

**PhD THESIS**

**Title: Constrained distributed moving horizon estimation for sensor networks with low-computation capabilities**

Reference: **TIS-DTIS-2022-25**

**Supervising team:**

- Cristina Stoica Maniu [cristina.maniu@centralesupelec.fr](mailto:cristina.maniu@centralesupelec.fr) – L2S
- Sylvain Bertrand [sylvain.bertrand@onera.fr](mailto:sylvain.bertrand@onera.fr) – ONERA
- Eduardo F. Camacho [eduardo@esi.us.es](mailto:eduardo@esi.us.es) (*International collaboration*) – Univ. of Seville, Spain
- Teodoro Alamo [alamo@cartuja.us.es](mailto:alamo@cartuja.us.es) (*International collaboration*) – Univ. of Seville, Spain

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

**Application deadline:** 17 April 2022

**Keywords:** distributed state estimation, moving horizon estimation, sensor fault detection, multi-agent systems, sensor networks, drones, mobile robotics.

**THESIS DESCRIPTION**

**General context**

This thesis is part of the collaboration between ONERA, CentraleSupélec/L2S (University Paris Saclay<sup>1</sup>) and University of Seville. This subject comes in the continuity of joint works in these institutions (see the previous PhD theses [Venturino20], [Merhy2018], [BenChabane2015], [Suwanton2014b], [Le2012]). In addition, it will offer the opportunity to obtain a *European PhD label*<sup>2</sup>. The starting point is based on the first developments of [Venturino2021] on distributed moving horizon estimation, rewarded with the Best Paper Award of the 24th International Conference on System Theory, Control and Computing, 2020.

**Brief scientific description**

In the more general context of distributed state estimation and multi-agent systems, the practical problem of interest explored in this PhD is the one of area surveillance using a network of sensors. Heterogeneous sensors are considered, in the sense that different technologies can be used (e.g. video camera, radar, LIDAR, etc.), hence providing measurements of different types. In addition, the sensors can also be fixed and/or mobile (e.g. embedded on robots or drones). The problem consists in estimating online the trajectory of an intruder infiltrating the monitored area. Assuming that computation and communication capabilities are associated to each sensor (or subset of sensors), distributed state observers will be considered, in order to increase the resilience with respect to the loss of one or more sensor(s). Different types of observers have been developed in the literature for distributed state estimation in sensor networks (see [Olfati2007], [He2020] and associated references).

Previous work proposed distributed moving horizon observers within this framework. These methods considered past measurements and constraints within the estimation process (e.g. constraints on the state of the system, noise or unknown inputs) [Farina 2010, Battistelli2018]. More specifically, the new algorithms developed by the supervising team [Venturino2020] allowed reducing the computation time, while increasing the accuracy, through the use of fused arrival cost and pre-estimation mechanism [Venturino2021]. This work was carried out in a linear framework (linear dynamical system and linear measurement equations).

In the first part of this thesis, we will focus on developing nonlinear extensions of these algorithms in order to broaden the spectrum of possible applications (e.g. distance or angular measurements, nonlinearities in the multi-agent system dynamics). We will provide stability guarantees (i.e. convergence of the estimation error) for the proposed estimation algorithms and we will validate the proposed approaches both in simulation and experimentally. We dispose of a fleet of several TurtleBots mobile robots and Crazyflie nano-drones to be used for experimentations in the indoor flight arena (equipped with an OptiTrack motion capture system) of CentraleSupélec.

In a second part, we will develop optimization-based moving horizon estimators and implement them in a distributed framework on low-cost sensor networks with limited computing capabilities.

Finally, a different research axis will focus on taking into account the data exchange capacities, the constraints of the communication network between the sensors, and its possible vulnerabilities with respect to cyber attacks. More

<sup>1</sup> Université Paris Saclay achieved the 13th position of the Shanghai ranking in 2021.

<sup>2</sup> 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>.

precisely, we will extend the proposed methods to take into account a possible asynchronicity of the communications between the sensors, the presence of communication delay [Dubois2018], uncertainties [Le2013], [Zhang2013], a limited data exchange capacity (reducing the communications [Yin2021]), corrupted data, and/or variations of the communication network topology due, for instance, to a temporary or permanent loss of communication links between certain sensors. Extensions to large scale systems are also envisaged.

### **Bibliography:**

- [Battistelli2018] G. Battistelli, “Distributed moving-horizon estimation with arrival-cost consensus”, in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 64, no. 8, pp. 3316–3323, 2018.
- [BenChabane2015] S. Ben Chabane, “Techniques de détection de défauts à base d’estimation d’état ensembliste pour systèmes incertains”, *PhD thesis Université Paris-Saclay*, 13 Oct. 2015, <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01243534v1>.
- [Dubois2018] R. Dubois, S. Bertrand, A. Eudes, “Performance Evaluation of a Moving Horizon Estimator for Multi-Rate Sensor Fusion with Time-Delayed Measurements”, *22nd International Conference on System Theory Control and Computing*, Sinaia, Romania, 2018.
- [Farina2010] M. Farina, G. Ferrari-Trecate and R. Scattolini, “Distributed Moving Horizon Estimation for Linear Constrained Systems”, in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 55, no. 11, pp. 2462-2475, 2010.
- [He2020] Shaoming He, Hyo-Sang Shin, Shuoyuan Xu and Antonios Tsourdos, “Distributed estimation over a low-cost sensor network: A Review of state-of-the-art”, in *Information Fusion*, vol. 54, pp. 21-43, 2020.
- [Le2012] V.T.H. Le, “Commande prédictive robuste par des techniques d’observateur à base d’ensembles zonotopiques”, *PhD thesis Université Paris Sud*, 22 Oct. 2012, <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00765444v1>.
- [Le2013] V.T.H. Le, C. Stoica, T. Alamo, E.F. Camacho, D. Dumur, “Zonotopic guaranteed state estimation for uncertain systems”, *Automatica*, no. 49(1), pp. 3418-3424, 2013.
- [Merhy2018] D. Merhy, “Contribution à l’estimation d’état par méthodes ensemblistes ellipsoïdales et zonotopiques”, *PhD thesis Université Paris-Saclay*, 24 Oct. 2019, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02402347/document>.
- [Olfati2007] R. Olfati-Saber, “Distributed Kalman Filtering for Sensor Networks”, *46th IEEE Conference on Decision and Control*, New Orleans, USA, 2007.
- [Suwanton2014b] R. Suwanton, “Nouvelle structure d’estimateurs a horizon glissant.application a l’estimation de trajectoires de debris spatiauxpendant la rentree atmospherique”, *PhD thesis Université Paris-Sud*, 2 Dec. 2014, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01132179/document>.
- [Venturino2020] A. Venturino, S. Bertrand, C. Stoica Maniu, T. Alamo, E. Camacho, “Distributed Moving Horizon Estimation with Pre-Estimating Observer”, *24th International Conference on System Theory, Control and Computing*, Sinaia, Romania, 2020.

### **Best Paper Award.**

- [Venturino2021] A. Venturino, S. Bertrand, C. Stoica Maniu, T. Alamo, E. Camacho, “A New l-step Neighbourhood Distributed Moving Horizon Estimator”, *60th IEEE Conference on Decision and Control*, Austin, USA, 2021.
- [Yin2021] Xunyuan Yin and Jinfeng Liu, “Event-Triggered State Estimation of Linear Systems Using Moving Horizon Estimation”, in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 29, no. 2, pp. 901-909, 2021.
- [Zhang2013] J. Zhang and J. Liu, “Distributed Moving Horizon State Estimation for Nonlinear Systems with Bounded Uncertainties”, in *Journal of Process Control*, vol. 23, pp. 1281-1295, 2013.

### **Required profil and skills**

This thesis requires automatic control skills (Master level or 3rd year ‘Grande Ecole’ in Automatic Control/Robotics/Mathematics/Signal Processing) with particular knowledge in state estimation and/or multi-agent systems (e.g. multi-robot). Good Matlab and/or Python and/or ROS skills and a good English level are required.

### **Acquired knowledge and skills during this PhD thesis**

The proposed subject should allow acquiring solid knowledge in robust distributed estimation and multi-agent systems, more particularly related to surveillance missions for multi-sensor multi-robot systems. The knowledge acquired in this direction will provide an opening to several areas (both theoretical and applicative), which are currently at the forefront of research. This thesis has the advantage to allow deep explorations into the theoretical field with a significant part consisting to implement the academic results on a real multi-sensor robotic system, 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 (TD, TP, 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.

<b>Contact:</b>	<b>Cristina STOICA MANIU</b> @ <a href="mailto:cristina.maniu@centralesupelec.fr">cristina.maniu@centralesupelec.fr</a> ☎ +33 1 69 85 13 78 <b>Sylvain BERTRAND</b> @ <a href="mailto:sylvain.bertrand@onera.fr">sylvain.bertrand@onera.fr</a> ☎ +33 1 80 38 66 12
<b>Application:</b>	CV, cover letter, recommendation letter (with date and signature) of the Master Program Director, and engineering and/or Master's official transcripts sent by e-mail to: <a href="mailto:cristina.maniu@centralesupelec.fr">cristina.maniu@centralesupelec.fr</a> and <a href="mailto:sylvain.bertrand@onera.fr">sylvain.bertrand@onera.fr</a> with the subject « <b>PhD thesis TIS-DTIS-2022-25</b> »
<b>Application deadline:</b>	<b>17 April 2022</b>
<b>Locations (Paris region)</b>	<b>ONERA, DTIS, Palaiseau</b> 8, Chemin de la Hunière, Palaiseau, France <b>L2S, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay</b> 3 rue Joliot Curie, 91190 Gif-sur-Yvette, France

**PROPOSITION DE SUJET DE THESE**

**Intitulé : Synthèse d'observateurs à horizon glissant pour l'estimation distribuée sous contraintes au sein de réseaux de capteurs bas coût**

Référence : TIS-DTIS-2022-25

**Equipe d'encadrement :**

- Cristina Stoica Maniu [cristina.maniu@centralesupelec.fr](mailto:cristina.maniu@centralesupelec.fr) (*directeur de thèse*) – L2S
- Sylvain Bertrand [sylvain.bertrand@onera.fr](mailto:sylvain.bertrand@onera.fr) – ONERA
- Eduardo F. Camacho [eduardo@esi.us.es](mailto:eduardo@esi.us.es) (*Collaboration internationale*) – Univ. Séville, Espagne
- Teodoro Alamo [alamo@cartuja.us.es](mailto:alamo@cartuja.us.es) (*Collaboration internationale*) – Univ. Séville, Espagne

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

**Date limite de candidature :** 17 Avril 2022

**Mots clés :** Estimation d'état distribuée, estimation à horizon glissant, détection de défauts capteur, réseaux de capteurs, systèmes multi-agents, drones, robotique mobile.

**DESCRIPTIF ET APPORT DU TRAVAIL DE THÈSE**

**Contexte de recherche**

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre l'ONERA, CentraleSupélec/L2S (Université Paris Saclay<sup>3</sup>) et le Département d'Ingénierie des Systèmes et d'Automatique de l'Université de Séville. Elle fait suite à plusieurs travaux de thèse menés dans ces institutions (voir les thèses en co-encadrement [Venturino20], [Merhy2018], [BenChabane2015], [Suwantong2014b], [Le2012]). De plus, la possibilité d'obtenir un *label* « *Doctorat Européen* »<sup>4</sup> est envisagée. Ainsi, elle s'inscrit dans la continuité de la thèse d'Antonello Venturino portant sur des premiers développements d'observateurs à horizon glissant pour l'estimation distribuée, récompensés par le Best Paper Award, reçu lors de la 24th International Conference on System Theory, Control and Computing, 2020.

**Présentation du projet doctoral, contexte et objectif**

Cette thèse s'intéresse à une problématique d'actualité dans le contexte des systèmes multi-agents, à savoir l'estimation d'état distribuée, en lien avec une application de surveillance d'une zone par un ensemble de capteurs hétérogènes. L'hétérogénéité peut provenir des différentes technologies utilisées (par exemple caméras, radar, LIDAR) et donc de la nature des mesures disponibles et/ou des différents modes de déploiement possibles (capteurs fixes, montés sur robots mobiles ou drones). Le problème est alors d'estimer l'état d'un « objet intrus » infiltré et circulant dans la zone à surveiller (reconstruction de la trajectoire). Pour ce faire, il s'agit de développer des observateurs permettant de reconstruire cet état à partir des mesures capteurs disponibles, de manière distribuée afin d'augmenter la résilience vis-à-vis de la perte d'un ou plusieurs capteur(s). On considèrera ainsi qu'un calculateur peut être associé à chaque capteur ou sous-ensemble de capteurs (« nœud ») avec une capacité de communication en réseau. On suppose donc un ensemble de capteurs hétérogènes dotés de différentes capacités de calcul et de communication au sein d'un même réseau, ces capacités demeurant toutefois limitées (capteurs bas coût). Cette problématique a fait l'objet de nombreux travaux de recherche dans la littérature, portant sur le développement de différents types d'observateurs distribués (par exemple [Olfati2007], [He2020] et références associées).

Des travaux précédents ont porté sur le développement d'observateurs à horizon glissant distribués pour cette problématique. Ces méthodes permettent de tenir compte d'un historique de mesures passées et de prendre en compte des contraintes au sein du processus d'estimation (ex : contraintes sur l'état du système, sur le bruit ou des entrées inconnues) [Farina 2010, Battistelli2018]. Plus précisément, les nouveaux algorithmes développés ont permis à la fois une forte réduction du temps de calcul [Venturino2020] et une amélioration de la précision, par l'usage d'un mécanisme de diffusion de l'information au sein du réseau [Venturino2021]. Ces travaux ont été réalisés dans un cadre linéaire (dynamique du système et équations de mesure linéaires).

Lors de cette thèse, on s'intéressera dans un premier temps à développer des extensions non linéaires de ces algorithmes afin d'élargir le spectre des applications possibles (ex : mesures de distance ou angulaires, non linéarités dans la dynamique du système à observer). On s'attachera à obtenir des garanties de stabilité (convergence de l'erreur

<sup>3</sup> L'Université Paris Saclay a été classée sur la 13<sup>ème</sup> position du classement de Shanghai en 2021.

<sup>4</sup> 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>).

d'estimation) et à valider les approches proposées en simulation et expérimentalement. On dispose d'une flotte de plusieurs robots mobiles TurtleBots et de nano-drones Crazyflie pour faire des expérimentations dans la volière de CentraleSupélec (équipée d'un système de capture de mouvement OptiTrack).

Dans une deuxième étape, afin de tenir compte de capacités de calcul limitées liées à une implémentation sur des capteurs bas coût, on cherchera à développer conjointement des méthodes d'optimisation adaptées à la formulation des observateurs à horizon glissant et à leur mise en œuvre dans un cadre distribué.

Enfin, un autre axe de travail portera sur la prise en compte des capacités et contraintes propres au réseau de communication entre les capteurs, ainsi que ses possibles vulnérabilités face à des cyber attaques. Plus précisément, on cherchera à étendre les méthodes proposées pour tenir compte d'une possible asynchronicité des communications entre les capteurs, de la présence de retard dans les communications [Dubois2018], des incertitudes [Le2013], [Zhang2013], d'une capacité d'échange limitée (réduction des communications [Yin2021]), de données corrompues, et/ou de variations de topologie au sein du réseau de communication due par exemple à une perte temporaire ou permanente de liens de communications entre certains capteurs. Des extensions aux systèmes à grande échelle (large scale systems) sont également envisagées.

### Références bibliographiques :

[Battistelli2018] G. Battistelli, "Distributed moving-horizon estimation with arrival-cost consensus", in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 64, no. 8, pp. 3316–3323, 2018.

[BenChabane2015] S. Ben Chabane, "Techniques de détection de défauts à base d'estimation d'état ensembliste pour systèmes incertains", *thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay*, 13 Octobre 2015, disponible en ligne <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01243534v1>.

[Dubois2018] R. Dubois, S. Bertrand, A. Eudes, "Performance Evaluation of a Moving Horizon Estimator for Multi-Rate Sensor Fusion with Time-Delayed Measurements", 22nd International Conference on System Theory Control and Computing, Sinaia, Romania, 2018.

[Farina2010] M. Farina, G. Ferrari-Trecate and R. Scattolini, "Distributed Moving Horizon Estimation for Linear Constrained Systems", in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 55, no. 11, pp. 2462-2475, 2010.

[He2020] Shaoming He, Hyo-Sang Shin, Shuoyuan Xu and Antonios Tsourdos, "Distributed estimation over a low-cost sensor network: A Review of state-of-the-art", in Information Fusion, vol. 54, pp. 21-43, 2020.

[Le2012] V.T.H. Le, "Commande prédictive robuste par des techniques d'observateur à base d'ensembles zonotopiques", *thèse de doctorat de l'Université Paris Sud*, 22 Octobre 2012, disponible en ligne <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00765444v1>.

[Le2013] V.T.H. Le, C. Stoica, T. Alamo, E.F. Camacho, D. Dumur, "Zonotopic guaranteed state estimation for uncertain systems", Automatica, no. 49(1), pp. 3418-3424, 2013.

[Merhy2018] D. Merhy, "Contribution à l'estimation d'état par méthodes ensemblistes ellipsoïdales et zonotopiques", *thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay*, 24 Octobre 2019, disponible en ligne <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02402347/document>.

[Olfati2007] R. Olfati-Saber, "Distributed Kalman Filtering for Sensor Networks", 46th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, USA, 2007.

[Suwanton2014b] R. Suwanton, "Nouvelle structure d'estimateurs à horizon glissant. application à l'estimation de trajectoires de débris spatiaux pendant la rentrée atmosphérique", *thèse de doctorat de l'Université Paris-Sud*, 2 Décembre 2014, disponible en ligne <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01132179/document>.

[Venturino2020] A. Venturino, S. Bertrand, C. Stoica Maniu, T. Alamo, E. Camacho, "Distributed Moving Horizon Estimation with Pre-Estimating Observer", 24th International Conference on System Theory, Control and Computing, Sinaia, Romania, 2020.

### Best Paper Award.

[Venturino2021] A. Venturino, S. Bertrand, C. Stoica Maniu, T. Alamo, E. Camacho, "A New 1-step Neighbourhood Distributed Moving Horizon Estimator", 60th IEEE Conference on Decision and Control, Austin, USA, 2021.

[Yin2021] Xunyu Yin and Jinfeng Liu, "Event-Triggered State Estimation of Linear Systems Using Moving Horizon Estimation", in IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 29, no. 2, pp. 901-909, 2021.

[Zhang2013] J. Zhang and J. Liu, "Distributed Moving Horizon State Estimation for Nonlinear Systems with Bounded Uncertainties", in Journal of Process Control, vol. 23, pp. 1281-1295, 2013.

### Profil et compétences recherchées

Ce sujet de thèse requiert principalement des compétences en Automatique (profil M2R ou 3e année école d'ingénieur, spécialité automatique/robotique/mathématique/signal), avec de façon privilégiée des connaissances dans le domaine de l'estimation d'état et/ou les systèmes multi-agents (ex. multi-robots). Une bonne pratique de Matlab et/ou Python et/ou ROS, ainsi qu'un bon niveau d'anglais sont requis.

### Connaissances et compétences acquises lors du travail de thèse

Le sujet proposé donnera au candidat de solides connaissances dans les domaines de l'estimation robuste distribuée et des systèmes multi-agents, en particulier en lien avec des missions de surveillance multi-capteurs multi-robots. Les connaissances acquises lui procureront une ouverture vers plusieurs domaines (théoriques et applicatifs) 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 ».

#### Contact :

**Cristina STOICA MANIU**

@ [cristina.maniu@centralesupelec.fr](mailto:cristina.maniu@centralesupelec.fr) ☎ +33 1 69 85 13 78

**Sylvain BERTRAND**

@ [sylvain.bertrand@onera.fr](mailto:sylvain.bertrand@onera.fr) ☎ +33 1 80 38 66 12

#### Soumission :

CV, lettre de motivation, avis daté et signé du directeur de Master et révélés de notes à envoyer par e-mail à :

[cristina.maniu@centralesupelec.fr](mailto:cristina.maniu@centralesupelec.fr) et [sylvain.bertrand@onera.fr](mailto:sylvain.bertrand@onera.fr)

avec l'objet « **PhD thesis TIS-DTIS-2022-25** »

**Date limite de dépôt de candidature : 17 Avril 2022**

#### Laboratoires d'accueil

**ONERA, DTIS, Palaiseau**

8, Chemin de la Hunière, Palaiseau, France

**L2S, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay**

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