

## École doctorale SMAER Sciences Mécaniques, Acoustique, Électronique, Robotique

### Sujet de thèse - campagne 2026

**Laboratoire** : Institut des Systèmes Intelligents et de la Robotique (ISIR), UMR 7222  
**Établissement de rattachement** : Sorbonne Université  
**Titre de la thèse** : **Estimation d'état et commande de robots continus à plusieurs sections**  
**Directeur de thèse** : Faïz Ben Amar (PU, SU), Azad Artinian (MCF, SU)  
**Mail de contact** : [artinian@isir.upmc.fr](mailto:artinian@isir.upmc.fr)  
**Rattachement à un programme** : ED SMAER  
**Cotutelle envisagée** : non  
**Si oui avec quelle université & quel laboratoire** :  
**Le sujet peut-il être publié sur le site web de l'ED SMAER** :

I. **Résumé et contexte** : La dernière décennie a vu émerger un nouveau type de robot : les robots



continus<sup>1,2,3,4,5,6</sup>. Leurs avantages par rapport aux robots rigides traditionnels sont multiples : un espace de travail plus large, une dextérité accrue, une complianc

accrue, la capacité de naviguer dans des environnements encombrés ou tortueux, un fort potentiel de miniaturisation, la possibilité de concevoir de nouvelles architectures cinématiques, ainsi qu'une diversification des applications, notamment en chirurgie mini-invasive ou pour la manipulation d'objets fragiles. Le concept de robot continu a ainsi permis l'émergence d'un nouveau paradigme dans le domaine de la robotique de dextérité. Cependant, ces innovations technologiques majeures posent encore de nombreux défis en matière d'intégration, de perception, de modélisation et de commande de ces mécanismes. Par conséquent, de nombreuses problématiques scientifiques, souvent fondamentales, restent ouvertes avant de parvenir à une intégration effective des robots continus dans des applications industrielles et médicales.

Les avancées récentes en commande des robots continus ont permis la mise en œuvre de stratégies de commande de l'extrémité en boucle fermée<sup>7</sup>, ce qui a conduit à atteindre une précision submillimétrique. Toutefois, la mise en œuvre de ce type de commande, en particulier dans des applications de chirurgie mini-invasive, nécessite une estimation robuste et fiable de l'état du robot.

L'estimation précise de l'état des robots continus constitue un problème complexe et l'une des briques manquantes pour la démocratisation de ces robots. Parmi les différentes modalités de perception en robotique, la vision est de loin la plus couramment utilisée. Toutefois, en robotique continue, les caméras sont peu fiables, que ce soit en raison de l'application, qui ne permet pas un contact visuel fiable avec le robot (navigation sur un terrain contraint, chirurgie mini-invasive), ou bien en raison des occultations du robot liées à ses propres déformations.

Cela impose d'explorer des stratégies de perception alternatives. Celles-ci reposent généralement sur l'intégration de capteurs supplémentaires au sein d'une architecture robotique déjà fortement contrainte en termes de compacité. Le problème qui en résulte se décline alors en deux défis majeurs :

## École doctorale SMAER

### Sciences Mécaniques, Acoustique, Électronique, Robotique

- Maximiser la quantité d'information fournie par des capteurs de petite taille sur l'état du robot, sans en altérer les propriétés intrinsèques ni compromettre sa capacité à réaliser les tâches prévues.
- Estimer avec précision l'état du robot à partir de mesures partielles ou indirectes. Cela inclut, par exemple, la reconstruction de l'état complet du robot à partir des positions mesurées à un nombre limité de points le long de sa structure, ou encore à partir de mesures d'efforts et de couples à sa base. En raison de la complexité des déformations auxquelles ces robots sont soumis, ces problèmes peuvent être mal posés et admettre plusieurs solutions, notamment pour l'estimation des charges externes.

#### II. Objectifs scientifiques :



Une grande majorité des approches d'estimation de l'état de robots continus proposées dans la littérature actuelle se base sur deux hypothèses simplificatrices : l'évolution du robot dans le temps est quasi-statique<sup>8</sup>, et les bruits d'évolution et de mesure sont négligeables<sup>9</sup>. De plus, la majorité des approches proposées sont formulées sous la forme d'une estimation du maximum de vraisemblance<sup>10</sup>. Autrement dit, la solution est l'état le plus vraisemblable, fondé uniquement sur les données des capteurs. Les connaissances a priori du comportement du robot ne sont jamais prises en compte.

Bien que ces approches fonctionnent généralement bien dans des conditions optimales de laboratoire, elles sont difficiles à mettre en œuvre dans des applications réelles. Puisque les données des capteurs ne sont pas contrebalancées par les connaissances a priori, l'estimation est peu précise, voire instable, lorsque les mesures sont bruitées, partielles ou aberrantes. De plus, lorsque le problème est mal posé, ce qui est souvent le cas pour l'estimation d'états de robots continus et d'autant plus en présence de bruit, plusieurs états peuvent expliquer les mêmes observations. Sans connaissance a priori, il est alors impossible de différencier les états possibles, des plus probables aux plus improbables.

L'objectif de ce projet de thèse est de développer une méthode robuste d'estimation de l'état, basée sur un modèle, de la forme et de la vitesse de robots continus, qui puisse être déployée dans des conditions sous-optimales, en présence de bruit, d'instabilités du système et de données de capteurs incomplètes. Pour cela, il est nécessaire de formuler le problème en termes d'estimation du maximum a posteriori. À chaque instant, les mesures sont ainsi contrebalancées par notre connaissance a priori du comportement du robot, issue de notre modèle. Cela permet, d'une part, de réduire la sensibilité au bruit et aux mesures aberrantes en contraignant la solution vers des valeurs plus plausibles, et, d'autre part, de régulariser les problèmes mal posés en favorisant les solutions les plus probables.

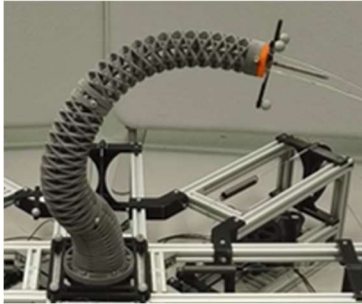
Dans cette optique, nous adapterons une méthode classique d'estimation d'état issue de la robotique rigide à nos prototypes de robots continus : l'estimation à horizon glissant<sup>11</sup> (Moving Horizon Estimation : MHE). Contrairement aux approches récursives classiques (filtres de Kalman, particuliers) qui ne conservent que l'état précédent, cette méthode optimise l'estimation en s'appuyant sur un historique de mesures récemment acquises. Elle permet ainsi de mieux prendre en compte les non-linéarités du modèle et de respecter les contraintes physiques intrinsèques aux robots continus.

En raison de la complexité des modèles de déformation utilisés pour représenter les robots continus, les méthodes d'estimation issues de la robotique rigide ont jusqu'à présent été peu exploitées dans le domaine de la robotique déformable. La majorité des travaux proposés dans la littérature repose sur des hypothèses simplificatrices, telles que la courbure constante<sup>12</sup> ou l'approximation quasi-statique<sup>13</sup>, ou bien sur des

## École doctorale SMAER

### Sciences Mécaniques, Acoustique, Électronique, Robotique

systèmes eux-mêmes simplifiés, comme les robots à une seule section<sup>14</sup>. Dans ces conditions, l'application directe de ces méthodes à nos systèmes peut entraîner des erreurs d'estimation significatives.



En effet, ces derniers sont actionnés par des tendons et se distinguent par leur grande taille ainsi que par le nombre de leurs sections, respectivement 1, 2 et 3, ce qui leur permet d'atteindre de nombreuses formes complexes. De plus, leur taille permet d'abriter plus facilement un grand nombre de capteurs. Spécifiquement, nous utiliserons les données provenant de centrales inertielles positionnées à la base de chaque section. En contrepartie de ces avantages, ces robots sont généralement plus difficiles à modéliser, car des hypothèses valides pour des robots de petite taille, destinés à la chirurgie mini-invasive (mouvements quasi-statiques, courbures

constantes, frottements négligeables, etc.), ne s'appliquent plus à ces robots.

Afin de pallier ces limites, nous proposons d'adopter un modèle dynamique de type Cosserat, issu du domaine de la mécanique, reconnu comme l'un des modèles les plus précis pour les robots continus. Celui-ci permet de représenter de manière adéquate les déformations dynamiques de robots continus de grande taille, à condition d'assumer un coût de calcul élevé.

Une fois l'estimateur d'état développé, il a pour vocation d'être intégré à une stratégie de commande en boucle fermée de la forme du robot. L'estimateur sera ainsi couplé à une commande prédictive (MPC)<sup>15</sup>. Les MPC et MHE ayant des structures similaires, les solutions du modèle Cosserat obtenues en résolvant le problème d'estimation pourront être partiellement réutilisées pour la commande, typiquement comme point de départ de l'optimisation<sup>16</sup>. Les applications envisagées incluent la navigation dans un environnement encombré ainsi que la manipulation d'objets, qui nécessitent de déformer le robot selon de multiples modes de déformation, ce qui est possible grâce aux multiples sections et à la longueur importante des prototypes.

### III. Équipe encadrante :

L'équipe encadrante sera constituée de Faïz Ben Amar et Azad Artinian.

Faïz Ben Amar est spécialisé dans la conception, la modélisation et la commande de systèmes complexes, notamment les robots continus et les robots mobiles dédiés à la navigation, à la saisie et à la manipulation d'objets.

Azad Artinian a mené des travaux sur la modélisation, la commande et l'estimation d'état de systèmes robotiques déformables, ainsi que sur la modulation active de leur raideur.

### IV. Références bibliographiques

1. Rus, D., & Tolley, M. T. (2015). Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, 521(7553),67-475.
2. Burgner-Kahrs, J., Rucker, D. C., & Choset, H. (2015). Continuum robots for medical applications: A survey. *IEEE transactions on robotics*, 31(6), 1261-1280.
3. Gilbert, H. B., Rucker, D. C., & Webster III, R. J. (2016, April). Concentric tube robots: The state of the art and future directions. In *Robotics Research: The 16th International Symposium ISRR* (pp. 253-269). Cham: Springer International Publishing
4. Morales Bieze, T., Kruszewski, A., Carrez, B., & Duriez, C. (2020). Design, implementation, and control of a deformable manipulator robot based on a compliant spine. *The International Journal of Robotics Research*, 39(14), 1604-1619.
5. Childs, J. A., & Rucker, C. (2023). A kinetostatic model for concentric push-pull robots. *IEEE transactions on robotics*, 40, 554-572.
6. Tummers, M., Boyer, F., Lebastard, V., Offermann, A., Troccaz, J., Rosa, B., & Chikhaoui, M. T. (2025).

## École doctorale SMAER

### Sciences Mécaniques, Acoustique, Électronique, Robotique

- Continuum concentric push–pull robots: A Cosserat rod model. *The International Journal of Robotics Research*, 44(2), 216-246.
7. Campisano, F., Caló, S., Ramirez, A. A., Chandler, J. H., Obstein, K. L., Webster III, R. J., & Valdastrì, P. (2021). Closed-loop control of soft continuum manipulators under tip follower actuation. *The International journal of robotics research*, 40(6-7), 923-938
  8. Orekhov, A. L., Ahronovich, E. Z., & Simaan, N. (2023). Lie group formulation and sensitivity analysis for shape sensing of variable curvature continuum robots with general string encoder routing. *IEEE Transactions on Robotics*, 39(3), 2308-2324.
  9. Ha, X. T., Wu, D., Ourak, M., Borghesan, G., Menciassi, A., & Vander Poorten, E. (2023). Sensor fusion for shape reconstruction using electromagnetic tracking sensors and multi-core optical fiber. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(7), 4076-4083.
  10. Liu, L., Huang, X., Zhang, X., Zhang, B., Xu, H., Trivedi, V. M., ... & Zhao, H. (2025). Model-based 3D shape reconstruction of soft robots via distributed strain sensing. *Soft Robotics*, 12(6), 721-731.
  11. Allgöwer, F., Badgwell, T. A., Qin, J. S., Rawlings, J. B., & Wright, S. J. (1999). Nonlinear predictive control and moving horizon estimation—an introductory overview. *Advances in control: Highlights of ECC'99*, 391-449
  12. Peng, R., Wang, Y., & Lu, P. (2024). A tendon-driven continuum manipulator with robust shape estimation by multiple IMUs. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 9(4), 3084-3091.
  13. Lilge, S., Barfoot, T. D., & Burgner-Kahrs, J. (2022). Continuum robot state estimation using gaussian process regression on se (3). *The International Journal of Robotics Research*, 41(13-14), 1099-1120.
  14. Stewart, K., Qiao, Z., & Zhang, W. (2022). State estimation and control with a robust extended Kalman filter for a fabric soft robot. *IFAC-PapersOnLine*, 55(37), 25-30.
  15. Song, Y., Zhu, L., Li, J., Deng, J., Wang, C., & Song, A. (2024). MPC Design of a Continuum Robot for Pulmonary Interventional Surgery Using Koopman Operators. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 9(12), 10819-10826.
  16. Artinian, A., Amar, F. B., & Perdereau, V. (2024). Closed-loop shape control of deformable linear objects based on Cosserat model. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 9(10), 8746-8753.