



Ampère

Unité Mixte de Recherche du CNRS - UMR 5005

Génie Électrique, Automatique et Bio-Ingénierie

Sujet de thèse

École doctorale EEA de Lyon

Merci de compléter l'ensemble des rubriques et de lire les notes de bas de page.

| |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Etablissement d'inscription : INSA Lyon ¹ |
| École doctorale : ED 160 EEA de Lyon dirigée par Mr Delachartre Philippe |
| Intitulé du doctorat : Automatique ² |
| Sujet de la thèse : Méthodes hybrides pour l'extrapolation de modèles physiques complexes appliqués à la robotique médicale |
| Unité de recherche : Ampère ³ , dirigée par Christian Vollaire |
| Directeur/trice de thèse : Mr PHAM Minh Tu |
| Co-directeur/trice de thèse (le cas échéant)⁴ : Mr Chalard Rémi |
| Co-directeur/trice de thèse en entreprise (le cas échéant) : |

¹ A impérativement choisir dans la liste suivante : Ecole Centrale de Lyon, INSA de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1

² A impérativement choisir dans la liste suivante : Automatique // Electronique, Nanotechnologie, Optique et Laser // Génie Electrique // Ingénierie pour le vivant Traitement du signal et de l'Image)

³ A impérativement choisir dans la liste suivante : Laboratoire Ampère, CITI, CREATIS, INL, LAGEP, LGEF

⁴ Un/une co-encadrant-e n'est pas nécessairement co-directeur/trice de thèse puisque pour remplir ce rôle, il est nécessaire d'être habilité à diriger des recherches (pour plus de précision, voir le règlement intérieur de l'ED EEA, section 3.

Collaboration(s)/partenariat(s) extérieur(s) éventuels⁵ :

Hospices Civils de Lyon et University of Alberta (Canada)

Domaine et contexte scientifiques :

L'approche traditionnelle en Automatique consiste à exploiter un modèle nominal du système de manière à garantir un comportement désiré. Il en est de même en Robotique où des modèles physiques identifiés permettent de prédire le comportement du robot et de le commander en conséquence. Dans le domaine spécifique de la robotique médicale, une des difficultés principales est d'assurer de bonnes performances en répétabilité et en précision indépendamment de conditions expérimentales variables liées à la nature même du vivant. Les méthodes basées sur un modèle nominal peuvent donc rapidement se montrer inefficaces. Depuis l'essor de l'intelligence artificielle (IA) en ingénierie, la Robotique est entrée dans une nouvelle ère notamment parce que les robots ont désormais la capacité d'analyser et de mener à bien des tâches qui étaient auparavant difficiles à automatiser à cause de la prise en compte de phénomènes complexes à modéliser (perturbations extérieures, environnement variable, etc.). Ainsi, à partir de grandes quantités de données ou d'une extrapolation des données récoltées, l'apprentissage en profondeur (Deep Learning) a montré dans de nombreux domaines qu'il est possible d'obtenir des résultats étonnants.

Mots-clefs : Modèles physiques complexes, Data-driven Models, Méthodes hybrides, robotique médicale, Intelligence Artificielle

Objectifs de la thèse :

L'objectif principal de cette thèse est de développer des méthodes hybrides s'appuyant sur un modèle robuste comportant les avantages des modèles physiques et des modèles basés sur des données (data-driven model) tout en minimisant leur faiblesse respective.

Verrous scientifiques :

Dans certaines applications, les exigences du cahier des charges sont irréalisables et des connaissances préalables supplémentaires sur la tâche à réaliser sont nécessaires pour surmonter les problèmes qui en résultent. En particulier, l'apprentissage de

⁵ Hors contrats doctoraux fléchés UMI par l'établissement, les sujets de thèse en cotutelle ne sont pas acceptés.

modèles physiques pour la commande nécessite une extrapolation robuste à partir d'un nombre réduit d'échantillons, souvent collectés en ligne, et les erreurs de modèle peuvent entraîner une dégradation des performances visées. Certains auteurs ont montré récemment que l'incorporation directe d'informations physiques permet d'obtenir une nouvelle approche d'apprentissage de modèles profonds qui extrapole raisonnablement le système tout en nécessitant moins d'échantillons.

Plusieurs travaux ont également proposé des approches hybrides afin de traiter de manière dissociée des problématiques de modélisation, de perception, ou de commande.

Contributions originales attendues :

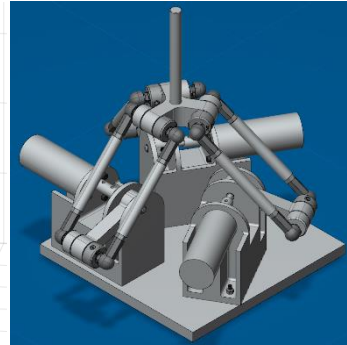
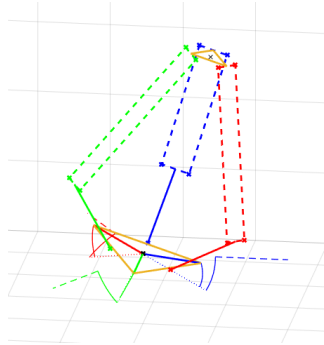
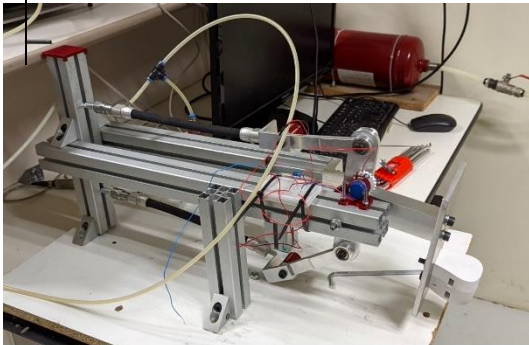
La thèse propose de développer une approche globale prenant en compte les différents aspects cités précédents. Pour cela différentes techniques de modélisation seront combinées pour proposer un modèle physique augmenté grâce à de l'Intelligence Artificielle.

Programme de recherche et démarche scientifique proposée :

Les travaux s'organiseront selon trois axes bien définis :

- Une revue de la littérature complète sur les data-driven modèles couplée à une étude comparative sur la modélisation physique de systèmes complexes (en particulier sur des systèmes polyarticulés).
- Le développement d'algorithmes de deep learning capables de modéliser un système physique connu puis inconnu afin de tester la capacité à identifier un modèle complexe avec un outil différent de ceux utilisés classiquement en Robotique.
- Enfin, le dernier point qui sera abordé dans la thèse concerne la validation expérimentale. Le travail s'appuiera sur différents moyens du laboratoire dans le cadre de deux projets : le premier est celui d'une interface haptique développée actuellement dans une thèse dont l'identification dynamique pourrait reposer sur une approche hybride qui combinera un modèle dynamique lagrangien pour la partie mécanique et un réseau de neurones pour modéliser les imperfections de la structure et les phénomènes de couplage mécanique ; le second est un simulateur de spasticité du membre

inférieur développé dans le cadre d'une ANR. Le simulateur actuellement en phase de conception intégrera à terme une structure mécanique multiphysique qu'il s'agira de piloter à l'aide d'une approche hybride qui permettra de simplifier la modélisation tout en gardant le caractère physique du système.



Encadrement scientifique :

- **Description du comité d'encadrement :** [à compléter avec le rôle dans l'encadrement scientifique (en termes de compétences scientifiques, etc.) et le pourcentage d'implication du directeur de thèse ⁶ et des autres membres du comité⁷]

| Nom Prénom | Labo / Equipe | Compétences scientifiques | Taux d'encadrement % |
|-----------------|---------------|-----------------------------------|----------------------|
| Mr PHAM Minh Tu | Ampère AIS | Robotique, Automatique | 50 |
| Mr Chalard Rémi | Ampère AIS | Robotique, Informatique Appliquée | 50 |

- *Le comité d'évaluation de l'HCERES ayant demandé à l'école doctorale de limiter la taille du comité d'encadrement à deux membres (directeur de thèse compris), il est impératif de ne proposer des comités*

⁶ Le directeur de thèse doit être un HdR rattaché à l'ED EEA ou en passe de le devenir avant juin de l'année en cours ou bénéficier d'une dérogation du Conseil Scientifique lors du dépôt du sujet de thèse.

⁷ Dans le cas d'un comité d'encadrement réparti sur plusieurs établissements, la plus grande partie de l'encadrement est effectuée par des membres de l'établissement. Si l'encadrement de la thèse implique des membres hors de l'ED EEA, la part de l'encadrement des membres ED doit être très supérieur à 50%.



d'encadrement de taille plus importante que si cela est absolument nécessaire⁸ et de le justifier soigneusement.

- **Intégration au sein du (ou des) laboratoire(s)** (Département/Equipe(s) impliquée(s)) (**pourcentage du temps travail au sein de ce ou ces laboratoire(s)**) :

Laboratoire Ampère, département AIS (100%)

Financement de la thèse : Contrat doctoral de l'établissement d'inscription

Profil du candidat recherché (prérequis) :

Ingénieur(e) généraliste ou titulaire d'un master en Robotique ou en Automatique. Des compétences ou une expérience en machine learning serait un plus.

Objectifs de valorisation des travaux de recherche :

Les pistes envisagées pour ce sujet devraient permettre des publications dans des conférences ou des revues internationales à comité de lecture de bons niveaux.

Compétences qui seront développées au cours du doctorat :

modélisation multi-physique, deep learning, commande et diagnostic en temps réel, robotique

Perspectives professionnelles après le doctorat :

domaine de la recherche en automatique et robotique (post-doc, carrière d'enseignant chercheur en France comme à l'étranger) ou ingénieur dans le secteur privé

Références bibliographiques sur le sujet de thèse :

[1] M. Brossard, S. Bonnabel, and A. Barrau. Denoising IMU gyroscopes with deep learning for open-loop attitude estimation. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020.

⁸ Un certain nombre de commissions type CNU ne reconnaissent un co-encadrement qu'au-delà d'un certain pourcentage. Souvent l'encadrement est considéré comme effectif si > 30%.

- [2] F.L. Lewis and D. Vrabie. Reinforcement Learning and Adaptive Dynamic Programming for Feedback Control. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2009.
- [3] M. Lutter and J. Peters. Combining physics and deep learning to learn continuous-time dynamics models. arXiv preprint arXiv:2110.01894.
- [4] M. Lutter, J. Silberbauer, J. Watson and J. Peters. Differentiable Physics Models for Real-world Offline Model-based Reinforcement Learning. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2021.
- [5] Y. Yin, V. Le Guen, J. Dona, E. de Bézennac, I. Ayed, N. Thome and P. Gallinari. Augmenting physical models with deep networks for complex dynamics forecasting. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2021.
- [6] M. Lutter, K. Listmann and J. Peters, Deep Lagrangian Networks for end-to-end learning of energy-based control for under-actuated systems, 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Macau, China, 2019, pp. 7718-7725
- [7] Hindman, J, Burton, R, & Schoenau, G. An Artificial Neural Network Approach to Payload Estimation in Four Wheel Drive Loaders. Proceedings of the ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 9: Mechanical Systems and Control, Parts A, B, and C. Seattle, Washington, USA. November 11–15, 2007. pp. 621-625. ASME.
- [8] Maziar Raissi and George Em Karniadakis. Hidden physics models: Machine learning of nonlinear partial differential equations. Journal of Computational Physics, 357:125–141, 2018.
- [9] Maziar Raissi, Paris Perdikaris, and George Em Karniadakis. Physics informed deep learning (part i): Data-driven solutions of nonlinear partial differential equations. arXiv preprint arXiv:1711.10561, 2017.
- [10] Elmar Rueckert, Moritz Nakatenus, Samuele Tosatto, and Jan Peters. Learning inverse dynamics models in $\mathcal{O}(n)$ time with lstm networks. In IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robotics, pp. 811–816. IEEE, 2017.
- [11] J. Cifuentes, P. Boulanger, M. T. Pham, F. Prieto and R. Moreau, Gesture Classification Using LSTM Recurrent Neural Networks, 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Berlin, Germany, 2019, pp. 6864-6867, doi: 10.1109/EMBC.2019.8857592.



[12] Gerardo Becerra, Fredy Ruiz, Diego Patino , Minh Tu Pham, Xuefang Lin-Shi, Learning-based Current Estimation for Power Converters Operating in Continuous and Discontinuous Conduction Modes, Electrimacs 2022.