

Ph. D. Thesis in Automatic Control

Title: Estimation and control of flexible structures with physics informed learning

Supervisors

Yongxin Wu, Associate Professor (HDR), SupMicroTech, FEMTO-ST AS2M, Besançon yongxin.wu@femto-st.fr

Yann Le Gorrec, Professor, SupMicroTech, FEMTO-ST AS2M, Besançon legorrec@femto-st.fr

Context/Aim

This thesis will mainly take place within the ROMOCO team at AS2M (Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques) department of FEMTO-ST Besançon. The aim of this thesis is to develop identification, estimation and control methods for flexible structures (1D and 2D) actuated by HASEL actuators, combining artificial intelligence (AI) techniques and the port Hamiltonian framework.

Key words

Port Hamiltonian systems; HASEL Actuator; Flexible structure; PINN

Detailed description

This thesis aims to address the estimation and control problem of HASEL actuator driven flexible structures (1D and 2D)(experimental set-up in 1D case existing in Department AS2M of FEMTO-ST institute as shown in Figure 1) using the port Hamiltonian structure informed Neural network.

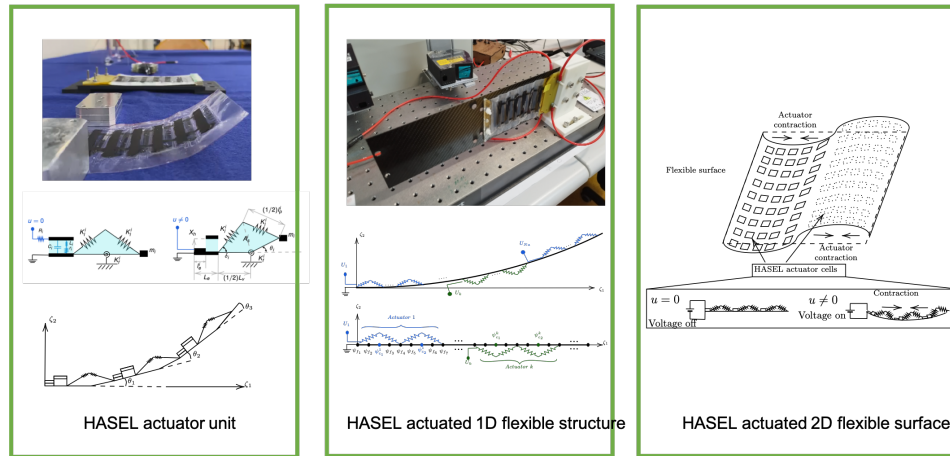


Figure 1: Left. HASEL actuator; Middle. HASEL driven 1D flexible structure; Right. HASEL driven 2D flexible structure

In recent years, soft robots have provided greater safety for humans and the ability to easily handle fragile objects, thanks to their flexible structure, compared to traditional rigid robots. Their

adaptability allows them to operate in challenging environments. Inspired by natural movement, they move more fluidly while being lightweight and less cumbersome. HASEL actuators combine the flexibility of materials with the ability to generate significant forces while remaining lightweight, fast, and capable of self-repair, making them promising for applications in soft robotics [1]. Modeling and controlling HASEL actuators is challenging due to their nonlinear behavior, the complex interactions between electrostatics and fluid mechanics, and their high flexibility, which makes their dynamics difficult to predict and control precisely [2].

Considering the multi-physical character of the mechanical structure actuated by the electric-active HASEL actuator and their nonlinear characteristics and power conserving interconnection relation, of sub-systems, the modeling of such kind of system is quite challenge. The port Hamiltonian (PH) formalism is particularly well-adapted for the modeling and the control of multi physical systems, such as structural mechanical systems [3], electro-mechanical systems [4], etc. The PH approach is based on the principle of conservation of energy and provides a clear physical interpretation of control design strategies. Due to these properties, this approach is particularly suitable for modeling and controlling flexible structures powered by HASEL actuators.

On the other hand, due to the manufacturing technology and the assumptions used in modeling HASEL actuators, as well as the limitations in measuring actuated flexible structures, conventional control laws lack the precision needed to control this type of system. This thesis proposes developing and investigating the contribution of data-driven algorithms, with neural networks guided by physical constraints, to enhance the performance of estimation and control of a flexible surface with HASEL actuators. This will improve robustness against uncertainties introduced in the modeling process when compared to real-world applications.

This thesis proposes combining data-driven approaches (neural networks) with physical and energy-based methods, particularly the port-Hamiltonian approach, to develop artificial intelligence (AI) methods that integrate physical principles. The approach involves leveraging the physical knowledge of the system to propose a model based on the interconnection of the flexible structure, described by partial differential equations (PDEs), and the HASEL actuators, described by ordinary differential equations (ODEs).

Subsequently, a numerical model will be obtained through a discretization method that preserves the physical structure. Within the framework of this structure-preserving numerical model, neural network based methods will be developed, utilizing limited experimental measurements to reconstruct a refined model that incorporates the system's real physical characteristics. With the reconstructed data, control laws will be applied to perform the desired tasks. The overall estimation and control strategies are illustrated by the Fig. 2.

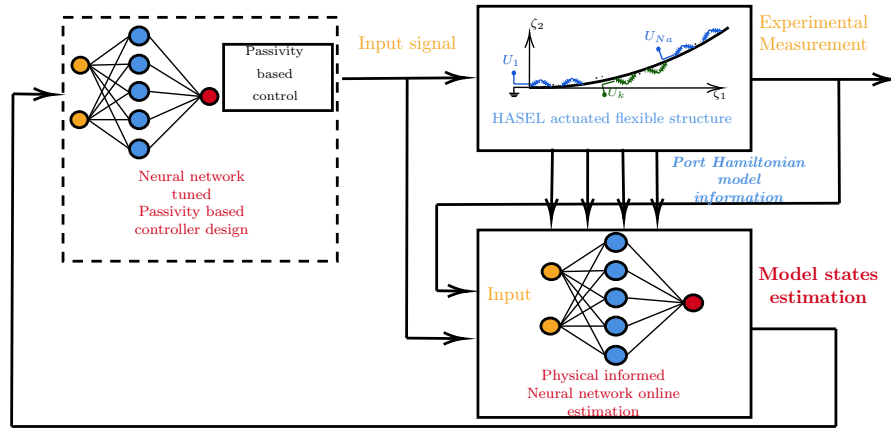


Figure 2: PINN Model Estimation and Real-Time Control of the Structure Scheme

Identification and control methods using neural networks within the framework of the port-Hamiltonian approach have been proposed in [5, 6, 7] for simple systems but lack experimental validation. This

project aims to develop artificial intelligence (AI) methods by integrating the port-Hamiltonian approach for complex systems, followed by experimental validation.

Another major focus is the study of the contribution of physical priors present in bimodal data, combined with appropriately adapted uncertainty measurements, in the context of flexible structures.

Objectives and time planing

- In the first year, we plan to employ an infinite-dimensional port-Hamiltonian system to model the dynamic behavior of the flexible structure actuated by HASEL actuator as shown in the middle figure of Fig. 1. Moreover, we will attempt to employ the Neural Network method with the port Hamiltonian structure preserved discretization model to develop the estimation algorithm using the experimental input-output measurement of the setup.
- In the second year, We aim to develop the control methodology to control the shape of the flexible structure using the passivity based method with the control parameter tuned by the Neural Network based algorithm.
- In the last year, we plan to improve the experimental setup to the 2D flexible surface actuated by the HASEL actuator. Furthermore to extend the obtained methods from the previous two years to estimate and control the 2D flexible structure.

Candidates profile

- Excellent MSc/Engineer in Automatic Control, Applied mathematics, Robotics.
- Strong knowledge background in automatic control and/or applied mathematics, experience in Artificial Intelligence.
- Fluent in speaking and reading English.

Funding and application

The Ph. D thesis may start in October 2025.

Please send your application documents, including **a detailed CV, a cover letter, all transcripts, and recommendation letters** to both advisers, Prof. Yann Le Gorrec (legorrec@femto-st.fr), Dr. Yongxin Wu (yongxin.wu@femto-st.fr).

References

- [1] Eric Acome, Shane K Mitchell, TG Morrissey, MB Emmett, Claire Benjamin, Madeline King, Miles Radakovitz, and Christoph Keplinger. Hydraulically amplified self-healing electrostatic actuators with muscle-like performance. *Science*, 359(6371):61–65, 2018.
- [2] Yu Yeh, Nelson Cisneros, Yongxin Wu, Kanty Rabenorosoa, and Yann Le Gorrec. Modeling and position control of the hasel actuator via port-Hamiltonian approach. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(3):7100–7107, 2022.
- [3] V. Duindam, A. Macchelli, S. Stramigioli, and H. eds. Bruyninckx. *Modeling and Control of Complex Physical Systems - The Port-Hamiltonian Approach*. Springer, Sept. 2009. ISBN 978-3-642-03195-3.
- [4] Andrea Mattioni, Yongxin Wu, Hector Ramirez, Yann Le Gorrec, and Alessandro Macchelli. Modelling and control of an ipmc actuated flexible structure: A lumped port Hamiltonian approach. *Control Engineering Practice*, 101:104498, 2020.

- [5] Shaan A Desai, Marios Mattheakis, David Sondak, Pavlos Protopapas, and Stephen J Roberts. Port-hamiltonian neural networks for learning explicit time-dependent dynamical systems. *Physical Review E*, 104(3):034312, 2021.
- [6] Karim Cherifi, Achraf El Messaoudi, Hannes Gernandt, and Marco Roschkowski. Nonlinear port-hamiltonian system identification from input-state-output data. *arXiv preprint arXiv:2501.06118*, 2025.
- [7] Santiago Sanchez-Escalonilla, Samuele Zoboli, and Bayu Jayawardhana. Robust neural ida-pbc: passivity-based stabilization under approximations. *arXiv preprint arXiv:2409.16008*, 2024.

FEMTO-ST

L'institut FEMTO-ST est une Unité Mixte de Recherche associée au CNRS (UMR 6174) et à l'Université Marie et Louis Pasteur dont SUPMICROTECH est établissement-composante.

L'institut FEMTO-ST est un laboratoire de recherche public d'envergure mondiale de grande taille regroupant plus de 700 personnes relevant des domaines de l'ingénierie et des sciences informatiques. FEMTO-ST développe des nouvelles technologies/logiciels et des nouvelles connaissances scientifiques autour de cinq grandes priorités stratégiques : les sciences et technologies pour la santé, les sciences et technologies pour un développement durable, les micro-nano-technologies, les sciences du numérique et l'intelligence artificielle, les technologies quantiques.

Au sein du CNRS, l'institut FEMTO-ST est rattaché à l'institut CNRS-ingénierie et à CNRS-Sciences-Informatiques. FEMTO-ST développe des projets scientifiques de dimension internationale à la frontière des connaissances et soutient en particulier le développement de projets européens (ERC, Doctoral-Networks, Projets RDI Horizon Europe, etc.).

La recherche à l'institut FEMTO-ST s'effectue au sein des 26 équipes de recherche et est structurée en 7 départements :

- le département Automatique et Systèmes Micromécatroniques (AS2M),
- le département Energie (DE),
- le département Informatique des Systèmes Complexes (DISC),
- le département de Mécanique Appliquée (DMA),
- le département Micro Nano Sciences et Systèmes (MN2S),
- le département Optique (DO),
- le département Temps-Fréquence (TF).

Fort de la large palette de compétences présentes dans l'unité, FEMTO-ST cultive le développement de projets scientifiques pluridisciplinaires particulièrement originaux et compétitifs à l'échelle internationale. Cette capacité à générer des projets pluridisciplinaires transverses aux départements est une des signatures fortes de l'unité.

La qualité de la recherche à FEMTO-ST est également intimement liée aux dix plateformes technologiques qui offrent aux scientifiques un accès privilégié à un parc d'instruments scientifiques de niveau international dans l'ensemble des domaines d'excellence de l'unité. Fort de cet ancrage technologique, FEMTO-ST est largement impliqué dans l'innovation notamment via des innovations DeepTech issues de ses résultats de recherche.

De plus, FEMTO-ST offre un cadre de travail privilégié aux scientifiques en leur donnant l'accès aux diverses ressources nécessaires à leur activité qu'elles soient administratives ou techniques via des services communs supports mutualisés à l'échelle de l'institut et dont la performance est reconnue par une certification ISO9001.

Enfin, FEMTO-ST s'engage dans une démarche continue et volontaire de réduction de son impact environnemental et a entamé en 2024 une analyse de son impact carbone (BGES). Des premiers projets d'amélioration (2023-24) ont, par exemple, permis de réduire significativement la consommation énergétique des plateformes.

<https://www.femto-st.fr>



UNIVERSITÉ MARIE ET LOUIS PASTEUR

L'Université Marie et Louis Pasteur est un établissement public expérimental implanté en région Bourgogne-Franche-Comté. Il regroupe 22 composantes issues de l'ex-université de Franche-Comté, l'université de technologie Belfort-Montbéliard (UTBM) et SUPMICROTECH.

Cinq partenaires sont associés à l'Université Marie et Louis Pasteur : l'École nationale supérieure d'arts et métiers (ENSAM) Campus de Cluny, le CHU de Besançon, le Crous BFC, l'établissement français du sang (EFS), l'École supérieure des technologies et des affaires (ESTA), et l'Institut supérieur des beaux-Arts de Besançon (ISBA). L'université Marie et Louis Pasteur, repose sur une histoire universitaire des plus anciennes de France démarrée en 1423. Elle compte aujourd'hui plus de 28 000 étudiants dont plus de 20% d'étudiants et stagiaires en provenance de l'Europe et du monde entier.

L'Université Marie et Louis Pasteur est structurée en 4 instituts pluri et interdisciplinaires couvrant l'ensemble de ses activités académiques et de service à la société : Technologies ; Sciences du Vivant, de l'Environnement et des Territoires ; Sciences Humaines et du Droit ; Sciences de la Santé et du Sport.

Ces instituts contribuent à la stratégie de l'établissement et coordonnent l'ensemble des forces qui composent l'Université Marie et Louis Pasteur et associés, en articulant entre elles les logiques universitaires d'enseignement et de recherche et les logiques professionnelles. Le poste proposé s'inscrit pleinement dans l'Institut de Technologies.



BESANÇON



Située dans le nord-est de la France à environ 60 kilomètres de la Suisse, Besançon a été fondée il y a plus de deux siècles dans l'un des méandres de la rivière « Le Doubs » au cœur du département portant le même nom qui est l'un des plus industrialisés de France (Automobiles Peugeot, ALSTOM).

Capitale économique et universitaire de Franche-Comté d'environ 120 000 habitants, Besançon est proclamée première ville verte de France mais aussi détentrice du label ville d'art et d'histoire, berceau d'une longue tradition horlogère. Sa citadelle fait partie du réseau Vauban et est inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO

À 2 h de Genève, 2h30 de Zurich, Paris, Lyon et Strasbourg et 4h de Francfort par le TGV, proche de l'aéroport de Bâle/Mulhouse, elle bénéficie d'une situation géographique idéale.

Ville à la vie sportive et culturelle intense, elle accueille chaque année en septembre un festival de musique internationale de réputation mondiale. La ville est proche des pistes de ski du Jura et sa région est réputée pour ses sports 'outdoor', par exemple pour la pratique du vélo tout terrain, pour la pêche et le kayak.