

PhD THESIS

Title: Guaranteed learning-based estimation and control of cyber-physical systems

Supervising team:

- [Adnane Saoud](mailto:adnane.saoud@l2s.centralesupelec.fr) adnane.saoud@l2s.centralesupelec.fr – L2S
- [Cristina Stoica Maniu](mailto:cristina.maniu@centralesupelec.fr) cristina.maniu@centralesupelec.fr – L2S
- [Eduardo F. Camacho](mailto:eduardo@esi.us.es) eduardo@esi.us.es (*international collaboration*) – Univ. of Seville, Spain
- [Teodoro Alamo](mailto:alamo@cartuja.us.es) alamo@cartuja.us.es (*international collaboration*) – Univ. of Seville, Spain

General information: 3 years, starting from Oct.-Nov. 2022

Application deadline: 18 Mai 2022

Funding: Univ. Paris-Saclay

Keywords: Learning for control and estimation, Complex logic specifications, Formal guarantee, Cyber-physical systems, Set-membership state estimation.

THESIS DESCRIPTION

General context

This thesis is part of the collaboration between CentraleSupélec/L2S (University Paris-Saclay) and University of Seville, offering the opportunity to obtain a *European PhD label*¹.

Context and objectives of the PhD thesis

Cyber-physical systems (CPS) result from the integration of computational devices with physical processes and are required to perform *complex high-level tasks* (e.g. a robot needs to pick an object from a given/uncertain location and to drop it at another location while avoiding the obstacles and reaching the charging station if low battery). Due to the inherent complexity, the design of formally correct control algorithms enforcing aforementioned complex high-level tasks for cyber-physical systems becomes highly challenging.

To synthesize formally verified control algorithms for CPS enforcing complex specifications, symbolic control techniques have been applied [1,2,3]. Symbolic approaches consist in creating a finite-state abstraction (or a symbolic model) for a continuous/hybrid system and refining the controller synthesized for the abstraction to a controller for the original system. Replacing a dynamical system by its abstraction principally enables using various techniques developed in the formal methods community, allowing to deal with complex specifications.

While symbolic approaches are a powerful tool to deal with cyber-physical systems, they generally rely on a precise mathematical model of the system, such as physics-based first principle models. When dealing with CPS consisting of components of different nature described by differential equations, lookup tables, transition systems, and hybrid automata, describing the cyber-physical systems in a closed-form model is often complex. In this case, a common practice focuses on learning-based approaches [4,5]. However, in the context of control, learning-based components are typically viewed as black box-type systems, lacking formal guarantees.

In addition, existing symbolic approaches rely on the exact knowledge of the system's state. However, models (i.e. systems representations) are usually subject to uncertainties, perturbations, measurement noises, constraints, etc., and, thus, the exact state is hard to obtain. Set-membership state estimation techniques [6,7] offer guarantees for the set (ellipsoid, polytope, etc.) containing the estimated state at a given moment. In the context of learning-based models, one challenge at the forefront of research consists in developing learning-based approaches with estimation techniques to propose a guaranteed state estimation for complex systems (e.g. black box-type), for which classical estimation approaches cannot be used. These learning-based estimation techniques will be then used to construct the symbolic model and synthesize an appropriate controller.

To address the aforementioned challenges, the goal of this thesis is to develop a new framework for *learning-based control and estimation* of cyber-physical systems with unknown mathematical models against *complex logic specifications* while providing *formal guarantees*, by combining tools from symbolic control, machine learning and set-membership estimation communities. Towards the end, we will demonstrate our results by implementing the proposed controllers on autonomous vehicles within the flight arena of CentraleSupélec.

Required profil and skills

This thesis requires automatic control skills (Master level or 3rd year 'Grande Ecole' in Automatic Control/Mathematics). Good Matlab and/or Python skills and a good English level are required. Furthermore, experience in machine-learning techniques is preferable.

¹ To this aim, the selected PhD student will do a research visit of at least 3 months at University of Seville. For more information about the European PhD label please see the following link <https://www.universite-paris-saclay.fr/en/recherche/doctorat-et-hdr/european-doctorate-label>.

Acquired knowledge and skills during this PhD thesis

The proposed subject should allow acquiring solid knowledge in Artificial Intelligence, control and estimation of cyber-physical systems. The knowledge acquired in this direction will provide an opening to several areas which are currently at the forefront of research, providing the possibility for future employment both in the academic and industrial sectors. During various professional training activities throughout the thesis, the PhD candidate will be able to acquire numerous transversal skills (e.g. pedagogical skills, scientific integrity and ethical skills, etc.). Teaching (tutorials, laboratory practice, projects, etc.) at CentraleSupélec is strongly encouraged, allowing the PhD candidate to acquire solid skills in pedagogy that will be useful for a possible academic career. Participation in international, national and local conferences will highlight the PhD student's scientific results and will allow increasing the PhD candidate's professional network. In addition, this thesis offers an international friendly working environment, permitting to develop multi-language communication skills and offering the opportunity to obtain a European PhD label.

Bibliography:

- [1]-P. Tabuada, "Verification and control of hybrid systems: a symbolic approach", Springer Science&Business Media, 2009.
- [2]-C. Belta, Y. Boyan, A.G. Ebru, "Formal methods for discrete-time dynamical systems", Springer International Publishing, 2017.
- [3]-**A. Saoud**, A. Girard, L. Fribourg. "*Contract-based design of symbolic controllers for safety in distributed multiperiodic sampled-data systems*", IEEE Transactions on Automatic Control, 2020.
- [4]-A. Devonport, **A. Saoud**, M. Arcak, "Symbolic abstractions from data: a PAC learning approach", IEEE Conference on Decision and Control, 2021.
- [5]-K. Hashimoto, **A. Saoud**, M. Kishida, T. Ushio, D. Dimarogonas, "Learning-based symbolic abstractions for nonlinear control systems", *submitted to Automatica 2021*-arXiv:2004.01879.
- [6]-V.T.H. Le, **C. Stoica**, **T. Alamo**, **E.F. Camacho**, D. Dumur, "Zonotopic guaranteed state estimation for uncertain systems", Automatica, 2013.
- [7]-V.T.H. Le, **C. Stoica**, **T. Alamo**, **E.F. Camacho**, D. Dumur, "Zonotopes: From guaranteed state estimation to control", ISTE Ltd and John Wiley & Sons, 2013.

Contact:

Cristina STOICA MANIU

cristina.maniu@centralesupelec.fr

+33 1 69 85 13 78

Adnane SAOUD

adnane.saoud@l2s.centralesupelec.fr

+33 1 69 85 13 85

Application on www.adum.fr

CV, cover letter, recommendation letter, and engineering and Master's official transcripts

Application deadline:

18 Mai 2022

Locations (Paris region)

L2S, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay

3 rue Joliot Curie, 91190 Gif-sur-Yvette, France

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Titre : Techniques à base d'apprentissage avec garanties pour l'estimation et la commande de systèmes cyber-physiques

Equipe d'encadrement :

- [Adnane Saoud](mailto:adnane.saoud@l2s.centralesupelec.fr) adnane.saoud@l2s.centralesupelec.fr (*co-encadrant*) – L2S
- [Cristina Stoica Maniu](mailto:cristina.maniu@centralesupelec.fr) cristina.maniu@centralesupelec.fr (*directeur de thèse*) – L2S
- [Eduardo F. Camacho](mailto:eduardo@esi.us.es) eduardo@esi.us.es (*collaboration internationale*) – Univ. Séville, Espagne
- [Teodoro Alamo](mailto:alamo@cartuja.us.es) alamo@cartuja.us.es (*collaboration internationale*) – Univ. Séville, Espagne

Durée de la thèse : 3 ans, à partir d'Octobre-Novembre 2022

Financement : contrat doctoral Université Paris-Saclay

Date limite de candidature : 18 Mai 2022

Mots clés : Apprentissage pour la commande et l'estimation, Spécifications logiques complexes, Garanties formelles, Systèmes cyber-physiques, Estimation ensembliste d'état.

DESCRIPTIF ET APPORT DU TRAVAIL DE THÈSE

Contexte de recherche

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre CentraleSupélec/L2S (Université Paris-Saclay) et le Département d'Ingénierie des Systèmes et d'Automatique de l'Université de Séville. La possibilité d'obtenir un *label* « *Doctorat Européen* »² est envisagée.

Contexte et objectifs de la thèse

Les *systèmes cyber-physiques* (CPS) résultent de l'intégration de dispositifs informatiques avec des processus physiques et sont nécessaires pour effectuer des *tâches complexes de haut niveau* (par exemple, un robot qui doit prendre un objet à un endroit donné/incertain et le déposer à un autre endroit tout en évitant des obstacles, ainsi qu'atteindre la borne de recharge si la batterie est faible). En raison de la complexité inhérente, la conception d'algorithmes de commande formellement corrects et permettant d'atteindre des spécifications complexes de haut niveau pour le système cyber-physique devient très difficile.

Pour synthétiser des algorithmes de commande formellement vérifiés pour les CPS avec des spécifications complexes, les techniques de commande symbolique ont été appliquées [1,2,3]. Les approches symboliques consistent à créer une abstraction à états finis (ou un modèle symbolique) pour un système continu/hybride et à raffiner le correcteur synthétisé pour l'abstraction en un correcteur pour le système d'origine. Remplacer un système dynamique par son abstraction permet principalement d'utiliser diverses techniques développées dans la communauté des méthodes formelles, permettant de traiter des spécifications complexes.

Bien que les approches symboliques soient un outil puissant pour traiter les systèmes cyber-physiques, elles reposent généralement sur un modèle mathématique précis du système, tel que les modèles basés sur le principe fondamentale de la dynamique. Lorsqu'il s'agit de CPS constitués de composants de nature différente décrits par des équations différentielles, des tables de correspondance, des systèmes de transition et des automates hybrides, décrire le modèle explicite du système cyber-physique est souvent complexe. Dans ce cas, une pratique courante se concentre sur les approches basées sur l'apprentissage [4,5]. Cependant, dans le contexte de l'automatique, les composants fondés sur l'apprentissage sont généralement considérés comme des systèmes de type boîte noire, dépourvus de garanties formelles. De plus, les approches symboliques existantes reposent sur la connaissance exacte de l'état du système. Cependant, les modèles (c'est-à-dire les représentations de systèmes) sont généralement soumis à des incertitudes, des perturbations, des bruits de mesure, des contraintes, etc. et donc l'état exacte est difficile à obtenir. Les techniques d'estimation ensemblistes [6,7] offrent des garanties pour l'ensemble (ellipsoïde, polytope, etc.) contenant l'état estimé à un instant donné. Dans le cadre des modèles fondés sur l'apprentissage, un défi à la pointe de la recherche consiste à développer des approches basées sur l'apprentissage avec des techniques d'estimation pour proposer une estimation d'état garanti pour des systèmes complexes (type boîte noire par exemple), pour lesquels les approches d'estimation classiques ne peuvent pas être utilisées. Ces techniques d'estimation à base d'apprentissage seront utilisées pour la construction du modèle symbolique et la synthèse d'un correcteur approprié.

Pour relever les défis susmentionnés, l'objectif de cette thèse est de développer un nouveau cadre de *commande et d'estimation basées sur l'apprentissage* de systèmes cyber-physiques avec des modèles mathématiques inconnus par rapport à des *spécifications logiques complexes* tout en offrant des *garanties formelles*, en combinant des outils de

² Dans ce but, un séjour de recherche de minimum 3 mois à l'Université de Séville sera effectué (pour plus d'informations, voir le lien suivant <https://www.universite-paris-saclay.fr/recherche/doctorat-et-hdr/label-doctorat-europeen>).

commande symbolique, d'apprentissage automatique et d'estimation ensembliste. Enfin, l'implémentation des résultats obtenus sur des véhicules autonomes est prévue dans la volière de CentraleSupélec.

Profil et compétences recherchées

Ce sujet de thèse requiert principalement des compétences en Automatique (profil M2R ou 3e année école d'ingénieur, spécialité automatique/mathématique). Une bonne pratique de Matlab et/ou Python, ainsi qu'un bon niveau d'anglais sont requis. De plus, une expérience dans les techniques d'apprentissage automatique est préférable.

Connaissances et compétences acquises lors du travail de thèse

Le sujet proposé donnera au candidat de solides connaissances dans les domaines de l'Intelligence Artificielle, de la commande et de l'estimation des systèmes cyber-physiques. Les connaissances acquises lui procureront une ouverture vers plusieurs domaines actuellement à l'avant-garde de la recherche, permettant une insertion à la fois dans le milieu académique et industriel. Lors des diverses formations tout au long de la thèse, le doctorant pourra acquérir de nombreuses compétences transverses (par exemple des compétences en pédagogie, en éthique de la recherche et intégrité scientifique, etc.). La participation aux dispositifs d'enseignement (TD, TP, projets, etc.) de CentraleSupélec est fortement encouragée, permettant d'acquérir des bases solides en pédagogie utiles pour une éventuelle carrière académique. La participation aux conférences internationales, nationales et locales permettra de valoriser les travaux de recherche du doctorant, de faire une veille scientifique et stratégique, ainsi que d'élargir son réseau professionnel. Par ailleurs, cette thèse sera l'occasion d'une ouverture à l'International au travers de cette collaboration, avec la possibilité d'obtenir un label « Doctorat Européen ».

Références bibliographiques :

- [1]-P. Tabuada, "Verification and control of hybrid systems: a symbolic approach", Springer Science&Business Media, 2009.
- [2]-C. Belta, Y. Boyan, A.G. Ebru, "Formal methods for discrete-time dynamical systems", Springer International Publishing, 2017.
- [3]-**A. Saoud**, A. Girard, L. Fribourg. "Contract-based design of symbolic controllers for safety in distributed multiperiodic sampled-data systems", IEEE Transactions on Automatic Control, 2020.
- [4]-A. Devonport, **A. Saoud**, M. Arcak, "Symbolic abstractions from data: a PAC learning approach", IEEE Conference on Decision and Control, 2021.
- [5]-K. Hashimoto, **A. Saoud**, M. Kishida, T. Ushio, D. Dimarogonas, "Learning-based symbolic abstractions for nonlinear control systems", *submitted to Automatica 2021*-arXiv:2004.01879.
- [6]-V.T.H. Le, **C. Stoica**, **T. Alamo**, **E.F. Camacho**, D. Dumur, "Zonotopic guaranteed state estimation for uncertain systems", Automatica, 2013.
- [7]-V.T.H. Le, **C. Stoica**, **T. Alamo**, **E.F. Camacho**, D. Dumur, "Zonotopes: From guaranteed state estimation to control", ISTE Ltd and John Wiley & Sons, 2013.

Contact :

Cristina STOICA MANIU
cristina.maniu@centralesupelec.fr
+33 1 69 85 13 78

Adnane SAOUD
adnane.saoud@l2s.centralesupelec.fr
+33 1 69 85 13 85

Candidature sur www.adum.fr

CV, lettre de motivation, lettre de recommandation, révélés de notes formation ingénieur et Master

Date limite de dépôt de candidature : 18 Mai 2022

Laboratoire d'accueil

L2S, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay
3 rue Joliot Curie, 91190 Gif-sur-Yvette, France