

Projet Recherche et Ingénierie : Etude et réalisation d'un drone quadricoptère

Joyce SUDI

Institut National des Sciences Appliquées de Lyon - INSA Lyon

Laboratoire Ampère - CNRS UMR 5005

Février 2023

Tuteurs scientifiques: Eric Bideaux, Paolo Massioni / Jury: Arnaud Lelevé

Sommaire

1 Introduction

- Contexte et objectifs
- Applications
- État de l'art

2 Dynamique du véhicule

- Orientation et repères de référence
- Les angles d'Euler
- Les équations du mouvement

3 Réalisation du prototype

4 Modélisation et contrôle avec Simulink

- Modélisation Simulink du quadricoptère
- Contrôleur PID
- Implémentation

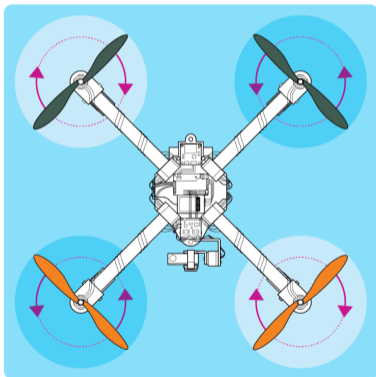
5 Conclusion et perspectives

- Conclusion
- Perspectives

6 Bibliographie

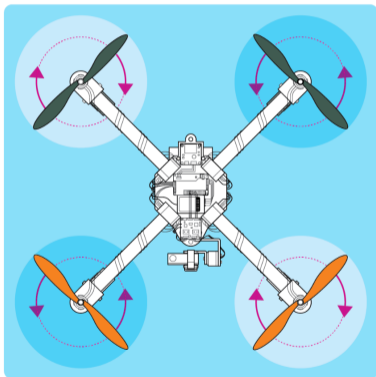
Introduction

Introduction



- 1** Un quadricoptère est un véhicule aérien comportant quatre rotors lui permettant de voler.
- 2** Les quadricoptères font partie de la catégorie des véhicules à décollage et atterrissage verticaux (VTOL - Vertical Take-off and Landing Aircraft)

Introduction



- 1** Un quadricoptère est un véhicule aérien comportant quatre rotors lui permettant de voler.
- 2** Les quadricoptères font partie de la catégorie des véhicules à décollage et atterrissage verticaux (VTOL - Vertical Take-off and Landing Aircraft)

Contexte et objectifs



- 1 Mise en place d'un nouveau support de travaux pratiques pour le cours « Dynamique et contrôle des systèmes aérospatiaux » afin d'illustrer la dynamique du vol des véhicules autonomes
- 2 Les objectifs :
 - Modéliser et simuler la dynamique du vol du quadricoptère
 - Réaliser et tester le prototype réel
 - Développer des premières lois de commande

Contexte et objectifs



- 1 Mise en place d'un nouveau support de travaux pratiques pour le cours « Dynamique et contrôle des systèmes aérospatiaux » afin d'illustrer la dynamique du vol des véhicules autonomes
- 2 Les objectifs :
 - Modéliser et simuler la dynamique du vol du quadricoptère
 - Réaliser et tester le prototype réel
 - Développer des premières lois de commande

Applications

- 1 La recherche et le sauvetage (lors des catastrophes naturelles, incendies et sinistres)
- 2 L'inspection des sites dangereux
- 3 La cartographie 3D des bâtiments ou des sites
- 4 Les missions de reconnaissance
- 5 La surveillance aérienne
- 6 Le transport
- 7 La prise de vue aérienne (photographie, cinéma, concerts et événements sportifs), etc...



The view from inside a disaster zone: Lessons learned from the Surfside, Florida, Collapse - Robin Murphy, Texas A&M University

État de l'art : Les questions de recherche

Q1 Comment modéliser la dynamique de vol d'un drone?

Q2 Comment contrôler cette dynamique fortement non-linéaire ?

Q1 Comment modéliser la dynamique de vol d'un drone?

- Dérivation des équations dynamiques du véhicule à partir des équations de Newton-Euler et/ou des équations d'Euler-Lagrange
 - Luukkonen, *Modelling and control of quadcopter*
- La prise en compte de la résistance de l'air et des interactions dynamiques complexes comme les effets aérodynamiques et le battement des pales.
- Approche matricielle pour la dérivation des équations de la dynamique du véhicule.
 - Hossain, Rideout, and Krouglicof, *Bond graph dynamic modeling and stabilization of a quad-rotor helicopter*

Q2 Comment contrôler cette dynamique fortement non-linéaire ?

- Plusieurs stratégies de contrôle ont été élaborées et étudiées :
 - les contrôleurs PID
 - Ferry, *Quadcopter Plant Model and Control System Development With MATLAB/Simulink Implementation*
 - Les contrôleurs à mode glissant
 - Le contrôleur LQR
 - Le contrôle de linéarisation par rétroaction
 - Lee, Kim, and Sastry, *Feedback linearization vs. adaptive sliding mode control for a quadrotor helicopter.*

Dynamique du véhicule

Orientation et repères de référence

- Le repère inertiel : considéré fixe par rapport à la Terre et les coordonnées sont souvent basées sur les directions cardinales.
- Le repère lié au corps solide : fixe par rapport au corps avec ses axes de coordonnées (b_1 , b_2 , b_3) alignés avec la structure.

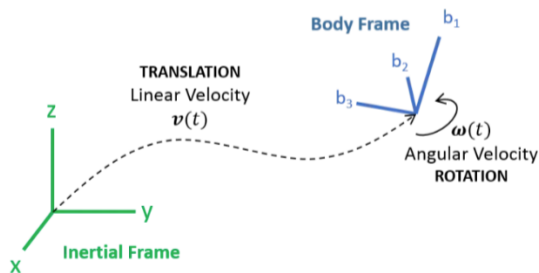


Figure: Repère inertiel et repère lié au solide

Configurations et orientations des axes de rotation du repère fixé au corps

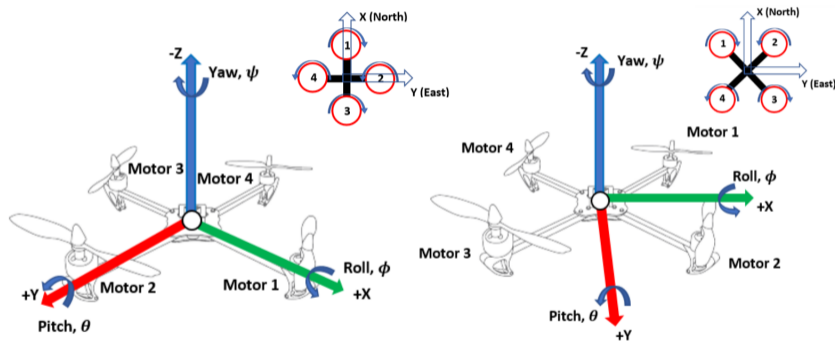


Figure: Différentes configurations de l'orientation du quadricoptère : configuration en "+" à gauche et configuration en "x" à droite. (Ferry, 2017)

Les angles d'Euler

- Les angles d'Euler permettent de définir l'orientation finale du véhicule par rapport au référentiel du corps.

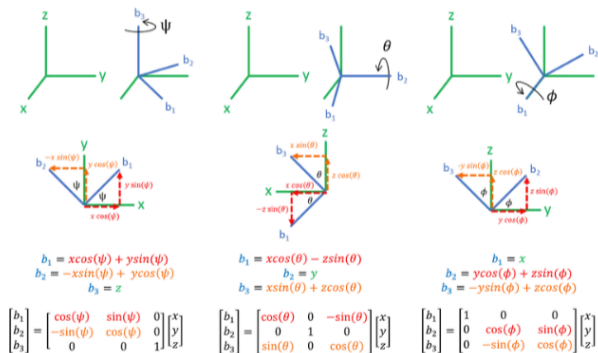


Figure: Les angles d'Euler (Usman, 2020)

Les angles d'Euler

Matrice de transformation C_n^b du repère inertiel au repère lié au corps

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = C_n^b \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cos(\Psi) & \cos(\theta) \sin(\Psi) & -\sin(\theta) \\ -\cos(\phi) \sin(\Psi) + \cos(\Psi) \sin(\theta) \sin(\phi) & \cos(\Psi) \cos(\phi) + \sin(\theta) \sin(\phi) \sin(\Psi) & \cos(\theta) \sin(\phi) \\ \sin(\Psi) \sin(\phi) + \cos(\Psi) \cos(\phi) \sin(\theta) & -\sin(\phi) \cos(\Psi) + \cos(\phi) \sin(\theta) \sin(\Psi) & \cos(\theta) \cos(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Les équations du mouvement

- Quelques hypothèses ont été formulées:
 - Le drone est une structure rigide
 - La structure du drone et les composants sont symétriques.
 - Le centre de gravité et l'origine du cadre du drone coïncident.
 - La poussée et la traînée sont proportionnelles au carré de la vitesse de l'hélice.
 - Il n'y a pas de perturbations externes au quadricoptère telles que le vent, la température, etc.

Les équations du mouvement

Symbole	Désignation	Unités
V^b Vitesses linéaires dans le repère lié au solide		
u	vitesse longitudinale	m/s
v	vitesse latérale	m/s
w	vitesse normale	m/s
W^b Vitesses angulaires dans le repère lié au solide		
p	vitesse angulaire de roulis	rad/s
q	vitesse ang. de tangage	rad/s
r	vitesse angulaire de lacet	rad/s
X Position dans le repère inertiel		
x	position sur l'axe x	m
y	position sur l'axe y	m
z	position sur l'axe z	m
Les angles d'Euler (orientation dans le repère lié au corps)		
ϕ	angle de roulis	rad
θ	angle de tangage	rad
ψ	angle de lacet	rad
Vitesses de rotation des moteurs		
ω_i	vitesse de rotation du moteur i	rad/s
Moments		
L	moment angulaire autour de x	Nm
M	moment angulaire autour de y	Nm
N	moment angulaire autour de z	Nm

Table: Les différentes variables du modèle

Les équations du mouvement

La seconde loi du mouvement de Newton

$$F = \frac{dp}{dt} = m \frac{dv}{dt} = ma$$

$$M = \frac{dH}{dt} = I \frac{d\omega}{dt} = I\Omega$$

- F : force
- p : quantité de mouvement
- H : moment angulaire
- Ω : accélération angulaire

Forces et moments extérieurs

La poussée

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum \omega_i^2 \end{bmatrix}$$

- b [kg.m] : constante de dimension appropriée, coefficient de poussée
- ω_i : vitesse de rotation du moteur i

Forces et moments extérieurs

Moments de roulis, de tangage et de lacet

$$L = bl(F_1 - F_2 - F_3 + F_4)$$

$$M = bl(-F_1 + F_2 - F_3 + F_4)$$

$$N = d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2)$$

- b [kg.m]: constante de dimension appropriée, coefficient de poussée
- d [kg.m] : constante de dimension appropriée, coefficient de traînée
- ω_i : vitesse de rotation du moteur i

Forces et moments extérieurs

Force de gravité

$$F_g^n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix}$$

$$F_g^b = \begin{bmatrix} -mg \sin(\theta) \\ mg \sin(\phi) \cos(\theta) \\ mg \cos(\phi) \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

- F_g^n : force de gravité exprimée dans le repère inertiel
- F_g^b : force de gravité exprimée dans le repère du corps

Matrices d'inertie

- Nous avons supposé que notre quadricoptère est symétrique.

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix}$$

Les équations du mouvement

Accélération linéaires et Équation du mouvement en translation

$$\dot{V}_b = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix}^b + \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}^b = \begin{bmatrix} \dot{u} + qw - rv \\ \dot{v} + ru - pw \\ \dot{w} + pv - qu \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -mg \sin(\theta) \\ mg \sin(\phi) \cos(\theta) \\ -F_1 - F_2 - F_3 - F_4 + mg \cos(\phi) \cos(\theta) \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} \dot{u} + qw - rv \\ \dot{v} + ru - pw \\ \dot{w} + pv - qu \end{bmatrix}$$

Les équations du mouvement

Accélération angulaire et Équation du mouvement en rotation

$$M = I^b \dot{\omega}_n^b + \omega_n^b \times I^b \omega_n^b$$

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx} \dot{p} \\ I_{yy} \dot{q} \\ I_{zz} \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -I_{yy}qr + I_{zz}qr \\ I_{xx}pr - I_{zz}pr \\ -I_{xx}pq + I_{yy}pq \end{bmatrix}$$

Les équations du mouvement

Les vitesses angulaires et les angles d'Euler

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\phi & s_\phi \\ 0 & -s_\phi & c_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\theta & 0 & -s_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ s_\theta & 0 & c_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\phi & s_\phi \\ 0 & -s_\phi & c_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{\psi}s_\theta \\ \dot{\psi}c_\theta s_\phi \\ \dot{\psi}c_\phi c_\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta}c_\phi \\ -\dot{\theta}s_\phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Les équations du mouvement du quadricoptère

$$\dot{u} = -g \sin(\theta) + rv - qw \quad (1)$$

$$\dot{v} = g \sin(\phi) \cos(\theta) - ru + pw \quad (2)$$

$$\dot{w} = \frac{1}{m} (-F_z) + g \cos(\phi) \cos(\theta) + qu - pv \quad (3)$$

$$\dot{p} = \frac{1}{I_{xx}} (L + (I_{yy} - I_{zz}) qr) \quad (4)$$

$$\dot{q} = \frac{1}{I_{yy}} (M + (I_{zz} - I_{xx}) pr) \quad (5)$$

$$\dot{r} = \frac{1}{I_{zz}} (N + (I_{xx} - I_{yy}) pq) \quad (6)$$

$$\dot{\phi} = p + (q \sin \phi + r \cos \phi) \tan \theta \quad (7)$$

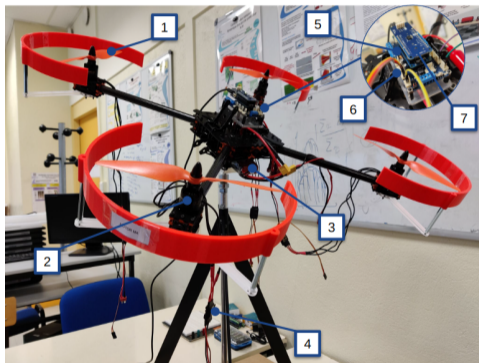
$$\dot{\theta} = q \cos \phi - r \sin \phi \quad (8)$$

$$\dot{\psi} = (q \sin \phi + r \cos \phi) \sec \theta \quad (9)$$

$$\dot{h}^E = -s_\theta u^b + s_\phi c_\theta v^b + c_\phi c_\theta w^b \quad (10)$$

Réalisation du prototype

Réalisation du quadricoptère : les composants



Repère	Désignation	Qté
-	Cadre/Structure reconfigurable	1
1	Hélice	4
2	Moteurs à courant continu sans balais	4
3	Batterie	1
4	Contrôleur électronique de vitesse	4
5	Microcontrôleur	1
6	Carte d'extension pour les moteurs	1
7	Centrale inertielle	1

Table: Liste des composants

Figure: Composants du quadricoptère

Banc d'essai à 4 degrés de liberté pour quadricoptère

- Ce banc de test permet de tester quatre degrés de libertés du mouvement du drone :
 - L'altitude z
 - Le roulis
 - Le tangage
 - Le lacet

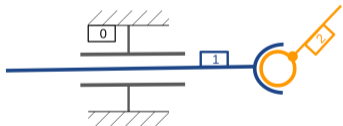


Figure: Schéma cinématique du banc d'essai
 - Les repères 0 = le bâti, 1 = le coulisseau et 2 = la pièce de fixation du drone



Figure: Banc d'essai à 4 degrés de liberté

Modélisation et contrôle avec Simulink

Modélisation Simulink du quadricoptère

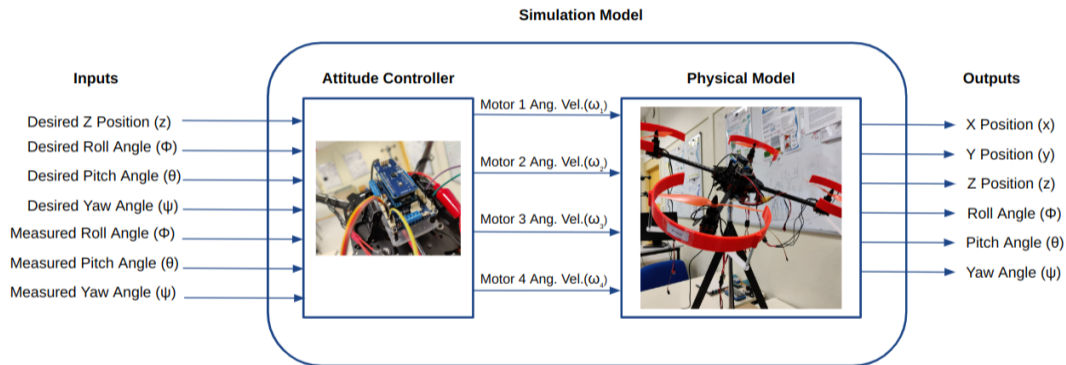


Figure: Modèle de simulation du quadricoptère

Les paramètres du modèle

Paramètre	Désignation	Valeur	Unité
m	Masse	2.0878	kg
g	Gravité (accél. de la pesanteur)	9.81	m/s ²
l	Distance CG - centre d'un rotor	0.32	m
I_{xx}	Moment d'inertie autour de l'axe x	0.07989	kg.m ²
I_{yy}	Moment d'inertie autour de l'axe y	0.07989	kg.m ²
I_{zz}	Moment d'inertie autour de l'axe z	0.15594	kg.m ²
I_r	Moment d'inertie de l'hélice /axe z	0.04439	kg.m ²
b	Coefficient de poussée	$3.59 \cdot 10^{-5}$	kg.m
d	Coefficient de traînée	$2.0810 \cdot 10^{-6}$	kg.m
A_x	Résistance de l'air suivant l'axe x	0.1	kg/s
A_y	Résistance de l'air suivant l'axe y	0.1	kg/s
A_z	Résistance de l'air suivant l'axe z	0.1	kg/s

Table: Paramètres du modèle du quadricoptère

Le modèle physique

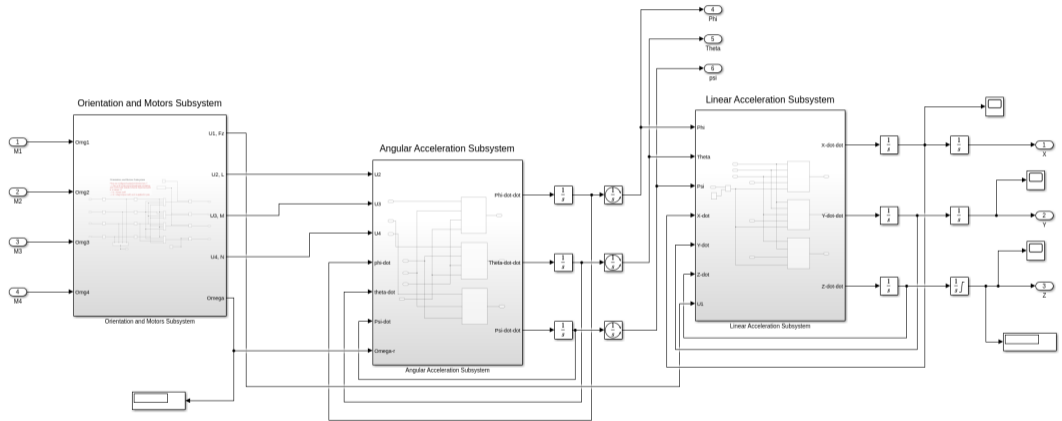


Figure: Les différents sous-systèmes du modèle physique

Vérification du modèle

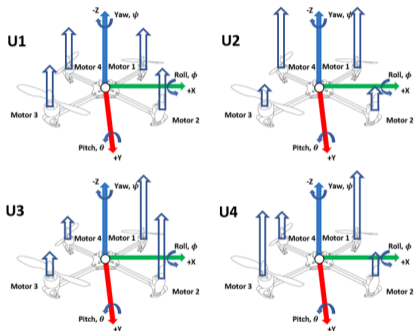


Figure: comportements souhaités

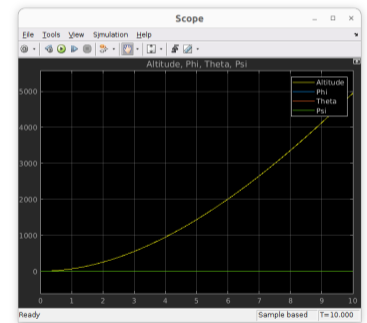


Figure: Vérification de la prise d'altitude

Vérification du modèle

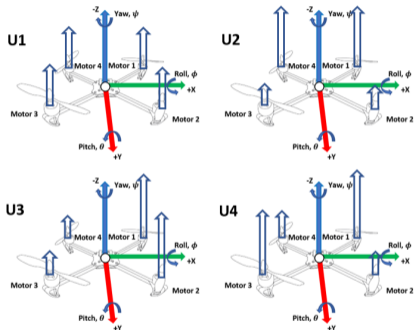


Figure: comportements souhaités

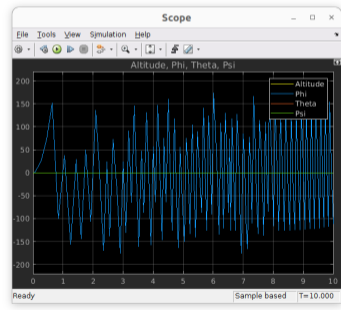
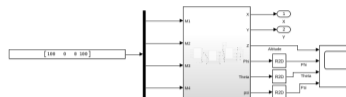


Figure: Vérification du mouvement de roulis

Contrôleur PID

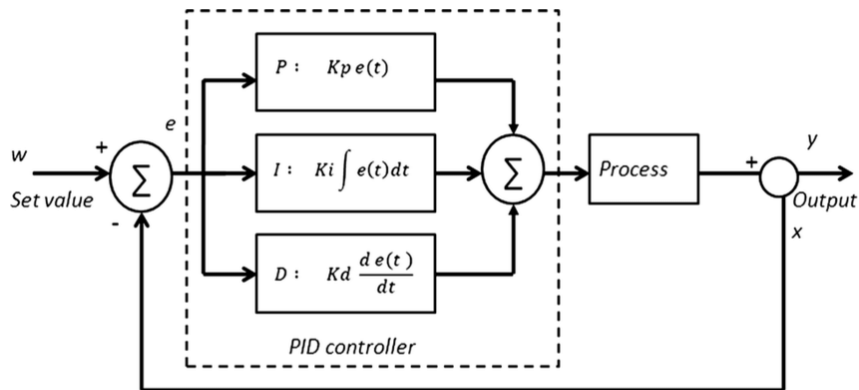


Figure: Schéma-bloc du contrôleur PID

Le contrôleur d'attitude

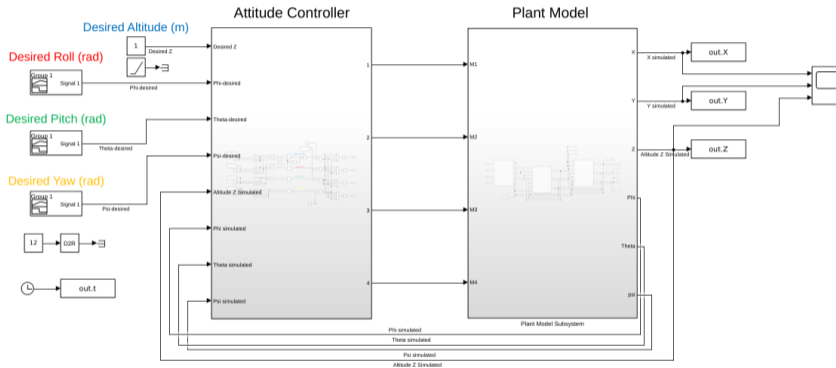


Figure: Le système de contrôle en boucle fermée

Le contrôleur d'attitude

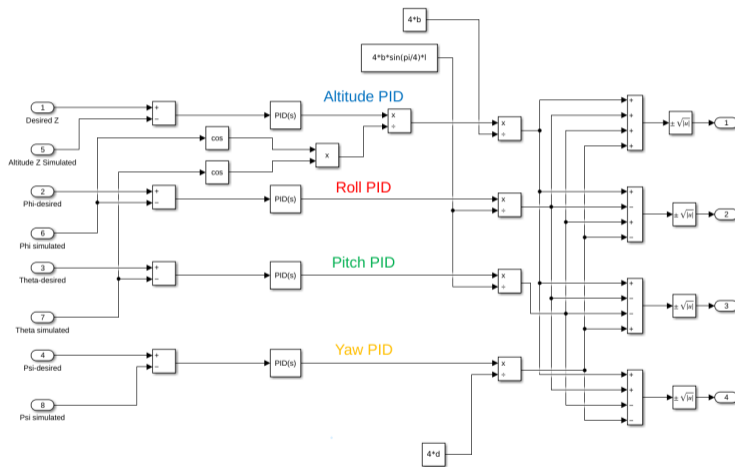


Figure: Le contrôleur d'Attitude pour la simulation

Réglage du PID pour le contrôle de l'altitude

K_p	7.4
K_i	5.5
K_d	4.4

Table: Les valeurs des gains du PID pour le contrôle de l'altitude

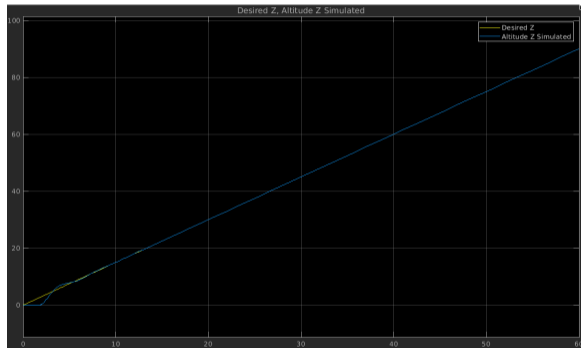


Figure: Réponse du système à une rampe - réglage du PID pour le contrôle d'altitude

Réglage du PID pour le roulis et le tangage

K_p	0.055
K_i	0.00002
K_d	0.11

Table: Les valeurs des gains du PID pour le contrôle de l'angle de roulis et de tangage

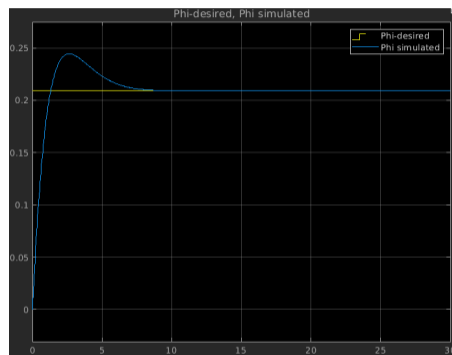


Figure: Réponse du système à un angle échelon de 12 degrés en roulis - réglage du PID pour le contrôle de l'angle de roulis

Réglage du PID pour le lacet

K_p	0.1
K_i	0.0001
K_d	0.2

Table: Les valeurs des gains du PID pour le contrôle de l'angle de lacet

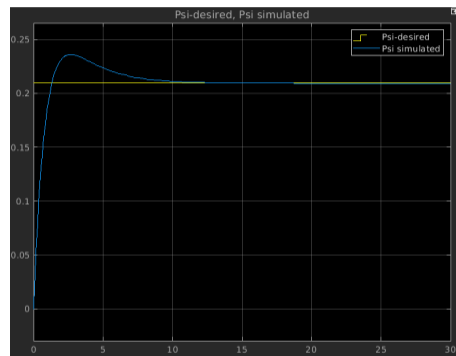


Figure: Réponse du système à un angle échelon de 12 degrés en lacet - réglage du PID pour le contrôle de l'angle de lacet

Modèle Simulink pour l'implémentation sur le drone

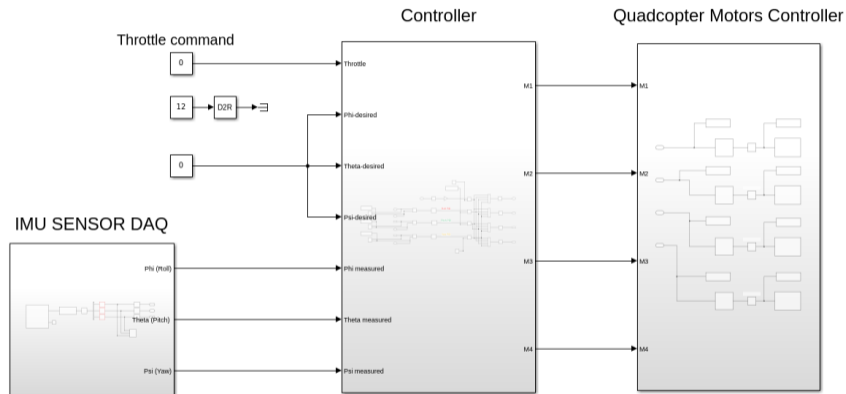


Figure: Modèle Simulink pour l'implémentation sur le drone

Le sous-système pour l'acquisition de données inertielles

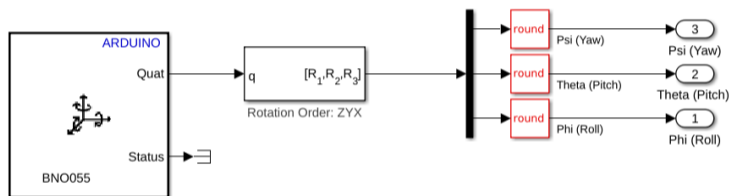


Figure: Le sous-système IMU SENSOR DAQ pour l'acquisition de données du capteur inertielle

Le contrôleur pour l'implémentation

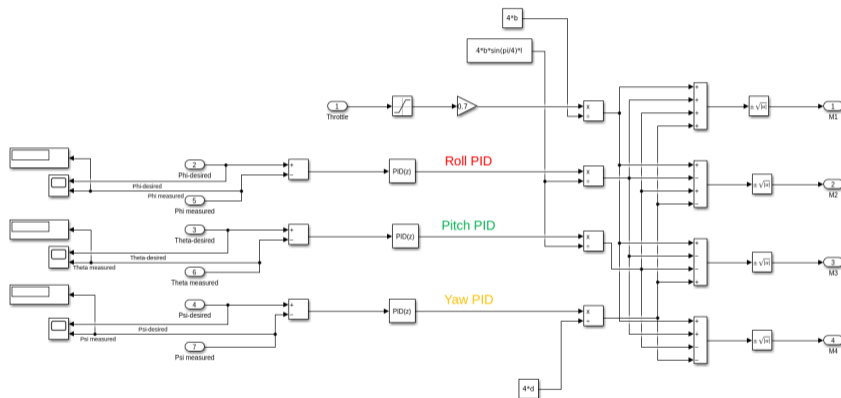
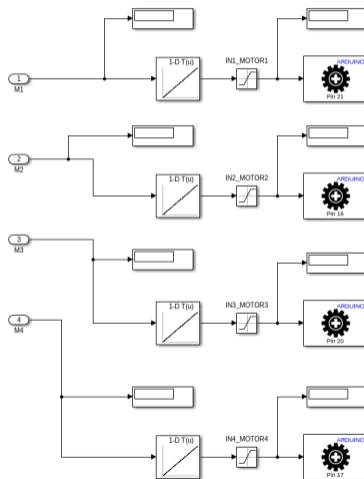


Figure: Le contrôleur d'Attitude pour l'implémentation sur le drone

Le sous-système pour la commande des moteurs



Conclusion et perspectives

Conclusion

- Les objectifs réalisés
 - Modélisation et simulation de la dynamique du vol
 - Réalisation et Test du prototype
 - Développement des premières lois de commande (partiellement complété)
- Difficultés rencontrées
 - Implémentation du contrôleur sur le prototype
 - Nécessité des ajustements pour améliorer le contrôleur d'attitude

Conclusion

- Les objectifs réalisés
 - Modélisation et simulation de la dynamique du vol
 - Réalisation et Test du prototype
 - Développement des premières lois de commande (partiellement complété)
- Difficultés rencontrées
 - Implémentation du contrôleur sur le prototype
 - Nécessité des ajustements pour améliorer le contrôleur d'attitude

Perspectives

Amélioration des performances du contrôleur d'attitude

- Amélioration du modèle du quadricoptère
 - Modélisation des actionnaires (identification et contrôle des moteurs BLDC)
 - Modélisation des capteurs (fusion de données avec un filtre de Kalman)
 - Ajout d'un capteur de position pour contrôle de l'altitude
 - Modélisation de la batterie
- Exploration d'autres stratégies de contrôle
 - Contrôleur LQR
 - Commande par linéarisation entrée-sortie

Perspectives

Amélioration des performances du contrôleur d'attitude

- Amélioration du modèle du quadricoptère
 - Modélisation des actionnaires (identification et contrôle des moteurs BLDC)
 - Modélisation des capteurs (fusion de données avec un filtre de Kalman)
 - Ajout d'un capteur de position pour contrôle de l'altitude
 - Modélisation de la batterie
- Exploration d'autres stratégies de contrôle
 - Contrôleur LQR
 - Commande par linéarisation entrée-sortie

Merci de votre attention

Références

- Ferry, Nicholas. *Quadcopter Plant Model and Control System Development With MATLAB/Simulink Implementation*. Department of Electrical and Microelectronic Engineering - Kate Gleason College of Engineering, Rochester Institute of Technology, 2017, p. 129.
- Hossain, Raju, Geoff Rideout, and Nicholas Krouglicof. *Bond graph dynamic modeling and stabilization of a quad-rotor helicopter*. Proceedings of the 2010 Spring Simulation Multiconference. Society for Computer Simulation International, 2010.
- Lee, Daewon, H. Jin Kim, and Shankar Sastry. *Feedback linearization vs. adaptive sliding mode control for a quadrotor helicopter*. International Journal of control, Automation and systems 7.3, 2009.
- Luukkonen, Teppo. *Modelling and control of quadcopter*. Independent research project in applied mathematics, Espoo, 2011.