

## Avant-propos

L'utilisation de drones dans le secteur civil est à l'aube de l'explosion. En effet, avec un marché qui atteindra en France plus de 2 milliards d'euros à l'horizon 2015, la Direction générale de l'aviation civile (DGAC) recensait déjà, fin octobre 2012, 345 opérateurs de drones représentant au total 585 appareils. Si l'utilisation des drones dans le secteur militaire n'est pas nouvelle, celle-ci émerge tout juste pour certaines applications civiles comme par exemple la surveillance de pipelines, la protection des populations ou l'aide au traitement et à l'analyse des sols cultivés. De nouvelles applications exploitant les drones comme vecteur expérimental sont actuellement à l'étude. Parmi tant d'autres, citons leur exploitation future en aérologie et météorologie pour la compréhension et la mesure de phénomènes locaux tels que les gradients de vent ou la formation de brouillard. Il est intéressant de constater que depuis 2006, l'augmentation du nombre d'engins exploités touche principalement les mini et les micro drones qui se classent dans la catégorie des moins de 30 kg. Les appareils de cette catégorie, sur lesquels nous nous focaliserons, présentent l'avantage d'être relativement légers et facilement transportables contrairement à ceux de plus de 150 kg. Outre leur masse, les drones aériens peuvent également être classés selon leur autonomie qui conditionne leur portée d'utilisation. Il est ainsi commun de les répertorier en *Short Range* (SR), *Close Range* (CR) et *Medium Range* (MR). Malgré une variété de configurations possibles, ces engins partagent cependant plusieurs caractéristiques communes : des masses à vide et au décollage, ainsi qu'un poids et une taille limites propres à leur catégorie. La donnée de ces caractéristiques conditionne fortement le nombre et la performance des capteurs qu'il est possible d'embarquer ; en conséquence, un niveau d'autonomie et une portée seuils qui orientent l'utilisation du drone vers telle ou telle application ; enfin, des qualités de vol plus ou moins bien connues et compatibles ou non avec des vols en intérieur, en milieu encombré, en présence de vent, etc. Au-delà du concept de drone envisagé, un moyen très répandu pour en optimiser les performances consiste à travailler au développement d'une chaîne avionique spécifique qui

confèrera à l'engin un degré d'autonomie et des qualités de vol en boucle fermée en adéquation avec la ou les missions qu'il doit remplir.

De façon très concrète, ce système avionique peut se décomposer en une partie hardware (comprenant un calculateur embarqué, des capteurs, un ensemble d'actionneurs et un module de communication sol/bord) et une partie software qui regroupe :

- des algorithmes de traitement du signal qui assurent des fonctions aussi diverses que le débruitage des sorties des capteurs ou l'estimation et la reconstruction des états du drone ou d'autres paramètres de vol, à partir d'une fusion des données mesurées disponibles à bord (et souvent peu redondées), corroborées par les sorties d'un modèle mathématique de prédiction, descriptif du comportement dynamique de l'engin ;

- des algorithmes de contrôle « bas-niveau » pour le pilotage et le guidage de l'appareil en boucle fermée de sorte que celui-ci soit commandé en consigne à atteindre ;

- des algorithmes de contrôle « haut-niveau » pour la navigation, la replanification ou l'aide à la décision (IA) en l'absence d'un opérateur humain ou dans le cas de situations dégradées (rupture de COM, pannes, etc.).

Les algorithmes d'estimation, d'état ou de paramètres, et de contrôle apparaissent donc primordiaux, d'autant plus lorsque la technologie des capteurs et des actionneurs, pour des raisons de coût et d'encombrement essentiellement, ne permet pas de disposer de capacités illimitées. Ceci est particulièrement vrai dans le cas des micro et des mini drones. L'estimation permet donc de fusionner, en temps réel, les informations imparfaites provenant des différents capteurs et de fournir une estimation, par exemple de l'état du drone (orientation, vitesse, position) au calculateur embarqué où sont implémentés les algorithmes de commande de l'engin. Ce contrôle de l'appareil doit garantir sa stabilité en boucle fermée quel que soit l'ordre de consigne fourni directement par l'opérateur ou par tout système automatique de gestion du vol et, assurer que celle-ci soit correctement recopiée. Estimation et commande participent donc grandement au succès de toute mission. Une dimension extrêmement importante concerne la capacité d'emport des mini drones que nous considérons. En effet, celle-ci, relativement limitée, et couplée à la volonté de ne pas grever les budgets de développement de tout mini drone, autorise uniquement l'intégration de matériels dits à « bas-coûts ». Malgré les progrès significatifs de la miniaturisation et l'augmentation continue des capacités de calcul embarqué (voir Loi de Moore), les mini drones d'intérêt considérés ici n'embarquent donc que des capteurs aux performances limitées, dans un contexte où cette catégorie d'engins autonomes est amenée à être de plus en plus fréquemment exploitée pour remplir des missions elles-mêmes toujours plus nombreuses. Celles-ci requièrent notamment que de tels drones puissent, de manière sûre, s'insérer et partager l'espace aérien civil moyennant le passage d'une certification de leur vol au même titre que pour les avions de transport des différentes compagnies aériennes. Dès lors,

face à cet enjeu de sécurisation des vols de mini drones, la consolidation de la connaissance de l'état de l'aéronef par des techniques d'estimation devient une tâche essentielle pour en assurer le contrôle, y compris en situations dégradées (pannes capteurs, perte occasionnelle de signaux, bruits et perturbations environnantes, imperfections des moyens de mesure, etc.). Tenter de répondre à cet enjeu conduit naturellement le chercheur à s'attaquer à des problèmes relativement nouveaux, en tout cas pas forcément aussi proches de ceux qui se posent dans le secteur de l'aéronautique civile ou militaire, où le système avionique est sans commune mesure avec celui que nous présentons dans cet ouvrage. En effet, ce dernier doit être extrêmement sophistiqué pour remplir diverses fonctions à bord pour un poids et un volume les plus faibles possibles. En particulier, les algorithmes d'estimation sont soumis à de très fortes contraintes, en termes de performances bien évidemment, mais aussi de temps d'exécution, d'espace mémoire et de preuve de convergence.

Cet ouvrage tente d'apporter une solution algorithmique originale à la problématique de l'estimation de l'état d'un mini drone en vol qui soit compatible avec les exigences d'embarquabilité inhérentes au système. Il a été orienté vers les méthodes d'estimation non linéaire à base de modèles. Ce travail a tout d'abord consisté à définir une modélisation dynamique descriptive du vol des mini drones étudiés, suffisamment générique pour être exploitée pour différents types de mini drones (voilure fixe, quadricoptère, etc.). Par la suite, deux algorithmes d'estimation originaux, dénommés IUKF et  $\pi$ -IUKF, exploitant ce modèle, ont été développés avant d'être testés en simulation puis sur données réelles pour la version  $\pi$ -IUKF. Ces deux méthodes transposent le cadre générique des observateurs invariants au cas de l'estimation non linéaire de l'état d'un système dynamique par une technique de type *Unscented Kalman Filter* (UKF) qui appartient à la classe plus générale des algorithmes de filtrage non linéaire de type *Sigma Point* (SP). La solution proposée sera à l'avenir intégrée à l'avionique des mini drones de l'ENAC ; le code informatique est d'ores et déjà disponible dans l'autopilote Paparazzi.

## Organisation de l'ouvrage

Le présent ouvrage comprend 5 chapitres :

- le chapitre 1 présente le contexte dans lequel cet ouvrage a été écrit et offre un aperçu des différentes évolutions technologiques qui ont permis l'essor de la robotique aérienne dans le secteur civil. En outre, cet essor a également entraîné un certain nombre d'initiatives de développement dites Open Source dont l'objectif est de proposer un système complet de pilote automatique pour mini drones. Les motivations sont données en guise de conclusion de chapitre et discutent de la problématique de conception d'un estimateur d'état pour mini drone qui soit compatible avec les exigences d'embarquabilité inhérentes au système Open Source Paparazzi ;

- le chapitre 2 présente un état de l'art du domaine de l'estimation. Cette étude bibliographique sert de référence tout au long du rapport et détaille plus particulièrement

deux techniques d'estimation : le filtrage de Kalman et les observateurs invariants. Concernant cette dernière, nous conseillons au lecteur, peu familier avec la géométrie différentielle, de se reporter à l'annexe. C'est à partir de l'hybridation de ces deux techniques que nous avons développé puis validé deux algorithmes d'estimation non linéaire ;

– dans le chapitre 3, nous présentons les différents modèles cinématiques communément exploités pour la navigation des systèmes dynamiques. Les différents filtres estimateurs développés dans cet ouvrage ont été bâtis à partir de ces modèles génériques, qui permettent par ailleurs de prendre en compte les erreurs de nature aléatoire qui perturbent le système réel (voir imperfections de mesure). Nous avons donc mené de façon détaillée une étude d'observabilité afin d'établir si les variables d'état peuvent être reconstruites à partir des entrées connues du système et des mesures. Ainsi, nous verrons que l'établissement d'un modèle dynamique précis pour la navigation inertielle peut comporter plusieurs degrés de liberté, et qu'il est donc assujéti à un certain nombre de choix de modélisation pour garantir que le problème d'estimation reste observable ;

– à partir des modèles issus du chapitre 3, le chapitre 4 a traité au développement de principes méthodologiques originaux qui ont permis d'élaborer deux algorithmes d'estimation non linéaire, IUKF et  $\pi$ -IUKF, qui diffèrent du point de vue de leur formulation. Ceux-ci, fondés conjointement sur la théorie des observateurs invariants et sur les principes du filtrage de Kalman dit *unscented*, permettent d'apporter une solution algorithmique extrêmement intéressante aux problèmes de navigation inertielle. Ainsi, un ensemble complet de tous premiers résultats caractérisant l'IUKF permettra de conclure quant au bien-fondé de cet algorithme et de son apport tant du point de vue théorique que pratique ;

– le 5<sup>e</sup> et dernier chapitre fournit un ensemble complet de résultats pour le  $\pi$ -IUKF. La première partie propose une comparaison des performances des algorithmes SRUKF (standard) et  $\pi$ -IUKF. Cette analyse est effectuée sur la base de données simulées bruitées des modèles génériques du chapitre trois qui intègrent les imperfections des différents capteurs. Ensuite, la seconde partie du chapitre présente, toujours en se basant sur un modèle de navigation complet, plusieurs résultats expérimentaux issus de l'estimation, sur données réelles, de l'état du mini drone à partir des trois principaux algorithmes présentés dans ce mémoire : le SRUKF, le  $\pi$ -IUKF et l'observateur invariant classique. Ces résultats valident l'approche qui permet de déterminer une correction spécifique de la prédiction fournie par n'importe quelle représentation d'état non linéaire utilisée pour l'estimation, de sorte que la dynamique de l'observateur synthétisé vérifie aussi les propriétés de symétrie du système considéré.

Enfin, un ensemble d'annexes complète ce manuscrit. De nombreuses références vers ces dernières sont fournies tout au long de l'ouvrage.