

Synthèse d'observateurs adaptatifs pour l'estimation et le contrôle de trajectoire d'une flotte de véhicules autonomes commandée en réseaux.

Descriptif du sujet de thèse :

De nos jours, les potentielles des applications des véhicules autonome (VA) organisés en flotte sont aujourd'hui larges et variées. Ces applications peuvent s'étendre du transports collectifs, ou logistiques telles que le transport de marchandises [1] au applications d'inspection de sites industriels à haut risque, de surveillance de départ de feux de forêts ou de sites de production agricoles [2-4]. Une large gamme de véhicules autonomes est impliquée dans ces domaines d'utilisation, à savoir une flotte de VA terrestres ou aériens connectés en essaim ou en formation.

En dépit de leurs larges possibilités de déploiement, le contrôle de trajectoire d'une flotte de VA connectés via un réseau de transmission de données fait encore face à plusieurs défis et verrous scientifiques et technologiques parmi lesquels :

1) Le nombre important de variables et de paramètres des différents modèles mathématiques souvent non linéaires décrivant la dynamique globale de la flotte de véhicules autonomes [5]. En plus des capteurs intrinsèques équipant le véhicule autonome, des variables additionnelles telles que les positions, vitesses et les accélérations des autres véhicules, les positions relatives de chaque véhicule, les distances longitudinales et latérales fournies par des capteurs de perception (RADAR, LIDAR, camera sur drone) sont indispensables pour un contrôle efficace d'une flotte de véhicules autonomes aériens ou terrestres. De plus le couplage entre les paramètres des modèles et les états du système est souvent complexe et non linéaire, rendant la tâche d'estimation simultanée des états et des paramètres plus difficile, par des structures d'observateurs non linéaires adaptatifs développés dans la littérature et notamment ceux proposés par les auteurs dans [6],[7].

2) Le phénomène d'échantillonnage, du retard et de la perte de transmission des données entre les différents véhicules de la flotte. Ces phénomènes d'échantillonnage, de retard et de pertes de données sont dus aux performances dégradées des capteurs et à la qualité du réseau de transmission qui régit le fonctionnement et les conditions de transmission de données dans de la flotte de véhicules autonomes connectés. D'autre part, le nombre important de données nécessaires à la conception de contrôleurs de trajectoires robustes et efficaces alourdit de façon significative les contraintes sur le réseau de transmission dégradant ainsi les performances de ce dernier.

3) Lors de l'estimation des états en présence d'entrées inconnues, la technique par découplage conduit à l'étude des dynamiques internes du système. Celles-ci sont imposées par le système et ne sont donc pas observable mais uniquement détectable. Le verrou scientifique considéré dans cette thèse concerne les dynamiques internes stable mais lentes ou quasi-stable. En effet, dans ces conditions, la dynamique de l'erreur d'estimation d'état est affectée, ce qui conduit à une convergence lente vers zéro ou dans le second cas à une erreur stable mais non asymptotique.

Le principal objectif de cette thèse est de répondre à ces 3 problématiques. Ainsi :

1. La première partie de la thèse s'attellera au développement de nouvelles structures d'observateurs adaptatifs permettant dans un premier temps une estimation simultanée des variables et des paramètres des modèles décrivant la dynamique de la flotte de véhicules et ceci en présence de données capteurs à la fois échantillonnées retardées et affectés par des bruits et des biais de mesures. Les structures d'observateurs développées incluront 2 composantes :
 - a. La première composante se basera sur le formalisme du prédicteur de sortie [8] et proposera une nouvelle structure de prédiction en boucle fermée couplée avec une nouvelle loi d'estimation de paramètre adaptative permettant une estimation simultanée et continue des états et des paramètres inconnus du système tout en compensant le phénomène de l'échantillonnage et du retard induit par le réseau transmission.
 - b. La seconde composante est un mécanisme de type Event-Trigger (ETM) qui permet de régir les instants de transmission des données par le réseau de transmission intra-véhicules. Le candidat retenu explorera deux types de mécanismes ETM proposés dans la littérature. Le premier mécanisme est un mécanisme de type ETM statique [9-12] qui se base sur des instants de déclenchement de processus de transmission de données déterminés par l'erreur entre la donnée du système disponible à l'instant t et la dernière donnée transmise au système par le mécanisme ETM. Cette erreur est comparée à une valeur seuil et suivant cette comparaison, le déclenchement de la transmission est décidé par le mécanisme ETM. Le second type d'ETM qui sera exploré par le candidat et le mécanisme ETM dynamique [13-15] qui se base sur une valeur seuil de l'erreur qui est ajustée de manière adaptative et dynamique. Le verrou scientifique auquel s'attaquera l'étudiant dans cette partie, sera de proposer de nouvelles structures d'ETM capables à la fois d'alléger d'une manière significative les contraintes de transmission des données imposées sur le réseau, et de garantir l'exclusion du phénomène du « Zeno behavior ». Ce phénomène provoque un nombre infini d'instants de déclenchement des données transmises par l'ETM dégradant ainsi irrémédiablement le réseau de transmission de données intra-véhiculaire du système. Par la suite, il faudrait explorer de manière plus approfondie la notion de découplage asymptotique dans les observateurs à entrées inconnues. Cette notion nouvelle a été introduite récemment dans [16], [17] dans le cadre des systèmes linéaires, afin d'améliorer la qualité de l'estimation malgré la présence de dynamiques internes stables mais lentes. Il est donc intéressant d'introduire cette notion dans le cadre des observateurs adaptatifs qui seront traités dans la première partie de la thèse.
2. La deuxième partie de la thèse concernera le développement sur la base des estimées fournies par les observateurs de lois de commandes robustes en vue du contrôle de trajectoires de la flotte de VA. Un cadre théorique de stabilité des lois de commande proposées sera construit.
3. La troisième et la dernière partie de la thèse concernera la validation expérimentale des algorithmes d'estimation et de commande développés sur une flottes de VA connectées. Le laboratoire IBISC dispose de plateformes

expérimentales (volière de drones et de véhicules terrestres) permettant au candidat de valider les performances des algorithmes d'estimation et de commandes conçus durant cette thèse.

Le doctorant vient appuyer l'équipe actuelle qui travaille dans le cadre du projet ANR ArtISM0 (2021-2025) qui travaille sur les problématiques d'estimation intelligente pour les véhicules.

Profil des candidats : Master 2 universitaire ou école d'ingénieur, avec des compétences en automatique linéaire et non linéaires, estimation et observation, contrôle des systèmes dynamiques, mathématiques appliquées, Matlab

Pour tout renseignement ou candidature, veuillez vous adresser à l'équipe encadrante :

Dalil Ichalal (dalil.ichalal@univ-evry.fr)

Naima Ait Oufroukh (naima.aitoufroukh@univ-evry.fr)

Sofiane Ahmed Ali (sofiane.ahmedali@univ-evry.fr)

Références :

[1] Véhicules autonomes : quels impacts sur les différents métiers ? Gwenaëlle Ily, février 2020.

[2] Des drones pour surveiller les sites industriels. Usine nouvelle, Mai 2018.

[3] E. Ausonio, P. Bagnerini and M. Ghio "Drone Swarms in Fire Suppression Activities: A Conceptual Framework", *Drones*, 2021. doi.org/10.3390/drones5010017.

[4] Z. Zhao and X. Jin, "Adaptive neural network-based sliding mode tracking control for agricultural quadrotor with variable payload," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 103, p. 108336, 2022. doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108336.

[5] R. Rajamani. *Vehicle Dynamics and Control*. 2nd edition, Springer Verlag, 2012.

[6] Q. Zhang, "Adaptive observer for multiple-input-multiple-output (MIMO) linear time-varying systems," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 47, no. 3, pp. 525-529, March 2002.

[7] X. Zhuang, H. Wang., S. Ahmed-Ali and Y. Tian, "Design of a joint adaptive high-gain observer for a class of nonlinear sampled-output system with unknown states and parameters," in *International Journal of Robust and nonlinear control*, vol. 32, no. 17, pp. 9174-9194, November 2022.

[8] I. Karafyllis, and C. Kravaris. "From continuous-time design to sampled-data design of observers". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 54(9), 2169-2174, 2009.

[9] P. Tabuada. "Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52(9), 1680-1685, 2007.

[10] Y. Huang, J. Wang, D. Shi and L. Shi, . "Toward event-triggered extended state observer". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 63(6), 1842-1849, 2017.

[11] D.P Borgers, and W. M. H. Heemels,. "Event-separation properties of event-triggered control systems". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59(10), 2644-2656, 2014.

[12] X. Zhuang, H. Wang., S. Ahmed-Ali ., Y. Tian and C.Song, "Design of an event-triggered joint adaptive high-Gain observer for a class of nonlinear system with unknown states and parameters," *Journal Of Franklin Institute*, vol. 360, no. 7, pp. 5048-5081, May 2023.

[13] A Girard. "Dynamic triggering mechanisms for event triggered control". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 60(7), 1992-1997,2014.

[14] X. Yi,. K Liu., D.V Dimarogonas and K.H Johansson,. "Dynamic event-triggered and self-triggered control for multi-agent systems". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 64(8), 3300-3307,2018.

[15] E. Petri, . R. Postoyan, D. Astolfi, D., D. Nei and W.M.H Heemels. "Event-triggered observer design for linear systems". *60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)* pp. 546-551,2021.

[16] D. Ichalal and S. Mammar, "Asymptotic Unknown Input Decoupling Observer for Discrete-Time LTI Systems," in *IEEE Control Systems Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 361-366, April 2020, doi: 10.1109/LCSYS.2019.2929351.

[17]. D. Ichalal and S. Mammar, "On Unknown Input Observers of Linear Systems: Asymptotic Unknown Input Decoupling Approach," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 65, no. 3, pp. 1197-1202, March 2020, doi: 10.1109/TAC.2019.2924375.

Adaptive observers design for estimation and trajectory control of a fleet of autonomous vehicles in networked control systems framework

Description of the thesis subject:

Nowadays, the potential applications of autonomous vehicles (AV) organized in fleets are now wide and varied. These applications can range from public transport, or logistics such as the transport of goods [1] to applications for inspecting high-risk industrial sites, monitoring the start of forest fires or agricultural production sites [2- 4]. A wide range of autonomous vehicles is involved in these areas of use, namely a fleet of land or air AVs connected in a swarm or in formation.

Despite their wide deployment possibilities, trajectory control of a fleet of AVs connected via a data transmission network still faces several scientific and technological challenges and obstacles, including:

1) The large number of variables and parameters of the various often non-linear mathematical models describing the global dynamics of the fleet of autonomous vehicles [5]. In addition to the intrinsic sensors fitted to the autonomous vehicle, additional variables such as the positions, speeds and accelerations of other vehicles, the relative positions of each vehicle, the longitudinal and lateral distances provided by perception sensors (RADAR, LIDAR, camera on drone) are essential for effective control of a fleet of autonomous air or ground vehicles. Moreover, the coupling between the parameters of the models and the states of the system is often complex and nonlinear, making the task of simultaneous estimation of the states and the parameters more difficult, by structures of adaptive nonlinear observers developed in the literature and in particular those proposed by the authors in [6],[7].

2) The phenomenon of sampling, delay, and loss of data transmission between the different vehicles of the fleet. These phenomena of sampling, delay and loss of data are due to the degraded performance of the sensors and the quality of the transmission network which governs the operation and the conditions of data transmission in the fleet of connected autonomous vehicles. On the other hand, the large number of data necessary for the design of robust and efficient trajectory controllers significantly increases the constraints on the transmission network, thus degrading its performance.

3) When estimating states in the presence of unknown inputs, the decoupling technique leads to the study of the internal dynamics of the system. These are imposed by the system and are therefore not observable but only detectable. The scientific obstacle considered in this thesis concerns stable but slow or quasi-stable internal dynamics. Indeed, under these conditions, the dynamics of the state estimation error is affected, which leads to a slow convergence towards zero or in the second case to a stable but non-asymptotic error.

The main objective of this thesis is to answer these 3 problems. So :

1. The first part of the thesis will focus on the development of new structures of adaptive observers allowing initially a simultaneous estimation of the variables and the parameters of the models describing the dynamics of the vehicle fleet and this in the presence of sensor data both sampled delayed and affected by noise and measurement bias. The observer structures developed will include 2 components:
 - a. The first component will be based on the formalism of the output predictor [8] and will propose a new closed-loop prediction structure coupled with a new adaptive parameter estimation law allowing a simultaneous and continuous estimation of the unknown states and parameters of the system. while compensating for the phenomenon of sampling and delay induced by the transmission network.
 - b. The second component is an Event-Trigger (ETM) type mechanism which makes it possible to govern the instants of data transmission by the intra-vehicle transmission network. The successful candidate will explore two types of ETM mechanisms proposed in the literature. The first mechanism is a static ETM type mechanism [9-12] which is based on data transmission process trigger times determined by the error between the system data available at time t and the last data transmitted. to the system by the ETM mechanism. This error is compared with a threshold value and following this comparison, the triggering of the transmission is decided by the ETM mechanism. The second type of ETM which will be explored by the candidate is the dynamic ETM mechanism [13-15] which is based on an error threshold value which is adjusted adaptively and dynamically. The scientific obstacle which the student will tackle in this part will be to propose new ETM structures capable of both significantly reducing the data transmission constraints imposed on the network and guaranteeing the exclusion of the phenomenon of “Zeno behavior”. This phenomenon causes an infinite number of instants of triggering of the data transmitted by the ETM, thus irreparably degrading the intra-vehicular data transmission network of the system. Subsequently, the notion of asymptotic decoupling in observers with unknown inputs should be further explored. This new notion was recently introduced in [16], [17] in the context of linear systems, to improve the quality of the estimation despite the presence of stable but slow internal dynamics. It is therefore interesting to introduce this notion in the context of adaptive observers which will be treated in the first part of the thesis.

2. The second part of the thesis will concern the development on the basis of estimates provided by observers of robust control laws for the control of trajectories of the AV fleet. A theoretical framework for the stability of the proposed control laws will be constructed.

3. The third and last part of the thesis will concern the experimental validation of the estimation and control algorithms developed on a fleet of connected AVs. The IBISC laboratory has experimental platforms (drones and land vehicles) allowing the candidate to validate the performance of the estimation and control algorithms designed during this thesis.

The doctoral student comes to support the current team which works within the framework of the ANR ArtISMO project (2021-2025) which works on the problems of intelligent estimation for vehicles.

Profile of candidates: Master 2 university or engineering school, with skills in linear and non-linear automation, estimation and observation, control of dynamic systems, applied mathematics, Matlab

For any information or application, please contact:

Dalil Ichalal (dalil.ichalal@univ-evry.fr)

Naïma Ait Oufroukh (naima.aitoufroukh@univ-evry.fr)

Sofiane Ahmed Ali (sofiane.ahmedali@univ-evry.fr)

Références :

[1] Véhicules autonomes : quels impacts sur les différents métiers ? *Gwenaëlle Ily, février 2020.*

[2] *Des drones pour surveiller les sites industriels. Usine nouvelle, Mai 2018.*

[3] E. Ausonio, P. Bagnerini and M. Ghio "Drone Swarms in Fire Suppression Activities: A Conceptual Framework", *Drones*, 2021. doi.org/10.3390/drones5010017.

[4] Z. Zhao and X. Jin, "Adaptive neural network-based sliding mode tracking control for agricultural quadrotor with variable payload," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 103, p. 108336, 2022. doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108336.

[5] R. Rajamani. *Vehicle Dynamics and Control*. 2nd edition, Springer Verlag, 2012.

[6] Q. Zhang, "Adaptive observer for multiple-input-multiple-output (MIMO) linear time-varying systems," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 47, no. 3, pp. 525-529, March 2002.

[7] X. Zhuang, H. Wang., S. Ahmed-Ali and Y. Tian, "Design of a joint adaptive high-gain observer for a class of nonlinear sampled-output system with unknown states and parameters," in *International Journal of Robust and nonlinear control*, vol. 32, no. 17, pp. 9174-9194, November 2022.

[8] I. Karafyllis, and C. Kravaris. "From continuous-time design to sampled-data design of observers". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 54(9), 2169-2174, 2009.

[9] P. Tabuada. "Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52(9), 1680-1685, 2007.

[10] Y. Huang, J. Wang, D. Shi and L. Shi, . "Toward event-triggered extended state observer". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 63(6), 1842-1849, 2017.

[11] D.P Borgers, and W. M. H. Heemels, . "Event-separation properties of event-triggered control systems". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59(10), 2644-2656, 2014.

[12] X. Zhuang, H. Wang., S. Ahmed-Ali ., Y. Tian and C.Song, "Design of an event-triggered joint adaptive high-Gain observer for a class of nonlinear system with unknown states and parameters," *Journal Of Franklin Institute*, vol. 360, no. 7, pp. 5048-5081, May 2023.

[13] A Girard. "Dynamic triggering mechanisms for event triggered control". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 60(7), 1992-1997,2014.

[14] X. Yi, K Liu, D.V Dimarogonas and K.H Johansson,. "Dynamic event-triggered and self-triggered control for multi-agent systems". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 64(8), 3300-3307,2018.

[15] E. Petri, R. Postoyan, D. Astolfi, D., D. Nei and W.M.H Heemels. "Event-triggered observer design for linear systems". *60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)* pp. 546-551,2021.

[16] D. Ichalal and S. Mammar, "Asymptotic Unknown Input Decoupling Observer for Discrete-Time LTI Systems," in *IEEE Control Systems Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 361-366, April 2020, doi: 10.1109/LCSYS.2019.2929351.

[17]. D. Ichalal and S. Mammar, "On Unknown Input Observers of Linear Systems: Asymptotic Unknown Input Decoupling Approach," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 65, no. 3, pp. 1197-1202, March 2020, doi: 10.1109/TAC.2019.2924375.