

Immersion observers synthesis for nonlinear systems affected by harmonic disturbances with unknown frequency(ies)

Doctoral supervision:

Matthieu Fruchard & Estelle Courtial (co-supervisors) & Youssoufi Touré (supervisor)

Research Team:

Laboratory PRISME, EA 4229 - University of Orléans, France

<https://www.univ-orleans.fr/prisme>

Thematics Medical diagnosis and microrobotics, Fluid flow control, Observation and control of nonlinear systems, Lyapunov stability, Immersion.
--

1 Proposal abstract

1.1 Context

The PRISME laboratory has a recognized competence on medical applications and fluid flow control. We address these very challenging research fields both from applied and theoretical point of view. Within the CONTROL THEORY team of the laboratory, we are mainly interested in control law and observers synthesis for such systems.

This PhD work mainly addresses the observer synthesis. In fact, dynamical systems are often affected by periodic disturbances whose knowledge –and especially their frequency– may be meaningful, *e.g.* to control the system. In such a case, it is relevant to rebuild this information that can not be directly accessed. Many various systems can be considered: medical diagnosis [17], medical microrobotics [9, 8], frequency hopping communications or phase locking loop systems [7], etc. It also occurs in some applications where there is an interest in compensating the disturbance using the control inputs of the system, *e.g.* to avoid induced vibrations in satellites, planes or helicopters [6], or to lower the energy consumption of a vehicle.

For instance, untethered microrobots magnetic control is a promising challenge for minimally invasive medicine (targeted drug release, microsurgery, diagnosis, etc). To perform such tasks, one or some microrobots navigate in the circulatory system (see Figure 1). Each robot is affected by external forces, and especially by the hydrodynamic force that opposes its relative motion with respect to the pulsatile blood flow. Yet the blood flow velocity is a local information (see Figure 1) which is hardly accessible by sensors with a precise enough spatial and temporal resolution. The system dynamics is ruled by \mathcal{S} : $\dot{x} = f(x, p, u)$, $y = h(x)$, with

- x the system state, *i.e.* the microrobot(s) positions and velocities,
- $p(t)$ is an harmonic disturbance (the blood velocity) with an unknown frequency (the pulse),
- u are the system inputs (magnetic gradients),
- f is a nonlinear mapping modeling the microrobots dynamics,
- y is the system output –quite noisy since measured by a medical imager– output is an image of the microrobots positions.

In the present example, the system observation both improves the tracking performances, but may also enable an in situ diagnosis, *e.g.* by checking if the blood velocity and pulse are back to normal after the microsurgery act.

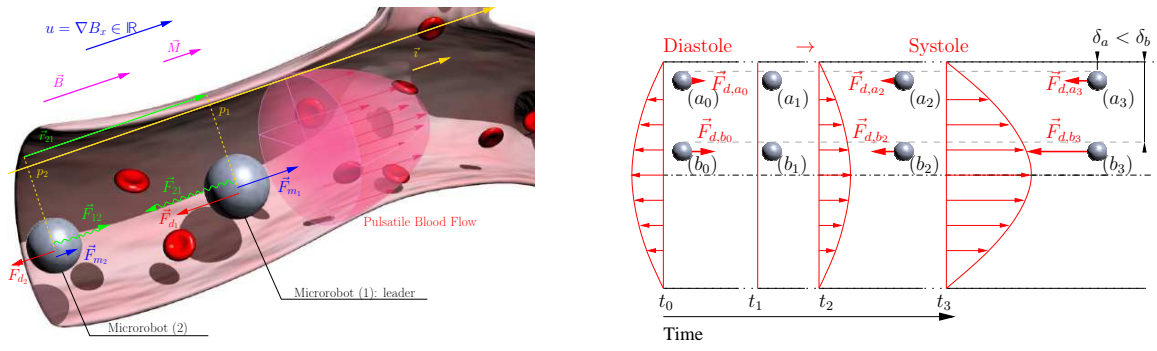


Figure 1: Two microrobots navigating in the circulatory system and affected by the hydrodynamic force $\vec{F}_{d,j}$, the magnetic motive force $\vec{F}_{m,j}$, and the magnetic force interaction $\vec{F}_{k,j}$ that the robot (k) exerts on the microrobot (j). The hydrodynamic drag force acting on stationary microrobots depends both on spatial and temporal discrimination.

1.2 Problem statement

This PhD work will address, more generically, nonlinear differential systems \mathcal{S} disturbed by an harmonic signal $p(t)$ whose frequency is unknown. Since every single periodic disturbance can be modeled by Fourier series, this signal is the solution of an auxiliary system \mathcal{S}_a modeling the disturbance dynamics. To access to all the information, one has to synthesize an observer for the extended system \mathcal{S}_e composed of the subsystems \mathcal{S} and \mathcal{S}_a . Yet, even if the disturbance $p(t)$ is accessible to measurement, some obstructions, such as observability singularities, may prohibit the use of some of the standard tools, like feedback linearization [11, 12], Luenberger observers [3], high gain observers [10, 1], etc.

1.3 Objectives

A way to bypass such limitations relies on immersion based observers synthesis. Immersion based observers are based on a projection of the system onto a target system which is expected to satisfy some desired properties. Such a class encompasses static or dynamic feedback linearization and adaptive control. Sometimes, it is necessary to target a system whose dimension is higher than the initial system dimension in order to get a target system that is linear [13], linear and stable [2, 15, 14], or to obtain a nonlinear target system under normal form [3, 4, 16]. Observer synthesis in the target coordinates is thus easier, but there are issues when trying to get back to the initial coordinates of the system because of the dimension gap that raises inversion issues. A promising approach consists in completing the immersion [1] and in modifying the system around singularities [5] to aim at semiglobally stabilizing the system. Even if the resulting target system dimension increases, this effect is limited compared to other existing approaches. Besides, this approach is appealing for addressing the observation of the extended system within a global framework [18].

This PhD proposal objective is twofold. The major objective is to provide a methodology for the synthesis of observers and observer-based feedbacks for wide classes of disturbed systems. Robustness with respect to output noise and parametric uncertainties will also be investigated, for these effects can not be neglected in medical or fluid flow applications.

This PhD work will benefit from some potential collaborations. The topic may lead to intern collaborations with ROBOT and SIGNAL teams for medical applications (either medical microrobotics or physiological data analysis), and also with ESA team for fluid flow closed-loop control design. This work can also provide theoretical background to the APR-IA COMODO, and can also benefit from the collaboration with the MAPMO developed within the project. Finally, this work may benefit from external informal collaborations with the laboratories CAS (Mines - ParisTech) and LAGEP (Université Lyon I). Experimental and financial facilities afforded by the APR-IA COMODO project can also help in applying on benchmarks the tools theoretically developed within the proposed PhD, and can also widen the results publication impact in international conferences and journals.

PhD fundings: Thesis allocation (3 years doctoral contract from the French Ministry of Higher Education & Research), APR-IA COMODO project for benchmark testing, mobility, and publications in international conferences and journals.

Supervisors emails: matthieu.fruchard@univ-orleans.fr,
estelle.courtial@univ-orleans.fr,
youssofi.toure@univ-orleans.fr

Localization & PhD starting date: Bourges, France, starting date: September 2019.

Skills & Profile: The candidate should have a grande école or master degree in *control theory or applied mathematics*, with good English skills (spoken and written). An interest in biomedical or fluid flow applications would be an asset. A strong motivation and the desire to learn and to work as a teammate with other researchers are essential.

Requested information: Please provide a cover letter, a detailed CV, transcripts of previous university and current degrees (even unofficial) and recommendation letters to matthieu.fruchard@univ-orleans.fr and estelle.courtial@univ-orleans.fr before May 2019.

Observateurs par immersion pour des systèmes non linéaires sujets à des perturbations harmoniques de fréquence(s) inconnue(s)

Encadrement de la thèse:

Matthieu Fruchard & Estelle Courtial & Youssoufi Touré (directeur)

Equipe d’accueil:

Laboratoire PRISME, EA 4229 - Université d’Orléans

<https://www.univ-orleans.fr/prisme>

Thématiques Diagnostic et microrobotique médicale, Contrôle d’écoulements, Observation et contrôle de systèmes non linéaires, Stabilité au sens de Lyapunov, Immersion.

2 Exposé du sujet

2.1 Contexte

Le laboratoire PRISME porte une attention particulière à des défis sociétaux identifiés, tels l’ingénierie des systèmes de santé ou la gestion de l’énergie. Dans ces domaines et depuis plusieurs années, nous traitons aussi bien de problèmes applicatifs que théoriques. Dans l’axe AUTOMATIQUE du laboratoire, il s’agit principalement des problématiques de contrôle-commande et de synthèse d’observateurs.

Ce travail concerne principalement la synthèse d’observateurs. En effet, les systèmes dynamiques sont souvent affectés par des perturbations périodiques qu’il est nécessaire de reconstruire lorsque les informations sur cette perturbation sont pertinentes, notamment pour le contrôle du système. On pense ici à des applications de type diagnostic médical [17], microrobotique médicale [9, 8], communication à saut de fréquence et verrouillage de phase [7], etc... ou encore des applications où il y a intérêt à compenser tout ou partie de la perturbation dans l’entrée u comme dans le cas des vibrations induites dans les satellites ou hélicoptères [6], ou encore dans le cas de réduction de la consommation d’un véhicule.

Ainsi, dans le cadre de la chirurgie minimalement invasive, les microrobots thérapeutiques magnétiquement actionnés sont un domaine d’étude particulièrement actif et prometteur (chimiothérapie ciblée, microchirurgie, diagnostic, etc). Pour ces tâches, un ou plusieurs microrobots se déplacent dans le système cardiovasculaire. Chaque robot est soumis à diverses forces, dont la force hydrodynamique qui s’oppose à son mouvement relatif par rapport au flux sanguin pulsatile (voir Figure 2). Or la vitesse du sang est une information locale qu’il est difficile de mesurer avec la précision spatiale et temporelle requise. Il est donc nécessaire de reconstruire cette information par le biais d’un observateur. La dynamique du système robotique est de la forme $\mathcal{S}: \dot{x} = f(x, p, u), y = h(x)$, où

- x est l’état du système: positions et vitesses du ou des microrobots,
- $p(t)$ représente une perturbation harmonique (la vitesse du sang) de fréquence inconnue (le pouls),
- u sont les entrées de commande (ici des gradients de champ magnétique),
- f est une application non linéaire représentant la dynamique des microrobots,
- y est la sortie du système, une image des positions des microrobots, mesurée par un imageur médical (donc fortement bruitée).

Dans cet exemple, l’observation, outre l’amélioration du suivi de trajectoire, permet un diagnostic de l’état physiologique in situ, par exemple en vérifiant si le flux sanguin et le pouls reviennent à la normale suite à l’action thérapeutique des microrobots.

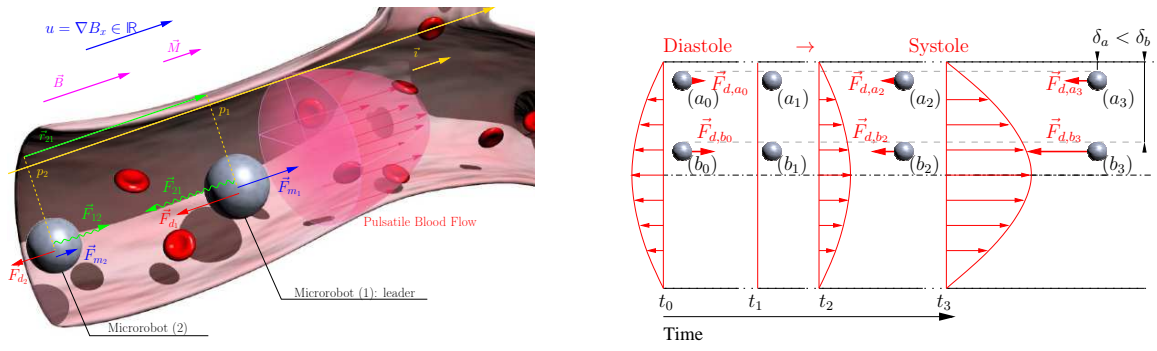


Figure 2: Deux microrobots circulant dans le système cardiovasculaire: ils sont notamment soumis aux forces hydrodynamique $\vec{F}_{d,j}$, magnétique $\vec{F}_{m,j}$, et à leur interaction magnétique réciproque $\vec{F}_{k,j}$. La force de traînée hydrodynamique subie par des microrobots stationnaires dépend à la fois de leur position et du cycle cardiaque.

2.2 Problématique

Dans cette thèse il s'agit de considérer, de façon plus générale, les systèmes non linéaires \mathcal{S} dont la dynamique est affectée par une perturbation harmonique $p(t)$ de fréquence inconnue. On peut alors lui associer un système auxiliaire \mathcal{S}_a décrivant la dynamique de la perturbation dans le cas où le signal $p(t)$ est une série de Fourier tronquée à l'ordre n . Pour accéder à toute l'information, il faut alors construire un observateur du système étendu \mathcal{S}_e composé des deux sous-systèmes \mathcal{S} et \mathcal{S}_a . Cependant, même dans le cas trivial où l'on a directement accès à $p(t)$, il existe des verrous scientifiques, par exemple des singularités de l'observabilité du système, qui rendent l'utilisation des outils standards de l'automatique du type linéarisation [11, 12], observateurs de Luenberger [3], grand gain [10, 1], etc inadaptée.

2.3 Objectifs

Afin de lever cette obstruction, le développement d'observateurs par immersion est envisageable. La synthèse d'observateurs par immersion consiste à projeter le système initial vers un système cible dont on espère des propriétés adéquates, et englobe ainsi les approches de type linéarisation par retour d'état statique ou dynamique, ou encore la commande adaptative. Il est parfois nécessaire, comme dans l'étude présente, de choisir un espace cible de dimension supérieure à celle du système de départ afin d'obtenir linéarité [13], linéarité et stabilité [2, 15, 14], ou une forme normale [3, 4, 16]. La construction de l'observateur dans ces nouvelles coordonnées est alors plus aisée, mais la difficulté réside dans le retour aux coordonnées naturelles du système initial de dimension plus faible (problème d'inversion). Une approche prometteuse consiste à compléter l'immersion [1] et à modifier le système autour des singularités de la condition de rang d'observabilité [5] afin de viser la stabilité semiglobale du système. La dimension du système obtenu est alors supérieure à la dimension du système initial, mais moindre que dans les approches de la littérature. De plus, cette approche permet d'envisager le problème d'observation du système étendu dans un cadre unique [18].

Les objectifs de cette thèse sont doubles. Il s'agit d'abord de proposer un cadre méthodologique pour la synthèse d'observateurs et de retours de sortie pour des classes de systèmes. Ensuite, un intérêt particulier sera porté à la robustesse de l'approche vis-à-vis de bruits de mesure et d'erreurs paramétriques, lesquels sont inévitables notamment dans le cadre d'applications médicales ou de mécanique des fluides.

Enfin, ce travail pourra bénéficier de diverses collaborations. Le sujet permet d'envisager des collaborations internes avec les axes ROBOT et SIGNAL dans le cadre médical (microrobotique médicale et analyse de données physiologiques), ou ESA dans le cadre mécanique (réduction de la traînée d'un véhicule ou contrôle de structures flexibles soumises à vibrations). Il peut aussi bénéficier de collaborations externes, que ce soit avec le MAPMO dans le cadre de l'APR-IA COMODO, ou de manière informelle dans le cadre de relations de travail établies au sein du CAS (Mines - ParisTech) et du LAGEP (Université Lyon I). Enfin, les moyens expérimentaux et financiers de l'APR-IA COMODO permettent d'assurer l'application

des nouveaux outils développés dans le cadre de cette thèse mais aussi, si les développements de la thèse s’y prêtent, la diffusion des résultats via des conférences et revues nationales et internationales.

Références

- [1] V. Andrieu, J. B. Eytard, and L. Praly. Dynamic extension without inversion for observers. *53rd IEEE Conf. on Decision and Control*, pages 878–883, Dec 2014.
- [2] V. Andrieu and L. Praly. Remarks on the existence of a kazantzis-kravaris/luenberger observer. *43rd IEEE Conf. on Decision and Control*, 4:3874–3879, Dec 2004.
- [3] V. Andrieu and L. Praly. On the existence of a kazantzis-kravaris/luenberger observer. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 45(2):432–456, 2006.
- [4] J. Back and J. H. Seo. An algorithm for system immersion into nonlinear observer form: {SISO} case. *Automatica*, 42(2):321 – 328, 2006.
- [5] P. Bernard, V. Andrieu, and L. Praly. Expressing an observer in preferred coordinates by transforming an injective immersion into a surjective diffeomorphism. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 56(3):2327–2352, 2018.
- [6] S. Bittanti and L. Moiraghi. Active control of vibrations in helicopters via pole assignment techniques. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 2:343–350, 1994.
- [7] M. Bodson. Rejection of periodic disturbances of unknown and time-varying frequency. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 19:67–88, 2005.
- [8] M. Fruchard, L. Arcese, and E. Courtial. Estimation of the blood velocity for nanorobotics. *IEEE Trans. on Robotics*, 30(1):93–102, Feb 2014.
- [9] J. Gangloff, R. Ginhoux, M. de Mathelin, L. Soler, and J. Marescaux. Model predictive control for compensation of cyclic organ motions in teleoperated laparoscopic surgery. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 14(2):235–246, 2006.
- [10] J. Gauthier, H. Hammouri, and S. Othman. A simple observer for nonlinear systems applications to bioreactors. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 37(6):875–880, 1992.
- [11] A. J. Krener and A. Isidori. Linearization by output injection and nonlinear observers. *Systems & Control Letters*, 3(1):47–52, 1983.
- [12] A. J. Krener and W. Respondek. Nonlinear observers with linearizable error dynamics. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 23(2):197–216, mar 1985.
- [13] J. Levine and R. Marino. Nonlinear system immersion, observers and finite-dimensional filters. *Systems & Control Letters*, 7(2):133 – 142, 1986.
- [14] L. Marconi, L. Praly, and A. Isidori. Output stabilization via nonlinear luenberger observers. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 45(6):2277–2298, 2007.
- [15] L. Praly, L. Marconi, and A. Isidori. A new observer for an unknown harmonic oscillator. *17th Int. Symposium on Math. Theory of Networks and Systems*, 2006.
- [16] L. Sadelli, M. Fruchard, and A. Ferreira. Estimation de la pulsation cardiaque et la vitesse du sang. in *6èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS Bourges (France)*, 2015.
- [17] L. Sadelli, M. Fruchard, and A. Ferreira. 2d observer-based control of a vascular microrobot. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 62:2194–2206, 2017.
- [18] B. Yi, R. Ortega, and W. Zhang. On state observers for nonlinear systems: A new design and a unifying framework. *IEEE Transactions on Automatic Control*, pages 1–1, (to appear in), 2019. available at arXiv:1712.08209.

Financement prévu pour le fonctionnement de la thèse: Contrat doctoral (allocation ministérielle), projet APR-IA COMODO pour financement de matériel, aide à la mobilité, et publications en conférences et revues internationales.

Email des encadrants de thèse:

matthieu.fruchard@univ-orleans.fr,
estelle.courtial@univ-orleans.fr,
youssoufi.toure@univ-orleans.fr

Lieu & déroulement de la thèse: Bourges, à partir de septembre 2019.

Profil et compétences attendus: Le candidat aura une bonne formation (grande école ou M2) en **automatique ou mathématiques appliquées**, de bonnes compétences en anglais écrit et parlé, et un intérêt pour les applications biomédicales et/ou en mécanique des fluides. Une forte motivation et le désir d'apprendre et de travailler en équipe avec d'autres chercheurs sont essentiels.

Candidature: Envoyer une lettre de motivation, CV détaillé, relevés de notes (même partiels) des 2 dernières années et de l'année en cours, et lettres de recommandation à matthieu.fruchard@univ-orleans.fr et estelle.courtial@univ-orleans.fr avant mai 2019.