Titre : Estimation embarquée du mouvement sans informations d’infrastructure : application à un drone autonome

La conception d’agents mobiles capables de naviguer de manière autonome vise à leur permettre de se déplacer en direction d’un objectif en évitant les collisions avec des obstacles et ce, sans informations préalables sur leur environnement. Les agents mobiles concernés sont de petits systèmes embarqués limités en ressources (énergie, calcul, mémoire), comme le micro-drone utilisé dans cette thèse.

Dans ce cadre, l’estimation en temps-réel de la trajectoire de l’agent, c’est-à-dire de sa position, de sa vitesse et de son orientation par rapport à son environnement, est indispensable, et doit être réalisée avec peu de ressources. Dans certains cas, le mouvement peut être estimé à partir de signaux provenant d’une infrastructure préinstallée dans l’environnement comme le GPS. Cependant, de tels signaux sont parfois indisponibles, comme lors de la navigation à l’intérieur de bâtiments inconnus. Le mouvement de l’agent doit alors être estimé à partir d’informations disponibles localement au niveau de son microcontrôleur. Celles-ci peuvent provenir d’un modèle de la dynamique de l’agent, ainsi que de capteurs embarqués qui fournissent des mesures bruitées et partielles du mouvement.

Une première approche consisterait à embarquer sur l’agent de multiples capteurs et à appliquer des algorithmes de traitements poussés pour essayer de mitiger leurs erreurs de mesure. Toutefois, cette approche n’est pas judicieuse dans le cas d’un agent particulièrement limité en ressources, comme le micro-drone considéré dans cette thèse. Ainsi on propose une autre approche, qui consiste à tirer profit du fait que le drone soit asservi, pour estimer au mieux son mouvement, tout en limitant le nombre de capteurs à embarquer ainsi que le coût de calcul de la solution.

Pour cela, on propose tout d’abord de synthétiser un estimateur basé sur un modèle du drone asservi. On adopte alors une approche séquentielle de synthèse de correcteur et d’estimateur. On conçoit d’abord correcteur linéaire étant donné le modèle dynamique linéarisé du drone, par des méthodes d’automatique fréquentielle classiques et avancées (commande H-infini). On développe une méthode d’analyse non-linéaire afin d’évaluer le domaine d’attraction obtenu par ce correcteur sur le modèle non-linéaire du drone. Puis, on choisit un ensemble minimal de capteurs du mouvement du drone et on modélise leurs mesures. Enfin, à partir du modèle du drone asservi par le correcteur préalablement choisi et des mesures de capteurs, on synthétise un estimateur basé sur le modèle en boucle fermée du drone. Par rapport à un estimateur basé sur le modèle en boucle ouverte, on montre que notre approche permet de profiter du fait que la dynamique du drone asservi soit simplifiée pour obtenir un estimateur performant ayant un ordre de complexité faible.

Dans un second temps, on propose de rassembler la synthèse de correcteur et d’estimateur en une seule étape de synthèse conjointe pour former un bloc appelé correcteur/estimateur, qui, à partir des signaux présents sur le microcontrôleur, produit en sortie la commande du drone et l’estimée de son mouvement. Pour cela, on forme un problème d’optimisation H-2/H-infini qui permet de synthétiser un correcteur/estimateur dont la performance d’estimation est maximale et qui garantit le respect du cahier des charges en terme d’asservissement. Par rapport à l’approche séquentielle de synthèse d’un correcteur puis d’un estimateur basé sur le modèle de la boucle fermée, l’approche de synthèse conjointe permet de systématiquement réduire l’ordre de complexité de l’ensemble correcteur/estimateur. De plus, lorsque les contraintes sur l’asservissement sont suffisamment faibles, l’approche de synthèse conjointe permet de régler l’asservissement de façon à augmenter la performance d’estimation par rapport à l’approche séquentielle. En effet, on montre en simulation que l’on peut atteindre une erreur quadratique moyenne d’estimation jusqu’à 25% plus faible.

Mots-clés : Micro-drone, commande H-infini, optimisation convexe, modélisation de capteurs, radar FMCW, estimation H-2, synthèse mixte H-2/H-infini, analyse non-linéaire

3973 caractères

Title: Infrastructure-free onboard motion estimation: application to an autonomous drone

The design of mobile agents capable of autonomous navigation aims to allow them to move towards a goal while avoiding collisions with obstacles, without any prior information about their environment. The mobile agents targeted are small embedded systems limited in resources (energy, computation, memory), such as the micro-drone (UAV) used in this thesis.

In this context, it is crucial to estimate the agent's trajectory, i.e. its position, velocity and orientation with respect to its environment, and this must be done with few resources. In some cases, it is possible to estimate the motion from infrastructure signals such as GPS. However, such signals are sometimes unavailable, as when navigating inside unknown buildings. Then, the agent's motion must be estimated from information available locally on its microcontroller. This information can come from a model of the agent's dynamics, as well as from embedded sensors that provide noisy and partial measurements of the motion.

A first approach would be to embed multiple sensors on the agent and apply advanced processing algorithms to mitigate their measurement errors. However, this approach is not appropriate for a particularly resource-constrained agent, such as the micro-drone considered in this thesis. Thus, we propose another approach, which consists in taking advantage of the fact that the UAV is controlled in closed-loop to estimate its movement as well as possible, while limiting the number of sensors to be embedded as well as the computing cost of the solution.

We first design a linear controller given the linearized dynamic model of the UAV, by classical and advanced control design methods (H-infinity control). We develop a non-linear analysis method to evaluate the attraction domain of this controller on the non-linear model of the UAV. Then, we choose a minimal set of motion sensors and we model their measurements. Finally, from the controller previously chosen and the sensors model, we synthesize an estimator based on the closed-loop model of the UAV. Compared to an estimator based on the open-loop model, we show that our approach takes advantage of the fact that the dynamics of the UAV in closed-loop are simplified to obtain an estimator with good performance and a low complexity order.

In a second step, we propose to gather the synthesis of the controller and the estimator in a single joint synthesis of a block called corrector/estimator, which, from the signals present on the microcontroller, produces the output of the drone command and the estimate of its motion. For this, we form an H-2/H-infinite optimization problem that allows us to synthesize a controller/estimator for which the estimation performance is maximum and the respect of the control design specifications is guaranteed. Compared to the sequential approach of synthesizing a controller and then an estimator based on the closed-loop model, the joint synthesis allows to systematically reduce the order of complexity of the controller/estimator. Moreover, when the control design specifications are sufficiently low, the joint synthesis allows to tune the controller in order to increase the estimation performance compared to the sequential approach. Indeed, we show in simulation that we can diminish the mean square estimation error up to 25%.

Keywords: Micro-drone, H-infinity control, convex optimization, sensor modeling, FMCW radar, H-2 estimation, H-2/H-infinity mixed synthesis

3320 caractères