Gif-sur-Yvette)

**Advisors:** Pedro Rodriguez-Ayerbe (dir., CentraleSupélec – L2S), Maria Makarov (CentraleSupélec – L2S), Isabelle Siegler (Univ. Paris Sud, CIAMS)

## Context

This research project lies at the interface between the Automatic and the Sciences of Human Movement (neuroscience). It aims at modeling the control of the human upper limb during a finalized rhythmic sensorimotor gesture, namely the ball-bouncing task (<https://www.universite-paris-saclay.fr/fr/actualite/quand-la-balle-rebondit-hors-du-cours>). On the one hand, this modeling contributes to the understanding of the human movement, and its analysis with the help of automatic control methods. On the other hand, it contributes to the development of innovative bio-inspired control strategies for anthropomorphic robotic systems in interaction with the environment, for applications in co-manipulation and robotic assistance.

This research project is part of a scientific collaboration between researchers from L2S (CentraleSupélec, CNRS, Université Paris-Sud) and CIAMS (Université Paris-Sud). The two teams are partners in the thematic axis "Bio-inspired artificial human" of the Federal Structure "FédeV" of the Sciences of the Movement within the Univ. Paris-Saclay (<http://fedev.universite-paris-saclay.fr/>).

## Previous work

This doctoral project is intended in continuation of the interdisciplinary thesis of Guillaume Avrin [Avrin2017] (IDI2014, FCS Paris-Saclay), which proposes an innovative behavioral model for the cyclic ball-bouncing benchmark task, based on a Matsuoka oscillator playing the role of a Central Pattern Generator (CPG). This scheme does not use any internal model, unlike many other control models more classical in Neuroscience such as those derived from the theory of optimal control [Ronse et al. 2010], [Kulchenko and Todorov 2011]. An asymptotic stability analysis is conducted for the hybrid dynamic system defined by the coupling between the neuromusculoskeletal system and the ball [Avrin2016-ACC, Avrin2017-ICINCO]. The relevance of the model is validated by comparison with the experimental data [Avrin2017-JNP]. The proposed control architecture effectively reproduces the movement patterns observed in valid persons, including when the task is subject to parametric variations (gravitational acceleration, restitution coefficient of the ball-racket system).

## Thesis objectives

In the perspective of a transfer of such behavior models to realistic robotic applications in dynamic interaction with the environment (situations of impact or contact), the developed model must be refined with strategies to control the efforts employed to achieve the movement, for example arm impedance control laws. Understanding how the dynamic properties of the arm are regulated during the movement before the impact phases of the ball is also a topic of interest in the field of human movement sciences. The impedance of the human arm in anticipation of impact during ball interception has been studied in [Tsuji et al. 2008]. This study showed a phase of adaptation of the impedance and the reference trajectory according to the environment. In recent studies, robotic arms used by participants to carry out finalized gestures (eg painting) were also equipped with sensors at their end to measure the control of the impedance of the upper limb at this point [Erden and Billard 2015]. For the analysis of the impedance adaptation, the initial case study will be extended here to the interaction with a heavy ball, with the aim of generalization to dynamic interactions with the environment. An experimental study to measure the impedance of the human arm is envisaged by means of a robotic device with force sensor.

In order to propose innovative control structures for robotics, a major concern during this project will be the translation of bio-inspired principles highlighted in the previous model, into a control law applicable to a mechatronic system and generalizable to multivariable control. A methodology for stability and robustness analysis of the proposed control laws will also be developed.

## Profile and skills

- Automatic control : advanced automatic control, nonlinear system stability analysis
- Robotics : previous knowledge in manipulator dynamics and control would be a plus but is not required
- Interest for human movement sciences and capacity to navigate in a highly interdisciplinary field (automatic control / robotics / human movement sciences), ability to see the big picture
- Ability to present technical results in French and in English, both written and oral
- Interest for experimental studies

## References

- [Avrin2017]** Guillaume Avrin. "Modélisation du contrôle moteur humain lors de tâches rythmiques hybrides et application à la commande de robots anthropomorphes". Thèse soutenue le 04/10/2017. ED 566 Sciences du sport, de la motricité et du mouvement humain (2S2MH). Co-directeurs : Isabelle A. Siegler (CIAMS), Pedro Rodriguez-Ayerbe (L2S).
- [Avrin2017-JNP]** Guillaume Avrin, Isabelle Anne Siegler, Maria Makarov, Pedro Rodriguez-Ayerbe. "Model of rhythmic ball bouncing using a visually controlled neural oscillator". *Journal of Neurophysiology*. 9 Aug. 2017, DOI: 10.1152/jn.00054.2017
- [Avrin2017-ICINCO]** G. Avrin, M. Makarov, P. Rodriguez-Ayerbe, I. A. Siegler. "Dynamic stability of repeated agent-environment interactions during the hybrid ball-bouncing task". ICINCO 2017. Spain, Madrid, July 26-28, 2017
- [Avrin2016-ACC]** G. Avrin, M. Makarov, P. Rodriguez-Ayerbe, I. A. Siegler. "Particle Swarm Optimization of Matsuoka's oscillator parameters in human-like control of rhythmic movements". American Control Conference (ACC). Boston, MA, USA, 6-8 Juillet 2016. DOI: 10.1109/ACC.2016.7524938.
- [Kulchenko and Todorov 2011]** Kulchenko P, Todorov E (2011) First-exit model predictive control of fast discontinuous dynamics: Application to ball bouncing. Proc IEEE Int Conf Robot Autom 2144–2151. doi: 10.1109/ICRA.2011.5980196
- [Erden and Billard 2015]** Erden MS, Billard A (2015) End-Point Impedance Measurements Across Dominant and Nondominant Hands and Robotic Assistance with Directional Damping. IEEE Trans Cybern 45:1146–1157. doi: 10.1109/TCYB.2014.2346021
- [Ronsse et al. 2010]** Ronsse R, Wei K, Sternad D (2010) Optimal control of a hybrid rhythmic-discrete task: the bouncing ball revisited. J Neurophysiol 103:2482–93. doi: 10.1152/jn.00600.2009
- [Tsuji et al. 2008]** Tsuji T, Tanaka Y (2008) Bio-mimetic Impedance Control of Robotic Manipulator for Dynamic Contact Tasks. Robot Auton Syst 56:306–316. doi: 10.1016/j.robot.2007.09.001