Description du sujet de thèse

Laboratoire de recherche : LAAS-CNRS, Toulouse
Equipe de recherche : Diagnostic, Supervision et Conduite (DISCO)
Noms des directeurs de thèse : Carine Jauberthie et Soheib Fergani
carine.jauberthie@laas.fr, sfergani@laas.fr
Téléphone : 05 61 33 69 43/05 61 33 64 10

Sujet de thèse

Titre : Synthèse de techniques de filtrages ensemblistes rapides avec incertitudes mixtes pour le diagnostic (estimation/localisation) de véhicules autonomes en vue d'une commande de navigation autonome garantie sans collision. Applications aux systèmes multi-agents.

Mots-clefs : Distributions de probabilité incertaines, fonctions de croyance, filtrage ensembliste, analyse par intervalle, système autonome, sécurité active, diagnostic.

Description

Dans un avenir proche, nous nous attendons à voir des flottes de véhicules, des avions et des robots, entièrement autonomes, devant être capables de prendre leurs propres décisions sans intervention humaine directe. Bien que ce thème technologique offre de nombreux avantages potentiels, garantir la sécurité et la fiabilité des véhicules autonomes de manière formelle est la principale problématique.

Un exemple très intéressant d'une problématique d'actualité suscitant l'intérêt des chercheurs académiques et du monde industriel concerne plusieurs stratégies de navigation coopérative multi-agents telles que le vol de précision automatique en formation serrée (drônes) [1], le ravitaillement automatique en vol en carburant (avions) [2], les pelotons autonomes de véhicules terrestres [3], ainsi que l'exploration planétaire par la formation de nano-satellites [4], où l'estimation garantie de la position et de la vitesse relative des véhicules est cruciale.
Pour obtenir ces estimations, nous nous appuyons généralement sur des capteurs de localisation, des systèmes de surveillance et/ou des réseaux de communication sans fil (ces derniers sont utilisés pour diffuser les coordonnées entre les agents).
Malheureusement, ces mécanismes de détection peuvent fournir des informations de position inexactes en raison des incertitudes capteurs, des délais de traitement, des interférences, du bruit et de la quantification, ce qui met en péril la sécurité du véhicule et de son environnement [5]. De même, les équipements de localisation plus largement utilisés, tels que les radars, sonars, lidars et les unités de mesures inertielles, peuvent subir des retards importants, des taux d'échantillonnage lents et des erreurs d'incertitudes induites par les constructeurs ou l'environnement.
En raison des approximations impliquées dans les filtres d'estimation largement utilisés actuellement dans les différentes applications industrielles (les étapes de linéarisation réalisées par le filtre de Kalman étendu (EKF) par exemple), la garantie de cohérence et de fiabilité du filtre est un problème ouvert (tout particulièrement en estimation non linéaire).
Un autre aspect très affecté par la fiabilité des estimations est la sûreté de l'utilisation de ces systèmes autonomes. Le risque de dysfonctionnement d'un système autonome pendant son fonctionnement, plus encore lorsqu'il s'agit d'un élément d'une flotte, représente une problématique inquiétante pour les constructeurs et les utilisateurs. Ce

type de défauts peut avoir des conséquences désastreuses et ne peut pas être prédit en se basant sur les méthodes classiques de diagnostic hors ligne.
Dans une perspective de recherche d'alternative des méthodes existantes, nous souhaitons proposer de nouvelles méthodologies rapides d'estimation d'état et de paramètres du système, basées sur une combinaison d'approches ensemblistes et stochastiques. L'idée principale est de proposer une alternative aux méthodes probabilistes (type EKF, ...) et aux méthodes ensemblistes déterministes exactes (généralement insolubles en termes de calcul pour les systèmes non linéaires). Pour cela, nous proposons de combiner ces approches (stochastiques, ensemblistes) et trouver des approximations externes des opérations d'ensembles impliqués les plus étroits possibles tout en restant implémentables. Dans ce contexte, certaines incertitudes seront modélisées par des ensembles compacts et les autres par des distributions de probabilité.

Le déroulement de ce travail de thèse se fera en deux parties :
-Dans une première partie, dans la continuité des travaux effectués au sein de l'équipe DISCO au travers de trois thèses [6], [7] et [8] et des filtres mixtes développés (Kalman intervalle avec borne majorante noté OUBIF, l'UBIKF et un filtre basé fonctions de croyances noté EBPF), nous considèrerons toutes les incertitudes comme bornées, c'est-à-dire que les incertitudes ne seront définies que par leur appartenance à des intervalles dans un premier temps. Pour cela, nous nous placerons dans un contexte dit « ensembliste » [9]. Nous pousserons nos résultats pour obtenir de meilleures preuves formelles notamment par rapport à la convergence des filtres d'estimation. À partir de là, nous étendrons les estimateurs au-delà de méthode d'analyse par intervalle, en développant des méthodes ensemblistes basées sur l'inclusion des estimations et des incertitudes dans des formes géométriques telles que les ellipsoïdes [10] et les zonotopes [9] d'une façon garantie. Cela permettra de s'affranchir des hypothèses non réalistes par rapport aux modèles de distributions de bruits de mesures, d'incertitudes et d'erreurs de modélisation du système, car elles restent peu identifiables sur les processus réels.

Le travail consistera à développer des filtres mixtes avec le moins de conservatisme en apportant une garantie d'appartenance à l'ensemble le plus étroit possible, tout en assurant un compromis entre cette garantie et une complexité de calcul acceptable les rendant implémentables.

-Dans la deuxième partie, nous nous intéresserons au développement de propriétés de convergence et aux performances des filtres mixtes, notamment celui basé sur les fonctions de croyance (noté EBPF [11]). Ce filtre permet de représenter des connaissances non seulement incertaines mais également incomplètes. Ainsi un modèle sous forme d'une fonction de masse pour une distribution gaussienne multivariée incertaine est proposé. Un filtrage particulaire ensembliste basé sur cette théorie a été développé pour des systèmes dynamiques non linéaires dans lesquels les bruits sur la dynamique sont bornés et les erreurs de mesure sont modélisées par une fonction de masse gaussienne incertaine (thèse de Q.H. Lu 2022 [6] et T.A. Tran 2017 [8]).

Ce travail donnera lieu :

- au développement et caractérisation de filtres ensemblistes et mixtes avec preuves formelles de convergence et de garantie d'inclusion.

- au développement de stratégie de diagnostic de défaillances avec une garantie de performance de détection et de diminution de fausses alarmes.

- à la conception de stratégie de localisation relative de systèmes multi-agents garantie en vue d'une commande de navigation de systèmes autonomes en formation serrée avec garantie de non collision.

Références

[1] A.R. Vetrella, G., Fasano and D. Accardo. Attitude estimation for cooperating UAVs based on tight integration of GNSS and vision measurements. Aerospace Science and Technology, 2019, vol. 84, p. 966-979.

[2] J. Hansen, J. Murray and N. Campos. The NASA Dryden AAR project: A flight test approach to an aerial refueling system. In : AIAA atmospheric flight mechanics conference and exhibit. 2004. p. 4939.

[3] LI, Shengbo Eben, ZHENG, Yang, LI, Keqiang, et al. An overview of vehicular platoon control under the four-component framework. In : 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2015. p. 286-291.

[4] S. D'Amico and J.R. Carpenterl. Satellite formation flying and rendezvous. Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications, 2020, vol. 2, p. 1921-1946.

[5] S. Zekavat, R.M. Buehrer, G.D. Durgin, et al. An overview on position location: past, present, future. International Journal of Wireless Information Networks, 2021, vol. 28, p. 45-76.

[6] Q.H. Lu. Filtrage à incertitudes stochastiques et bornées : application au diagnostic actif en automobile. Thèse de doctorat Automatique Toulouse (15/03/2022).

[7] J. Xiong, Set-membership state estimation and application on fault detection, Doctorat de l'Université de Toulouse (INP Toulouse) 12/09/2013.

[8] T.A. Tran. Cadre unifié pour la modélisation des incertitudes statistiques et bornées. Application à la détection et isolation de défauts dans les systèmes dynamiques incertains par estimation. Doctorat de l'Université de Toulouse (UPS) 29/11/2017.

[9] J. Bolting and S. Fergani. Method of estimating a constrained zonotope enclosing a state representing motion of at least one mobile target governed by a nonlinear model. U.S. Patent Application No 17/608,717, 13 oct. 2022.

[10] J. Bolting and S. Fergani. Ellipsoidal Set Membership Filtering with Reduced Conservatism Applied to Relative Localization Between Aircraft Based on GNSS and UWB Ranging. In 2019 18th European Control Conference (ECC). IEEE, 2019. p. 1810-1815.

[11] T.A. Tran, C. Jauberthie, F. Le Gall, L. Travé-Massuyès. Evidential box particle filter using belief function theory, International Journal of Approximate Reasoning, Volume 93, pp 40-58, 2018.