

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	1
<b>Chapitre 1. La robotique aérienne : situation actuelle</b> . . . . .	5
1.1. La robotique aérienne . . . . .	5
1.1.1. L'essor des drones dans le secteur civil . . . . .	5
1.1.2. Les différentes configurations de mini drones . . . . .	8
1.2. Le projet Paparazzi . . . . .	9
1.3. Les différents moyens de mesure . . . . .	13
1.3.1. Les capteurs proprioceptifs . . . . .	13
1.3.1.1. Les gyromètres . . . . .	13
1.3.1.2. Les accéléromètres . . . . .	16
1.3.2. Les capteurs extéroceptifs . . . . .	18
1.3.2.1. Les systèmes de positionnement par satellites . . . . .	18
1.3.2.2. Les altimètres barométriques . . . . .	19
1.3.2.3. Les magnétomètres . . . . .	20
1.3.2.4. Les caméras et télémètres . . . . .	21
1.3.3. Les systèmes inertiels . . . . .	22
1.4. Motivations . . . . .	23
<b>Chapitre 2. État de l'art</b> . . . . .	25
2.1. Concepts de base . . . . .	25
2.2. Revue bibliographique . . . . .	31
2.2.1. Travaux fondateurs . . . . .	31
2.2.2. Historique . . . . .	34
2.3. Filtrage optimal des systèmes linéaires gaussiens . . . . .	38
2.3.1. Algorithme du filtre de Kalman linéaire . . . . .	38
2.3.2. Extension aux modèles non linéaires . . . . .	42
2.4. Approximation du filtrage optimal par linéarisation . . . . .	43

2.5. Approximation du filtrage optimal par discrétisation . . . . .	45
2.5.1. Prédiction et <i>sigma points</i> . . . . .	45
2.5.2. Interprétation de l'approche par <i>sigma points</i> . . . . .	46
2.5.3. <i>Scaled Unscented Kalman Filter</i> (UKF) . . . . .	50
2.6. Théorie des observateurs invariants . . . . .	52
2.6.1. Un exemple : la voiture non holonome . . . . .	57
2.6.1.1. Construction d'une erreur de sortie invariante . . . . .	61
2.6.1.2. Construction d'un repère invariant . . . . .	62
2.6.1.3. Préobservateur invariant . . . . .	64
<b>Chapitre 3. Modèles pour la navigation inertielle . . . . .</b>	<b>65</b>
3.1. Préambule : modélisation des mini drones . . . . .	65
3.2. Dérivation d'un modèle pour la navigation . . . . .	68
3.3. Problème de la navigation inertielle dite « véritable » . . . . .	71
3.4. Modélisation et identification des imperfections des capteurs inertiels . . . . .	74
3.4.1. La variance d'Allan . . . . .	75
3.4.2. Modélisation des bruits caractéristiques . . . . .	79
3.5. La navigation inertielle du pauvre : l'AHRS . . . . .	81
3.5.1. Observabilité du modèle exploité par l'AHRS . . . . .	82
3.5.2. Retour sur l'AHRS : prise en compte des erreurs de mesure . . . . .	85
3.6. L'AHRS augmenté d'un GPS et d'un baromètre : l'INS . . . . .	87
3.6.1. Observabilité des imperfections sur les mesures de l'INS . . . . .	88
<b>Chapitre 4. Les algorithmes IUKF et <math>\pi</math>-IUKF . . . . .</b>	<b>91</b>
4.1. Préambule . . . . .	91
4.2. Organisation du chapitre . . . . .	92
4.3. Systèmes invariants/équivalents . . . . .	94
4.4. Observateurs invariants : AHRS/INS . . . . .	96
4.4.1. AHRS : rappel de la modélisation . . . . .	96
4.4.2. Invariance des équations du modèle de l'AHRS . . . . .	97
4.4.3. Construction d'une erreur de sortie et d'un repère invariant . . . . .	98
4.4.4. Formulation de l'observateur invariant pour l'AHRS du pauvre . . . . .	101
4.4.5. Filtre invariant pour la problématique de l'INS . . . . .	101
4.4.6. Formulation de l'observateur invariant pour l'INS . . . . .	104
4.5. Erreur d'estimation invariante sur l'état . . . . .	106
4.6. <i>Algorithme Square-Root Unscented Kalman Filter</i> (SRUKF) . . . . .	108
4.7. Première reformulation du filtrage de Kalman <i>unscented</i> . . . . .	110
4.7.1. Principes fondateurs . . . . .	110
4.7.2. Premiers résultats et analyse . . . . .	123
4.7.3. Résumé et pseudo-codes . . . . .	131
4.8. Deuxième reformulation du filtrage de Kalman <i>unscented</i> . . . . .	140
4.8.1. Précédents travaux menés sur l'IEKF . . . . .	140
4.8.2. Algorithme $\pi$ -IUKF sur un groupe de Lie : formulation . . . . .	142

<b>Chapitre 5. Validation méthodologique, expérimentations et résultats</b>	<b>149</b>
5.1. Validation sur données simulées	150
5.1.1. Présentation des données	150
5.1.2. Étude des deux algorithmes UKF sur le modèle AHRS	153
5.1.2.1. Validation sans erreur sur l'état initial	153
5.1.2.2. Performances des deux algorithmes	155
5.1.2.3. Introduction d'une erreur initiale	156
5.1.3. Les propriétés d'invariance du $\pi$ -IUKF appliquées à l'AHRS	158
5.1.4. Étude des deux algorithmes UKF sur le modèle INS	162
5.1.4.1. Validation avec conditions initiales connues	162
5.1.4.2. Performances des deux algorithmes	163
5.1.4.3. Introduction d'une erreur initiale sur le vecteur d'état	164
5.1.5. Les propriétés d'invariance du $\pi$ -IUKF appliquées à l'INS	167
5.2. Validation sur données réelles	169
5.2.1. Outils et dispositifs expérimentaux utilisés	170
5.2.2. Identification préliminaire des imperfections	172
5.2.3. Procédure de calibration des capteurs embarqués sur l'Apogee	178
5.2.3.1. Calibration des accéléromètres	178
5.2.3.2. Calibration des magnétomètres et des gyromètres	179
5.2.4. Mise en œuvre expérimentale du $\pi$ -IUKF sur un modèle AHRS	180
5.2.5. Observateur invariant sur données réelles : méthode de réglage	183
5.2.6. Validation de l'INS sur données réelles	185
5.2.7. Analyse des performances en vitesse et position de l'INS	190
5.3. Implémentation de l'observateur invariant pour le modèle INS	194
<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>199</b>
<b>Annexe. Notions de géométrie différentielle et théorie des groupes</b>	<b>203</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>219</b>
<b>Index</b>	<b>227</b>