

PhD THESIS

Title: Fault tolerant distributed predictive control techniques for intelligent multi-vehicle systems

Supervising team:

- [Cristina STOICA](mailto:cristina.stoica@l2s.centralesupelec.fr) cristina.stoica@l2s.centralesupelec.fr – L2S
- [Mohammed CHADLI](mailto:mohammed.chadli@univ-evry.fr) mohammed.chadli@univ-evry.fr – IBISC

General information: 3 years, starting from Oct.-Nov. 2023

Application deadline: 22 Mai 2023

Funding: Univ. Paris-Saclay

Keywords: Predictive control, state estimation, fault detection, fault tolerant control, learning for control and estimation, multi-vehicle systems.

THESIS DESCRIPTION

General context

This thesis is part of the collaboration between L2S/CentraleSupélec (Université Paris-Saclay) et IBISC/Université Evry Val d'Essonne (Université Paris-Saclay). An international collaboration is envisaged, offering the opportunity to obtain a *European PhD label*¹. To this aim, the selected PhD student will do a research visit of at least 3 months in an European university.

Context and objectives of the PhD thesis

Complex missions (e.g., search for survivors during fires or after earthquakes) often involve *multiple intelligent autonomous systems* auto-coordinated in order to accomplish challenging tasks in hostile environments (e.g., [1], [2], [3]). These tasks become even more difficult to accomplish in the presence of faults [4]-[5] that can act on a single vehicle (sensor/actuator/component faults) and at the multi-vehicle formation (delay, communication loss/degradation/restriction etc.). In order to avoid these problems, *fault detection* [6] and *fault tolerant control* techniques [7]-[8] are considered as promising strategies.

Thus, the main direction to be explored in this PhD thesis is the use of fault tolerant distributed predictive control strategies that can be appropriately mixed to take into account constraints, uncertainties, communication delays/losses/restrictions that could appear at the level of a multi-vehicle dynamical system. In order to reduce communication costs, distributed *event-triggered* strategies [9]-[10] will also be explored.

Moreover, both the environment model and the multi-vehicle model in the presence of faults are often imprecise (with variations in parameters, etc.). Thus, in this PhD thesis, *learning-based techniques* will be proposed to update the estimation and control algorithms in an efficient way.

This PhD thesis will consider the practical case where autonomous vehicle systems are subject to strong nonlinearities, external disturbances, and unknown faults (actuator and sensor faults). Thus, with the characterized fault information, *fault-tolerant distributed predictive control* strategies will be proposed in order to simultaneously compensate for the various faults (of actuators and sensors).

Finally, the *implementation* of the developed algorithms on *autonomous vehicles* is planned in the CentraleSupélec flight arena.

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.

Acquired knowledge and skills during this PhD thesis

The proposed subject should allow acquiring solid knowledge control and estimation of intelligent multi-vehicle 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

¹ 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>.

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] R. N. Haksar and M. Schwager, Distributed deep reinforcement learning for fighting forest fires with a network of aerial robots, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1067-1074, 2018.
- [2] R. Olfati-Saber and R. M. Murray, "Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 49, no. 9, pp. 1520–1533, 2004.
- [3] A. Venturino, **C. Stoica Maniu**, S. Bertrand, T. Alamo, E.F. Camacho, Multi-vehicle localization by distributed MHE over a sensor network with sporadic measurements: further developments and experimental results, *Control Engineering Practice*, 2023.
- [4] Y. M. Zhang, J. Jiang, Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems, *Annual Reviews in Control*, 32(2), pp. 229-252, 2008.
- [5] M.A. Kamel, K.A. Ghamry, Y.M. Zhang, Real-time fault-tolerant cooperative control of multiple UAVS-UGVS in the presence of actuator faults, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2017.
- [6] **M. Chadli**, M. Davoodi, N. Meskin. Distributed State Estimation, Fault Detection and Isolation Filter Design for Heterogeneous Multi-Agent LPV Systems. *IET Control Theory & Applications*, Vol. 11 (2), 254-262. 2016.
- [7] Y. Yu, J. Guo, **M. Chadli**, Z. Xiang, Distributed adaptive fuzzy formation control of uncertain multiple unmanned aerial vehicles with actuator faults and switching topologies, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2023.
- [8] T. Chevet, C. Vlad, **C. Stoica Maniu**, Y.M. Zhang, E.F. Camacho, Chance-constrained MPC for Voronoi-based multi-agent system deployment, *21st IFAC World Congress*, Berlin, Germany, 2020.
- [9] C. Viel, S. Bertrand, M. Kieffer, H. Piet-Lahanier. Distributed event-triggered control strategies for multi-agent formation stabilization and tracking. *Automatica*, 2019.
- [10] Y. Wu, M. Chen, H. Li, **M. Chadli**, Event-triggered-based adaptive NN cooperative control of six-rotor UAVs with finite-time prescribed performance, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2023.

Contact:

Cristina STOICA

cristina.stoica@l2s.centralesupelec.fr
+33 1 69 85 13 78

Mohammed CHADLI

mohammed.chadli@univ-evry.fr
+33 1 69 47 31 79

Application on www.adum.fr

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

Application deadline:

22 Mai 2023

Locations (Paris region)

L2S, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay
3 rue Joliot Curie, 91190 Gif-sur-Yvette, France
IBISC
40 rue du Pelvoux 91020 Evry

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Titre : Techniques de commande prédictive distribuées tolérantes aux défauts pour des systèmes multi-véhicules intelligents

Equipe d'encadrement :

- [Cristina STOICA](mailto:cristina.stoica@l2s.centralesupelec.fr) cristina.stoica@l2s.centralesupelec.fr – L2S
- [Mohammed CHADLI](mailto:mohammed.chadli@univ-evry.fr) mohammed.chadli@univ-evry.fr – IBISC

Durée de la thèse : 3 ans, à partir d'Octobre-Novembre 2023

Financement : contrat doctoral Université Paris-Saclay

Date limite de candidature : 22 Mai 2023

Mots clés : Commande prédictive, estimation d'état, détection de défauts, commande tolérante aux défauts, apprentissage pour la commande et l'estimation, systèmes multi-véhicules.

DESCRIPTIF ET APPORT DU TRAVAIL DE THÈSE

Contexte de recherche

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre L2S/CentraleSupélec (Université Paris-Saclay) et IBISC/Université Evry Val d'Essonne (Université Paris-Saclay). La possibilité d'obtenir un *label « Doctorat Européen »*² est envisagée. Dans ce but, un séjour de recherche de minimum 3 mois dans une université européenne sera effectué.

Contexte et objectifs de la thèse

Les missions complexes (e.g. recherche des survivants lors des incendies ou après des tremblements de terre) impliquent souvent *plusieurs systèmes autonomes intelligents* qui se coordonnent pour accomplir des tâches difficiles dans des environnements mal connus (voir par exemple [1], [2], [3]). Ces tâches deviennent encore plus difficiles à accomplir en présence de défauts [4]-[5] qui peuvent agir au niveau de chaque véhicule (défauts de capteurs/actionneurs/composants) et au niveau de la formation (retard, perte/dégradation/restriction de communication etc.). Afin d'éviter ces problèmes, des techniques de *détection de défauts* [6] et des lois de *commande tolérantes aux défauts* [7]-[8] sont considérées comme des stratégies prometteuses.

Ainsi, la direction principale à explorer dans cette thèse est l'utilisation de stratégies de commande prédictive distribuées tolérantes aux défauts qui peuvent être combinées de façon appropriée afin de prendre en compte des contraintes, des incertitudes, des retards/pertes/restrictions de communication qui pourraient apparaître au niveau d'un système dynamique multi-véhicules. Afin de réduire les coûts de communication, des stratégies distribuées de type *event-triggered* [9]-[10] seront également explorées.

De plus, à la fois le modèle de l'environnement, ainsi que les modèles du système multi-véhicules en présence des défauts sont souvent imprécis, avec des variations des paramètres, etc. De ce fait, dans le cadre de cette thèse, des *techniques fondées sur l'apprentissage* seront proposées permettant de mettre à jour les algorithmes d'estimation et de commande d'une manière efficace.

Dans cette thèse, nous considérerons le cas pratique où les systèmes de véhicules autonomes sont sujets à de fortes non-linéarités, de perturbations externes et de défauts inconnus (défauts d'actionneur et de capteur). Ainsi, avec les informations de défaut caractérisées, des stratégies de *commande prédictive distribuées tolérantes aux défauts* seront proposées afin de compenser simultanément les divers défauts (d'actionneurs et de capteurs).

Enfin, l'*implémentation* des algorithmes développés sur des *véhicules autonomes* est prévue dans l'arène de vol de CentraleSupélec.

Profil et compétences recherchées

Ce sujet de thèse requiert principalement des compétences en Automatique (profile 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.

² Pour plus d'informations, voir le lien suivant <https://www.universite-paris-saclay.fr/recherche/doctorat-et-hdr/label-doctorat-europeen>.

Connaissances et compétences acquises lors du travail de thèse

Le sujet proposé donnera au/à la candidat.e de solides connaissances dans les domaines de la commande et de l'estimation des systèmes multi-véhicules intelligents. 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/la doctorant.e 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/de la doctorant.e, 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, avec la possibilité d'obtenir un label « Doctorat Européen ».

Références bibliographiques :

- [1] R. N. Haksar and M. Schwager, Distributed deep reinforcement learning for fighting forest fires with a network of aerial robots, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1067-1074, 2018.
- [2] R. Olfati-Saber and R. M. Murray, "Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 49, no. 9, pp. 1520–1533, 2004.
- [3] A. Venturino, **C. Stoica Maniu**, S. Bertrand, T. Alamo, E.F. Camacho, Multi-vehicle localization by distributed MHE over a sensor network with sporadic measurements: further developments and experimental results, *Control Engineering Practice*, 2023.
- [4] Y. M. Zhang, J. Jiang, Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems, *Annual Reviews in Control*, 32(2), pp. 229-252, 2008.
- [5] M.A. Kamel, K.A. Ghamry, Y.M. Zhang, Real-time fault-tolerant cooperative control of multiple UAVS-UGVS in the presence of actuator faults, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2017.
- [6] **M. Chadli**, M. Davoodi, N. Meskin. Distributed State Estimation, Fault Detection and Isolation Filter Design for Heterogeneous Multi-Agent LPV Systems. *IET Control Theory & Applications*, Vol. 11 (2), 254-262. 2016.
- [7] Y. Yu, J. Guo, **M. Chadli**, Z. Xiang, Distributed adaptive fuzzy formation control of uncertain multiple unmanned aerial vehicles with actuator faults and switching topologies, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2023.
- [8] T. Chevet, C. Vlad, **C. Stoica Maniu**, Y.M. Zhang, E.F. Camacho, Chance-constrained MPC for Voronoi-based multi-agent system deployment, *21st IFAC World Congress*, Berlin, Germany, 2020.
- [9] C. Viel, S. Bertrand, M. Kieffer, H. Piet-Lahanier. Distributed event-triggered control strategies for multi-agent formation stabilization and tracking. *Automatica*, 2019.
- [10] Y. Wu, M. Chen, H. Li, **M. Chadli**, Event-triggered-based adaptive NN cooperative control of six-rotor UAVs with finite-time prescribed performance, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2023.

Contact :

Cristina STOICA

cristina.stoica@l2s.centralesupelec.fr
+33 1 69 85 13 78

Mohammed CHADLI

mohammed.chadli@univ-evry.fr
+33 1 69 47 31 79

Candidature sur www.adum.fr

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

Date limite de dépôt de candidature : 22 Mai 2023

Laboratoires d'accueil

L2S, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay
3 rue Joliot Curie, 91190 Gif-sur-Yvette, France
IBISC
40 rue du Pelvoux 91020 Evry