

Conception, Modélisation Et Commande D'Un Drone Convertible À Quatre Hélices Pivotantes

Navigation Autonome D'Un Mini-Drone Par Vision Embarquée

Gerardo FLORES

Directeurs de thèse : Rogelio LOZANO

Introduction

Il y a des missions dont la portée dépasse les capacités des drones conventionnelles car ils nécessitent non seulement la vitesse d'un avion, mais aussi de vol stationnaire.

- La surveillance des objectifs en mouvement rapide et statique.
- Identification des fissures dans les canalisations ou les ponts.
- Les fournitures médicales.



FIGURE : Le ELBIT SKYLARK et le CV-22.

Introduction

Quad-plane

Le véhicule combine les capacités du vol à haute vitesse d'un avion classique avec les capacités d'un hélicoptère en vol stationnaire grâce au pivotement des rotors.

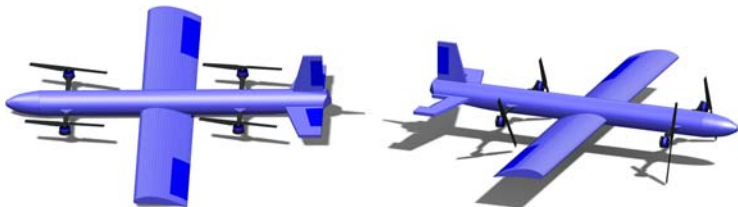


FIGURE : Modes d'opération du *Quad-plane*.

Sujets abordés

Les questions abordées au cours de la thèse

- Obtenir le modèle de véhicule et de proposer un contrôleur pour le mode hélicoptère et le mode avion.
- Étudier la dynamique du véhicule en utilisant la théorie des perturbations singulières, également, développer une loi de commande à l'aide de cette théorie.
- On étudiera la phase transitoire du drone. A savoir, la réalisation de loi de commande
- Développer un système complet de drone convertible avec la possibilité d'effectuer une tâche spécifique en utilisant la transition du vol.
- Estimer la position du drone en utilisant la vision.

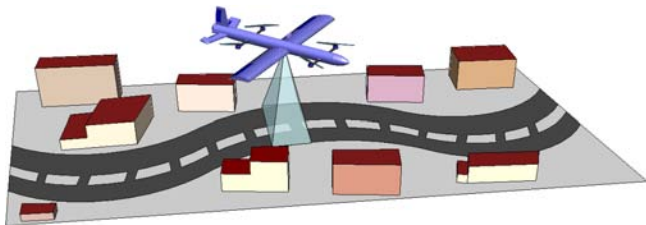
Plan

- Introduction
- Objectifs de la thèse
- Enoncé du problème
- Estimation d'état pour le drone
- Calcul d'états lorsque la route n'est pas détecté
- Stratégie de Commande
- Plate-forme Expérimentale
- Expériences en temps réel
- Conclusions

Motivation

Comment pouvons-nous effectuer une mission de suivi de route ?

En utilisant la combinaison de capteurs d'image, d'altitude et d'inertie.



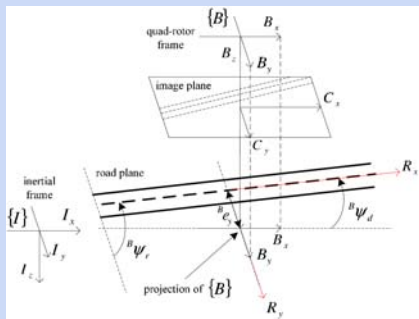
Faire face à des situations où il y a des défaillances dans le capteur d'image.
Changer entre différents contrôleurs.

Plan de la présentation

- Introduction
- Objectifs de la thèse
- Enoncé du problème
- Estimation d'état pour le drone
- Calcul d'états lorsque la route n'est pas détecté
- Stratégie de Commande
- Plate-forme Expérimentale
- Expériences en temps réel
- Conclusions

Enoncé de problème

Schéma de l'expérience



Des capteurs

Capteur d'inertie, capteur d'ultrasons, caméra.

Navigation basé sur la vision

Décollage autonome : altitude z_d .
 Estimation de l'angle de lacet ψ .
 La distance e_y est maintenu petit.
 La vitesse d'avance \dot{x} constante.
 Atterrissage autonome.

Objectif

Suivre une route sans connaissance à priori sur celle-ci.
 Robuste aux perturbations externes c'est à dire lorsque l'image de la route est temporairement perdue.

Plan de la présentation

- Introduction
- Objectifs de la thèse
- Enoncé du problème
- Estimation d'état pour le drone
- Calcul d'états lorsque la route n'est pas détecté
- Stratégie de Commande
- Plate-forme Expérimentale
- Expériences en temps réel
- Conclusions

Estimation d'état pour le drone

Détection de route sur la base de la méthode de transformée de Hough

$$x_l^i = x_g + \Gamma(-\sin(\theta)) \quad ; \quad y_l^i = y_g + \Gamma \cos(\theta) \quad (1)$$

$$x_F^i = x_g - \Gamma(-\sin(\theta)) \quad ; \quad y_F^i = y_g - \Gamma \cos(\theta) \quad (2)$$

Des lignes pour une représentation unique

$$\left(x_l = \frac{x_l^i}{i}, y_l = \frac{y_l^i}{i} \right) \quad ; \quad \left(x_F = \frac{x_F^i}{i}, y_F = \frac{y_F^i}{i} \right) \quad (3)$$

Calcul d'angle de lacet

$$\psi_r = \arctan(y_F - y_l, x_F - x_l) \quad (4)$$

$$\psi_d = \psi_r + \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

Estimation d'état pour le drone

Calcul de la position latérale

$$e_x^c = \left(\frac{x_I - x_F}{2} + x_F \right) - \frac{c_w}{2} \quad (6)$$

c_w : largeur de l'image (en pixels). Position latérale du drone par rapport à la route :

$$e_y = z \frac{e_x^c}{\alpha_x} \quad (7)$$

Vitesses de translation

Algorithme de flot optique : Le méthode de Lucas-Kanade combinée avec le détecteur de région Harris.

$$\bar{O}\bar{F}_x = \bar{V}_{OF_x} + K_x \bar{V}_{OF_z} + \bar{R}_{OF_x} \Rightarrow -z \frac{\bar{V}_{OF_x}}{\alpha_x} = \dot{x} \quad (8)$$

$$\bar{O}\bar{F}_y = \bar{V}_{OF_y} + K_y \bar{V}_{OF_z} + \bar{R}_{OF_y} \Rightarrow -z \frac{\bar{V}_{OF_y}}{\alpha_y} = \dot{y} \quad (9)$$

Plan de la présentation

- Introduction
- Objectifs de la thèse
- Enoncé du problème
- Estimation d'état pour le drone
- Calcul d'états lorsque la route n'est pas détecté
- Stratégie de Commande
- Plate-forme Expérimentale
- Expériences en temps réel
- Conclusions

Calcul d'angle de lacet et de la position latérale lorsque la route n'est pas détecté

Mesures basées sur le système de vision

Si la route n'est pas sur le champ de vision (FOV) : l'estimation n'est pas possible.

Il faut définir un signal binaire $s : [0, \infty) \rightarrow \{0, 1\}$

$$s(t) := \begin{cases} 0 & \text{pas de détection de ligne à l'instant } t \\ 1 & \text{la caméra détecte la ligne à l'instant } t \end{cases} \quad (10)$$

la commutation entre deux modes, destiné à calculer les états du véhicule.

Des événements temporels

T_{s0} : le temps lorsque le signal binaire passe de 1 à 0.

T_{s1} : le temps lorsque le signal binaire passe de 0 à 1.

Calcul d'angle de lacet et de la position latérale lorsque la route n'est pas détecté

Calcul d'angle de lacet en utilisant la signal de commutation $s(t)$

$$\psi_s(t) = s(t)\psi_d(t) + (1 - s(t))\psi_{IMU}(T_{s0}) \quad (11)$$

$\psi_d(t)$: angle de lacet mesuré par le système de vision.

$\psi_{IMU}(T_{s0})$: angle de lacet mesuré par l'IMU à T_{s0} .

$\psi_s(t)$: angle de lacet désiré qui sera utilisé dans la loi de commande.

L'équation (11) permet de commuter entre

- Angle de lacet obtenue du capteur d'image.
- Angle de lacet obtenue du capteur inertielle lorsque le chemin n'est pas détecté par la caméra.

Calcul d'angle de lacet et de la position latérale lorsque la route n'est pas détecté

Calcul de la position latérale en utilisant la signal $s(t)$

$$e_{ys}(t) = s(t)e_y(t) + (1 - s(t)) \left(e_y(T_{s0}) + \int_{T_{s0}}^{T_{s1}} \dot{y}(t) dt \right) \quad (12)$$

$e_y(t)$: obtenue à partir du capteur d'image.

$e_y(T_{s0})$: mesure de la position latérale à l'instant T_{s0} .

$\dot{y}(t)$: vitesse latérale obtenue à partir du flot optique.

L'équation (12) permet la commutation entre :

La position latérale obtenue lorsque le chemin est détecté par la caméra.
 Approche alternative en utilisant l'information du position à l'instant T_{s0} et l'intégration de la vitesse de translation \dot{y} pendant le temps dans laquelle le chemin n'est pas détecté par l'algorithme de vision (le temps entre T_{s0} et T_{s1}).

Plan de la présentation

- Introduction
- Objectifs de la thèse
- Enoncé du problème
- Estimation d'état pour le drone
- Calcul d'états lorsque la route n'est pas détecté
- **Stratégie de Commande**
- Plate-forme Expérimentale
- Expériences en temps réel
- Conclusions

Le modèle dynamique du drone

Le modèle mathématique normalisé

$$\begin{aligned}
 \ddot{x} &= -u_1 (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) \\
 \ddot{y} &= -u_1 (\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) \\
 \ddot{z} &= 1 - u_1 (\cos \phi \cos \theta) \\
 \ddot{\theta} &= u_2 \\
 \ddot{\phi} &= u_3 \\
 \ddot{\psi} &= u_4
 \end{aligned} \tag{13}$$

Forme d'espace d'état

$$\begin{array}{l|l}
 x_1 = x & z_1 = \theta \\
 x_2 = \dot{x} & z_2 = \dot{\theta} \\
 x_3 = y & z_3 = \phi \\
 x_4 = \dot{y} & z_4 = \dot{\phi} \\
 x_5 = z & z_5 = \psi \\
 x_6 = \dot{z} & z_6 = \dot{\psi}
 \end{array} \tag{14}$$

En utilisant (13) et (14)

$$\begin{array}{l|l}
 \dot{x}_1 = x_2 & \dot{z}_1 = z_2 \\
 \dot{x}_2 = -z_1 u_1 & \dot{z}_2 = u_2 \\
 \dot{x}_3 = x_4 & \dot{z}_3 = z_4 \\
 \dot{x}_4 = z_3 u_1 & \dot{z}_4 = u_3 \\
 \dot{x}_5 = x_6 & \dot{z}_5 = z_6 \\
 \dot{x}_6 = 1 - u_1 & \dot{z}_6 = u_4
 \end{array}$$

La mission de la détection de route

Les modes de fonctionnement

Take-off mode : obtenir l'altitude désirée z_d .

y -alignment mode (y AL) : maintenir un trajet de vol alignée par rapport à la route.

ψ -alignment mode (ψ AL) : aligner l'angle de lacet par rapport à la direction de la route.

Navigation mode : vol d'avancement à vitesse constante.

Landing mode : le véhicule atterri de façon autonome.

La mission de la détection de route

Lois de commande dans chaque mode de fonctionnement

L'ensemble du système est constitué de deux sous-systèmes, la dynamique de l'orientation et de la dynamique de position, avec une separation d'échelles de temps entre eux.

Système de contrôle hiérarchique

Le commande de positionnement fournit les références pour les angles d'orientation (θ_d , ϕ_d et ψ_d), qui doivent être suivis par les contrôleurs d'orientation.

La dynamique d'erreur $\tilde{x}_i = x_i - x_{i_d}$ et $\tilde{z}_i = z_i - z_{i_d}$, avec $i \in \{1, \dots, 6\}$.

La mission de la détection de route

Loi de commande pour la dynamique d'orientation

Commande par mode de glissement intégrale (Integral sliding mode control ISMC).

L'équation d'erreur d'angle de tangage : $\tilde{\theta}_1 = \theta_1 - \theta_{1d}$.

$$\varphi(\theta) = \ddot{\tilde{\theta}}_1 + 2\lambda\dot{\tilde{\theta}}_1 + \lambda^2 \int_0^t \tilde{\theta}_1(\tau) d\tau \quad (15)$$

$$\theta_1 = u_{2eq} - K \text{sign}(\varphi) \quad (16)$$

où $K > 0$.

Loi de commande pour la dynamique de position

Mouvement sur $x - y$: Le vecteur de poussée doit être orientée vers le sens du déplacement souhaité. θ_d et ϕ_d : contrôleurs virtuels pour la dynamique de position.

Le problème du suivi d'une route

Le contrôle de la position latérale dépend de la détection de la route

$$\phi_1 = \frac{1}{u_1}(-k_{L3}y_1 - k_{L4}y_2 + k_{LI}\xi) \quad (17)$$

où $\dot{\xi} = y_{1d} - y_1 = -y_1$. Soit $e_y = (y_{d1}, y_{d2}, \xi)^T$, le système en boucle fermée :

$$\begin{aligned} \dot{y}_{d1} &= y_{d2} \\ \dot{y}_{d2} &= -k_{L3}y_{d1} - k_{L4}y_{d2} - k_{LI}\xi \\ \dot{\xi} &= -y_{d1} \end{aligned} \quad (18)$$

La route est détectée - les gains réglés à se comporter comme PD commande

Nous avons écrit (18) comme $\dot{e}_y = A_L e_y$ où

$$A_L = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -k_{L3} & -k_{L4} & k_{LI} \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

La route n'est pas détectée - les gains réglés à se comporter comme PI

Nous avons écrit (18) comme $\dot{e}_y = A_{NL} e_y$ où

$$A_{NL} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -k_{NL3} & -k_{NL4} & k_{NLI} \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Plan de la présentation

- Introduction
- Objectifs de la thèse
- Enoncé du problème
- Estimation d'état pour le drone
- Calcul d'états lorsque la route n'est pas détecté
- Stratégie de Commande
- Plate-forme Expérimentale
- Expériences en temps réel
- Conclusions

Plate-forme Expérimentale

Le drone *Quad-Plane*



Dimension : 40 cm.

Poids : 1.1 kg.

Autonomie : 15 min.

Carte de contrôle IGEPv2.

Microstrain[®] IMU : 100 Hz

SRF10 : altitude 2 m.

Système de vision embarqué : DSP à 100 Hz.

PlayStation[®] Eye camera.

OpenCV :

Détecteur de région Harris.

Pyramidal Lucas-Kanade,

Détecteur de ligne de Hough.

Station au sol

Wireless link.

GUI pour contrôler et commander le drone.

Mode de contrôle manuel :

PlayStation[®] 3 joystick,

BlueTooth[™].

Plan de la présentation

- Introduction
- Objectifs de la thèse
- Enoncé du problème
- Estimation d'état pour le drone
- Calcul d'états lorsque la route n'est pas détecté
- Stratégie de Commande
- Plate-forme Expérimentale
- Expériences en temps réel
- Conclusions

Expériences en temps réel

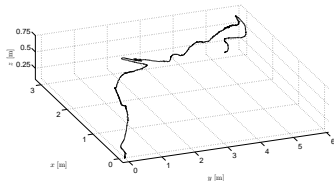
Suivi de trajectoire

Mission autonome, modèle de route ayant deux courbes lisses, et en présence de perturbations extérieures.

Expériences

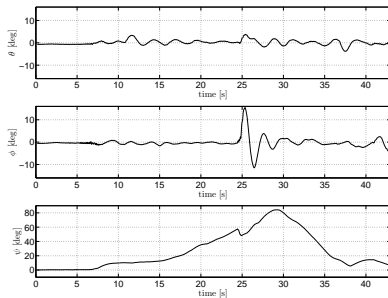
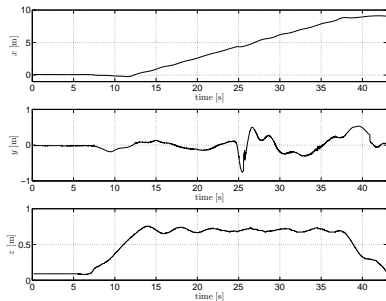


Chemin 3D



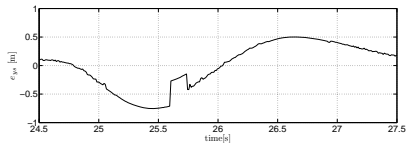
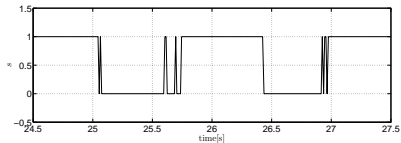
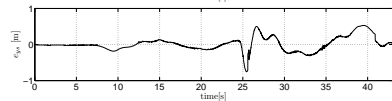
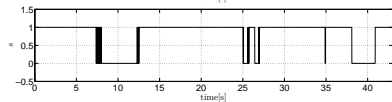
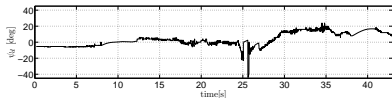
Expériences en temps réel

Position et les angles d'Euler



Expériences en temps réel

Signaux de commutation



Plan de la présentation

- Introduction
- Objectifs de la thèse
- Enoncé du problème
- Estimation d'état pour le drone
- Calcul d'états lorsque la route n'est pas détecté
- Stratégie de Commande
- Plate-forme Expérimentale
- Expériences en temps réel
- Conclusions

Conclusions

Navigation autonome par vision embarquée

L'estimation et le suivi d'une route, sans connaissance a priori de la route.
Faire face à des instants lorsque la route n'est pas détecté par le système de vision.

Contrôleur hiérarchique

Commandes de positionnement fournir des références pour les contrôleurs de l'attitude.

Stratégie de commutation

États : en combinaison de capteurs d'image et capteurs inertiels.
Commande : afin de stabiliser la position latérale du drone.

Les travaux futurs

Faire des expériences sur une route réelle. Faire l'algorithme de vision robuste aux changements d'éclairage

Publications

Chapitres de livre

- L1 GERARDO FLORES, J. Guerrero, J. Escareño and Rogelio Lozano. "Modeling and Control of mini UAV", in *Flight formation control*, edited by J. Guerrero and Rogelio Lozano, John Wiley and Sons, 2012.

Revues

- J1 GERARDO FLORES, J. Escareño, R. Lozano and S. Salazar. "Quad-Tilting Rotor Convertible MAV : Modeling and Real-Time Hover Flight Control", **Journal of Intelligent and Robotic Systems**, vol. 65, no. 1-4, p. 457-471, 2012.
- J2 L. García, GERARDO FLORES, G. Sanahuja and R. Lozano, "Quad Rotorcraft Switching Control : An Application for the Task of Path Following", **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 2012, under revision.
- J3 J. Balderas, GERARDO FLORES, L. García and R. Lozano, "Tracking a Ground Moving Target with a Quadrotor Using Switching Control", **Journal of Intelligent and Robotic Systems**, DOI : 10.1007/s10846-012-9747-9, 2012.

Conférences Internationales

- C1 GERARDO FLORES, J. Escareño, S. Salazar and R. Lozano, "Quad-Tilting Rotor Convertible MAV : Modeling and Real-time Hover Flight Control", International Conference on Unmanned Aircraft Systems (**ICUAS'11**), May 24-27, 2011, Denver, Colorado, USA.
- C2 J. Balderas, GERARDO FLORES, L. García and R. Lozano, "Tracking a Ground Moving Target with a Quadrotor Using Switching Control", International Conference on Unmanned Aircraft Systems (**ICUAS'12**), Jun 12-15, 2012, Philadelphia, PA.
- C3 L. García, GERARDO FLORES, G. Sanahuja and R. Lozano, "Quad-Rotor Switching Control : An Application for the Task of Path Following", in Proc. IEEE American Control Conference (**ACC'12**), Montréal, Canada, Jun. 2012, pp. 4637-4642.
- C4 GERARDO FLORES, L. García, G. Sanahuja and R. Lozano, "PID Switching Control for a Highway Estimation and Tracking Applied on a Convertible Mini-UAV", in Proc. IEEE Conference on Decision and Control (**CDC'12**), Maui, HI, USA, Dec. 2012, to be published.
- C5 GERARDO FLORES and R. Lozano, "Transition Flight Control of the Quad-Tilting Rotor Convertible MAV ", in Proc. IEEE American Control Conference (**ACC'13**), Washington, DC, Jun. 2013, under revision.
- C6 GERARDO FLORES and R. Lozano, "Lyapunov-based Controller using Singular Perturbation Theory : An Application on a mini-UAV", in Proc. IEEE American Control Conference (**ACC'13**), Washington, DC, Jun. 2013, under revision.
- C7 GERARDO FLORES, J. Escareño and R. Lozano, "Quadrotor MAV Having 1DOF Manipulator : Rotational Modeling and Switching-based Control ", in Proc. IEEE American Control Conference (**ACC'13**), Washington, DC, Jun. 2013, under revision.
- C8 GERARDO FLORES, G. Sanahuja and R. Lozano, "Lyapunov-Based Switching Control for a Road Estimation and Tracking Applied on a Convertible MAV ", in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (**ICRA'13**), Kongresszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, May. 2013, under revision.

Merci