

Développement d'Algorithmes de Conception d'Observateurs pour les Systèmes Non Linéaires

Ali Zemouche, Cédric Delattre

1. Contexte de la thèse

L'estimation d'état des systèmes dynamiques est un domaine de recherche crucial et important pour le contrôle, le diagnostic et la surveillance des systèmes. De plus, le besoin d'estimation non linéaire et de conception d'observateurs a été ressenti et poursuivi dans de nombreuses applications modernes et essentielles, notamment l'auto-synchronisation dans les systèmes multi-agents ; la réalisation de consensus dans les réseaux de systèmes ; la détection de cyberattaques et/ou d'attaques par déni de service. Dans le cas des systèmes non linéaires, le problème de la conception d'observateurs d'état devient complexe et difficile lorsqu'il est nécessaire d'atteindre certaines performances liées à la présence de perturbations externes et d'incertitudes paramétriques. La difficulté peut également provenir de la complexité de la structure des non-linéarités du système. Des approches bien connues ont été proposées dans la littérature. Par exemple, les observateurs à gain-gain, le filtre de Kalman étendu, les observateurs basés sur les Inégalités Matricielles Linéaires (LMI), des méthodes basées sur des transformations non linéaires utilisant les formes normales d'observabilité, et des méthodes d'estimation basées sur des fonctions modulatrices. Malgré les nombreuses techniques puissantes de conception d'observateurs proposées dans la littérature récente [1], [2], [3], [4], le problème est loin d'être définitivement résolu pour les systèmes non linéaires généraux. De nombreuses pistes de recherche restent à explorer pour améliorer les méthodes actuelles. La thèse proposée s'inscrit dans ce contexte.

2. Objectifs de la thèse

Dans cette thèse, nous envisageons de travailler sur de nouvelles méthodes basées sur les LMI. L'objectif principal consiste à introduire de nouveaux outils de stabilité afin de réduire le conservatisme des approches actuelles. Parmi ces outils, nous exploiterons la notion de « incremental-Exponential Input/Output-to-State Stability (i-EIOSS) » qui permettra d'aboutir à des conditions LMIs plus générales et moins contraignantes. En effet, depuis les travaux récents de Andrew Teel et ses coauteurs, la propriété i-EIOSS devient essentielle pour la synthèse d'estimateurs robustes pour les systèmes non linéaires. Elle a été notamment exploitée pour développer de nouvelles conditions de stabilité de certains estimateurs tels que l'estimateur à horizon glissant (MHE pour Moving Horizon Estimation). On aimerait exploiter cette propriété, qu'on trouve intéressante, pour construire des observateurs non linéaires, notamment des observateurs basés sur les techniques LMIs. En effet, la propriété i-EIOSS pourrait surmonter certaines difficultés de faisabilité rencontrées par les approches LMIs standards. Par exemple, dans le cas des systèmes avec des non-linéarités toutes non-monotones, nous avons démontré qu'aucune des approches LMIs ne fournit de solutions [5], et nous envisageons d'utiliser la propriété i-EIOSS qui mènera à des

Contacts :

Cédric Delattre : cedric.delattre@univ-lorraine.fr

Ali Zemouche : ali.zemouche@univ-lorraine.fr

Profil recherché : Master en Automatique ou en Mathématiques appliquées

Financement : Contrat doctoral Université de Lorraine

Date de début : 01 octobre 2025

Durée du contrat : 3 ans

conditions sous une nouvelle structure et surmontera ainsi l'obstacle de la non-faisabilité des LMIs classiques. Résoudre ce problème permettra une avancée majeure dans ce domaine car plusieurs applications réelles sont concernées par cette problématique, notamment le modèle cinématique de véhicule, les capteurs magnétiques, l'état de charge des batteries, les communication optique LED, et bien d'autres. Néanmoins, afin d'exploiter une telle propriété pour l'observation, on a besoin d'introduire de nouvelles définitions ou critères de stabilité en fonction de certains paramètres de la propriété i-EIOSS. En effet, certains paramètres peuvent impliquer la contraction du système, ce qui mènera à la convergence de ses trajectoires l'une vers l'autre. Afin d'exploiter cette notion dans le cas de cette problématique, il est nécessaire d'établir une relation directe et explicite entre l'observabilité du système et la monotonie des fonctions non linéaires. Pour cela, il est primordial de revisiter les approches LMI utilisées dans le cadre de la conception d'observateurs non linéaires afin de les améliorer en changeant la structure des LMIs et surmonter ainsi leur non-faisabilité. Dans ce contexte, nous reconsidérerons le cas de l'observateur basé sur un gain commuté développé dans [5], voire aller vers un gain d'observateur qui varie dans le temps. Dans certaines formulations, les résultats théoriques ne seront pas toujours faciles à mettre en œuvre en pratique, nous aurons besoin de l'utilisation des techniques de Deep-Learning pour le calcul de certaines transformations et de fonctions inverses [6]. Une application directe à la synthèse des paramètres de l'estimateur à horizon glissant sera abordée [7] et des validations sur des modèles réels seront réalisées, en particulier sur des modèles de la dynamique du véhicule [4], [8].

Mots-clés : Estimation ; conception d'observateurs ; systèmes non linéaires ; approches apprentissage profond ; dynamique du véhicule.

Références

- [1] A. Zemouche, F. Zhang, F. Mazenc and R. Rajamani. High Gain Nonlinear Observer with Lower Tuning Parameter. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 64, n°8: 3194-3209, 2019.
- [2] A. Zemouche, R. Rajamani, G. Phanomchoeng, B. Boukroune, H. Rafaralahy, M. Zasadzinski. Circle Criterion-Based \mathcal{H}_∞ Observer Design for Lipschitz and Monotonic Nonlinear Systems - Enhanced LMI Conditions and Constructive Discussions. *Automatica*, vol. 85, n°11: 412-425, 2017.
- [3] R. Rajamani, Y. Wang, G. Nelson, R. Madson, A. Zemouche. Observers with Dual Spatially Separated Sensors for Enhanced Estimation - Industrial, Automotive and Biomedical Applications. *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 37, n°3: 42-58, 2017.
- [4] W. Jeon, A. Zemouche, R. Rajamani. Tracking of Vehicle Motion on Highways and Urban Roads Using A Nonlinear Observer. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, regular paper*, vol. 24, n°2, pp. 644-655, April 2019.
- [5] R. Rajamani, W. Jeon, H. Movahedi, A. Zemouche. On the Need for Switched-Gain Observers for Non-Monotonic Nonlinear Systems. *Automatica, regular paper*, vol. 114, pp. 108814, 2020.
- [6] J. Peralez, M. Nadri. Deep model-free KKL observer: A switching approach. *Learning for Dynamics and Control*, July 2024.
- [7] H. Arezki, A. Zemouche, A. Alessandri. Robust Moving Horizon Estimation Schemes for Nonlinear Systems Through Advanced Prediction Strategies, *IEEE Transactions on Automatic Control*, (under review).
- [8] H. Bessafa, C. Delattre, Z. Belkhatir, A. Zemouche, R. Rajamani. Radar sensor-based longitudinal motion estimation by using a generalized high-gain observer. *IEEE American Control Conference, ACC 2024*, Toronto, Canada.

Contacts :

Cédric Delattre : cedric.delattre@univ-lorraine.fr

Ali Zemouche : ali.zemouche@univ-lorraine.fr

Profil recherché : Master en Automatique ou en Mathématiques appliquées

Financement : Contrat doctoral Université de Lorraine

Date de début : 01 octobre 2025

Durée du contrat : 3 ans