

Proposition de sujet de thèse 2024-2027

Titre Analyse et conception de systèmes k -contractifs en réseau

Encadrant [Constantin-Irinel MORARESCU](#) (PR, UL)

Co-Encadrants [Mattia GIACCAGLI](#) (MCF, UL)
[Dragan NESIC](#), [Airlie CHAPMAN](#) (Professeurs, University of Melbourne, Australie)

Mots-clés

Systèmes non linéaires, stabilité incrémentale, contraction, systèmes multi-agents, systèmes en réseaux

Sujet

Les systèmes en réseau sont de plus en plus présents dans la société moderne. L'étude de ces systèmes devient essentielle pour de nombreux domaines d'application. Sans être exhaustive l'analyse des systèmes en réseau est motivée par des applications comme: la propagation d'une épidémie suite aux interactions entre différents individus; la propagation des opinions/rumeurs dans un réseau social; l'évolution du climat suite aux interactions entre l'environnement et les agents économiques et sociaux; la dynamique des robots coopérant pour réaliser collectivement une tâche. On peut ajouter des applications technologique comme le contrôle de pelotons des véhicules autonomes, ou le contrôle collaboratif des robots sur une chaîne de montage. Dans ce contexte, une priorité scientifique du département CID porte sur le développement des outils mathématiques/théoriques pour l'analyse des systèmes interconnectés.

Le comportement asymptotique des systèmes dynamiques non linéaires ne se réduit pas à l'attraction vers un point fixe ou une solution unique et stationnaire. Ceci est particulièrement vrai lorsque des comportements non-locaux sont considérés et/ou lorsque nous ne traitons pas de problèmes de stabilisation. Pour cela, la notion de stabilité incrémentale [LS98] a commencé à jouer un rôle fondamental dans la théorie du contrôle. En bref, un système est incrémentalement stable (ou contractif) si la distance entre des trajectoires ayant des conditions initiales différentes diminue asymptotiquement jusqu'à zéro, sans nécessairement converger vers un point d'équilibre. Les propriétés de contraction se sont avérées efficaces dans de nombreux problèmes de contrôle, tels que la régulation de la sortie [GAAM22], la synchronisation multi-agents [JCVB21], la conception d'observateurs [GATA23], etc. Par conséquent, il est devenu naturel de rechercher des généralisations de cet outil.

Dans ce projet, nous nous concentrons sur la notion récente de k -contraction [WKM22]. Elle généralise le concept de contraction des distances à des objets géométriques de dimension k . Ainsi, la 1-contraction correspond à la contraction des longueurs, c'est-à-dire à la contraction au sens habituel. Par conséquent, la 2-contraction correspond à la contraction des surfaces, la 3-contraction à la contraction des volumes, et ainsi de suite. Pour $k > 1$, une telle notion peut être utilisée pour étudier le comportement asymptotique de systèmes non linéaires, comme la présence de points d'équilibre (éventuellement multiples), de cycles limites, et de comportements chaotiques sans s'appuyer sur des outils de stabilité locale [FS18].

L'objectif de cette thèse est d'étudier les propriétés k -contractives des systèmes en réseau. En effet, les oscillations, les cycles limites et les comportements similaires sont typiques de nombreux systèmes non linéaires qui peuvent être décrits comme des systèmes multi-agents. Ce type de cadre se retrouve dans de nombreuses applications, telles que les processus décisionnels [MG10], le contrôle de la formation des robots mobiles [VCL23], les véhicules aériens [CMVV15], les réseaux d'interaction biologique [AARS21], les réseaux neurones [YWM⁺21], et bien d'autres encore. L'intérêt du projet est double. D'une part, il permettrait d'étudier et de justifier les comportements asymptotiques des solutions des systèmes en réseau, en examinant leurs propriétés k -contractives. D'autre part, cela permettrait de développer de nouveaux outils pour contrôler les systèmes en réseau en imposant de manière appropriée les propriétés k -contractives sur le réseau, soit par le biais d'une conception de rétroaction, soit en modifiant le protocole de communication.

La thèse se développera en deux phases. Tout d'abord, nous nous concentrerons sur la création de nouveaux outils



d'analyse. En effet, les approches existantes sont soit basées sur des mesures matricielles [WKM22], qui nécessitent des calculs intensif et ne sont pas adaptées à la conception de rétroaction, soit sur l'utilisation de structures métriques plates [FS18], qui ne sont cependant pas adaptées pour de grandes classes de systèmes. En particulier, nous développerons d'abord une approche de type Riemannien (et/ou de type Lyapunov) pour étudier la k -contraction (similaire à [LS98] pour 1-contraction). Cela nous permettra de considérer des classes de systèmes plus générales, pour lesquelles des conditions suffisantes et nécessaires pour la k -contraction seront développées. Ensuite, nous étudierons comment les systèmes k -contractifs se comportent sous l'effet de signaux externes (et donc de propriétés de stabilité entrée-sortie). La deuxième phase de la thèse portera sur l'aspect distribué, c'est-à-dire, l'interconnexion des systèmes k -contractifs. En particulier, nous étudierons l'interconnexion en réseau des systèmes k -contractifs, le rôle du protocole de communication (le graphe) dans le processus de synchronisation et comment le modifier pour obtenir certaines propriétés asymptotiques. Pour conclure, nous étudierons comment concevoir des contrôleurs de rétroaction atteignant des propriétés k -contractives pour la boucle fermée.

Encadrement et candidature

Cette thèse sera encadrée par **Constantin-Irinel MORARESCU** (Professeur à l'Université de Lorraine et membre du département "Contrôle – Identification – Diagnostic" du CRAN (UMR 7039)) et co-encadrée par **Mattia GIACCAGLI** (Maitre de Conférences à l'Université de Lorraine et membre du département "Contrôle – Identification – Diagnostic" du CRAN (UMR 7039)) et **Airlie CHAPMAN** (Professeur Associé à l'Université de Melbourne, Australie). Les travaux seront menés en collaboration avec **Romain POSTOYAN** (DR CNRS au CRAN) et **Dragan NESIC** (Professeur à l'Université de Melbourne, Australie).

La thèse s'inscrit dans une longue collaboration historique entre le CRAN et l'Université de Melbourne (Australie). Le(a) doctorant(e) effectuera donc sa thèse au CRAN. Au moins une longue visite de plusieurs mois à l'Université de Melbourne sera prévue au cours des 3 ans.

Nous sommes à la recherche d'un(e) candidat(e) fortement motivé(e) ayant un diplôme de Master en automatique ou mathématiques appliquées ou diplôme équivalent, et démontrant un goût prononcé pour la recherche méthodologique.

Contact

Constantin-Irinel MORARESCU (constantin.morarescu@univ-lorraine.fr)
Mattia GIACCAGLI (mattia.giaccagli@univ-lorraine.fr)

References

- [AARS21] D. Angeli, M.A. Al-Radhawi, and E.D. Sontag. A robust Lyapunov criterion for nonoscillatory behaviors in biological interaction networks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 67(7):3305–3320, 2021.
- [CMVV15] A. Chapman, M. Mesbahi, K.P. Valavanis, and G.J. Vachtsevanos. UAV swarms: Models and effective interfaces. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, pages 1987–2019, 2015.
- [FS18] F. Forni and R. Sepulchre. Differential dissipativity theory for dominance analysis. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 64(6):2340–2351, 2018.
- [GAAM22] M. Giaccagli, D. Astolfi, V. Andrieu, and L. Marconi. Sufficient conditions for global integral action via incremental forwarding for input-affine nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 67(12):6537–6551, 2022.
- [GATA23] M. Giaccagli, V. Andrieu, S. Tarbouriech, and D. Astolfi. LMI conditions for contraction, integral action, and output feedback stabilization for a class of nonlinear systems. *Automatica*, 154:111106, 2023.
- [JCVB21] S. Jafarpour, P. Cisneros-Velarde, and F. Bullo. Weak and semi-contraction for network systems and diffusively coupled oscillators. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 67(3):1285–1300, 2021.
- [LS98] W. Lohmiller and J.J. E. Slotine. On contraction analysis for non-linear systems. *Automatica*, 34(6):683–696, 1998.
- [MG10] I.C. Morarescu and A. Girard. Opinion dynamics with decaying confidence: Application to community detection in graphs. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 56(8):1862–1873, 2010.
- [VCL23] E.M. Vella, A. Chapman, and N. Lipovetzky. Learning user preferences for complex cobotic tasks: Meta-behaviors and human groups. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023.
- [WKM22] C. Wu, I. Kanevskiy, and M. Margaliot. k -contraction: Theory and applications. *Automatica*, 136:110048, 2022.
- [YWM⁺21] W. Yang, Y.W. Wang, I.C. Morarescu, X.K. Liu, and Y. Huang. Fixed-time synchronization of competitive neural networks with multiple time scales. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 33(8):4133–4138, 2021.

