

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

**Intitulé : Méthodes d'estimation robustes pour navigation relative entre deux satellites**

Référence : **TIS-DTIS-2023-35**  
(à rappeler dans toute correspondance)

**Début de la thèse : 01/10/2023**

**Date limite de candidature : 31/05/2023**

**Mots clés : rendez-vous spatial, estimation relative, méthodes ensemblistes, zonotopes, observateurs par intervalles**

### Profil et compétences recherchées

Ecoles d'ingénieur, Masters recherche en Automatique, Identification, Estimation

### Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Lors d'un rendez-vous spatial, un satellite chasseur cherche à se rapprocher d'un satellite cible. Ce rendez-vous peut donner lieu à un amarrage (comme dans le cas de l'ATV sur la station spatiale internationale), mais pas nécessairement (comme dans le cas du diagnostic à distance d'un satellite par un autre).

Cette approche, qu'elle soit avec ou sans amarrage, nécessite de la part du satellite chasseur une connaissance de la pose (position et orientation) du satellite cible. Cette connaissance permet d'une part, d'adapter la commande nécessaire au rapprochement, et d'autre part, de s'assurer contre une collision éventuelle. A de grandes distances (au-delà du kilomètre), cette pose peut être estimée de manière absolue (via des capteurs sol, par exemple) et transmise au satellite chasseur. Mais lorsque la distance se fait plus faible (typiquement infrakilométrique), le besoin de précision dans la connaissance de la pose du satellite cible, et la nécessité de mettre en place une commande embarquée imposent l'utilisation d'une méthode d'estimation dite relative, c'est-à-dire une estimation de la pose du satellite cible par rapport au satellite chasseur. Une telle estimation peut être obtenue à partir des mesures fournies par des capteurs embarqués sur le satellite chasseur. Cette estimation doit être d'autant plus précise que les deux satellites sont proches, ceci afin de limiter le risque de collision entre les deux objets.

Cette estimation peut se faire entre deux satellites coopératifs (le satellite cible communique avec le satellite chasseur et lui apporte un complément d'information sur son état relatif) ou non coopératif (c'est par exemple le cas d'un débris).

Les rendez-vous coopératifs sont dans l'ensemble assez bien maîtrisés, sous réserve de la qualité des capteurs et de la performance des moyens de communication. Dans le cas de rendez-vous non coopératifs, ou dans le cas d'une coopérativité avec des capteurs de qualité moyenne, ou possiblement défaillants, l'estimation de pose relative devient plus complexe [6,7].

Le cadre applicatif de cette thèse sera une approche sans amarrage (de type diagnostic) entre un satellite chasseur et un satellite cible non coopératif. Nous nous focaliserons sur la phase finale de l'approche (c'est-à-dire infra kilométrique), bien que la phase d'approche à grande distance peut également nécessiter l'utilisation de méthodes relatives (surtout si les fréquences de revisite avec la station sol sont faibles). Dans une telle application, une des principales problématiques est la réalisation de manœuvres utilisant une commande basée sur une estimation relative de la pose et garantissant l'absence de collision entre les deux satellites.

Les principales méthodes d'estimation relative utilisées dans la littérature sont les méthodes bayésiennes, essentiellement le filtre de Kalman, et ses extensions [3,7]. Cependant, une telle approche nécessite des hypothèses fortes sur la densité de probabilité des incertitudes de modèle et de mesures, hypothèses parfois difficilement vérifiables dans la pratique.

Les méthodes ensemblistes sont une alternative reposant sur la seule hypothèse que les incertitudes de modèle et de mesures sont bornées, et de bornes connues. Elles fournissent des ensembles garantis de contenir l'état recherché (position et orientation relatives), ce qui est particulièrement adapté à la nécessité d'évitement d'une collision (qui se résume à prouver qu'une intersection d'ensembles est vide).

Parmi les méthodes ensemblistes existantes, les méthodes dites par intervalles ont connu (et connaissent toujours) un grand succès. Cependant, une limite de l'approche par intervalles se situe dans le fait que les intervalles sont alignés avec les axes du repère de travail, et par conséquent, lorsque la solution à encadrer présente une enveloppe convexe très éloignée d'un intervalle (ce qui est généralement le cas dans un système fortement non linéaire et de grande dimension telle que celui envisagé), de telles méthodes s'avèrent d'un fort pessimisme, et produisent des ensembles, certes garantis de contenir la solution, mais d'une taille potentiellement grossière par rapport à l'ensemble réel des solutions potentielles.

Dans cette thèse, deux approches ensemblistes alternatives aux intervalles sont envisagées. D'une part, il s'agira d'étudier une approche d'estimation basée sur l'utilisation d'ellipsoïdes, qui présentent des caractéristiques particulièrement adaptées à ce type de système car de forme non dépendante des axes du repère d'étude [1,4]. D'autre part, il s'agira d'étudier l'apport des zonotopes, un zonotope pouvant être défini comme l'image du cube unité par une transformation affine. Un tel objet présente des caractéristiques permettant de limiter le pessimisme de l'estimation obtenue par des intervalles moyennant l'utilisation de dimensions supplémentaires lors de la phase de correction, suivi de réduction de dimension afin d'éviter une explosion de la complexité calculatoire [1,5].

Notons que les incertitudes de navigation propre au satellite chasseur, bien que pouvant être négligées dans un premier temps, devront ensuite être intégrées, car certaines variables d'état du chasseur interviennent directement dans les équations de la dynamique relative.

Un autre aspect qui sera traité dans cette thèse sera la détection de défaut. En effet, le caractère garanti de l'approche ensembliste reposant sur la connaissance des bornes d'erreur des capteurs, cette approche sera défaillante dès qu'un défaut apparaît, puisque celui-ci aura pour effet d'entacher la mesure d'une erreur qui sort potentiellement des bornes attendues [2,5,8,9].

Enfin, une commande tolérante aux défauts capteurs, et garantissant une absence de collision sera développée pour effectuer des manœuvres prédéfinies (pour un diagnostic complet de la cible, par exemple).

Les estimateurs développés, une fois validés par simulation, pourront être éprouvés sur des données réelles. En effet, ce sujet de thèse s'inscrit dans le cadre du projet Flylab, projet dont l'objet, est le lancement de deux satellites courant 2024, et dont, entre autres missions scientifiques, le rapprochement non coopératif d'un satellite de l'autre est prévu.

## Références

- [1] Bo, Z., Kun, Q., Xu-Dong, M., & Xian-Zhong, D. (2013). A new nonlinear set membership filter based on guaranteed bounding ellipsoid algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 39(2), 146-154.
- [2] Ingimundarson, A., Bravo, J. M., Puig, V., Alamo, T., & Guerra, P. (2009). Robust fault detection using zonotope-based set-membership consistency test. *International journal of adaptive control and signal processing*, 23(4), 311-330.
- [3] Pesce, V., Lavagna, M., & Bevilacqua, R. (2017). Stereovision-based pose and inertia estimation of unknown and uncooperative space objects. *Advances in Space Research*, 59(1), 236-251.

- [4] Sanyal, A. K., Lee, T., Leok, M., & McClamroch, N. H. (2008). Global optimal attitude estimation using uncertainty ellipsoids. *Systems & Control Letters*, 57(3), 236-245.
- [5] Scott, J. K., Raimondo, D. M., Marseglia, G. R., & Braatz, R. D. (2016). Constrained zonotopes: A new tool for set-based estimation and fault detection. *Automatica*, 69, 126-136.
- [6] Segal, S., Carmi, A., & Gurfil, P. (2013). Stereovision-based estimation of relative dynamics between noncooperative satellites: Theory and experiments. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 22(2), 568-584.
- [7] Woods, J. O., & Christian, J. A. (2016). Lidar-based relative navigation with respect to non-cooperative objects. *Acta Astronautica*, 126, 298-311.
- [8] Zammali, C., Van Gorp, J., Wang, Z., & Raïssi, T. (2021). Sensor fault detection for switched systems using interval observer with  $L^\infty$  performance. *European Journal of Control*, 57, 147-156.
- [9] Zammali, C., Van Gorp, J., Wang, Z., Ping, X., & Raïssi, T. (2020, December). Ellipsoid-based sensor fault detection for discrete-time switched systems. In *2020 59th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)* (pp. 3267-3272). IEEE.

### Collaborations envisagées

Thèse co-encadrée entre la laboratoire IBISC de l'Université d'Evry, et l'ONERA, tous deux membres de l'Université Paris Saclay.

La direction de thèse sera effectuée par Dalil Ichalal de l'Université d'Evry.

Le doctorant effectuera environ la moitié de la durée de la thèse à l'ONERA, et l'autre moitié à l'Université d'Evry.

#### Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Département Traitement de l'Information et Systèmes

Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

**Contact** : Luc Meyer

Tél. : 01 80 38 66 13

Email : luc.meyer@onera.fr

#### Directeur de thèse

Nom : Dalil Ichalal

Laboratoire : IBISC (Université d'Evry)

Tél. : 01 69 47 75 49

Email : dalil.ichalal@univ-evry.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>