

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd
Faculté de Technologie
Département d'Electronique



Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de :
Doctorat en Sciences en Electronique
Option : Contrôle

Sous le Thème :

**Commande Robuste Tolérante
pour les Systèmes Robotiques**

Présentée par :

CHARA Kheireddine

Devant le jury composé de :

M. SAIDI Lamir	Prof.	Université de Batna 2	Président
M. ABDESSEMED Yassine	Prof.	Université de Batna 2	Rapporteur
M. SRAIRI Kamel	Prof.	Université de Biskra	Examineur
M. ZIET Lahcene	Prof.	Université de Sétif 1	Examineur

12 Novembre 2022

Table des matières

Résumé	
Abstract	
ملخص	
Liste des figures.....	i
Liste des Abréviations.....	iii
Liste des Symboles	iv
Introduction Générale	1
CHAPITRE I Etats de l’art.....	5
I.1 Introduction	5
I.2.Etat de l’art.....	5
I.2.1 Planification de trajectoire des robots mobile.....	5
I.2.2 Commande appliquée au robots mobile	7
I.2.3 Génération et planification de trajectoire des drone (UAV)	9
I.2.4 Commande appliquée au drone (UAV)	12
I.3 Conclusion.....	13
CHAPITRE II Commande Backstepping Appliquée aux Robots Mobiles à Roues	15
II.1 Introduction	15
II.2 Architecture des robots mobiles	16
II.3 Modèle dynamique du robot mobile	16
II.4 Commande Backstepping	18
II.4.1 Principe de la commande Backstepping.....	18
II.4.2 Exemples d’application	19
II.5 Application de la commande backstepping au robot mobile.....	28
II.5.1 Dédution du modèle appliqué	28
II.5.2 Etude des variables de sortie basée sur le backstepping.....	30
II.6. Détection et poursuite d’une cible dans l’environnement du robot mobile.....	33
II.6.1 Présentation du système de détection.....	34
II.6.2 Techniques de détections employées	34
II.7. Résultats de simulations et expérimentaux	37
II.8 Conclusion	43
CHAPITRE III Commande Synergétique et Application aux Quadrirotors	45
III.1 Introduction.....	45
III.2 Hypothèses adoptées	45
III.3 Modèle du Quadrirotor considéré.....	46
III.3.1 Modèle cinématique.....	46

III.3.2 Equations des forces et moments.....	49
III.3.3 Modèle dynamique	52
III.4 Commande Synergétique.....	58
III.4.1 Principe général	58
III.4.2 Analyse de Stabilité	60
III.4.3 Applications	60
III.5 Synthèse de la commande Synergétique appliquée au modèle	64
III.6. Génération de trajectoire pour le quadrirotor.....	66
III.6.1 Courbes de Bézier.....	66
III.6.2 Courbes B-splines	69
III.7 Conclusion	69
CHAPITRE IV Résultats de Simulations et expérimentaux	70
IV.1 Introduction	70
IV.2 La plateforme expérimentale	70
IV.2.1 Pixhawk 1	71
IV.2.2 Radio Control (RC)	72
IV.3 Résultats de simulation.....	73
IV.3.1 Test 1 : stabilisation.....	74
IV.3.2 Test 2 : Méthode de Bézier	75
IV.3.3 Test 3: Méthode B-spline.....	78
IV.4 Résultats expérimentaux.....	80
IV.4.1 Test 1 Stabilisation	80
IV.4 .2 Test 2 Méthode de Bézier	81
IV.4.3 Test 3 méthode de B-splines	82
IV.5 Conclusion	84
Conclusion générale.....	85
Bibliographie.....	87

RESUMES

Résumé

Le sujet de thèse du doctorat porte sur la commande robuste des systèmes robotiques. On a entamé la recherche scientifique dans le domaine par une étude bibliographique approfondie pour obtenir l'état de l'art des lois de commandes appliquées aux robots mobiles, en particulier les robots mobiles à roues et les véhicules aériens sans pilote (UAV) de type Quadrirotor.

Ensuite, on a élaboré et appliqué des techniques intelligentes telles que les algorithmes génétiques pour la localisation des robots mobiles, la détection et la poursuite optimisées des amers placés dans un environnement intérieur et extérieur inconnus afin d'atteindre des objets colorés.

En outre, une technique de contrôle de recul adaptatif a été mise en œuvre pour la navigation autonome et le suivi des objets colorés détectés dans son environnement inconnu. L'avantage le plus remarquable de cette stratégie de contrôle est sa robustesse contre les perturbations externes qui peuvent survenir lors de l'évolution du robot mobile à roues. Des essais expérimentaux probants ont été effectués avec un système robotisé équipé de capteurs à ultrasons et d'une caméra. Ces tests ont permis d'obtenir des résultats très satisfaisants présentés dans le cadre d'une conférence internationale de l'IEEE

Puis, nous avons développé et mis en œuvre des algorithmes avec un contrôleur synergétique robuste pour un guidage d'un Quadrirotor dans un environnement complexe. La méthode de la courbe de Bézier est introduite pour planifier et générer une trajectoire optimale et douce au Quadrirotor, où les points de contrôle seront générés automatiquement pour éviter tout risque de collision. De plus, une méthode de calcul des trajectoires basé sur les courbes B-splines est introduite afin de comparer les performances stratégiques proposées. Le contrôleur synergétique est synthétisé pour le contrôle du Quadrirotor. L'analyse de la stabilité de la méthode proposée est formellement établie. Quelques simulations numériques satisfaisantes sont présentées.

Ensuite, des tests expérimentaux en temps réel pour la validation à l'aide d'un banc d'essais avec un Quadrirotor sont effectués afin de confirmer les résultats théoriques obtenus. Ces essais ont permis de se concentrer sur la robustesse de cette loi de contrôle aux perturbations externes et d'établir formellement sa stabilité asymptotique ainsi que sa grande capacité à suivre les trajectoires générées. Ce contrôleur synergétique proposé a montré une performance très satisfaisante pour stabiliser les dynamiques non linéaires en boucle fermée du Quadrirotor et de conclure sur sa grande efficacité et robustesse. Cette approche constitue la contribution originale majeure de nos travaux de recherche.

Ces travaux de recherche ont abouti à la publication d'un article dans un journal spécialisé « Intelligent Service Robotics » édité par Springer.

Abstract

The subject of the PhD thesis is the robust control of robotic systems. The scientific research in this area started with an extensive bibliographic study to obtain the state of the art of control laws applied to mobile robots, in particular wheeled mobile robots and Quadrotor unmanned aerial vehicles (UAV).

Then, intelligent techniques such as genetic algorithms were developed and applied for mobile robot localization, optimized detection and tracking of bitters placed in unknown indoor and outdoor environment to reach colored objects.

In addition, an adaptive backtracking control technique was implemented for autonomous navigation and tracking of detected colored objects in its unknown environment. The most remarkable advantage of this control strategy is its robustness against external disturbances that may occur during the evolution of the wheeled mobile robot. Successful experimental tests were conducted with a robotic system equipped with ultrasonic sensors and a camera. These tests allowed us to obtain very satisfactory results presented in the framework of an international conference of the IEEE

Then, we developed and implemented algorithms with a robust synergetic controller for a guidance of a Quadrirotor in a complex environment. The Bézier curve method is introduced to plan and generate an optimal and smooth trajectory to the Quadrirotor, where the control points will be generated automatically to avoid any risk of collision. In addition, a trajectory calculation method based on B-splines is introduced to compare the proposed strategic performances. The synergetic controller is synthesized for the control of the Quadrirotor. The stability analysis of the proposed method is formally established. Some satisfactory numerical simulations are presented.

Then, real time experimental tests for validation using a test bed with a Quadrirotor are performed to confirm the theoretical results obtained. These tests focused on the robustness of this control law to external disturbances and formally established its asymptotic stability as well as its high ability to track the generated trajectories. This proposed synergetic controller has shown a very satisfactory performance to stabilize the non-linear dynamics in closed loop of the Quadrotor and to conclude on its high efficiency and robustness. This approach constitutes the major original contribution of our research work.

This research work led to the publication of an article in a specialized journal "Intelligent Service Robotics" published by Springer.

ملخص

إن الهدف الأساسي من إنجاز هذا البحث هو دراسة الموضوع الخاص بالتحكم القوي في الأنظمة الروبوتية. نقوم في المرحلة الأولى بتوضيح المفهوم الأساسي لبيليو جرافية متعمقة للحصول على أحدث قوانين التحكم المطبقة على الروبوتات المتنقلة، ولا سيما الروبوتات المتحركة ذات العجلات والمركبات الجوية غير المأهولة من نوع كوادكوبتر. بعدها نعرض إلى تبني فكرة جديدة و هي تطوير وتطبيق تقنيات ذكية مثل الخوارزميات الجينية لتحديد مواقع الروبوتات المتنقلة والكشف الأمثل وتتبع المعالم الموضوعية في بيئة داخلية وخارجية غير معروفة من أجل الوصول إلى الأشياء الملونة.

إن الجزء التالي من هذا البحث يهدف أساساً إلى دراسة تحليلية مفصلة للتحكم في الارتداد التكيفي للتنقل المستقل وتتبع العناصر الملونة المكتشفة في محيطها غير المألوف. الميزة الأكثر بروزاً لاستراتيجية التحكم هذه هي قوتها ضد المعوقات الخارجية التي قد تحدث أثناء نشاط و فعالية الروبوت المتحرك ذي العجلات.

تم إجراء اختبارات تجريبية مقنعة باستخدام نظام آلي مزود بأجهزة استشعار فوق صوتية وكاميرا، و لقد سمحت هذه الاختبارات من الحصول على نتائج مرضية للغاية قدمت في إطار مؤتمر دولي لـ **IEEE**.

بالإضافة إلى ذلك قمنا بتطوير وتنفيذ خوارزميات باستخدام وحدة تحكم تأزرية قوية لتوجيه كوادكوبتر في بيئة معقدة. تم استخدام طريقة منحني بيزير للتخطيط وإنشاء مسار مثالي وسلس للطائرة كوادكوبتر ، حيث سيتم إنشاء نقاط التحكم تلقائياً لتجنب أي خطر عابر. بالإضافة إلى ذلك ، يتم تقديم طريقة حساب المسار بناءً على منحنيات B-splines من أجل مقارنة الأداء الاستراتيجي المقترح. تم تصنيع وحدة تحكم التآزر للتحكم في كوادكوبتر. تم إنشاء تحليل استقرار الطريقة المقترحة رسمياً. يتم عرض بعض عمليات المحاكاة العددية المرضية.

و لأجل إعطاء المزيد من المقاربة النموذجية لهذا النوع من التحكم، تم إجراء اختبارات تجريبية للتحقق من فعالية التقنية باستخدام منصة اختبار مزودة بمحرك رباعي من أجل تأكيد النتائج النظرية التي تم الحصول عليها. سمحت هذه الاختبارات من فعالية و متانة قانون التحكم مع وجود معوقات التشغيل المحتملة الخارجية وإثبات استقراره المقارب رسمياً بالإضافة إلى قدرته الكبيرة على متابعة المسارات المبرمجة. أظهرت وحدة التحكم التآزرية المقترحة أداءً مرضياً للغاية في تثبيت الديناميكيات غير الخطية ذات الحلقة المغلقة للطائرة كوادكوبتر واستنتجت كفاءتها العالية ومتانتها. يشكل هذا النهج المساهمة الأصلية الرئيسية لعملنا البحثي.

أدى هذا البحث إلى نشر مقال في مجلة متخصصة "Intelligent Service Robotics" من تحرير Springer.

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES SYMBOLES

Liste des figures

Figure (II.1)	Schéma représentatif du robot mobile	17
Figure (II.2)	Schéma du système d'ordre deux	19
Figure (II.3)	Résultats de simulation de l'exemple 1	22
Figure (II.4)	...Résultats de simulation de l'exemple 2	23
Figure (II.5)	Résultats de simulation de l'exemple 3	24
Figure (II.6)	Résultats de simulation de l'exemple 4	28
Figure (II.7)	Vue d'ensemble du système mis en place	34
Figure (II.8)	Organigramme du système de suivi proposé.	36
Figure (II.9)	Image de test avec quatre objets couleur (rouge, vert, bleu, jaune)	37
Figure (II.10)	Résultats visuel de détection d'objets des 4 couleurs dans l'espace couleur RGB de l'image de test	37
Figure (II.11)	Résultats visuel de détection d'objets des 4 couleurs dans l'espace couleur HSV de l'image de test	37
Figure (II.12)	Détection d'objets couleurs Rouge, Vert, Bleu et Jaune de l'image de test	38
Figure (II.13)	Évolution de la fonction de fitness en fonction du nombre de générations	39
Figure (II.14)	Résultats visuels de la détection d'objets des 4 couleur à l'aide d'un algorithme génétique.....	39
Figure (II.15)	Poursuite de la cible par robot.....	39
Figure (II.16)	Perturbations appliquées au modèle	40
Figure (II.17)	Evolution des variables d'Erreurs	41
Figure (II.18)	Paramètres estimés	42
Figure (II.19)	Vecteur de commande	42
Figure (II.20)	Coordonnées de la cible de référence et coordonnées cartésiennes du robot	43
Figure (III-1)	Le repère terrestre fixe E et Le repère mobile B.....	46
Figure (III-2)	Les entrées de commande du Quadrirotor	50
Figure (III-3)	Trajectoires de la variable x_2 pour différente valeurs de T	62
Figure (III-4)	Trajectoires de la variable x_2 pour différente valeurs de λ	63
Figure (III-5)	Trajectoires des variables du système pour $\lambda = 5, T = 1$	63
Figure (III-6)	Boucle interne et externe du contrôleur proposé.....	64
Figure (III.7)	Courbes de Bézier de degré 3 et avec quatre points de contrôle.....	67

Figure (IV.1) Quadrotor experimental setup	71
Figure (IV.2) Pixhawk utilisé.....	72
Figure (IV.3) Radio Control utilisé	73
Figure (IV.4) Résultats de la simulation de l'essai de stabilisation	74
Figure (IV.5) Résultats de la simulation du deuxième essai (méthode de Bézier).	
De haut en bas : les angles (tangage, roulis et lacet), les positions en (x (m), y et z	76
Figure (IV.6) Position trajectory in the x–y plane (position in meters).	77
Figure (IV.7) Position trajectory in the x–y–z plane.	77
Figure (IV.8) Résultats de la simulation du troisième essai (Méthode B-spline).	
De haut en bas : angle de tangage, angle de roulis et angle de lacet	78
Figure (IV.9) Résultats de la simulation du troisième essai (Méthode B-spline).	
De haut en bas : position x (en mètre), position y et position z	79
Figure (IV-10) Trajectoire du Quadrirotor dans le plan x–y.	79
Figure (IV-11) Trajectoire du Quadrirotor dans le plan x–y–z.	80
Figure (IV.12) Résultats expérimentaux du test de stabilisation.....	80
Figure (IV.13) Résultats expérimentaux du deuxième test (méthode de Bézier).	
De haut en bas : angle de tangage, angle de roulis et angle de lacet	81
Figure (IV.14) Résultats expérimentaux du deuxième essai (méthode de Bézier).	
De haut en bas : position x (en mètre), position y et position z	82
Figure (IV.15) Résultats expérimentaux du deuxième test (méthode de B-spline).	
De haut en bas : angle de tangage, angle de roulis et angle de lacet	83
Figure (IV.16) Résultats expérimentaux du deuxième essai (méthode de Bézier).	
De haut en bas : position x (en mètre), position y et position z	83

Liste des Abréviations

UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UCAV	Unmanned Combat Aerial Vehicle
EOM	Equations of Motion
TO	Trajectory Optimization
RBF	Radial Basis Function
GTSP	Generalised Travelling Salesman Problem
ATSP	Asymmetric Travelling Salesman Problem
MILP	Mixed-Integer Linear Programming
MINLP	Mixed-Integer Non-linear Programming
WMR	wheeled mobile robots
SMC	sliding mode control
VRC	Vision-based robot controllers
FL	Fuzzy Logic
NN	Neural Networks
NFS	Neuro Fuzzy Systems
SLAM	Simultaneous Localization And Mapping
EKF	Extended Kalman Filter
BE	Bayesian Estimator
PF	Particle Filter/estimator.
RL	Reinforcement Learning
AG	Algorithmes Génétique
SC	Synergetic Controller
PID	Proportional Integral Derivative
RBF	Red Green Blue
HSV	Hue Saturation Value
HIS	Hue Saturation Intensity
GCS	Global Coordinate System
BCS	Body Coordinate System

Liste des Symboles

Liste des symboles dans le chapitre II

P	Centre de l'entre axe du châssis
Q	Centre de gravité du robot
q	Vecteur de coordonnées
v	Vecteur vitesse
v_1	Vitesse linéaire
v_2	Vitesse angulaire
W	Variable intermédiaire
m	Masse du robot
I_0	Inertie du robot
R	Rayon des roues
D	Distance entre le centre P et les roues
h	Distance entre le point P et la centre de masse Q
θ	Orientation du robot dans le plan fixe
L	L'inductance du moteur,
r	Résistance d'armature du moteur,
k_e	Coefficient du moteur,
U	Tension d'entrée,
β	Rapport de réduction,
k_T	Constante du couple moteur
X_i	$i^{\text{ème}}$ Variable d'état du système
u	Vecteur de commande
y	Vecteur de sortie
φ_i	Fonction ou paramètre inconnus à estimer
Z_i	Variables d'erreur
y_r	Variable désirée (consigne)
α_i	Fonction stabilisante
V_i	Fonction de Lyapunov
C_i	Constante de contrôleur Backstepping
P_i	Plan de couleur
TH	Valeur seuil
E_{rr}	Erreur de classement
A_{cc}	Taux de classement
$B_{i,j}$	Pixel bien classé
$N_{i,j}$	Nombre de pixel de classe cible

Liste des symboles dans le chapitre III

(x, y, z)	Coordonnées du Quadrirotor dans l'espace
ϕ	Angle de roulis (The roll angle)
θ	Angle de tangage (The Pitch angle)
ψ	Angle de lacet (The Yaw angle)
$R(:, :)$	Matrice de rotation simple autour des axes
p	Vitesse angulaire dans BCS liée à $\dot{\phi}$
q	Vitesse angulaire dans BCS liée à $\dot{\theta}$
r	Vitesse angulaire dans BCS liée à $\dot{\psi}$
ω	Vitesse de rotation angulaire dans BCS
$v_{x,y,z}^E$	Vitesses linéaires dans le repère fixe
$v_{x,y,z}^B$	Vitesses linéaires dans le repère mobile
Ω_i	Vitesse de rotation du $i^{\text{ème}}$ moteur
P	Poids du Quadrirotor
L	Longueur du bras entre le rotor et le centre de gravité
F_i	Force de poussée
b	coefficient de poussé
F_h	Force de trainée des hélices
d	Coefficient de trainé
F_t	Force de trainée du Quadrirotor
K_{ft}	Coefficient de trainé de translation
M_a	Moment résultant du frottement aérodynamique
M_θ	Moment des forces de poussées
M_ϕ	Moment de tangage
M_ψ	Moments dus aux forces de trainées
K_{fa}	Coefficient de frottement aérodynamique
M_{gh}	Moment gyroscopique de l'hélice
M_{gm}	Moment gyroscopique du Quadrirotor
J_r	Inertie du rotor
J	Inertie du Quadrirotor
F_B	Force totale générée par les quatre rotors
M_B	Moment de poussé et de trainé
ϕ_d	Angle de roulis désiré
θ_d	Angle de tangage désiré

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Au cours de la dernière décennie, des changements importants sont intervenus dans le domaine de la planification et du contrôle du mouvement des véhicules mobiles (terrestre ou volants). La planification des trajectoires est particulièrement difficile en raison de plusieurs complexités, qui n'étaient pas prises en compte par les stratégies précédentes, tels que : l'importance accrue des contraintes différentielles, la turbulence atmosphérique, état du sol qui rend impossible le suivi précis d'un plan précalculé, l'incertitude de l'état du véhicule et la connaissance limitée de l'environnement en raison des capacités limitées des capteurs. Ces contraintes ont motivé la conception d'autres techniques plus élaborées pour la planification et le suivi de trajectoire.

L'absence d'algorithmes exacts pour ces problèmes et la difficulté inhérente à la caractérisation des algorithmes d'approximation font qu'il est pratiquement impossible de déterminer la complexité temporelle, la complétude et même la validité des algorithmes. Cet état de fait n'a pas encore été comblé par la caractérisation statistique des performances expérimentales des algorithmes et l'analyse comparative. En raison de ce manque général de connaissances, il est difficile de concevoir un système de guidage, et encore moins de choisir l'algorithme.

Dans [1] la distinction entre deux grandes catégories d'algorithmes a été faite. Ils distinguent ce qu'ils appellent les méthodes de planification et les méthodes réactives. Ils définissent les méthodes de planification comme des méthodes qui utilisent une carte de l'environnement, prévoient une trajectoire réalisable pour le drone et gèrent le suivi des trajectoires par un contrôle dédié. Scherer et al opposent ces méthodes aux méthodes réactives qui, selon eux, résolvent le problème en temps réel de l'évitement des obstacles en utilisant une approche simple pour réagir aux obstacles à mesure qu'ils apparaissent. Ils soulignent que ces méthodes ne garantissent pas une solution appropriée pour chaque situation.

Le problème de la navigation consiste à trouver le plus court chemin lisse entre deux configurations de départ et de but pour un drone soumis à une contrainte sur le rayon de courbure [2].

Malgré les méthodes proposées pour l'évitement d'obstacles par le Quadrirotor, la synthèse d'un contrôleur robuste qui garantit la stabilité du système dans tous les scénarios d'évitement d'obstacles reste une tâche essentielle.

Puisque le Quadrirotor trouve ses applications dans de nombreux environnements différents avec des scénarios différents et compliqués, les chercheurs continuent à développer des contrôleurs robustes afin de maintenir la stabilité du système lors de l'évitement d'obstacles dans un environnement complexe (incluant des perturbations externes...etc.).

Par exemple, dans [3], un contrôle en mode glissant utilisant des réseaux neuronaux RBF et combinant les champs de potentiel artificiel (APF) est proposé pour l'évitement d'obstacles par un quadrirotor avec une cible mobile.

Un contrôle actif de rejet des perturbations basé sur l'optimisation du loup gris chaotique est proposé dans [4]. Il permet le contrôle de la trajectoire et l'évitement d'obstacles du Quadrirotor. Dans [5], un contrôle d'évitement d'obstacle de Quadrirotor par un contrôle d'apprentissage sûr sous des perturbations de vent est proposé.

L'évitement de collisions avec une commande de formation distribuée en temps fini est proposé pour le Quadrirotor soumis à des perturbations externes [6]. Dans [7], une loi convergente rapide en temps fini est proposée afin d'éviter les collisions des véhicules aériens sans pilote.

Il est intéressant de garder dans l'esprit certaines des caractéristiques et exigences générales relatives aux systèmes robotique. Les systèmes robotiques mobile tels que les véhicules mobiles terrestre ou volants « UAV » sont typiquement modélisés comme ayant des contraintes de vitesse et d'accélération (et potentiellement les contraintes différentielles d'ordre supérieur associées aux équations du mouvement).

L'objectif est de guider le véhicule vers un but à travers un champ d'obstacles. Le problème de suivi de trajectoire de ces systèmes mobiles est typiquement caractérisé par un espace de problème tridimensionnel, des informations limitées sur l'environnement, des capteurs embarqués avec une portée limitée, des contraintes de vitesse et d'accélération, et une incertitude dans l'état du véhicule et les données des capteurs.

Pour pouvoir comparer les algorithmes sur une base rigoureuse, il est nécessaire d'établir leur degré de robustesse, de complétude, d'optimalité, de précision et de complexité de

calcul. Le choix d'un algorithme se fait en fonction des exigences requises par une application particulière.

Notre étude porte sur le choix d'un algorithme de guidage robuste de systèmes robotiques, afin de générer des lois de commandes appliquées aux robots mobiles, en particulier les robots mobiles à roues et les véhicules aériens sans pilote (UAV) de type Quadrirotor.

Dans un premier temps, la détection et la poursuite optimisées d'amers placés dans un environnement intérieur et extérieur inconnus feront l'objet d'un développement explicite basé sur l'application des techniques intelligentes pour la localisation des robots mobiles.

En outre, une technique de contrôle backstepping adaptatif a été mise en œuvre pour la navigation autonome et le suivi des objets colorés détectés dans un environnement inconnu. Ce choix est guidé par le fait que cette stratégie de commande présente une robustesse remarquable vis-à-vis des éventuelles perturbations qui peuvent altérer la bonne évolution du robot mobile à roues. L'application expérimentale d'une telle loi de commande sur un robot mobile équipé de capteurs à ultrasons et d'une caméra montre l'efficacité de la structure de contrôle choisie.

Par ailleurs, nous nous sommes attachés à développer et à mettre en œuvre une stratégie de commande synergique robuste pour le pilotage d'un Quadrirotor dans un environnement complexe. Plus précisément, dans un souci de générer une trajectoire optimale et douce nous avons fait appel à la courbe de Bézier. Cette dernière présente l'avantage de générer automatiquement des points de contrôle permettant d'éviter tout risque de collision.

Afin de mettre en exergue les performances du contrôleur synergétique que nous avons proposé, nous avons introduit les courbes B-splines pour le calcul des trajectoires où la stabilité de la méthode proposée est formellement établie. Les simulations effectuées sur le modèle du Quadrirotor considéré montrent clairement l'efficacité de l'approche qu'on a développée avant de les vérifier par des tests expérimentaux en temps réel. Ces derniers sont en parfaite concordance avec les résultats théoriques. Cette expérimentation a permis de mettre en valeur la robustesse de la stratégie proposée vis-à-vis des perturbations et également la faculté d'un bon suivi des trajectoires générées.

Tous les développements de la commande synergétique, son déploiement pratique sur plateforme test ainsi que l'exploitation des courbes paramétriques pour la génération des trajectoires de vol de l'UAV constituent la contribution originale majeure des travaux de

recherche de cette thèse et ont été couronnés par la publication d'un article dans un journal spécialisé « Intelligent Service Robotics » édité par Springer.

Outre l'introduction et la conclusion générales, ce manuscrit est organisé en Quatre chapitres répartis comme suit :

- Le premier chapitre est dédié à l'état de l'art dans le domaine de la robotique et plus précisément pour les systèmes robotiques mobile à roues et volant. Nous orienterons cette étude aux méthodes de planifications et de génération de trajectoire ainsi qu'aux différentes techniques utilisées pour la commande des systèmes précédemment cités.
- Le chapitre suivant présente une approche générale pour la conception d'une commande adaptative de position pour un robot mobile à roues en utilisant la technique du backstepping. Dans ce chapitre, on proposera une méthode intelligente de localisation de cible dans l'environnement d'évolution du robot mobile basée sur les algorithmes génétiques. Cette méthode de détection fera l'objet de tests expérimentaux dans les résultats seront présentés à la fin de ce chapitre.
- Le troisième chapitre est consacré à la présentation théorique de la commande synergétique et son application sur un robot volant de type Quadrirotor considéré dans cette thèse. Dans ce chapitre, on présentera les techniques de conception de trajectoire optimale faisant appel aux courbes de Bézier et B-spline pour générer le tracé de vol du drone.
- Le quatrième chapitre exposera les résultats de simulations ainsi que les résultats de tests expérimentaux en temps réel réalisés sur un banc d'essai de Quadrirotor.

CHAPITRE I

ETATS DE L'ART

CHAPITRE I

Etats de l'art

I.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les approches déjà proposées dans la littérature dans le domaine de la robotique.

Le chapitre souligne les directions choisies pour nos recherches futures. Ces directions guident le choix des systèmes robotiques à étudier ainsi que les méthodes et techniques appliquées à ces systèmes. Notre choix est guidé par le fait que les robots mobiles à roues et les drones de type quadrirotor sont très polyvalent et trouvent leurs applications dans divers domaines et donc reste d'actualité dans le milieu de la recherche scientifique

I.2. Etat de l'art

I.2.1 Planification de trajectoire des robots mobile

La planification en robotique se concentre sur le problème général de déterminer comment se déplacer pour se rendre d'un endroit à un autre (planification de trajectoire, planification de mouvement) et comment effectuer une tâche souhaitée (planification de tâche) [8, 9]. Ici, nous nous intéresserons à la planification de trajectoire et à la planification de mouvement. La planification de trajectoire des robots mobiles est l'une des opérations de base nécessaires à la mise en œuvre de la navigation du robot.

Ces opérations sont :

- Auto-localisation.
- Planification de trajectoire.
- Élaboration de cartes et interprétation de cartes

La première opération qui consiste en l'auto-localisation représente le noyau de planification de trajectoire. Une planification dite dynamique qui assure le suivi de trajectoire et l'évitement d'obstacle en temps réel ne peut s'effectuer que si le robot peut se localiser dans son environnement et déterminer avec une certaine précision les positions des

obstacles à éviter ou des balises à suivre. Les Méthodes de localisation peuvent être classées selon les mécanismes de détection employés. Si l'approche utilise des mécanismes inertiels internes basés sur l'intégration des données intéroceptives fournies par des capteurs internes tel que des codeurs incrémentaux, des accéléromètres ou des gyroscopes alors l'approche est dite « *méthode de localisation relative* ». Dans le cas où la méthode de localisation prélève des données de l'environnement à l'aide de capteurs extéroceptifs tel que des caméras, vision stéréoscopique, GPS ou système de télémétrie ultrasonore ou laser dans ce cas on parle de « *méthode de localisation absolue* ».

Kim, J.M et al [10] ont étudié le problème SLAM (simultaneous localization and mapping) qui consiste à placer un Robot Mobile à Roues (WMR) dans un environnement inconnu, alors que le WMR construit progressivement une carte cohérente de cet environnement. Le problème SLAM a été étudié pour la première fois par Durrant-Whyte qui a établi une base statistique pour décrire les relations entre les points de repère (balises) et manipuler l'incertitude géométrique.

Pour résoudre le problème SLAM, il faut utiliser un état total (conjoint) qui incorpore la (position/ orientation) du WMR et la position de chaque repère (balise). Cet état conjoint doit être estimé et mis à jour après chaque observation de repère. Pour l'observation et la détection de l'environnement, il existe toute une gamme de capteurs (sonars, caméras, télémètres laser, etc.) [11, 12]. L'estimation de l'état conjoint peut être effectuée par un filtre de Kalman étendu (EKF), un estimateur bayésien (BE) ou un filtre/estimateur particulaire (PF). L'EKF est une extension du filtre de Kalman qui couvre les modèles stochastiques non linéaires. Les estimateurs bayésiens décrivent le mouvement du WMR et les observations des caractéristiques directement en utilisant les fonctions de densité de probabilité sous-jacentes et la loi de mise à jour de Bayes. Le PF (également appelé estimateur séquentiel de Monte Carlo) est basé sur la simulation [10]. Un aperçu des méthodes ci-dessus est fourni dans [13, 14].

Pour la navigation dans des environnements complexes, un robot doit trouver un compromis entre la nécessité d'avoir des trajectoires efficaces et optimisées et la nécessité de réagir à des événements inattendus.

S. Garrido, et al [15] ont présenté un nouveau planificateur de trajectoire construit autour du diagramme de Voronoï. Une méthode de marche rapide est appliquée aux zones extraites de Voronoï afin d'obtenir le chemin. La méthode combine des opérations de planification

basées sur la carte et sur les capteurs pour fournir un plan de mouvement fiable, tout en fonctionnant à la fréquence des capteurs.

Les principales caractéristiques sont la vitesse et la fiabilité, car les dimensions de la carte sont réduites à une carte presque unidimensionnelle et cette carte représente les zones les plus sûres de l'environnement pour le déplacement du robot. En outre, le diagramme de Voronoï peut être calculé dans des zones ouvertes et avec toutes sortes d'obstacles, ce qui permet d'appliquer la méthode de planification proposée dans des environnements complexes où d'autres méthodes de planification basées sur le diagramme de Voronoï ne fonctionnent pas.

I.2.2 Commande appliquée au robots mobile

David et Manivanan [16], ont étudié les méthodes de contrôle des robots mobiles avec remorques, qui accomplissent leur tâche de manière plus rapide et moins chère qu'un robot individuel. L'enjeu principal de leur étude est la complexité et la stabilité du système complet qui est non linéaire et instable. Leur étude fournit une analyse de diverses stratégies et algorithmes de contrôle pour le mouvement vers l'arrière (de recul) des robots mobiles avec remorques, et identifie certains problèmes non résolus dans ce domaine.

R. Marino, et-al [17, 18] ont proposé un contrôle adaptatif convenant aux systèmes impliquant des paramètres à variation lente ou des incertitudes/perturbations dues à la variation de charge, à la consommation de carburant, etc.. Le contrôle robuste est appliqué dans les cas où il existe de fortes variations de paramètres ou des incertitudes, sous l'hypothèse que les bornes de ces incertitudes sont a priori inconnues. Cette approche a été revue par R. Marino [18] pour les systèmes non linéaires. Les contrôleurs adaptatifs (lois de commande ou algorithmes de commande) améliorent leurs performances au fur et à mesure que l'adaptation évolue avec le temps.

Les contrôleurs robustes peuvent faire face à des perturbations rapides, à des variations rapides et à des caractéristiques non modélisées, et tentent de maintenir une performance acceptable dès le début. Presque toujours, les techniques de contrôle adaptatif nécessitent une paramétrisation linéaire de la dynamique du système non linéaire sous contrôle.

La logique floue (FL) et les réseaux de neurones (NN) ont trouvé une large application dans l'identification, la planification et le contrôle des robots mobiles. La logique floue offre une manière approximative unifiée (linguistique) pour tirer des conclusions à partir de données

incertaines en utilisant des règles incertaines. Les réseaux de neurones offrent la possibilité d'apprendre et de se former de manière autonome (apprentissage non supervisé) ou non autonome (apprentissage supervisé), ou via l'évaluation de leurs performances (apprentissage par renforcement) [19] [20].

T. Das et al [21] et , O. Castillo et al [22], ont présenté un contrôleur de suivi flou adaptatif direct, et B.J.Driesen et al [23] ont décrit un contrôleur de logique floue décentralisé (FLC) pour plusieurs robots mobiles à roues.

Dans de nombreux cas pratiques (y compris les robots mobiles), on utilise des systèmes neuro flou (NFS) combinés (hybrides) qui offrent de meilleures performances. Les ensembles flous ont été inventés par Lofti Zadeh [18], et constituent une extension du concept classique d'ensemble (crisp) qui a brisé la dichotomie aristotélicienne (vrai-non vrai, oui-non).

J.J Stotine et al [24] ont présenté la méthode de commande en mode glissant (SMC). Cette méthode de commande robuste et puissante pour les systèmes non linéaires a été appliquée aux robots mobiles dans [25, 26]. Cette méthode a été appliquée à l'origine à un modèle non linéaire canonique avec une entrée unique et une sortie unique.

En pratique, pour éviter le phénomène de broutement de la commande, la fonction signum (sgn) est remplacée par la fonction saturation (sat). Le problème de contrôle robuste a également été résolu en utilisant la méthode de stabilisation de Lyapunov [24]. Ces méthodes ont été appliquées pour concevoir un contrôle robuste (mode glissant, contrôle basé sur la fonction de Lyapunov) des robots mobiles à roues dans [25, 26].

R.M Haralik, et al [27] définissent que la vision est un capteur robotique puissant qui peut être utilisé pour mesurer l'environnement sans contact physique. Le contrôle visuel de robot ou l'asservissement visuel est une méthodologie de contrôle par rétroaction qui utilise un ou plusieurs capteurs de vision (caméras) pour contrôler le mouvement du robot. Plus précisément, les entrées de commande des moteurs du robot sont produites par le traitement des données d'image (généralement, l'extraction des contours, des caractéristiques, des coins et d'autres primitives visuelles). Dans la robotique mobile, la tâche du contrôleur visuel est de contrôler la position du véhicule par rapport à certains points de repère. La stabilité du suivi ne peut être assurée que si les délais de détection de la vision sont suffisamment faibles et/ou si le modèle dynamique du robot est suffisamment précis.

Les commandes de robot basées sur la vision (VRC) varient selon que le système de vision fournit des points de consigne en entrée aux commandes des articulations du robot ou calcule directement les entrées de niveau d'articulation, et selon que le signal d'erreur est déterminé en coordonnées de l'espace de tâche ou directement en termes de caractéristiques d'image [27, 28, 29, 30].

I.2.3 Génération et planification de trajectoire des drone (UAV)

La plupart des problèmes de planification de trajectoire liés aux applications actuelles d'UAV doivent être considérés comme des problèmes soumis à des contraintes dynamiques. L'approche cinématique est insuffisante pour bien approximer le comportement des véhicules aériens (ce qui est, le plus souvent, le cas dans l'étude des véhicules terrestres).

La prise en compte des équations du mouvement est importante pour garantir la robustesse du planificateur, car l'approximation de la dynamique uniquement par un modèle cinématique avec contraintes conduira à des modèles trop conservateurs. Les équations du mouvement sont également pertinentes et font apparaître les effets de la manœuvre du véhicule aérien affectant l'énergie ou la durée de la trajectoire.

Kong et Mettler [31] montrent que les critères de performance influent sur les trajectoires résultantes et que les méthodes heuristiques (par exemple, la minimisation de la distance) ne sont pas en mesure de répondre aux exigences de performance spécifiques.

Cette classe de problèmes de planification est sensiblement plus difficile à résoudre en raison de la dépendance entre le temps et l'espace d'état introduite par les contraintes différentielles. Même dans le cas trivial de la connexion de deux états dans un espace de configuration sans obstacles, une solution exacte est impossible. Une solution exacte n'est disponible que pour des problèmes bidimensionnels, solvable en temps exponentiel et dans un espace polynomial.

Toutefois, cette approche ne peut être étendue à des problèmes tridimensionnels. Pour les applications nécessitant la navigation d'un véhicule entre des obstacles ou en terrain complexe, des algorithmes qui exploitent une certaine forme d'approximation ou d'heuristique sont nécessaires, non seulement pour trouver une possible trajectoire optimale mais aussi pour s'adapter aux capacités matérielles. Les solutions à cette catégorie de

problèmes représentent un domaine de recherche plus récent où très peu de limites approximatives ou de résultats d'analyse comparative ont été proposés.

Parmi les algorithmes de résolution, on trouve les algorithmes à " *solution bidimensionnelle canonique* ", algorithmes à " *Échantillonnage d'espace d'état* " tel que 'Recherche de réseau d'espace d'état', 'Arbre aléatoire à expansion rapide (RRT)' et 'Graphe d'accessibilité, arbre dense à expansion rapide (RDT)' les algorithmes à " *Chemin de distance minimum suivi par la formation de trajectoire* " tel que 'Planifier et transformer (lissage spline)' 'Approche découplée' et 'Planification de trajectoire contrainte par chemin' et les algorithmes à " *Programmation mathématique* " tel que 'Modèle de contrôle prédictif (horizon fuyant)' et 'Optimisation de trajectoire basée sur le gradient'.

Zhang et al. [32] ont étudié le problème de l'acheminement d'un UCAV de combat dans un environnement 3D à travers des cibles terrestres fixes tout en évitant les zones d'exclusion aérienne. Pour réussir les attaques, l'UCAV doit voler dans l'espace d'attaque avec cibles autorisé (qui consistait en un espace aérien en forme de cône creux autour de la cible) tout en respectant les contraintes de vitesse et d'attitude de largage du projectile. L'UCAV a été modélisé par un EOM 3DOF haute-fidélité prenant en compte les vitesses du vent.

Afin de résoudre ce problème, Zhang et al. [32] proposent une Approche de calcul hiérarchique à deux niveaux. Au premier niveau, l'espace d'états du véhicule est échantillonné et discrétisé en un ensemble de points réalisables qui croisent la région d'attaque autorisée des cibles en utilisant une méthode de feuille de route probabiliste modifiée. Ensuite, pour chaque paire de points échantillonnés n'appartenant pas à la même cible, un problème TO a été résolu pour obtenir des trajectoires réalisables (par rapport à la dynamique du véhicule et aux contraintes opérationnelles). Le deuxième niveau de décision consiste à résoudre (GTSP) sur le réseau produit au premier niveau. Ceci est accompli en transformant le GTSP en une instance du TSP asymétrique au moyen de la méthode de transformation noon-bean. L'heuristique de Lin-Kernighan a ensuite été utilisée pour résoudre l'ATSP. Pour plus de flexibilité dans les applications pratiques, les auteurs ont intégré cet algorithme dans un cadre temps réel. Les simulations numériques ont montré que ces algorithmes sont gourmands en calculs. Les auteurs ont rapporté que pour résoudre un cas de test avec trois cibles et une zone d'exclusion aérienne, plus 50 minutes étaient nécessaires.

Fügenschuh et Müllenstedt [33] ont étudié le problème de la conception et de la planification de chemin d'une flotte de drones hétérogènes sur un ensemble de points de passage à suivre (waypoints). Les waypoints doivent être sélectionnés dans une liste et pondérés par un score qui leur est associé individuellement. L'objectif étant une optimisation double, la maximisation du score total (défini comme la somme des scores individuels) et une minimisation du temps de vol total.

Afin de modéliser le mouvement des drones, une approche dynamique linéaire par morceaux a été choisie. Cette approche basée sur la loi de Newton a l'avantage d'être simple puisque la version discrétisée de ces équations de mouvement (MOE) est également linéaire.

D'autre part, cette modélisation de la dynamique de vol des UAV présente des limites de précision. Pour une représentation de la portée des capteurs liés aux drones, les points de balisage ont été estimés comme reposant à l'intérieur d'une sphère.

Un waypoint serait considéré comme inspecté si un UAV pénètre sa sphère de couverture. Les zones d'évitement des collisions entre les UAV et d'exclusion aérienne ont également été pris en compte. De plus, différents emplacements pourraient être choisis pour lancer chaque drone.

Les auteurs ont proposé une formulation MINLP à ce problème, qui a été linéarisée et pourrait être résolue par un logiciel d'optimisation commercial MILP. Des Simulations informatiques ont montré que le temps de calcul nécessaire pour résoudre des petits problèmes (selon le nombre de waypoint, de zones d'exclusion et de drones), jusqu'à l'optimalité, variait entre 57 et 3400 secondes.

E.J. Forsmo [34] a présenté une approche similaire. Afin de modéliser le mouvement des drones, Forsmo a appliqué la deuxième loi de Newton tout en imposant des contraintes sur la vitesse, l'amplitude des forces et les taux de lacet, ce qui a augmenté la complexité de la modélisation des UAV. Un ensemble de contraintes opérationnelles ont été prises en considération, telles que les obstacles et l'évitement de collisions.

Des scénarios avec deux drones et plusieurs points de marquage de parcours ont été générés. Une formulation MILP a été proposée afin de trouver des trajectoires avec des temps de vol minimum passant par tous les waypoints tout en étant soumis à des contraintes de mission et opérationnelles. Des simulations computationnelles ont été réalisées sur 5 cas tests, construits en faisant varier le nombre de drones (1 ou 2), de waypoints (6 ou 8) et en

imposant ou non un ordre de visite. Les auteurs ont montré que les temps de calcul pouvaient être réduits en diminuant l'horizon de temps de vol.

I.2.4 Commande appliquée au drone (UAV)

G. Veselov et al [35] ont exploré le problème de la conception d'une loi de contrôle synergique pour un groupe de robots mobiles. Pour résoudre ce problème, ils ont une nouvelle approche de la commande d'un groupe de robots mobiles basée sur les principes et les méthodes de la théorie de la commande synergique. La conception synergique de la commande d'un groupe de quadricoptères est considérée avec l'analyse d'un modèle mathématique et avec un objectif spécifié.

Dans la théorie de la commande synergique, l'ensemble des critères du système de commande est généralement exprimé sous la forme d'un système approprié d'invariants. Les invariants jouent le rôle d'objectifs de contrôle, ils mettent en application un problème technologique donné, et la procédure de synthèse synergétique se réduit au processus de recherche des lois de contrôle sur lesquelles ces invariants donnés sont satisfaits. Les lois de contrôle synthétisées fournissent un mouvement asymptotiquement stable d'un groupe de robots mobiles avec un type de formation spécifié.

M. Abbadi et al [36] ont développé des systèmes de commande robustes pour faire face aux incertitudes paramétriques et aux perturbations externes. Dans le cas des drones multirotores, les incertitudes proviennent de la rotation de l'hélice, du battement des pales, du changement de la vitesse de rotation de l'hélice et de la position du centre de masse, ce qui nécessite un contrôleur non-linéaire robuste. Les compensations des non-linéarités du stator ont été abordées en combinant le contrôleur non linéaire en mode glissant avec le contrôleur non linéaire backstepping et un observateur de perturbations non linéaires. Le contrôleur backstepping a stabilisé le mouvement de translation, tandis que le contrôleur en mode glissant a permis le control du mouvement rotatif du quadrirotor.

J. Muliadi et al [37] ont faits une comparaison d'un contrôleur PID avec un contrôleur à base de réseau de neurones, plus précisément un réseau neuronal de contrôle direct par modèle inverse (contrôle inverse direct). Les résultats de la comparaison ont montré que le réseau neuronal de contrôle inverse direct est plus performant que le contrôleur PID pour gérer la dynamique d'altitude du Quadrirotor. De plus, dans des conditions de vol stationnaire, le réseau neuronal de contrôle inverse direct a montré moins d'erreur en régime permanent que le contrôleur PID. Ainsi que les oscillations transitoires s'amortissent plus

rapidement avec le réseau neuronal de contrôle inverse direct, ce qui montre qu'il gère mieux les non-linéarités que le PID.

W. Koch et al [38] ont étudié les performances et la précision d'un contrôleur d'attitude. Le contrôleur d'attitude est un contrôleur basé sur un réseau de neurones (NN) entraîné par des algorithmes de pointe d'apprentissage par renforcement (RL). Les performances du contrôleur NN ont été comparées à celles d'un contrôleur PID afin de déterminer l'adéquation du contrôleur NN pour un contrôle de vol de haute précision et à temps critique. La performance du contrôleur a été évaluée en simulation en utilisant l'environnement GYMFC. Les résultats ont montré que le RL peut former des contrôleurs d'attitude précis, également le contrôleur entraîné a surpassé un contrôleur PID sur presque chaque métrique.

M. Guanglei et al [39] ont conçus des contrôleurs PID pour l'altitude et la position. Une expérimentation en environnement extérieur est menée sur la base du GPS pour vérifier les performances, et les points de cheminement de la trajectoire souhaitée sont déterminés à l'aide du logiciel Mission Planar. Un capteur à ultrasons est utilisé pour détecter les obstacles pendant le vol, de sorte que la position du quadricoptère est ajustée en fonction du signal du capteur à ultrasons afin d'éviter toute collision.

Un contrôleur PID en cascade utilisant d'un télémètre laser combiné à un accéléromètre afin de déterminer la hauteur du véhicule a été présenté par Zhao et al [40]. Le système proposé est comparé aux performances du système en utilisant un GPS combiné à un manomètre. Cependant, les résultats du système proposé présentent de meilleures performances, en particulier dans la plage de basse altitude.

La commande centralisée de vol en formation d'une structure leader/suiveur de trois quadcoptères est proposée par Q. Ali et al [41] en utilisant LQR-PI, la trajectoire du leader définit la trajectoire souhaitée pour les suiveurs. Un contrôleur de placement de pôle est utilisé pour le leader et des contrôleurs LQR-PI pour les suiveurs. En cas de perte de communication entre le leader et l'un des suiveurs, un autre quadcoptère suiveur fournit les états du leader au quadcoptère suiveur affecté afin de maintenir la formation intacte.

I.3 Conclusion

Dans le présent chapitre on a tenté de fournir une vue d'ensemble d'un grand nombre de publications dans le domaine, en se concentrant particulièrement sur le domaine des

méthodologies de contrôle, de navigation et de planification des robots mobiles terrestres et volants.

Des descriptions plus détaillées des méthodologies peuvent être trouvées dans les livres et articles cités.

CHAPITRE II

COMMANDE BACKSTEPPING APPLIQUEE AUX ROBOTS MOBILES A ROUES

CHAPITRE II

Commande Backstepping Appliquée aux Robots Mobiles à Roues

II.1 Introduction

La théorie de commande non linéaire fait l'objet d'intenses recherches aux cours des deux dernières décennies. Les outils développés dans ce domaine sont appliqués à l'étape de la conception et exploités comme modules de commande dans les systèmes non linéaires.

Actuellement, les approches sont plus structurées et développées comparativement aux anciens outils de contrôle. La méthode connue sous le nom de Backstepping fournit un outil de conception récursive des lois de commandes basées sur la théorie de Lyapunov.

La théorie de Lyapunov a été pendant longtemps un moyen important dans la commande des systèmes linéaires aussi bien que dans la commande non linéaire. Néanmoins, son utilisation dans la commande non linéaire a été limitée par la difficulté de déterminer des fonctions de Lyapunov pour certains types de systèmes. L'invention des outils constructifs pour la mise en place de théories permettant la conception de commande non linéaire basée sur la théorie de Lyapunov, comme le *Backstepping*, a été donc reçue à bras ouverts par les concepteurs de systèmes de commande.

La méthodologie du *Backstepping* peut être considérée comme une manière d'organiser un système en plusieurs sous-systèmes en cascade. Sur un plan général, l'exploitation de cette méthodologie de conception débouche à la mise en place d'une loi de commande par rétroaction associée systématiquement à une fonction de Lyapunov ou l'équivalent.

Dans un premier temps on va présenter le modèle d'un robot mobile à roues afin de l'exploiter ensuite pour l'élaboration d'une loi de commande backstepping.

L'objectif de ce chapitre est la présentation de la commande backstepping en s'appuyant sur des exemples, puis l'application de la loi de commande backstepping adaptative afin de contrôler un robot mobile pour qu'il atteigne un objectif (but) défini par un système de

détection de cible dans un environnement contrôlé. Dans ce chapitre sont présentées et détaillées les techniques de détection de cible mise en œuvre. Les résultats expérimentaux des méthodes de détection d'objet ainsi que les résultats de simulation de l'application de loi de commande backstepping adaptative au robot mobile à roues seront exposés.

II.2 Architecture des robots mobiles

Contrairement au robot industriel qui est généralement fixé, le robot mobile est doté de moyens de locomotions qui lui permettent de se déplacer dans son espace de travail. Suivant son degré d'autonomie ou degré d'intelligence, il peut être doté de moyens de perception et de raisonnement. Certains sont capables, sous contrôle humain réduit, de modéliser leur espace de travail et de planifier un chemin dans un environnement qu'ils ne connaissent pas forcément d'avance [42].

En général un robot mobile est constitué de trois structures :

- **Structure mécanique** : elle assure le mouvement du robot par des roues motrices placées selon le type de mouvement et la précision de la tâche voulue.
- **Structure instrumentale** : un robot est équipé d'un certain nombre de capteurs de sécurité afin de lui donner une certaine connaissance de l'environnement. Selon l'application, les capteurs peuvent être :
 - Des systèmes de vision.
 - Un télémètre laser.
 - Un télémètre ultrasonore.
 - Un télémètre optique.
 - Des capteurs tactiles de sécurité.
- **Structure informatique** : une commande numérique est impérative, afin de bien analyser les différentes informations, soit du système de perception ou de localisation. Cette structure de commande peut être à base d'un microprocesseur ou microcontrôleur.

II.3 Modèle dynamique du robot mobile

Pour cette étude, nous avons pris comme modèle un robot à trois roues dont deux motrices et une folle. Ce type de modèle est très utilisé dans les laboratoires de robotique et dans l'industrie. De plus, son étude est simple et peut être généralisée sur d'autres types de robots à roues.

Parmi les caractéristiques géométriques et mécaniques nous citons :

- Il s'agit d'un robot mobile rectangulaire tricycle.
- Deux roues motrices dont la direction reste fixe par rapport au robot mobile.
- Une roue d'orientation (roue folle), totalement libre. Le changement de direction est ainsi obtenu par la différence de vitesse des deux roues motrices.

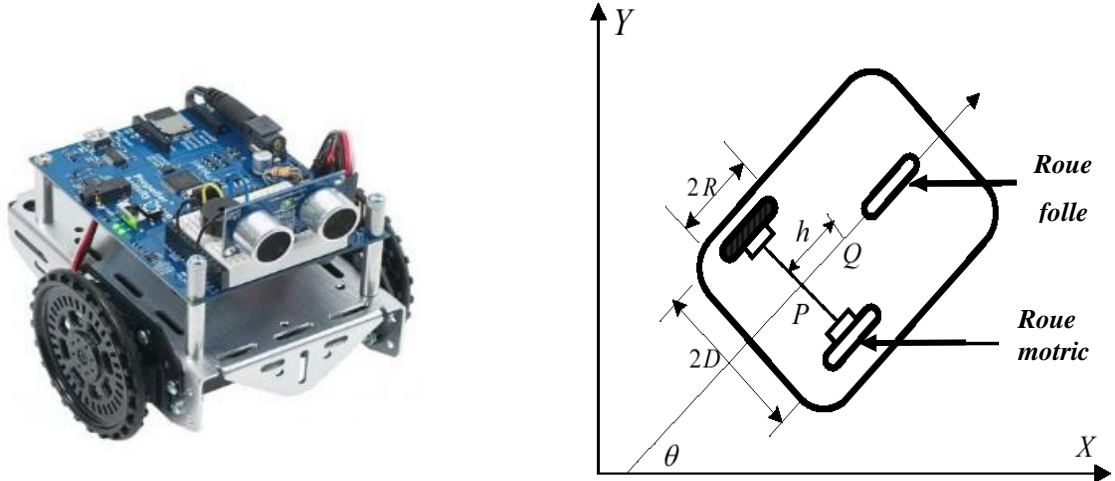


Figure (II.1) Schéma représentatif du robot mobile

Le modèle dynamique du robot $\delta(2,0)$ choisi [43] est donné par :

$$\begin{aligned} \dot{q} &= S(q) \cdot v \\ H \cdot \ddot{v} + B \cdot \dot{v} + K \cdot v &= U \end{aligned} \quad (\text{II.1})$$

où x et y sont les coordonnées du point P , $q = (x, y, \theta)^T$;

$v = (v_1, v_2)^T$, v_1 et v_2 , sont respectivement la vitesse linéaire et la vitesse angulaire.

Les matrices correspondantes mentionnées ci-dessus sont définies comme suit :

$$S(q) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -h \cdot \sin\theta \\ \sin\theta & h \cdot \cos\theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

$$H = \frac{R \cdot l}{2 \cdot D \cdot \beta \cdot k_T} \begin{bmatrix} m \cdot D & I_0 \\ m \cdot D & -I_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

$$B = \frac{R \cdot r}{2 \cdot D \cdot \beta \cdot k_T} \begin{bmatrix} m \cdot D & I_0 \\ m \cdot D & -I_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

$$K = \frac{k_e \cdot \beta}{R} \begin{bmatrix} 1 & D \\ 1 & -D \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$q = [x, y, \theta]^T$,

m : la masse du robot,

I_0 : inertie,

R : rayon des roues motrices

D : distance entre les roues motrices

h : distance entre le centre de l'axe des roues motrices et le centre de masse du robot

θ : l'orientation du robot dans le repère fixe

l : inductance du moteur,

r : résistance d'armature du moteur,

k_e : Coefficient du moteur,

U : tension d'entrée,

β : rapport de réduction,

k_T : constante du couple moteur.

II.4 Commande Backstepping

II.4.1 Principe de la commande Backstepping

Le backstepping a été développé par Kanellakopoulos et al [44] et inspiré par les travaux de Feurer et Morse [44] d'une part et Tsiniias [44] et Kokotovic et Sussmann [44] d'autre part.

Dans leur article Sontag et Sussmann [45] vont utiliser d'une commande virtuelle qui permettra la contribution ultérieure de Kokotovic et Sussmann [46] dans laquelle un système non-linéaire a été décomposé en 2 sous-systèmes, le premier sous-système étant commandé virtuellement par un état du deuxième sous-système.

Le backstepping est un algorithme récursif qui permet un choix adéquat des fonctions de Lyapunov permettant ainsi de garantir la stabilité du système. Il offre une méthode systématique pour effectuer la synthèse d'un contrôleur pour les systèmes non linéaires. L'idée consiste à calculer une loi de commande afin de garantir que la dérivée d'une certaine fonction (de Lyapunov) définie positive soit toujours négative.

La méthode consiste à fragmenter le système en un ensemble de sous-systèmes imbriqués d'ordre décroissant avec une structure triangulaire inférieure.

Le calcul de la fonction de Lyapunov s'effectue, après définition des variables d'erreurs, récursivement en partant de l'intérieur de la boucle.

A chaque étape, l'ordre du système est augmenté et la partie non stabilisée lors de l'étape précédente est traitée en calculant la fonction stabilisante.

A la dernière étape, la loi de commande est trouvée. Celle-ci permet de garantir, en tout temps, la stabilité globale du système compensé tout en réalisant l'objectif de poursuite et de régulation.

Avant d'appliquer la loi de commande Backstepping sur le système robotisé choisi, et dans le but d'explicitier cette commande, nous allons traiter l'application une commande backstepping non adaptative puis une commande backstepping adaptative sur un exemple, en occurrence, système non linéaire de deuxième ordre.

II.4.2 Exemples d'application

II.4.2.1 Approche non adaptative

Présentation du système

Soit le système non linéaire de deuxième ordre :

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 + \varphi_1(x_1) \cdot \theta \\ \dot{x}_2 &= \beta \cdot u + \varphi_2(x_1, x_2) \cdot \theta \\ y &= x_1\end{aligned}\tag{II.6}$$

tel que θ : paramétrique connu, $\varphi_1(x_1)$ et $\varphi_2(x_1, x_2)$: fonctions non linéaire lisse avec $\varphi_1(0)=0$ et $\varphi_2(0,0)=0$.

Le diagramme, présenté par la figure suivante, expose un exemple d'ordre deux et les fonctions non linéaires dépendent seulement des variables d'état.

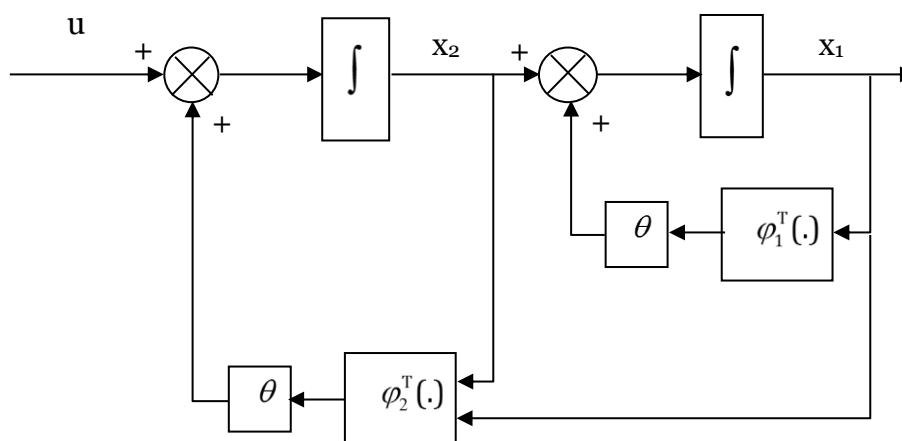


Figure (II.2) Schéma du système d'ordre deux

Étapes de la technique

1^{ère} étape : On adopte le choix des variables d'erreurs suivant :

$$\begin{aligned} z_1 &= x_1 - y_r \\ z_2 &= x_2 - \alpha_1 \end{aligned} \quad (\text{II.7})$$

y_r : Consigne (valeur désirée)

$\alpha_1 = x_2$ (*stabilisante*) la fonction stabilisante de l'état x_2

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= \dot{x}_1 - \dot{y}_r \\ &= x_2 + \varphi_1(x_1) \cdot \theta - \dot{y}_r \end{aligned} \quad (\text{II.8})$$

2^{ème} étape : On choisit la première fonction de Lyapunov définie positive :

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (\text{II.9})$$

Sa dérivée :

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= z_1 \dot{z}_1 \\ &= z_1 (x_2 + \varphi_1(x_1) \cdot \theta - \dot{y}_r) \\ &= z_1 (+c_1 z_1 - c_1 z_1 + x_2 + \varphi_1(x_1) \cdot \theta - \dot{y}_r) \\ &= -c_1 z_1^2 + z_1 (+c_1 z_1 + x_2 + \varphi_1(x_1) \cdot \theta - \dot{y}_r) \end{aligned} \quad (\text{II.10})$$

avec : c_1 une constante positive

$\alpha_1 = x_2$ (*stabilisante*) la fonction stabilisante de l'état x_2 afin de garantir que la dérivée de la fonction de Lyapunov soit définie négative $\dot{V}_1 < 0$.

Pour cela : $c_1 z_1 + x_2 + \varphi_1(x_1) \cdot \theta - \dot{y}_r = 0$ pour atteindre $\dot{V}_1 = -c_1 z_1^2$

ce qui donne :

$$\alpha_1 = x_2(\text{stabilisante}) = -c_1 (x_1 - y_r) - \varphi_1(x_1) \cdot \theta + \dot{y}_r \quad (\text{II.11})$$

En remplaçant (II.11) dans (II.8) alors :

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= x_2 - c_1 z_1 - \alpha_1 \\ &= -c_1 z_1 + z_2 \end{aligned} \quad (\text{II.12})$$

3^{ème} étape : La deuxième fonction de Lyapunov est définie positive tel que :

$$V_2 = \frac{1}{2}z_1^2 + \frac{1}{2}z_2^2 = V_1 + \frac{1}{2}z_2^2 \quad (\text{II.13})$$

Sa dérivée :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 \\ &= z_1 \dot{z}_1 + z_2 (\dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1) \\ &= z_1 (-c_1 z_1 + z_2) + z_2 (\dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1) \\ &= -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 + z_2 (u + \varphi_2^T(x_1, x_2) \cdot \theta - \dot{\alpha}_1) \\ &= -c_1 z_1^2 + z_2 (z_1 + \beta \cdot u + \varphi_2^T(x_1, x_2) \cdot \theta - \dot{\alpha}_1) \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

Avec : $\alpha_1 = -c_1(x_1 - y_r) - \varphi_1(x_1) \cdot \theta + \dot{y}_r$

De ce fait :

$$\dot{\alpha}_1 = \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \dot{y}_r + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \dot{y}_r} \ddot{y}_r \quad (\text{II.15})$$

En remplaçant (II.15) dans (II.14)

$$\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 + z_2 \cdot \left[z_1 + \beta \cdot u + \varphi_2^T(x_1, x_2) \cdot \theta - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} (x_2 + \varphi_1(x_1)^T \cdot \theta) - \ddot{y}_r - \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \cdot \dot{y}_r \right] \quad (\text{II.16})$$

Afin de rendre la dérivée de la fonction de Lyapunov définie négative $\dot{V}_2 < 0$, la loi de commande est prise $u = \alpha_2$

Pour réaliser et atteindre la négativité la commande u est choisi comme :

$$z_1 + \beta \cdot u + \varphi_2^T(x_1, x_2) \cdot \theta - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} (x_2 + \varphi_1(x_1)^T \cdot \theta) - \ddot{y}_r - \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \cdot \dot{y}_r = -c_2 z_2 \text{ avec } c_2 > 0$$

$$u = (-c_2 z_2 - z_1 - \varphi_2^T(x_1, x_2) \cdot \theta + \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} (x_2 + \varphi_1(x_1)^T \cdot \theta) + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \cdot \dot{y}_r + \ddot{y}_r) / \beta \quad (\text{II.17})$$

alors :

$$\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 < 0 \quad (\text{II.18})$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{z}_1 z_1 + \dot{z}_2 z_2 \\ &= -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 + \dot{z}_2 z_2 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 \end{aligned}$$

Alors : $\dot{z}_2 = -c_2 z_2 - z_1$

Ce qui signifie que l'équilibre est globalement asymptotiquement stable. Cela peut être vu du fait que le système $\dot{Z} = A.Z$ est linéaire stable (voir les valeurs propres de A) :

$$\text{avec : } A = \begin{bmatrix} -c_1 & 1 \\ -1 & -c_2 \end{bmatrix}, Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}.$$

Exemple1

Les résultats de simulations ci-dessous sont ceux du modèle considéré suivant :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + \varphi_1(x_1).\theta \\ \dot{x}_2 &= \beta.u \\ y &= x_1 \end{aligned} \tag{II.19}$$

Pour une fonction non linéaire $\varphi_1(x_1) = [\sin(x_1) \quad x_1^3]$ et une entrée de référence constante.

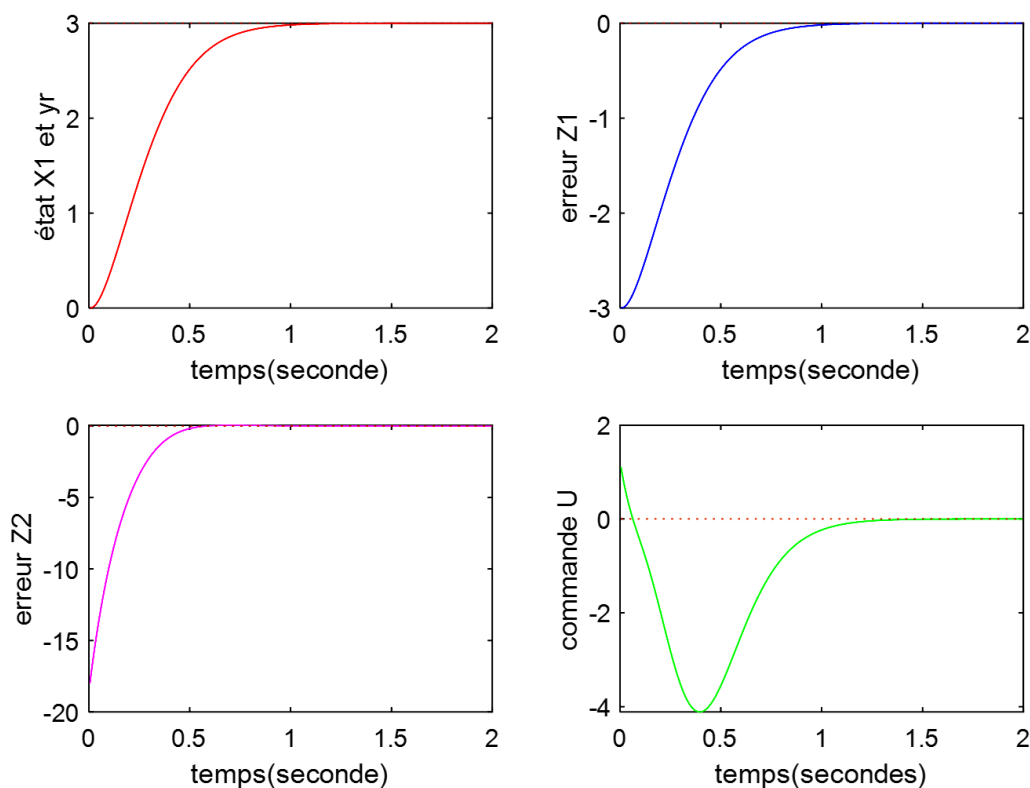


Figure (II.3) Résultats de simulation de l'exemple 1

Exemple 2

Les résultats de simulations ci-dessous sont ceux du modèle considéré suivant :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + \varphi_1(x_1) \cdot \theta \\ \dot{x}_2 &= \beta \cdot u + \varphi_2(x_1, x_2) \cdot \theta \\ y &= x_1 \end{aligned} \tag{II.20}$$

Pour une fonction non linéaire $\varphi_1(x_1) = \sin(x_1)$, $\varphi_2(x_1, x_2) = x_1 \cdot x_2$ et une entrée de référence constante.

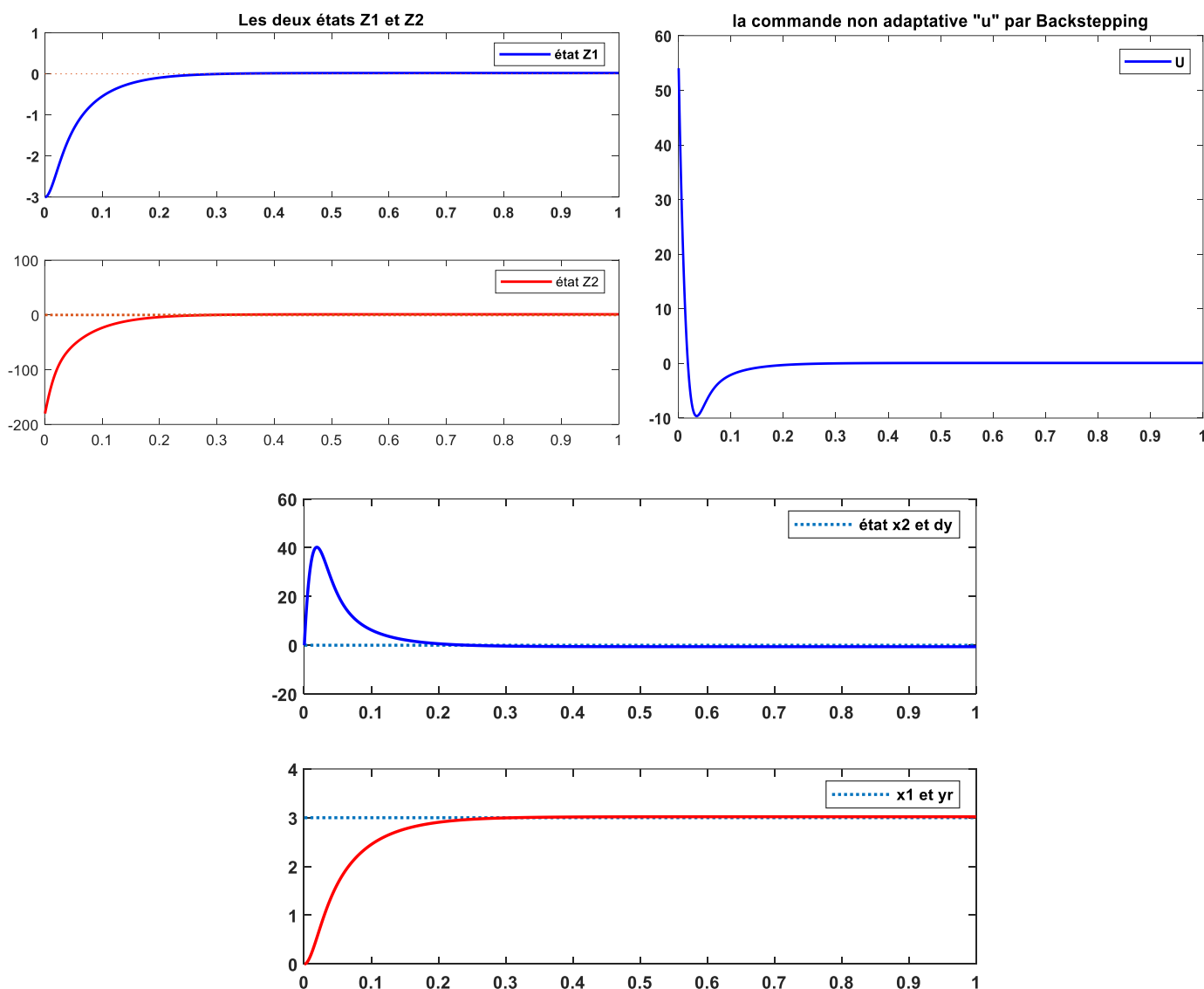


Figure (II.4) Résultats de simulation de l'exemple 2

Ces deux exemples consistent en une application de la commande backstepping non adaptative à un système non linéaire dans le but de réaliser une commande de régulation.

- Poursuite $y_r = \sin(5.t)$

Exemple3

Les résultats de simulations ci-dessous sont ceux du modèle considéré suivant :

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 + \varphi_1(x_1).\theta \\ \dot{x}_2 &= \beta.u \\ y &= x_1\end{aligned}\tag{II.21}$$

Pour une fonction non linéaire $\varphi_1(x_1) = \sin(x_1)$, et une entrée de référence $y_r = \sin(5.t)$

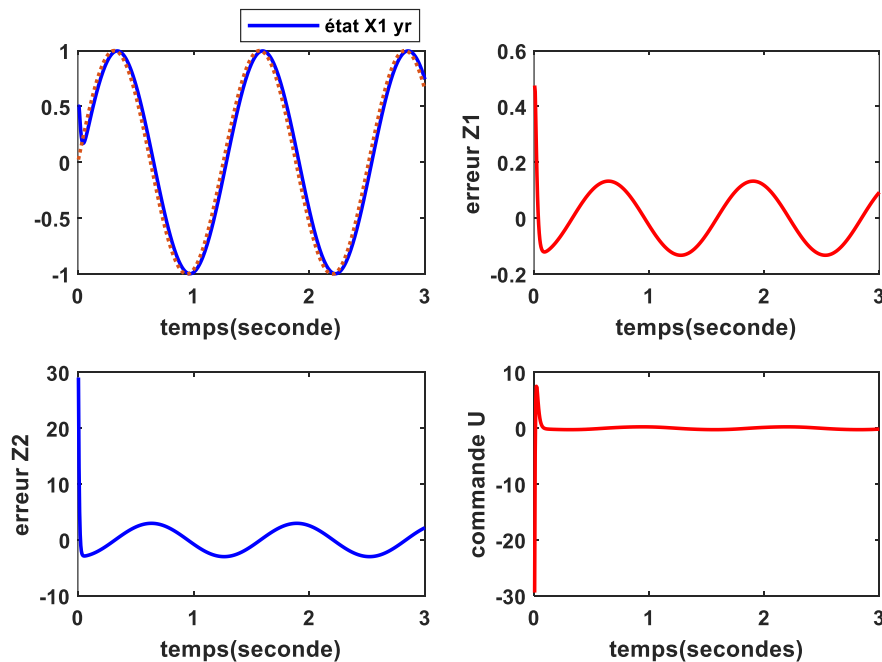


Figure (II.5) Résultats de simulation de l'exemple 3

Cet exemple consiste en une poursuite de trajectoire par le système grâce à l'application de la commande backstepping non adaptative.

4.2.2 Approche adaptative

Le problème d'adaptation surgit à cause du paramètre inconnu θ et la fonction non-linéaire $\varphi_1(x_1)$ est connu avec $\varphi(0)=0$. On utilise le même modèle (II.6) pour voir la différence :

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 + \varphi_1(x_1) \cdot \theta \\ \dot{x}_2 &= \beta \cdot u + \varphi_2(x_1, x_2) \cdot \theta \\ y &= x_1\end{aligned}$$

1^{ère} étape : On adopte le choix des erreurs suivantes :

$$\begin{aligned}z_1 &= x_1 - y_r \\ z_2 &= x_2 - \alpha_1 \\ \tilde{\theta} &= \theta - \hat{\theta}\end{aligned}\tag{II.22}$$

θ : valeur réelle ; $\hat{\theta}$: valeur estimée ; $\tilde{\theta}$: erreur d'estimation

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= \dot{x}_1 - \dot{y}_r \\ &= x_2 + \varphi_1(x_1) \cdot \theta - \dot{y}_r \\ &= x_2 + \varphi_1(x_1) \cdot (\hat{\theta} + \tilde{\theta}) - \dot{y}_r \\ &= x_2 + \varphi_1(x_1) \cdot \hat{\theta} + \varphi_1(x_1) \cdot \tilde{\theta} - \dot{y}_r \\ \dot{z}_2 &= \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 \\ \dot{\tilde{\theta}} &= -\dot{\hat{\theta}}\end{aligned}\tag{II.23}$$

2^{ème} étape : La première fonction de Lyapunov est définie positive :

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2\tag{II.24}$$

Sa dérivée s'écrit :

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= z_1 \dot{z}_1 \\ &= z_1 \left(x_2 + \varphi_1(x_1) \cdot (\hat{\theta} + \tilde{\theta}) - \dot{y}_r \right) \\ &= z_1 \left(+c_1 z_1 - c_1 z_1 + x_2 + \varphi_1(x_1) \cdot \hat{\theta} + \varphi_1(x_1) \cdot \tilde{\theta} - \dot{y}_r \right) \\ &= -c_1 z_1^2 + \varphi_1(x_1) \cdot \tilde{\theta} \cdot z_1 + z_1 \left(+c_1 z_1 + x_2 + \varphi_1(x_1) \cdot \hat{\theta} - \dot{y}_r \right)\end{aligned}\tag{II.25}$$

avec : c_1 une constante positive

$\alpha_1 = x_2$ (*stabilisante*) la fonction stabilisante de l'état x_2 afin de garantir que la dérivée de la fonction de Lyapunov soit définie négative $\dot{V}_1 < 0$.

De ce fait : $c_1 z_1 + x_2(\text{stabilisante}) + \varphi(x_1) \cdot \hat{\theta} - \dot{y}_r = 0$ permet d'atteindre $\dot{V}_1 = -c_1 z_1^2$ ce qui donne :

$$\alpha_1 = x_2(\text{stabilisante}) = -c_1 (x_1 - y_r) - \varphi_1(x_1) \cdot \hat{\theta} + \dot{y}_r \quad (\text{II.26})$$

En remplaçant (II.26) dans (II.23)

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= x_2 + \varphi_1(x_1) \cdot \tilde{\theta} - c_1 z_1 - \alpha_1 \\ &= -c_1 z_1 + z_2 + \varphi_1(x_1) \cdot \tilde{\theta} \end{aligned} \quad (\text{II.27})$$

3^{ème} étape : On définit la deuxième fonction de Lyapunov définie positive :

$$V_2 = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} z_2^2 \quad (\text{II.28})$$

Sa dérivée :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= z_1 \dot{z}_1 + z_2 \dot{z}_2 = z_1 \dot{z}_1 + z_2 \dot{z}_2 \\ &= z_1 \dot{z}_1 + z_2 (\dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1) \\ &= z_1 (-c_1 z_1 + z_2 + \varphi_1(x_1) \tilde{\theta}) + z_2 (\dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1) \\ &= -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 + \varphi_1(x_1) \tilde{\theta} \cdot z_1 + z_2 (u + \varphi_2(x_1, x_2) \cdot \theta - \dot{\alpha}_1) \\ &= -c_1 z_1^2 + \varphi_1(x_1) \tilde{\theta} \cdot z_1 + \varphi_2(x_1, x_2) \cdot \tilde{\theta} \cdot z_2 + z_2 (z_1 + u + \varphi_2(x_1, x_2) \cdot \hat{\theta} - \dot{\alpha}_1) \end{aligned} \quad (\text{II.29})$$

Avec : $\alpha_1 = -c_1 (x_1 - y_r) - \varphi_1(x_1) \cdot \hat{\theta} + \dot{y}_r$ On peut déduire que :

$$\dot{\alpha}_1 = \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}} + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \dot{y}_r + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \dot{y}_r} \ddot{y}_r \quad (\text{II.30})$$

Alors :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -c_1 z_1^2 + \varphi_1(x_1) \tilde{\theta} \cdot z_1 + \varphi_2(x_1, x_2) \tilde{\theta} \cdot z_2 \\ &\quad + z_2 \cdot \left[u + \varphi_2(x_1, x_2) \cdot \hat{\theta} + z_1 - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} (x_2 + \varphi(x_1) \cdot (\hat{\theta} + \tilde{\theta})) - \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}} - \ddot{y}_r - \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \cdot \dot{y}_r \right] \end{aligned} \quad (\text{II.31})$$

4^{ème} étape :

$$V_3 = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^2 = V_2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^2$$

$$\begin{aligned}
\dot{V}_3 &= \dot{V}_2 + \tilde{\theta} \cdot \dot{\tilde{\theta}} \\
&= -c_1 z_1^2 + \varphi_1(x_1) \tilde{\theta} \cdot z_1 + \varphi_2(x_1, x_2) \tilde{\theta} \cdot z_2 \\
&\quad + z_2 \cdot \left[u + \varphi_2(x_1, x_2) \hat{\theta} + z_1 - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} (x_2 + \varphi_1(x_1)) (\hat{\theta} + \tilde{\theta}) - \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}} - \ddot{y}_r - \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \cdot \dot{y}_r \right] - \tilde{\theta} \cdot \dot{\hat{\theta}}
\end{aligned} \tag{II.32}$$

$$\begin{aligned}
\dot{V}_3 &= -c_1 z_1^2 - \tilde{\theta} \cdot \dot{\hat{\theta}} - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} \varphi_1(x_1) \cdot z_2 \tilde{\theta} + \varphi_1(x_1) \tilde{\theta} \cdot z_1 + \varphi_2(x_1, x_2) \tilde{\theta} z_2 \\
&\quad + z_2 \cdot \left[u + \varphi_2(x_1, x_2) \hat{\theta} + z_1 - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} (x_2 + \varphi_1(x_1)) \cdot \hat{\theta} - \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}} - \ddot{y}_r - \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \cdot \dot{y}_r \right] \\
\dot{V}_3 &= -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + \left[-\dot{\hat{\theta}} - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} \varphi_1(x_1) \cdot z_2 + \varphi_1(x_1) \cdot z_1 + \varphi_2(x_1, x_2) z_2 \right] \tilde{\theta} \\
&\quad + z_2 \cdot \left[u + \varphi_2(x_1, x_2) \hat{\theta} + z_1 + c_2 z_2 - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} (x_2 + \varphi_1(x_1)) \cdot \hat{\theta} - \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}} - \ddot{y}_r - \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \cdot \dot{y}_r \right]
\end{aligned} \tag{II.33}$$

Pour atteindre la convergence et la stabilité asymptotique globale $\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 < 0$, il faut choisir :

- **La loi d'adaptation :**

$$\dot{\hat{\theta}} = -\frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} \varphi_1(x_1) \cdot z_2 + \varphi_1(x_1) \cdot z_1 + \varphi_2(x_1, x_2) z_2 \tag{II.34}$$

- **La loi de commande :**

$$u = \alpha_2(x_1, x_2, \hat{\theta}) = -c_2 z_2 - z_1 - \varphi_2(x_1, x_2) \cdot \hat{\theta} + \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} (x_2 + \varphi_1(x_1)) \cdot \hat{\theta} + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}} + \ddot{y}_r + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \cdot \dot{y}_r \tag{II.35}$$

\dot{V}_2 est négative et la stabilité globale est réalisée. Enfin, il résulte que l'équilibre $x_1 = y_r$ est globalement stable et $\lim_{t \rightarrow \infty} x_1(t) = y_r$.

Exemple4

Les résultats de simulations ci-dessous sont ceux du modèle considéré suivant :

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_2 + \varphi_1(x_1) \cdot \theta \\
\dot{x}_2 &= \beta \cdot u + \varphi_2(x_1, x_2) \cdot \theta \\
y &= x_1
\end{aligned} \tag{II.36}$$

Pour une fonction non linéaire $\varphi_1(x_1) = [\sin(x_1), x_1^2]$, $\varphi_2(x_1, x_2) = 0$ et une entrée de référence $y_r = 1$

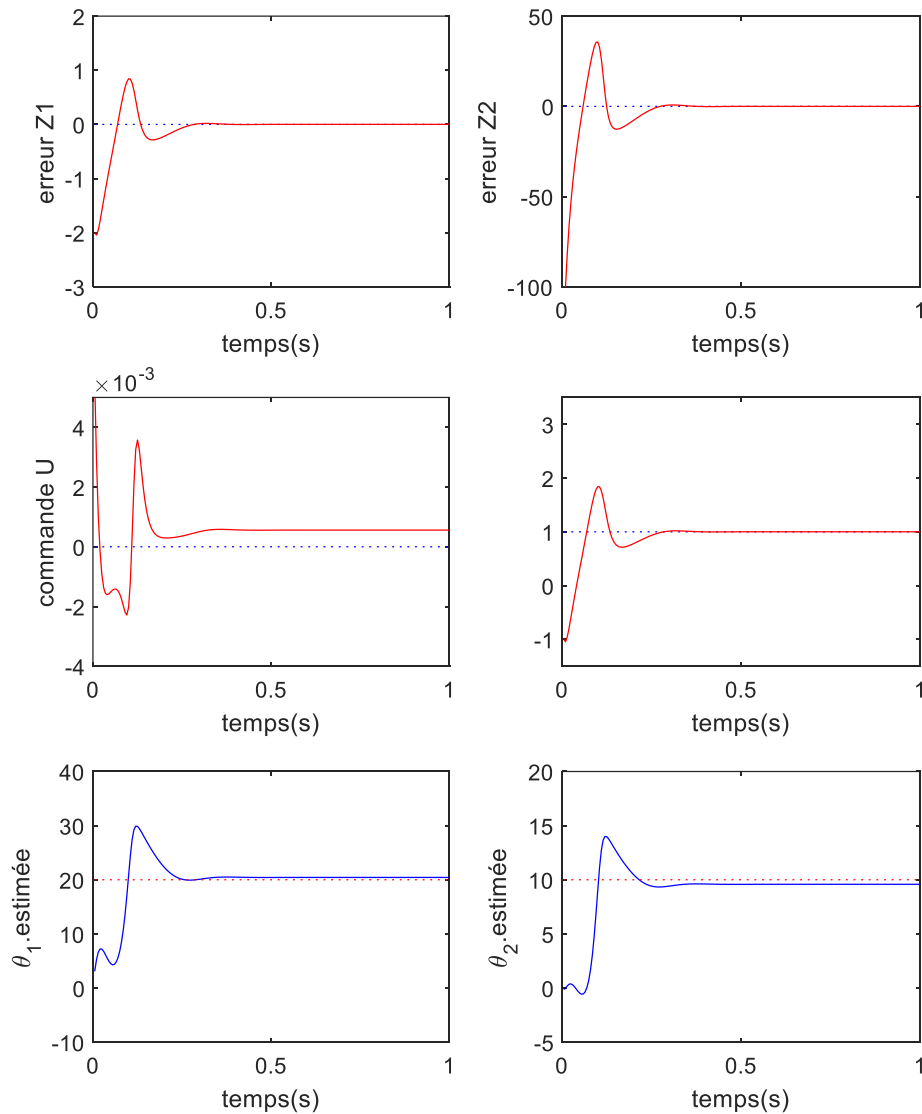


Figure (II.6) Résultats de simulation de l'exemple 4

II.5 Application de la commande backstepping au robot mobile

II.5.1 Dédution du modèle appliqué

Soit le modèle donné par les équations de (II.1) à (II.5).

Pour pouvoir appliquer la commande adaptative par la technique backstepping, il est préférable de séparer les paramètres inconnus des fonctions connues. Pour réaliser cela, les changements de variables suivants seront adoptés.

$$H_1 = \begin{bmatrix} 1/m & 1/m \\ D/I_0 & -D/I_0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \Phi_1 = \frac{k_T \cdot \beta}{1.R}, \Phi_2 = \frac{2.k_e \cdot k_T \cdot \beta^2}{1.R^2}, \Phi_3 = \frac{r}{1} \quad (\text{II.37})$$

Avec quelques opérations mathématiques, on trouve les expressions suivantes :

$$H^{-1} = \Phi_1 \cdot H_1, \quad H^{-1} \cdot K = \Phi_2 \cdot K_1, \quad H^{-1} \cdot B = \Phi_3 \cdot B_1$$

Ce qui permet d'avoir la représentation d'état suivante :

$$\begin{aligned} \dot{q} &= S(q) \cdot v \\ \dot{v} &= W \\ \dot{W} &= \Phi_1 \cdot H_1 \cdot U - \Phi_2 \cdot K_1 \cdot v - \Phi_3 \cdot B_1 \cdot W \end{aligned} \quad (\text{II.38})$$

tel que $q = [x, y, \theta]^T$, W variable intermédiaire qui satisfait $W = [w_1 \ w_2]^T = \dot{v}$ et $v = [v_1 \ v_2]^T$.

On prend la position centre du système robot comme entrée :

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + h \cdot \cos\theta \\ y + h \cdot \sin\theta \end{bmatrix} \text{ avec } h \neq 0 \quad (\text{II.39})$$

Les dérivées de l'équation (II.39) auront les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} \dot{Y} &= D_1(\theta) \cdot v \\ \ddot{Y} &= D_2(\theta) \cdot v_2 \cdot v + D_1(\theta) \cdot W \\ \ddot{Y} &= [D_2(\theta) \cdot w_2 - D_1(\theta) \cdot v_2^2] \cdot v + 2 \cdot D_2(\theta) \cdot v_2 \cdot W + D_1(\theta) \cdot [\Phi_1 \cdot H_1 \cdot U - \Phi_2 \cdot K_1 \cdot v - \Phi_3 \cdot B_1 \cdot W] \end{aligned} \quad (\text{II.40})$$

avec :

$$D_1(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -h \cdot \sin\theta \\ \sin\theta & h \cdot \cos\theta \end{bmatrix}, \quad D_2(\theta) = \begin{bmatrix} -\sin\theta & -h \cdot \cos\theta \\ \cos\theta & -h \cdot \sin\theta \end{bmatrix}$$

Admettant que :

$$P = [D_2(\theta) \cdot w_2 - D_1(\theta) \cdot v_2^2] \cdot v + 2 \cdot D_2(\theta) \cdot v_2 \cdot W \quad (\text{II.41})$$

alors, l'équation (II.40) devient :

$$\ddot{Y} = P + D_1(\theta) \cdot [\Phi_1 \cdot H_1 \cdot U - \Phi_2 \cdot K_1 \cdot v - \Phi_3 \cdot B_1 \cdot W] \quad (\text{II.42})$$

Soit le changement de variables suivant :

$$X_1 = Y, \quad X_2 = \dot{Y}, \quad X_3 = \ddot{Y}$$

alors, la variable de sortie satisfait le système d'équations dynamique :

$$\begin{aligned}\dot{X}_1 &= X_2 \\ \dot{X}_2 &= X_3 \\ \dot{X}_3 &= P + D_1(\theta) \cdot [\Phi_1 \cdot H_1 \cdot U - \Phi_2 \cdot K_1 \cdot v - \Phi_3 \cdot B_1 \cdot W]\end{aligned}\quad (\text{II.43})$$

Le Robot mobile est soumis à des perturbations diverses due aux imperfections du sol, aux glissements de contacts entre sol et roues. Ces perturbations sont représentées par d_1, d_2 et d_3 . L'équation (II.43) devient :

$$\begin{aligned}\dot{X}_1 &= X_2 + d_1 \\ \dot{X}_2 &= X_3 + d_2 \\ \dot{X}_3 &= P + D_1(\theta) \cdot [\Phi_1 \cdot H_1 \cdot U - \Phi_2 \cdot K_1 \cdot v - \Phi_3 \cdot B_1 \cdot W] + d_3\end{aligned}\quad (\text{II.44})$$

II.5.2 Etude des variables de sortie basée sur le backstepping

L'objectif principal dans ce qui suit, est d'atteindre la position désirée $X_d = [y_{1d} \ y_{2d}]^T$ en appliquant la procédure backstepping.

D'abord, on définit les erreurs variables :

$$\begin{aligned}Z_1 &= X_1 - X_d \\ Z_2 &= X_2 - \dot{X}_d - \alpha_1 \\ Z_3 &= X_3 - \ddot{X}_d - \alpha_2\end{aligned}\quad (\text{II.45})$$

tel que α_1 et α_2 deux fonctions stabilisantes.

La dynamique des erreurs est explicitée par :

$$\begin{aligned}\dot{Z}_1 &= \dot{X}_1 - \dot{X}_d = X_2 + d_1 - \dot{X}_d = Z_2 + \alpha_1 + d_1 \\ \dot{Z}_2 &= \dot{X}_2 - \ddot{X}_d - \dot{\alpha}_1 = X_3 + d_2 - \ddot{X}_d - \dot{\alpha}_1 = Z_3 + \alpha_2 + d_2 - \dot{\alpha}_1 \\ \dot{Z}_3 &= \dot{X}_3 - \ddot{X}_d - \dot{\alpha}_2 \\ &= P + D_1(\theta) \cdot [\Phi_1 \cdot H_1 \cdot U - \Phi_2 \cdot K_1 \cdot v - \Phi_3 \cdot B_1 \cdot W] + d_3 - \ddot{X}_d - \dot{\alpha}_2\end{aligned}\quad (\text{II.46})$$

Étape 1 : La première fonction de Lyapunov est décrite par :

$$V_1 = \frac{1}{2} Z_1^T \cdot Z_1 + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\gamma_i} (\Phi_i - \hat{\Phi}_i)^2 \quad (\text{II.47})$$

Où $\Phi_i (i=1, 2, 3)$ est l'estimation du paramètre Φ_i

Sa dérivée est de la forme :

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= Z_1^T \cdot \dot{Z}_1 + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\gamma_i} \left[-\dot{\hat{\Phi}}_i (\Phi_i - \hat{\Phi}_i) \right] \\ &= Z_1^T \cdot (Z_2 + \alpha_1 + d_1) + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\gamma_i} \left[-\dot{\hat{\Phi}}_i (\Phi_i - \hat{\Phi}_i) \right]\end{aligned}\quad (\text{II.48})$$

Avec le choix de la fonction stabilisante

$$\alpha_1 = -c_1 \cdot Z_1 - d_1 \quad (\text{II.49})$$

A partir de (II.46) et (II.49)

$$\begin{aligned}\dot{Z}_1 &= \dot{X}_1 - \dot{X}_d = X_2 + d_1 - \dot{X}_d = Z_2 + \alpha_1 + d_1 \\ \dot{Z}_1 &= Z_2 + \alpha_1 + d_1 = Z_2 + \underbrace{(-c_1 Z_1 - d_1)}_{\alpha_1} + d_1 \\ \dot{Z}_1 &= Z_2 - c_1 Z_1\end{aligned}\quad (\text{II.50})$$

L'équation (II.48) aura la forme :

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= Z_1^T \cdot (Z_2 - c_1 \cdot Z_1) + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\gamma_i} \left[-\dot{\hat{\Phi}}_i (\Phi_i - \hat{\Phi}_i) \right] \\ &= Z_1^T \cdot Z_2 - c_1 \cdot Z_1^T \cdot Z_1 + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\gamma_i} \left[-\dot{\hat{\Phi}}_i (\Phi_i - \hat{\Phi}_i) \right]\end{aligned}\quad (\text{II.51})$$

$$\begin{aligned}\dot{\alpha}_1 &= -c_1 \cdot \dot{Z}_1 - \dot{d}_1 \\ &= -c_1 \cdot (Z_2 + \alpha_1 + d_1) - \dot{d}_1 \\ &= -c_1 \cdot (Z_2 - c_1 \cdot Z_1) - \dot{d}_1\end{aligned}\quad (\text{II.52})$$

Étape 2 : La deuxième fonction de Lyapunov étant définie par :

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} Z_2^T \cdot Z_2 \quad (\text{II.53})$$

Sa fonction dérivée est explicitée par :

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + Z_2^T \cdot \dot{Z}_2 \\ &= Z_1^T \cdot Z_2 - c_1 \cdot Z_1^T \cdot Z_1 + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\gamma_i} \left[-\dot{\hat{\Phi}}_i (\Phi_i - \hat{\Phi}_i) \right] + Z_2^T \cdot (Z_3 + \alpha_2 + d_2 - \dot{\alpha}_1)\end{aligned}\quad (\text{II.54})$$

Avec le choix de la deuxième fonction stabilisante :

$$\alpha_2 = -Z_1 - c_2 \cdot Z_2 - d_2 + \dot{\alpha}_1 \quad (\text{II.55})$$

L'équation (II.54) peut alors s'écrire :

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 &= Z_1^T \cdot Z_2 - c_1 \cdot Z_1^T \cdot Z_1 + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\gamma_i} \left[-\dot{\hat{\Phi}}_i (\Phi_i - \hat{\Phi}_i) \right] + Z_2^T \cdot (Z_3 - Z_1 - c_2 \cdot Z_2) \\ &= -c_1 \cdot Z_1^T \cdot Z_1 - c_2 \cdot Z_2^T \cdot Z_2 + Z_2^T \cdot Z_3 + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\gamma_i} \left[-\dot{\hat{\Phi}}_i (\Phi_i - \hat{\Phi}_i) \right]\end{aligned}\quad (\text{II.56})$$

La dérivée de l'expression (II.55) est donnée sous forme :

$$\begin{aligned}\dot{\alpha}_2 &= -\dot{Z}_1 - c_2 \cdot \dot{Z}_2 + \ddot{\alpha}_1 - \dot{d}_2 \\ &= (c_1^2 - 1) \cdot (Z_2 - c_1 \cdot Z_1) - (c_1 + c_2) \cdot (Z_3 - Z_1 - c_2 \cdot Z_2) - \ddot{d}_1 - \dot{d}_2\end{aligned}\quad (\text{II.57})$$

Etape 3 La troisième fonction de Lyapunov V_3 aura l'expression :

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} Z_3^T \cdot Z_3 \quad (\text{II.58})$$

ce qui permet d'écrire sa fonction dérivée suivante :

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_2 + Z_3^T \cdot \dot{Z}_3 \quad (\text{II.59})$$

$$\begin{aligned}\dot{V}_3 &= -c_1 \cdot Z_1^T \cdot Z_1 - c_2 \cdot Z_2^T \cdot Z_2 + Z_2^T \cdot Z_3 + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\gamma_i} \left[-\dot{\hat{\Phi}}_i (\Phi_i - \hat{\Phi}_i) \right] \\ &\quad + Z_3^T \cdot \left[P + D_1(\theta) \cdot [\Phi_1 \cdot H_1 \cdot U - \Phi_2 \cdot K_1 \cdot v - \Phi_3 \cdot B_1 \cdot W] + d_3 - \ddot{X}_d - \dot{\alpha}_2 \right]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{V}_3 &= -c_1 \cdot Z_1^T \cdot Z_1 - c_2 \cdot Z_2^T \cdot Z_2 + Z_2^T \cdot Z_3 + Z_3^T \cdot \left[P + D_1(\theta) \cdot [\hat{\Phi}_1 \cdot H_1 \cdot U - \hat{\Phi}_2 \cdot K_1 \cdot v - \hat{\Phi}_3 \cdot B_1 \cdot W] + d_3 - \ddot{X}_d - \dot{\alpha}_2 \right] \\ &\quad + \frac{1}{\gamma_1} (\Phi_1 - \hat{\Phi}_1) \cdot \left(-\dot{\hat{\Phi}}_1 + \gamma_1 \cdot Z_3^T \cdot D_1 \cdot H_1 \cdot U \right) + \frac{1}{\gamma_2} (\Phi_2 - \hat{\Phi}_2) \cdot \left(-\dot{\hat{\Phi}}_2 - \gamma_2 \cdot Z_3^T \cdot D_1 \cdot K_1 \cdot v \right) \\ &\quad + \frac{1}{\gamma_3} (\Phi_3 - \hat{\Phi}_3) \cdot \left(-\dot{\hat{\Phi}}_3 - \gamma_3 \cdot Z_3^T \cdot D_1 \cdot B_1 \cdot W \right)\end{aligned}$$

En tenant compte de l'équation (II.52), la fonction stabilisante s'écrit :

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= -Z_1 - c_2 \cdot Z_2 + \dot{\alpha}_1 - d_2 \\ &= -Z_1 - c_2 \cdot Z_2 - \underbrace{c_1 (Z_2 + \alpha_1 + d_1)}_{\dot{\alpha}_1} - \dot{d}_1 - d_2\end{aligned}\quad (\text{II.60})$$

Lois de commande

A partir de la dernière expression de la fonction dérivée de Lyapunov, on peut déduire :

$$U = \frac{1}{\hat{\Phi}_1} \cdot H_1^{-1} \cdot \left[D_1(\theta)^{-1} \cdot (-c_3 Z_3 - P + \ddot{X}_d + \dot{\alpha}_2) + \hat{\Phi}_2 \cdot K_1 \cdot v + \hat{\Phi}_3 \cdot B_1 \cdot W \right] \quad (\text{II.61})$$

Lois de mise à jour des paramètres

On peut exprimer les lois de mise à jour des paramètres comme suit :

$$\dot{\hat{\Phi}}_1 = +\gamma_1 \cdot Z_3^T \cdot D_1 \cdot H_1 \cdot U \quad (\text{II.62})$$

$$\dot{\hat{\Phi}}_2 = -\gamma_2 \cdot Z_3^T \cdot D_1 \cdot K_1 \cdot v \quad (\text{II.63})$$

$$\dot{\hat{\Phi}}_3 = -\gamma_3 \cdot Z_3^T \cdot D_1 \cdot B_1 \cdot W \quad (\text{II.64})$$

ce qui permet d'avoir la fonction dérivée de Lyapunov suivante :

$$\dot{V}_3 = -c_1 \cdot Z_1^T \cdot Z_1 - c_2 \cdot Z_2^T \cdot Z_2 - c_3 \cdot Z_3^T \cdot Z_3 < 0 \quad (\text{II.65})$$

Alors, le système converge vers zéro et atteint sa stabilité.

II.6. Détection et poursuite d'une cible dans l'environnement du robot mobile

Un système autonome est capable de planifier sa trajectoire vers la cible, de détecter et d'éviter les obstacles sur sa trajectoire pour atteindre son objectif avec une bonne précision. De nombreux travaux de recherche ont été réalisés sur le suivi de la trajectoire et la navigation d'une plate-forme mobile [47-48]. La tâche de planification de la trajectoire et l'évitement des obstacles sont des concepts qui peuvent être classés en deux catégories : la navigation dans un environnement inconnu par l'acquisition de données de capteurs en temps réel et la navigation dans un environnement connu par des cartes préétablies [49]. Le travail proposé entre dans la première catégorie en utilisant une fusion de données de capteurs pour détecter et explorer l'environnement de navigation.

Le suivi d'objets à partir d'une séquence d'images prend une place prépondérante dans plusieurs domaines de la vision artificielle comme la surveillance, l'imagerie médicale, et l'interaction homme-machine [50].

Dans ce travail, une nouvelle approche pour le suivi d'objets en couleur est développée. Le système réalisé peut fonctionner en temps réel en analysant les informations visuelles de l'environnement au voisinage de l'objet à détecter fournis par caméra, ce qui permet une détection robuste de la couleur, la taille et la position de l'objet. La navigation autonome du système nécessite une détermination exacte de la position, de l'orientation de la plateforme mobile, et une détermination précise de la couleur, de la forme et de la portée des objets potentiels dans l'environnement. Ainsi, une nouvelle stratégie de détection utilisant des

méthodes de seuil et basée sur un algorithme génétique d'optimisation (GA) [51,52] est proposée, testée et comparée aux méthodes de détection conventionnelles.

II.6.1 Présentation du système de détection

Le système robotique développé comprend des composants matériels légers (capteurs à ultrasons et caméra), tous montés sur un dispositif intégré de taille raisonnable à placer sur la plate-forme. Il est composé d'un Raspberry Pi3, d'un capteur d'image Cam, d'un Nano Arduino, d'un L298N, de deux roues et d'une roue folle, de deux servomoteurs qui agissent comme actionneurs. Des capteurs à ultrasons pour mesurer la distance entre le robot mobile et l'objet de couleur. La plateforme comprend également deux batteries et un bouclier wifi. Toutes ces pièces sont assemblées dans un châssis Figure (II.7) [53].

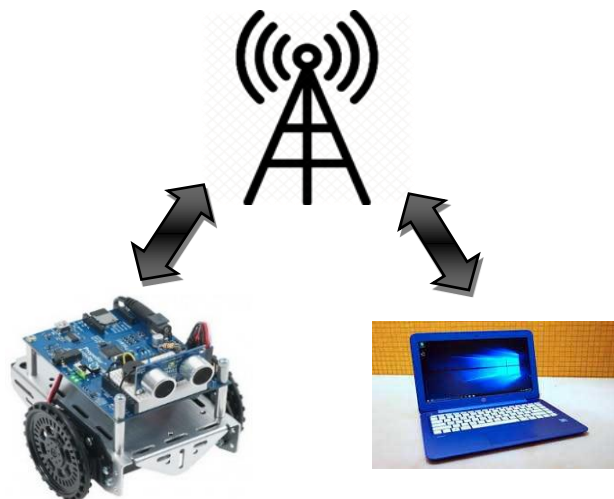


Figure (II.7) Vue d'ensemble du système mis en place [53]

II.6.2 Techniques de détections employées

Trois techniques sont testées afin de définir automatiquement les objets avec cette plateforme en utilisant cinq espaces de couleur (RGB, YCbCr, HSV, HSI, YIQ). Ces techniques se basent sur les stratégies de seuillage : Seuil fixe, seuil adaptatif et seuil automatique basé sur GA.

- **Seuil fixe**

La méthode consiste à prédéfinir un seuil basé sur l'histogramme de l'image qui se rapproche le mieux de l'image binarisée (équation (II.66)). Si les coefficients obtenus des espaces couleurs issus de chaque plan P1, P2 et P3 sont inférieurs ou égaux au seuil (TH), ces coefficients sont mis à 1 (Objet ou Vrai), sinon à 0 (fond ou Faux) [53].

$$Color(i, j) = \begin{cases} \text{True,} & \text{if } P_1(i, j) \leq TH \\ & P_2(i, j) \leq TH \\ & P_3(i, j) \leq TH \\ \text{False,} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (\text{II.66})$$

- **Seuil adaptatif**

Pour la seconde stratégie (Adaptive), les couleurs peuvent être classées comme suit :

$$Color(i, j) = \begin{cases} \text{True,} & \text{if } TH_{\min} \leq P_1(i, j) \leq TH_{\max} \\ & TH_{\min} \leq P_2(i, j) \leq TH_{\max} \\ & TH_{\min} \leq P_3(i, j) \leq TH_{\max} \\ \text{False,} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (\text{II.67})$$

où TH_{\min} et TH_{\max} sont respectivement les seuils minimum et maximum des espaces colorimétriques.

- **Seuil automatique**

Les algorithmes génétiques fournissent des solutions à des problèmes qui peuvent être calculés en un temps raisonnable. Il ne s'agit pas de trouver une solution analytique exacte, mais de trouver des solutions satisfaisant au mieux à différents critères, souvent contradictoires. Cette Technique évolutive (GA) permet d'optimiser les seuils avec une méthode hybride utilisant les différents espaces colorimétriques. La méthode d'optimisation peut être résumée dans les étapes suivantes :

Etape 1 : Une population initiale de taille n représentant le nombre de chromosomes est générée. Puis, les gènes qui composent chaque chromosome sur l'intervalle de recherche sont sélectionnés aléatoirement [53]. L'équation de seuil dans ce cas est donnée par :

$$Red(i, j) = \begin{cases} \text{True,} & \text{if } THR_{\min} \leq Cb(i, j) \leq THR_{\max} \\ \text{False,} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (\text{II.68})$$

La qualité de la population initiale est très importante pour la génération de meilleures solutions. La diversité de la population est très importante afin éviter une convergence prématurée vers des minima locaux.

Etape 2 : Chaque chromosome est évalué par la fonction objectif, ce qui permet de déduire sa valeur de fitness.

$$Err(\%) = 100 - Acc \tag{II.69}$$

Où Err et Acc représente respectivement, l'erreur de classement et le taux de classement :

$$Acc(\%) = 100 \times \frac{1}{C \times O} \sum_{j=1}^{O=4} \sum_{i=1}^{C=2} \frac{B_{ij}}{N_{ij}} \tag{II.70}$$

Où O est l'objet couleur, C est le nombre de classes, B_{ij} présente des pixels bien classés pour les objets couleur Rouge, Vert, Bleu et Jaune et N_{ij} est nombre de pixels des classes cibles pour chaque objet de couleur [53].

Etape 3 : Les cycles de génération de la population, dont le nombre de cycles est initialement déterminé, sont exécutés. Chaque nouvelle génération remplace la précédente.

Dans chaque cycle, des chromosomes, un nombre précis, sont choisis pour la reproduction et le croisement par paires. Après un nombre de croisement donné et une configuration de AG bien déterminé [53], les chromosomes vont évoluer de telle sorte que la dernière génération contienne des chromosomes meilleurs que les générations précédentes.

Le programme global du système de détection et de suivi des objets en couleur est décrit dans l'organigramme suivant (voir figure (II.8)). Développé sous MATLAB-SIMULINK, il est embarqué dans un ordinateur est communique les commandes au robot via une communication sans fil (Wi-Fi) [53].

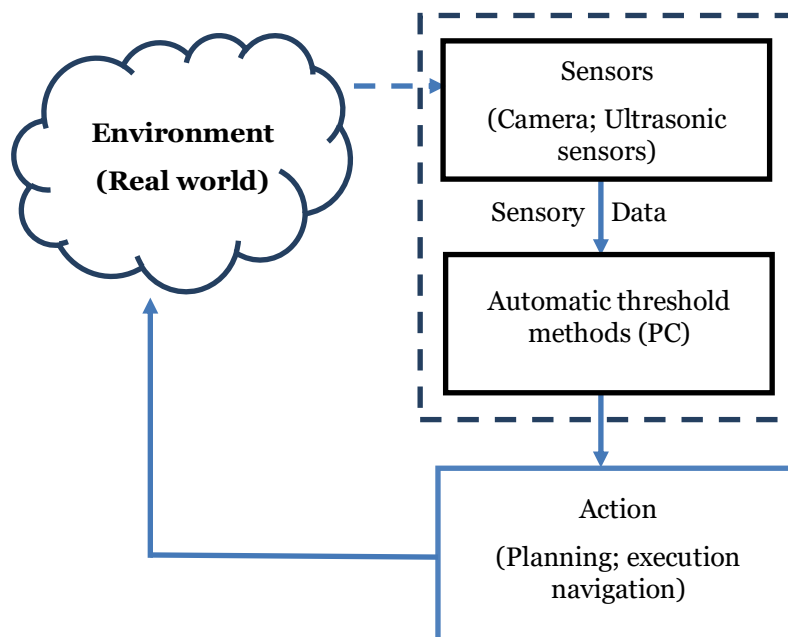


Figure (II.8) Organigramme du système de suivi proposé [53].

II.7. Résultats de simulations et expérimentaux

Afin de tester et d'évaluer les méthodes précédemment citées de manière approfondie, une étude expérimentale dans un environnement connu a été réalisée. L'image de test illustrée à la figure (II.9) a été utilisée [53].



Figure (II. 9) Image de test avec quatre objets couleur (rouge, vert, bleu, jaune) [53].

Les résultats les plus pertinents et exploitables de cette étude sont comme suit :

Pour la méthode de seuillage fixe, les résultats visuels sont très mauvais, de ce fait cette technique est rarement utilisée. Les figures (II.10) et (II.11) représentent deux exemples de seuillage fixe (TH=100) dans les espaces couleurs RGB et HSV.

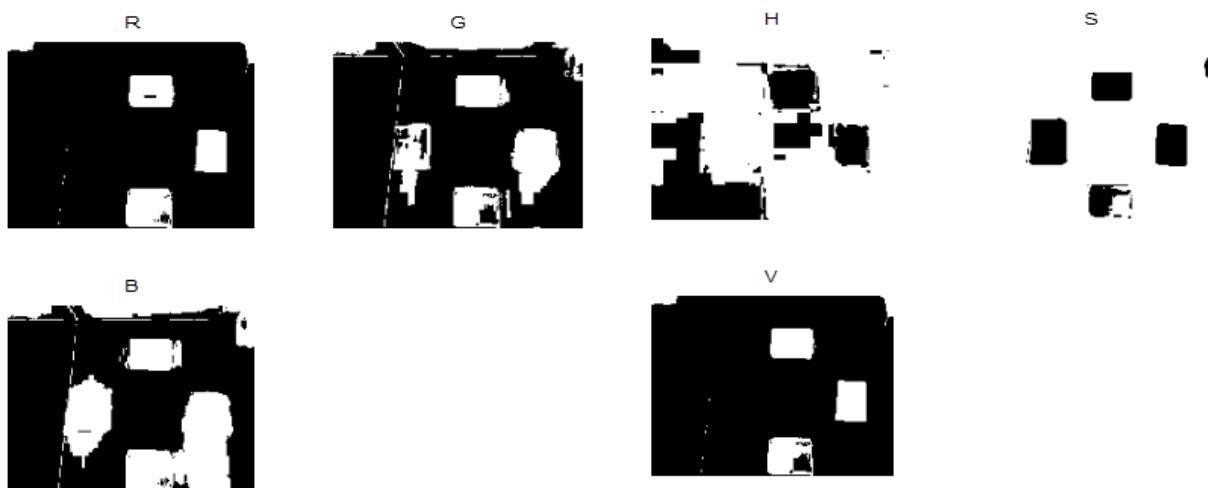


Figure (II. 10) Résultats visuel de détection d'objets des 4 couleurs dans l'espace couleur RGB de l'image de test [53]

Figure (II. 11) Résultats visuel de détection d'objets des 4 couleurs dans l'espace couleur HSV de l'image de test [53]

Des figures (II.10) et (II.11), on constate que les objets dans la scène ne peuvent être isolé ou extrait, de ce fait aucune information sur la cible (position, distance, forme ou couleur) ne peut être récolter.

Pour la méthode se seuil adaptatif, les résultats permettent de distinguer les meilleurs espaces de couleur et plan pour chaque couleur. Par exemple, pour l'objet rouge le meilleur espace couleur et plan est celui de l'application de RGB sur l'image brute, le plan est G. Pour les deux objets de couleur vert et bleu, le changement d'espace couleur le plus adapté est l'espace HSV avec le plan H. Pour la quatrième couleur le meilleur espace couleur est YCbCr, le plan est Cb.

La question est laquelle des techniques à choisir parmi toutes les approches proposées ?

La technique de fusion des résultats fournis par un ensemble de différentes méthodes de changement d'espace couleur sera la réponse la plus adéquat à la question précédemment posée.

La figure (II.12) représente les meilleures combinaisons des espaces couleurs et seuillage adaptative. La combinaison d'un ensemble de techniques de changement d'espace couleur est un moyen efficace pour améliorer la robustesse du processus de détection d'objet mais aussi la précision finale de taux de classification.

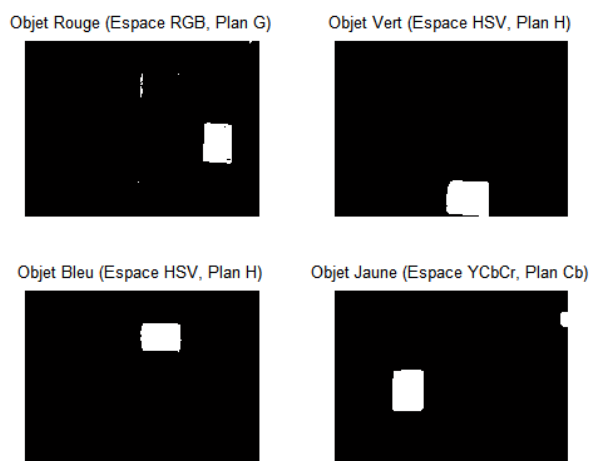


Figure (II.12) Détection d'objets couleurs Rouge, Vert, Bleu et Jaune de l'image de test [53].

La dernière technique est celle du seuil automatique. Cette dernière stratégie est basée sur un concept d'algorithme génétique. C'est une solution l'hybride entre toutes les stratégies de

transformation des espaces couleur dont l'objectif est de donner une meilleure séparation entre la couleur des différents objets, et l'utilisation des avantages de chaque espace couleur par rapport à l'environnement [53].

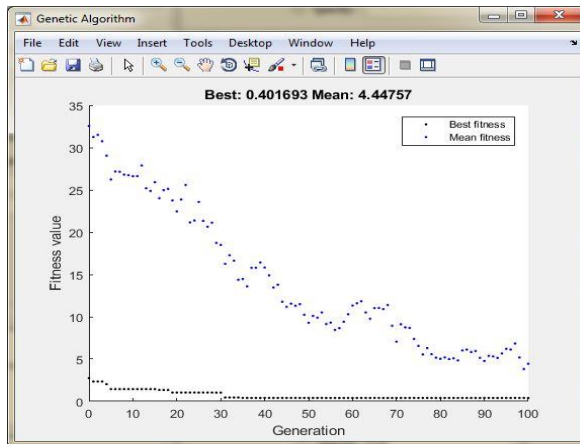


Figure (II.13) Évolution de la fonction de fitness en fonction du nombre de générations [53]

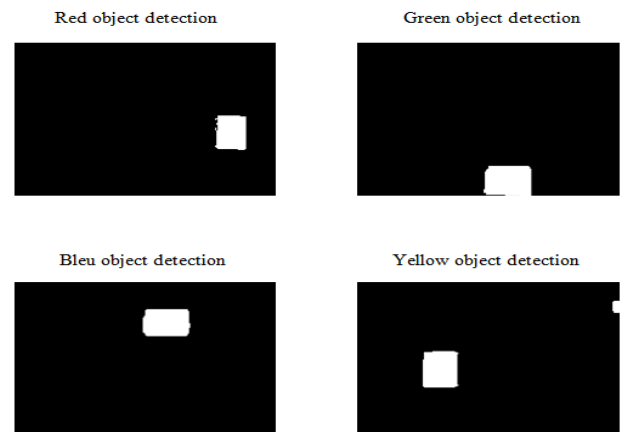


Figure (II.14) Résultats visuels de la détection d'objets des 4 couleur à l'aide d'un algorithme génétique [53].

La figure (II.13) montre l'évolution de la fonction de fitness en fonction du nombre de générations. La figure (II.14) montre les résultats visuels obtenus en utilisant l'algorithme génétique. La méthode du seuil automatique montre un bon comportement du taux de classification, ce qui donne des résultats précis. Ces résultats démontrent l'efficacité et la fiabilité de cette stratégie. La figure (II.15) présente l'étape finale du suivi des différents objets de couleur.



Figure (II.15) Poursuite de la cible par robot [53].

L'ensemble des résultats de l'étude basée sur la détection et le suivi d'objet ainsi que la reconnaissance de couleur sont exposés dans [53].

Pour le système de suivi, un contrôleur robuste et performant basé sur la loi de commande backstepping adaptative est proposé. Les résultats de simulation de cette commande appliquée à notre robot mobile à roues sont présentés dans cette section.

Dans cette simulation, le modèle dynamique du robot est non-linéaire. La commande développée est une commande adaptative backstepping et les paramètres magnétique et mécanique ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 sont inconnus.

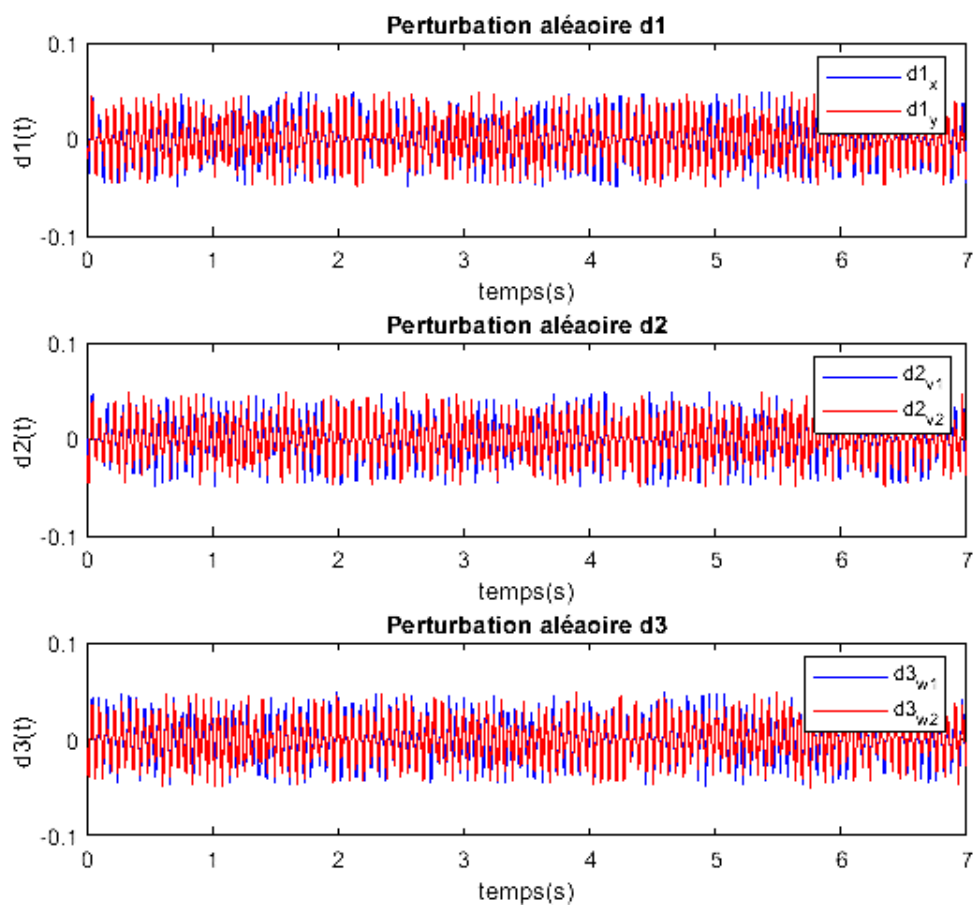


Figure (II.16) Perturbations appliquées au modèle

La figure (II.16) représente les perturbations d_1, d_2, d_3 appliquées au modèle considéré du robot mobile. Il apparaît sur cette figure que ces perturbations sont de nature totalement aléatoire et indépendantes. Leurs amplitudes peuvent être considérées comme importantes comparé à la variation instantanée au cours du temps élémentaire du déplacement et des différentes vitesses. Ces perturbations peuvent avoir plusieurs origines tel que : l'état du sol, les défauts de type contact sol-roues, qualité des roues, ...etc.

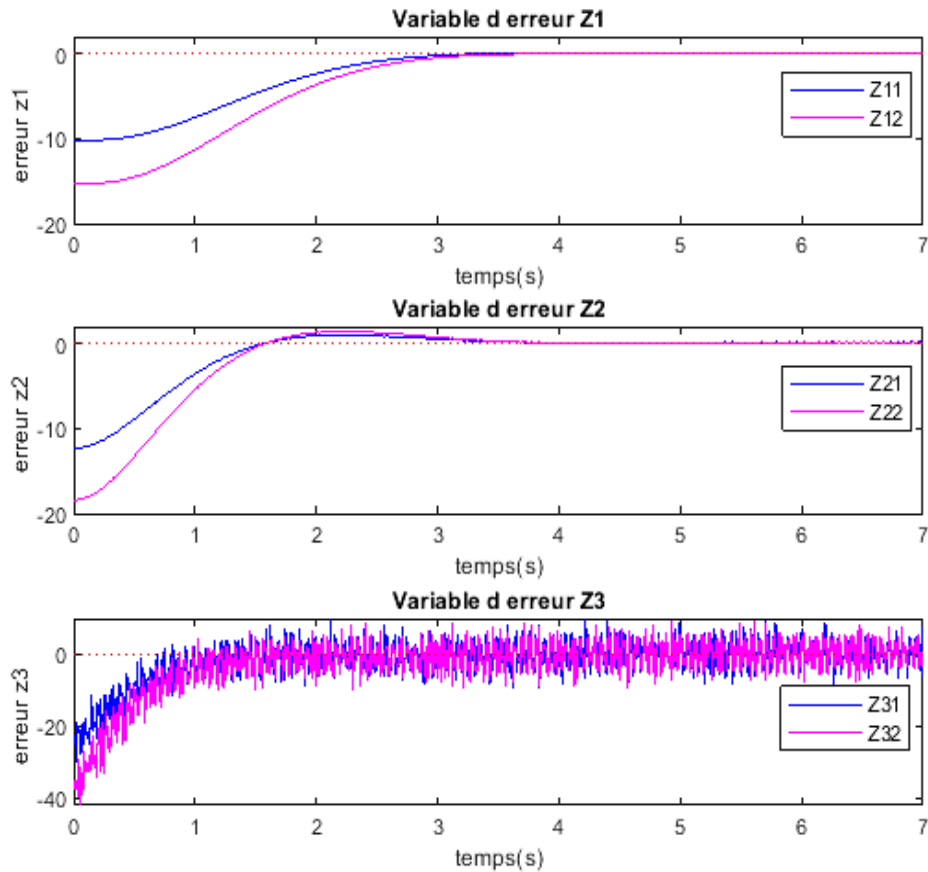


Figure (II.17) Evolution des variables d'Erreurs

De la figure (II.17), on constate l'évolution des variables d'erreurs vers la valeur nulle. Ceci démontre la convergence des variables d'états du modèle vers les valeurs désirées.

Dans la figure (II.18) on observe que le contrôleur a pu estimer les paramètres inconnus du système. Leurs estimations convergent rapidement à des valeurs fixes proches des paramètres calculés en utilisant les équations de (II.37) avec un taux d'erreur inférieur à 0.1%.

La figure (II.19) représente les signaux de commande générés par le contrôleur adaptatif.

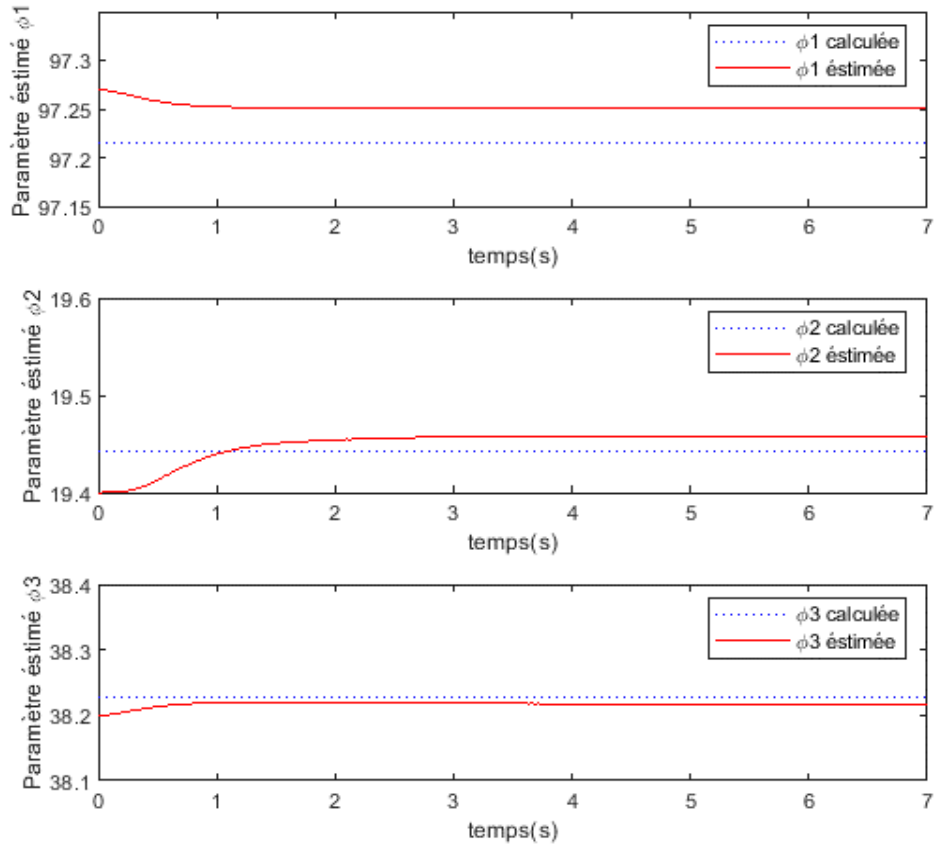


Figure (II.18) Paramètres estimés

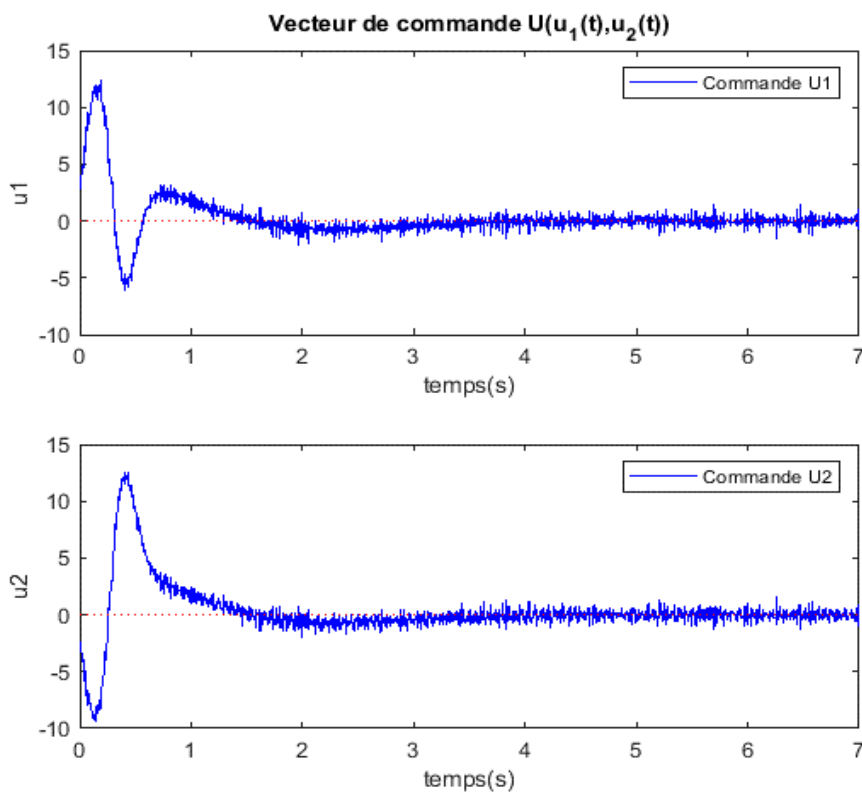


Figure (II.19) Vecteur de commande

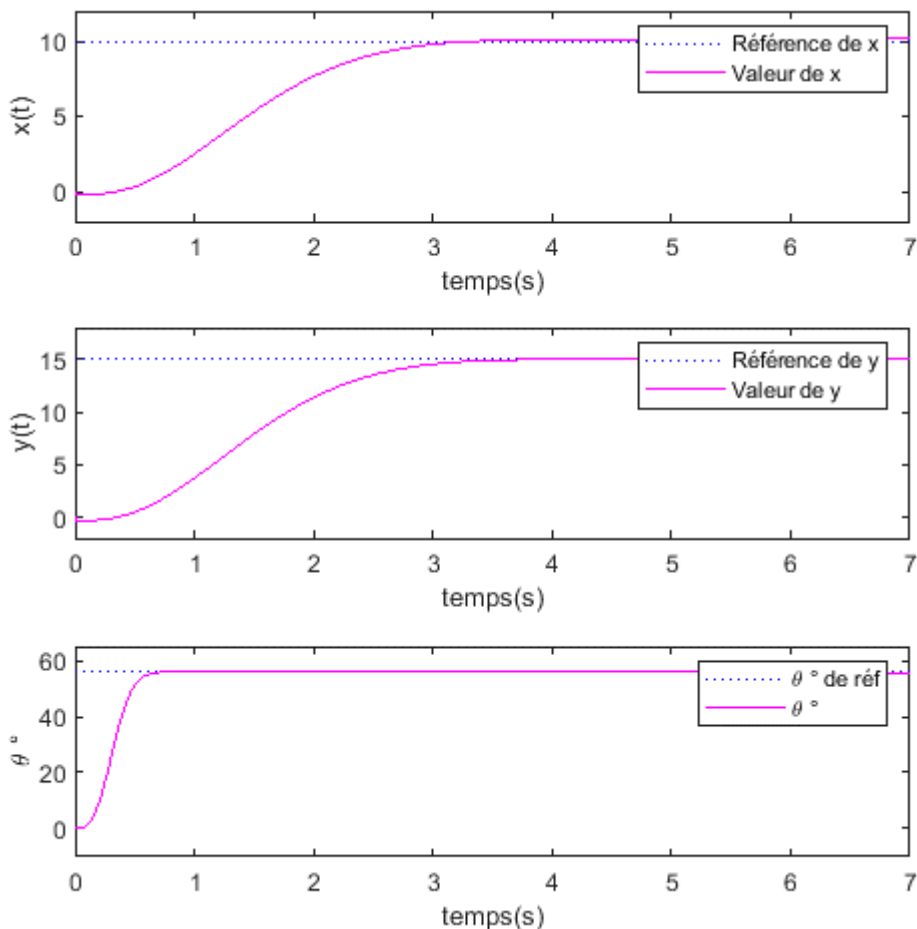


Figure (II.20) Coordonnées de la cible de référence et coordonnées cartésiennes du robot

La figure (II.20) représente respectivement les courbes d'évolution de la position du robot en x , y et l'angle d'orientation θ . Le robot mobile part de la position de référence $P_0 = (0; 0; 0)$ et l'évolution en direction de la cible. La figure (II.20) fait apparaître que le robot se dirige effectivement vers la trajectoire de référence.

II.8 Conclusion

Ce Chapitre présente la conception d'un contrôleur adaptatif robuste de suivi de la sortie (position de cible) basé sur le backstepping adaptatif. L'incertitude paramétrique et les perturbations aléatoires externes dans le système robotique, en l'occurrence un robot mobile, ont été pris en compte. La stabilité du contrôleur a été prouvée avec une sélection appropriée de la fonction de Lyapunov.

D'après les équations présentées, le contrôleur a une bonne adaptabilité vis-à-vis des paramètres inconnus du système, et une certaine robustesse par rapport aux perturbations aléatoires.

L'évaluation par simulation numérique du contrôleur a été faite. Elle a permis de valider l'étude théorique. Les résultats de simulation ont démontré la robustesse de loi de commande backstepping adaptative aux perturbations aléatoires.

La mise en œuvre expérimentale de cette loi de commande doit encore d'être menée en exploitant la plateforme mobile et les techniques de détection d'objet présentées dans la section 6 de ce chapitre.

CHAPITRE III

**COMMANDE SYNERGETIQUE
ET APPLICATION AUX QUADRIROTOR**

CHAPITRE III

Commande Synergétique et Application aux Quadrirotors

III.1 Introduction

L'évitement d'obstacles lors de vols d'un Quadrirotor est un sujet qui a été traité depuis quelques années comme le montre la revue de l'état de l'art [54].

Dans ce chapitre, un modèle dynamique de drone de type quadrirotor sera développé. Nous proposons un contrôleur synergique robuste pour un guidage optimal du Quadrirotor dans un environnement complexe.

Contrairement aux contrôleurs proposés pour la planification de trajectoire et l'évitement d'obstacles dans la littérature, la technique de contrôle synergique proposée assure la stabilité asymptotique et la robustesse du système contrôlé [55,56,57,58,59,60]. L'analyse de stabilité de la méthode proposée est formellement établie en utilisant la méthode directe de Lyapunov.

De plus, la méthode de la courbe de Bézier est introduite pour planifier la trajectoire du Quadrirotor, où les points de contrôle peuvent être générés automatiquement pour éviter la collision avec les obstacles, en gardant une grande précision pour les détecter. De plus, les courbes B-spline sont générées afin de comparer les performances de l'approche proposée.

III.2 Hypothèses adoptées

La structure du quadrirotor est supposée rigide et parfaitement symétrique ce qui implique que la matrice d'inertie est diagonale.

Les hélices sont supposées rigides pour pouvoir négliger l'effet de leur déformation lors de la rotation. De même, le centre de masse et l'origine du repère lié à la structure coïncident. Aussi, les forces de portance et de traînée sont proportionnelles aux carrés de la vitesse de

rotation des rotors, ce qui est une approximation très proche du comportement aérodynamique.

Pour faire une analyse cinématique avec une étude dynamique profonde pour le modèle mathématique du quadrirotor, on adopte deux repères : un repère fixe lié à la terre $E (X,Y,Z)$ et un repère de référence mobile $B (x,y,z)$ fixé au centre de masse du quadrirotor.

III.3 Modèle du Quadrirotor considéré

III.3.1 Modèle cinématique

La figure (III-1) montre le repère mobile fixé au centre de masse du Quadrirotor considéré $B (x,y,z)$ ainsi que le repère inertiel lié à la terre $E (X,Y,Z)$.

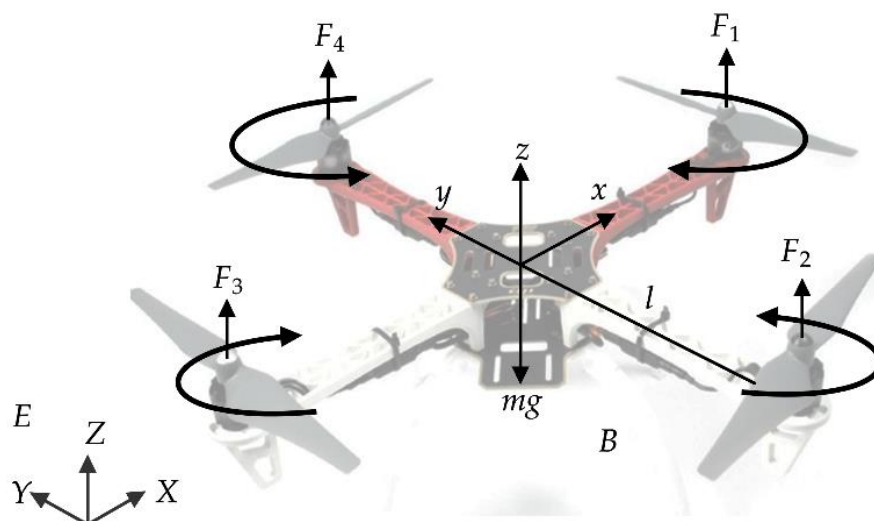


Figure (III-1) : Le repère terrestre fixe E et Le repère mobile B.

En génie aérospatial, les axes sont dirigés comme pour un engin se déplaçant dans la direction x positive, avec le côté droit correspondant à la direction y positive et le dessous vertical correspondant à la direction z positive. Les trois angles de rotation autour de ces trois axes sont appelés individuellement roulis, tangage et lacet.

La matrice de transformation entre deux systèmes de coordonnées rectangulaires est orthogonale.

L'orientation du corps du système dans l'espace est donnée par une rotation R du repère B vers le repère E , où R est la matrice de rotation.

III.3.1.1 Angle d'Euler

En considérant un système de coordonnées orienté à droite, les trois rotations simples autour des axes x , y et z respectivement sont décrites séparément par :

- $R(x, \phi)$, Rotation autour de l'axe x : angle de roulis ϕ .
- $R(y, \theta)$, Rotation autour de l'axe y : angle de tangage θ
- $R(z, \psi)$, Rotation autour de l'axe z : l'angle de lacet ψ

$$\begin{aligned} R(x, \phi) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \\ R(y, \theta) &= \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \\ R(z, \psi) &= \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{III.1})$$

L'orientation du corps dans l'espace est donnée par une rotation R du repère B vers le repère E , où R est la matrice de rotation.

La matrice de rotation du système de coordonnées fixe (GCS) au système de coordonnées lié au corps (BCS) est le produit des matrices explicitées en (III.1), qui indiquent la rotation autour de l'axe z -suivie d'une rotation autour de l'axe y -et enfin une rotation autour de l'axe x -à savoir :

$$R_{E \rightarrow B} = R(x, \phi)R(y, \theta)R(z, \psi) \quad (\text{III.2})$$

Par conséquent, la matrice de transformation du GCS en BCS est donnée par

$$R_{B \rightarrow E} = R_{E \rightarrow B}^T \quad (\text{III.3})$$

L'expression spécifique est donnée par :

$$R_{B \rightarrow E} = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & s_\phi s_\theta c_\psi - c_\phi s_\psi & c_\phi s_\theta c_\psi + s_\phi s_\psi \\ c_\theta s_\psi & s_\phi s_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & c_\phi s_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi \\ -s_\theta & s_\phi c_\theta & c_\phi c_\theta \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

Où $c = \cos(\cdot)$ et $s = \sin(\cdot)$

III.3.1.2 Vitesses angulaires

Le vecteur de vitesse angulaire décrit dans le repère mobile (BCS) $[p, q, r]$ est lié aux vitesses généralisées $[\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T$ du repère fixe (GCS) (dans la région où les angles d'Euler sont valides) au moyen de la relation cinématique standard.

Les composantes de la vitesse angulaire p, q et r sont les valeurs de projection sur le BCS de la vitesse angulaire de rotation $\omega(rd/s)$ qui indique la rotation du GCS vers le BCS.

Elle est donc différente des vitesses angulaires du corps (p, q, r), qui sont mesurées physiquement avec des gyroscopes. Un IMU est généralement utilisé dans l'aérospatiale pour mesurer les rotations du corps.

La matrice de transformation de $[\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T$ à $[p, q, r]$ est donnée par :

$$\begin{aligned}
 \omega &= \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R(x, \phi)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + (R(y, \theta).R(x, \phi))^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \cos \phi \\ -\dot{\theta} \sin \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\dot{\psi} \sin \theta \\ \dot{\psi} \sin \phi \cos \theta \\ \dot{\psi} \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} - \dot{\psi} \sin \theta \\ \dot{\theta} \cos \phi + \dot{\psi} \sin \phi \cos \theta \\ \dot{\psi} \cos \phi \cos \theta - \dot{\theta} \sin \phi \end{bmatrix} \quad (\text{III.5}) \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \cos \theta \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\omega = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

$$\text{Où } R_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \cos \theta \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

III.3.1.3 Vitesses linéaires

Les vitesses linéaires v_x^E, v_y^E, v_z^E , dans le repère fixe lié au sol en fonction des vitesses linéaires v_x^B, v_y^B, v_z^B , dans le repère mobile lié au corps de l'UAV sont exprimées par la relation suivante :

$$v = \begin{bmatrix} \dot{X} & \dot{Y} & \dot{Z} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} v_x^E & v_y^E & v_z^E \end{bmatrix}^T = R \cdot \begin{bmatrix} v_x^B & v_y^B & v_z^B \end{bmatrix}^T \quad (\text{III.8})$$

III.3.1.4 Cinématique de translation

L'étude cinématique de translation du quadrirotor nous permet d'obtenir les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (\cos\theta \cos\psi)v_x^B + (\sin\phi \sin\theta \cos\psi - \cos\phi \sin\psi)v_y^B + (\cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi)v_z^B \\ \dot{y} &= (\cos\theta \cos\psi)v_x^B + (\sin\phi \sin\theta \cos\psi + \cos\phi \cos\psi)v_y^B + (\cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi)v_z^B \\ \dot{z} &= (-\sin\theta)v_x^B + (\sin\phi \cos\theta)v_y^B + (\cos\phi \cos\theta)v_z^B \end{aligned} \quad (\text{III.9})$$

III.3.1.5 Cinématique de rotation

La cinématique de rotation est définie par :

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tan\theta \sin\phi & \tan\theta \cos\phi \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \frac{\sin\phi}{\cos\theta} & \frac{\cos\phi}{\cos\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

III.3.2 Equations des forces et moments

L'aéronef à quatre rotors est contrôlé par les vitesses angulaires de quatre moteurs électriques, comme illustré à la Figure (III.2).

Chaque moteur produit une poussée et un couple, dont la combinaison génère la poussée principale, le couple de lacet, le couple de tangage et le couple de roulis agissant sur le quadrirotor.

Les hélicoptères conventionnels modifient la portance en faisant varier le pas collectif. Ces véhicules aériens utilisent un dispositif mécanique appelé plateau cyclique. Ce système interconnecte des servomécanismes et des biellettes de calage des pales afin de modifier l'angle de calage des pales du rotor de façon cyclique, de manière à obtenir les couples de commande de tangage et de roulis du véhicule. En revanche, le quadrirotor n'a pas de plateau

cyclique et a des pales à pas constant. Ainsi, dans un quadrirotor, on ne peut faire varier que la vitesse angulaire de chacun des quatre rotors pour obtenir les couples de commande en tangage et en roulis.

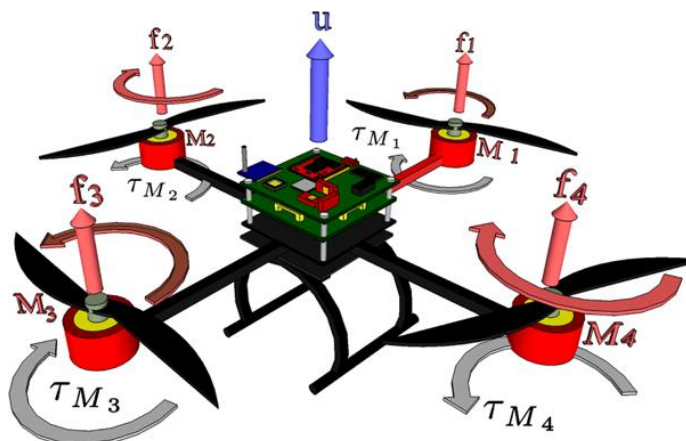


Figure (III-2) : Les entrées de commande du Quadrirotor

Étant donné que les moteurs du quadrirotor ne peuvent tourner que dans un sens fixe, la force produite F_i est toujours positive. Les moteurs avant (M_1) et arrière (M_3) tournent dans le sens antihoraire, tandis que les moteurs gauche (M_2) et droit (M_4) tournent dans le sens horaire. Avec cette disposition, les effets gyroscopiques et les couples aérodynamiques ont tendance à s'annuler en vol compensé. La poussée principale u est la somme des poussées individuelles de chaque moteur.

Les forces agissantes sur le système sont :

- Le poids du quadrirotor est donné par la relation $P = mg$, où m est la masse totale et g représente la gravité.
- Les forces de poussées : sont des forces provoquées par la rotation des moteurs, elles sont perpendiculaires au plan des hélices. Ces forces sont proportionnelles aux carrés des vitesses de rotation des moteurs Ω_i :

$$F_i = b.\Omega_i^2 \quad ; \quad i = 1, \dots, 4 \quad (\text{III.11})$$

avec : b est le coefficient de portance, il dépend de la forme et le nombre des pales et la densité de l'air.

- Les forces de traînée : La force de traînée est le couplage entre une force de pression et la force de frottement visqueux. Dans ce cas, on a deux forces de traînée agissantes sur le système, la traînée dans les hélices et la traînée selon les axes (x, y, z) .

La traînée dans les hélices agit sur les pales, elle est proportionnelle à la densité de l'air, à la forme des pales et au carré de la vitesse de rotation de l'hélice. Elle est donnée par la relation suivante :

$$T_h = d \cdot \Omega^2 \quad (\text{III.12})$$

tel que : d est le coefficient de drag, il dépend de la fabrication de l'hélice.

La traînée selon les axes (x, y, z) est due au mouvement du corps du quadrirotor :

$$F_t = K_{ft} \cdot v \quad (\text{III.13})$$

avec : K_{ft} est le coefficient de traînée de translation et v est la vitesse linéaire.

Les différents moments intervenants dans le fonctionnement du quadrirotor sont énumérés ci-dessous :

- Moments dus aux forces de poussée : La rotation autour de l'axe x est due au moment de roulis créé par la différence entre les forces de portance $F_4 - F_2$ des rotors 2 et 4.

$$M_\theta = l(F_4 - F_2) = lb(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \quad (\text{III.14})$$

tel que l est la longueur du bras entre le rotor et le centre de gravité du quadrirotor.

On peut aussi déduire le moment de tangage due la rotation autour de l'axe y et qui est créé par la différence entre les forces de portance $F_1 - F_3$ des rotors 1 et 3.

$$M_\phi = l(F_1 - F_3) = lb(\Omega_1^2 - \Omega_3^2) \quad (\text{III.15})$$

- Moments dus aux forces de traînée : La rotation autour de l'axe z est due à un couple réactif par les couples de traînée $M_i = d\Omega_i^2$ de chaque hélice avec $i = 1, \dots, 4$, ce moment est donné par la relation suivante :

$$M_\psi = \sum_{i=1}^4 M_i = d(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2) \quad (\text{III.16})$$

- Le moment résultant des frottements aérodynamiques est donné par :

$$M_a = K_{fa} \omega^2 \quad (\text{III.17})$$

avec: K_{fa} le coefficient des frottements aérodynamiques et ω la vitesse angulaire.

- Effet gyroscopique : Cet effet se définit comme la difficulté de modifier la position ou l'orientation du plan de rotation d'une masse tournante. L'effet gyroscopique est ainsi nommé en référence au mode de fonctionnement du gyroscope, appareil de contrôle de mouvement utilisé dans l'aviation.

Le moment gyroscopique des hélices est donné par l'expression suivante :

$$M_{gh} = \sum_{i=1}^4 \omega \wedge J_r \left[0 \quad 0 \quad (-1)^{i+1} \Omega_i \right]^T \quad (\text{III.18})$$

avec J_r est l'inertie des rotors

Le moment gyroscopique dû aux mouvements du quadrirotor s'écrit :

$$M_{gm} = \omega \wedge J \omega \quad (\text{III.19})$$

avec : J est l'inertie du système.

III.3.3 Modèle dynamique

Le modèle dynamique est composé des mouvements de rotation et de translation.

La force et le moment aérodynamiques produits par le i -ème rotor sont proportionnels au carré de la vitesse du rotor donc les relations sont données comme suit :

$$\begin{aligned} F_i &= b \Omega_i^2 \\ M_i &= d \Omega_i^2 \end{aligned} \quad (\text{III.20})$$

Où b et d sont respectivement, les constantes de la force et du moment aérodynamiques.

Les moments agissant sur le Quadrirotor dans le BCS sont donnés par :

$$M_B = \begin{bmatrix} l \cdot b(-\Omega_2^2 + \Omega_4^2) \\ l \cdot b(\Omega_1^2 - \Omega_3^2) \\ d(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

Où l est le moment du bras qui représente la distance entre l'axe d'un rotor et le centre du Quadrirotor.

Dans le BCS, les équations du mouvement de rotation sont déduites à partir du théorème de la loi de la quantité de mouvement et l'effet gyroscopique du Quadrirotor,

Les équations du mouvement de translation sont obtenues dans le GCS par la méthode de la deuxième loi de Newton.

En utilisant le formalisme Newton – Euler, la dynamique d'un corps rigide sous des forces extérieures appliquées au centre de masse et exprimées sur le repère fixe est donnée par :

$$\begin{aligned}
 \dot{r} &= v \\
 m\ddot{r} &= F_B + F_t + F_g \\
 \dot{R} &= R.S(\omega) \\
 J\dot{\omega} &= -\omega \wedge J\omega + M_B - M_a - M_{gh}
 \end{aligned} \tag{III.22}$$

$r = [x \ y]^T$ vecteur de position du Quadrirotor dans le GCS,

m : masse totale du quadrirotor,

ω : vitesse angulaire exprimée dans le repère fixe,

R : matrice de rotation,

\wedge : produit vectoriel.

J : matrice d'inertie symétrique de dimension (3x3),

$S(\omega)$ est la matrice antisymétrique. Pour un vecteur de vitesse $\omega = [\omega_1, \omega_2, \omega_3]^T$, cette matrice est exprimée par :

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix} \tag{III.23}$$

F_B est la force totale générée par les quatre rotors, elle est donnée par :

$$F_B = R \begin{bmatrix} 0 & 0 & \sum_{i=1}^4 F_i \end{bmatrix}^T = R.F_p = R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (\text{III.24})$$

F_p est la force de portance totale agissant sur le Quadrirotor dans le BCS.

F_t est la force de traînée selon les axes (x, y, z) , elle est décrite par :

$$F_t = \begin{bmatrix} -K_{ftx} & 0 & 0 \\ 0 & -K_{fyy} & 0 \\ 0 & 0 & -K_{ftz} \end{bmatrix} \dot{\xi} \quad (\text{III.25})$$

K_{ftx} , K_{fyy} , K_{ftz} sont les coefficients de traînée de translation.

F_g représente la force de gravité. Elle est donnée par le vecteur suivant :

$$F_g = [0 \quad 0 \quad -mg]^T \quad (\text{III.26})$$

M_B : est le moment provoqué par les forces de poussée et de trainée. Il est donné par :

$$M_B = \begin{bmatrix} I(F_4 - F_2) \\ I(F_1 - F_3) \\ d(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (\text{III.27})$$

M_a : est le moment résultant des frottements aérodynamiques, il est décrit par l'expression :

$$M_a = \begin{bmatrix} K_{f\dot{\alpha}x} \dot{\phi}^2 \\ K_{f\dot{\alpha}y} \dot{\theta}^2 \\ K_{f\dot{\alpha}z} \dot{\psi}^2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.28})$$

$K_{f\dot{\alpha}x}$, $K_{f\dot{\alpha}y}$, $K_{f\dot{\alpha}z}$: sont les coefficients des frottements aérodynamiques.

M_{gh} : est le moment gyroscopique des hélices est donné par l'expression (III.18) tel que :

$$M_{gh} = \sum_{i=1}^4 \omega \wedge J_r \begin{bmatrix} 0 & 0 & (-1)^{i+1} \Omega_i \end{bmatrix}^T$$

III.3.3.1 Équations de mouvement de translation

En remplaçant les équations (III.24), (III.25) et (III.26) dans la deuxième expression de (III.22), nous aurons la forme suivante :

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \psi \sin \phi \\ \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi \\ \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \sum_{i=1}^4 F_i - \begin{bmatrix} K_{ftx} \dot{x} \\ K_{fity} \dot{y} \\ K_{ftz} \dot{z} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} \quad (\text{III.29})$$

En conséquence, on obtient les équations différentielles qui définissent le mouvement de translation :

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{1}{m} (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \psi \sin \phi) \left(\sum_{i=1}^4 F_i \right) - \frac{K_{ftx}}{m} \dot{x} \\ \ddot{y} &= \frac{1}{m} (\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) \left(\sum_{i=1}^4 F_i \right) - \frac{K_{fity}}{m} \dot{y} \\ \ddot{z} &= \frac{1}{m} (\cos \phi \cos \theta) \left(\sum_{i=1}^4 F_i \right) - \frac{K_{ftz}}{m} \dot{z} - g \end{aligned} \quad (\text{III.30})$$

III.3.3.2 Équations de mouvement de rotation

Par substitution des équations (III.18) (III.27) et (III.28) dans la quatrième expression de (III.22) on obtient :

$$\begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \wedge \left(\begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} J_r \bar{\Omega}_r \dot{\theta} \\ -J_r \bar{\Omega}_r \dot{\phi} \\ (0) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{f\dot{\phi}} \dot{\phi}^2 \\ K_{f\dot{\theta}} \dot{\theta}^2 \\ K_{f\dot{\psi}} \dot{\psi}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} lb(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ lb(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ d(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (\text{III.31})$$

Les équations différentielles définissant le mouvement de rotation sont déduites de l'équation (III.31):

$$\begin{aligned} I_x \ddot{\phi} &= -\dot{\theta} \dot{\psi} (I_z - I_y) - J_r \bar{\Omega}_r \dot{\theta} - K_{f\dot{\phi}} \dot{\phi}^2 + lb(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ I_y \ddot{\theta} &= \dot{\phi} \dot{\psi} (I_z - I_x) + J_r \bar{\Omega}_r \dot{\phi} - K_{f\dot{\theta}} \dot{\theta}^2 + lb(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ I_z \ddot{\psi} &= -\dot{\phi} \dot{\theta} (I_y - I_x) - K_{f\dot{\psi}} \dot{\psi}^2 + d(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2) \end{aligned} \quad (\text{III.32})$$

avec : $\bar{\Omega}_r = -\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4$.

Après synthétisation des modèles cinématiques et dynamiques du système volant, les équations de mouvement du quadrirotor peuvent être dérivées comme suit [61,62]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{\phi} = \frac{(I_y - I_z)}{I_x} \dot{\theta} \dot{\psi} - \frac{J_r}{I_x} \bar{\Omega}_r \dot{\theta} - \frac{K_{fax}}{I_x} \dot{\phi}^2 + \frac{1}{I_x} u_2 \\ \ddot{\theta} = \frac{(I_z - I_x)}{I_y} \dot{\phi} \dot{\psi} + \frac{J_r}{I_y} \bar{\Omega}_r \dot{\phi} - \frac{K_{fay}}{I_y} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{I_y} u_3 \\ \ddot{\psi} = \frac{(I_x - I_y)}{I_z} \dot{\phi} \dot{\theta} - \frac{K_{faz}}{I_z} \dot{\psi}^2 + \frac{1}{I_z} u_4 \\ \ddot{x} = -\frac{K_{fxx}}{m} \dot{x} + \frac{1}{m} u_x u_1 \\ \ddot{y} = -\frac{K_{fyy}}{m} \dot{y} + \frac{1}{m} u_y u_1 \\ \ddot{z} = -\frac{K_{fzz}}{m} \dot{z} - g + \frac{\cos \phi \cos \theta}{m} u_1 \end{array} \right. \quad (\text{III.33})$$

avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} u_x = \cos \phi \cos \psi \sin \theta + \sin \phi \sin \psi \\ u_y = \cos \phi \sin \psi \sin \theta - \sin \phi \cos \psi \end{array} \right. \quad (\text{III.34})$$

et l'entrée du système pourra s'écrire :

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b & b & b & b \\ 0 & -lb & 0 & lb \\ lb & 0 & -lb & 0 \\ d & -d & d & -d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1^2 \\ \Omega_2^2 \\ \Omega_3^2 \\ \Omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.35})$$

Lors de son vol, le Quadrirotor est soumis à des perturbations de nature multiple comme l'apparition brutale de vent, variation de la pression atmosphérique ou entrée dans des zones de courant d'air ascendant.

Afin de simplifier le modèle du système, les perturbations incorporées englobent l'effet des perturbations externes ainsi de l'effet des moment résultants des frottements aérodynamiques M_a et des forces de trainés F_t agissant sur le système. En effectuant le changement de variable suivant : $\omega_\theta = \dot{\theta}$, $\omega_\phi = \dot{\phi}$, $\omega_\psi = \dot{\psi}$, $\dot{V}_x = \ddot{x}$, $\dot{V}_y = \ddot{y}$, $\dot{V}_z = \ddot{z}$;

L'équation (III.32) devient :

$$\begin{aligned}
I_x \dot{\omega}_\phi &= \omega_\theta \omega_\psi (I_y - I_z) - J_r \omega_\theta \Omega + IU_2 + d_\phi \\
I_y \dot{\omega}_\theta &= \omega_\phi \omega_\psi (I_z - I_x) - J_r \omega_\phi \Omega + IU_3 + d_\theta \\
I_z \dot{\omega}_\psi &= \omega_\phi \omega_\theta (I_x - I_y) + U_4 + d_\psi \\
\dot{V}_x &= -\frac{U_1}{m} (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) + d_x \\
\dot{V}_y &= -\frac{U_1}{m} (\cos \phi \sin \theta \sin \psi + \sin \phi \cos \psi) + d_y \\
\dot{V}_z &= -g \frac{U_1}{m} (\cos \phi \cos \theta) + d_z
\end{aligned} \tag{III.36}$$

$$\begin{aligned}
\text{Où, } \dot{d}_\phi &= c_1 (\phi_d - \phi) ; \quad \dot{d}_\theta = c_2 (\theta_d - \theta) ; \quad \dot{d}_\psi = c_3 (\psi_d - \psi) ; \quad \dot{d}_x = c_4 (x_0 - x) ; \\
\dot{d}_y &= c_5 (y_0 - y) ; \quad \dot{d}_z = c_6 (z_0 - z)
\end{aligned}$$

Vu que le système est sous actionné, Nous ne pouvons pas contrôler x et y avec seulement U_1 , mais il est possible de les manipuler à travers les angles de roulis et de tangage.

On suppose que le Quadrirotor vole autour d'une position stationnaire, c'est-à-dire que les valeurs des angles de roulis et de tangage sont faibles. On a donc l'hypothèse suivante :

$$\sin \phi_d \approx \phi_d, \sin \theta_d \approx \theta_d, \cos \phi_d = \cos \theta_d = 1$$

Ainsi, on peut écrire :

$$\begin{aligned}
\ddot{x} &= \frac{1}{m} (\phi_d \sin \psi + \theta_d \cos \psi) U_1 + d_x \\
\ddot{y} &= \frac{1}{m} (-\phi_d \cos \psi + \theta_d \sin \psi) U_1 + d_y
\end{aligned} \tag{III.37}$$

Après un réarrangement,

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \frac{U_1}{m} \begin{bmatrix} \sin \psi & \cos \psi \\ -\cos \psi & \sin \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_d \\ \theta_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix} \tag{III.38}$$

Les angles de roulis et de tangage peuvent donc être obtenus par inversion (III.38).

$$\begin{bmatrix} \phi_d \\ \theta_d \end{bmatrix} = -\frac{m}{U_1} \begin{bmatrix} \sin \psi & -\cos \psi \\ \cos \psi & \sin \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} - \frac{m}{U_1} \begin{bmatrix} \sin \psi & -\cos \psi \\ \cos \psi & \sin \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix} \tag{III.39}$$

III.4 Commande Synergétique

Le contrôle synergétique a été développé par Kolesnikov et ses collègues [63]. Il s'agit d'une approche progressive dans le domaine des systèmes de contrôle. L'approche est souvent appelée stabilisation et contrôle via la restriction du système et l'invariance multiple [64]

La stratégie de commande Synergétique est attractive pour les systèmes non linéaires [65]. C'est une approche de commande non linéaire qui a le même objectif que la commande par mode glissant. Cette commande ainsi que la commande par mode glissant partagent les avantages de stabilité globale, la réduction d'ordre et l'insensibilité vis-à-vis des paramètres. Ce qui la différencie de la commande par mode glissant est le fait qu'elle est toujours continue ce qui permet d'éviter le phénomène de broutement ("chattering" en anglais) de la commande par mode glissant.

Le but de cette commande est de porter le système à fonctionner dans une région bien spécifique définie par une macro-variable. Le concept fondamental de cette approche est de gérer les trajectoires du système contrôlé dans l'espace d'état du système.

Dans [64] et [66] une description complète de la technique synergétique a été présentée.

III.4.1 Principe général

L'élaboration d'une commande synergétique est complètement analytique et peut être résumée dans les trois étapes suivantes :

1- Choix de la macro-variable

Considérons le système non linéaire de dimension n suivant :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, t) \quad (\text{III.40})$$

Où x est le vecteur des variables d'état du système tel que $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$, $m \leq n$ est le vecteur de commande et t est le temps.

Afin de synthétiser le contrôleur par la méthode synergétique, la macro-variable est alors définie comme suit [67] :

$$\varphi = \varphi(x, t) \quad (\text{III.41})$$

Où $\varphi \in \mathbb{R}^k$, $0 < k \leq m$ est la macro-variable.

Théoriquement, la macro-variable peut être sélectionnée conformément aux spécifications de contrôle et des contraintes de commande, selon les objectifs désirés et des performances

souhaités. Par exemple, pour réguler ou stabiliser la sortie du système. La manière dont la macro-variable est définie ou formulée détermine le comportement du système une fois qu'il atteint le *manifold*. Elle est choisie comme une certaine combinaison des variables d'état du système. L'objectif du contrôleur synergique est de piloter le système afin de fonctionner dans l'intersection des *manifolds* (intersection de tous les $\varphi=0$). Il a été démontré dans [64], que (III.42) est une solution du problème optimal dont la fonction objective est donnée dans (III.43).

2- Evolution dynamique de macro-variable

Les macro-variables évoluent selon l'équation différentielle suivante :

$$T \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = 0 \quad (\text{III.42})$$

avec T est une matrice diagonale dans $\mathbb{R}^{k \times k}$, telle que les éléments T_i sont positifs.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} L(t, \varphi, \dot{\varphi}) \quad (\text{III.43})$$

Où J est la fonction objective et $\{t_0, t_f\}$ sont respectivement le temps initial et le temps final, et L est défini comme :

$$L(t, \varphi, \dot{\varphi}) = \dot{\varphi}^T T^T T \dot{\varphi} + \varphi^T \varphi \quad (\text{III.44})$$

La matrice T est le paramètre de conception du contrôleur qui spécifie le temps nécessaire pour que les macro-variables convergent vers zéro et reflète donc la vitesse à laquelle les variables d'état se déplacent vers le *manifold*.

L'équation (III.42) peut être dérivée :

$$T \frac{d\varphi(x, t)}{dt} + \varphi(x, t) = 0$$

$$T \frac{d\varphi(x, t)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} + \varphi(x, t) = 0$$

Selon la définition du système donnée en (III.40) :

$$T \frac{d\varphi(x, t)}{dx} f(x, u, t) + \varphi(x, t) = 0 \quad (\text{III.45})$$

Par conséquent, en définissant une macro-variable appropriée et en choisissant le paramètre T , la sortie de contrôle peut être déduite de l'équation (III.45).

3- Extraction de loi de commande

En résolvant l'équation (III.46) pour u , la loi de commande peut être définie sous la forme :

$$u = g(x, t, \varphi(x, t), T) \quad (\text{III.46})$$

Il n'y a pas de manière unique de construire un *manifold*. La manière dont le *manifold* est construit dépend du type de problème (régulation ou suivi) et détermine la qualité des performances du contrôleur.

III.4.2 Analyse de Stabilité

La solution de l'équation différentielle (III.42), pour $T_i > 0$; $i = 1..k$, est de la forme :

$$\varphi_i(t) = \varphi_i(t_0) e^{-\frac{t-t_0}{T_i}} \quad (\text{III.47})$$

Où t_0 est le temps initial. Ce qui implique que la trajectoire d'état de système en boucle fermée converge vers la variété $\varphi_i = 0$ à partir de n'importe quel état initial. On peut aussi montrer facilement que la fonction $V(\varphi) = \varphi^T \varphi$ est une fonction de Lyapunov pour le système [Ettouil *et al.* [68].

La méthode adoptée, la même que celle adoptée dans Slotine [69], est illustrée à l'aide des applications donnés ci-dessous.

III.4.3 Applications

Première application : Considérons un système linéaire invariant dans le temps dont la dynamique est définie par l'espace d'état donné ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} u \quad (\text{III.48})$$

$$y = x_1$$

En supposant que nous voulions déplacer l'état du système d'un point initial quelconque (x_{10}, x_{20}) à un endroit d'intérêt particulier (x_{1f}, x_{2f}) . On sait qu'il s'agit d'un problème de régulation. De nouvelles variables, appelées variables d'erreur, sont définies comme suit :

$$\bar{x}_1 = x_1 - x_{1f} \quad \text{et} \quad \bar{x}_2 = x_2 - x_{2f}.$$

Et (III.48) peut être réécrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{x}}_1 \\ \dot{\bar{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.49})$$

où

$$\begin{aligned} f_1 &= -(a_{11}x_{1f} + a_{12}x_{2f}) \\ f_2 &= -(a_{21}x_{1f} + a_{22}x_{2f}) \end{aligned} \quad (\text{III.50})$$

La macro-variable est généralement définie comme une fonction différentielle polynomiale de la variable d'erreur. Le degré du polynôme est $n-1$ avec n étant l'ordre du système, c'est-à-dire que dans le cas général, la macro-variable est définie comme suit :

$$\varphi(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \bar{x}_1 \quad (\text{III.51})$$

Dans le cas du système défini par l'équation de (III.48) ou (III.49), la macro-variable est définie comme suit :

$$\varphi = \dot{\bar{x}}_1 + \lambda \bar{x}_1 \quad (\text{III.52})$$

La solution de (III.45) est donnée comme suit :

$$\varphi = \varphi(0) e^{-\frac{1}{T}t} \quad (\text{III.53})$$

où $\varphi(0)$ est la valeur initiale de la variable macro. Nous pouvons également voir que comme $t \rightarrow \infty$, $\varphi = 0$ qui, lorsqu'il est substitué dans (III.53), produit un *manifold* donné par :

$$\varphi = \dot{\bar{x}}_1 + \lambda \bar{x}_1 = 0 \quad (\text{III.54})$$

Pour que le *manifold* défini dans (III.54) soit stable, $\lambda > 0$.

La solution de (III.54) donnera, $\bar{x}_1 = \bar{x}_2 = 0$ et donc $x_1 = x_{1f}$ et $x_2 = x_{2f}$. Ainsi, on dit que l'entrée de commande obtenue lors de la résolution de (III.45) a forcé le système vers le *manifold*.

Deuxième application : Considérons un système non linéaire dont la dynamique est donnée par l'équation différentielle suivante :

$$\ddot{x} + \gamma_1 \dot{x}^2 + \gamma_2 \dot{x}^5 \sin x = u \quad (\text{III.55})$$

Où α_1 et α_2 sont des paramètres constants connus. Cette équation peut être écrite sous forme d'espace d'état comme suit :

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_2 \\
\dot{x}_2 &= x_3 \\
\dot{x}_3 &= -\gamma_1 x_3^2 - \gamma_2 x_2^5 \sin x_1 + u
\end{aligned} \tag{III.56}$$

Où $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}$ et $x_3 = \ddot{x}$ sont les variables d'état. L'objectif de conception de la commande pour le système (III.56) est de réguler l'état à l'origine de \mathbf{R}^3 . En utilisant la procédure décrite dans l'application précédente afin de construire *manifold*, nous avons

$$\varphi(x_1, x_2, x_3) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^2 x_1 = \left(\frac{d^2}{dt^2} + 2\lambda \frac{d}{dt} + \lambda^2 \right) x_1 \tag{III.57}$$

La loi de contrôle synergique est obtenue en résolvant l'équation différentielle du premier ordre,

$$T\dot{\varphi}(x_1, x_2, x_3) + \varphi(x_1, x_2, x_3) = 0 \tag{III.58}$$

En résolvant cette équation différentielle pour u nous obtenons

$$u = \gamma_1 x_3^2 + \gamma_2 x_2^5 \sin x_1 - \left(2\lambda + \frac{1}{T} \right) x_3 - \lambda \left(\lambda + \frac{2}{T} \right) x_2 - \frac{\lambda^2}{T} x_1 \tag{III.59}$$

En choisissant $\lambda=5$, l'effet de la variation de T est illustré à la figure (III.3). La figure (III.4) représente l'effet de la variation de λ avec T fixé à 0.1 et les trajectoires des variables d'état pour $\lambda=5$ et $T=1$ sont données à la figure (III.5). La condition initiale du système est $\{-5, -3, 2\}$ et les paramètres du modèle γ_1, γ_2 ont pour valeurs respectives 2.25 et -0.187 .

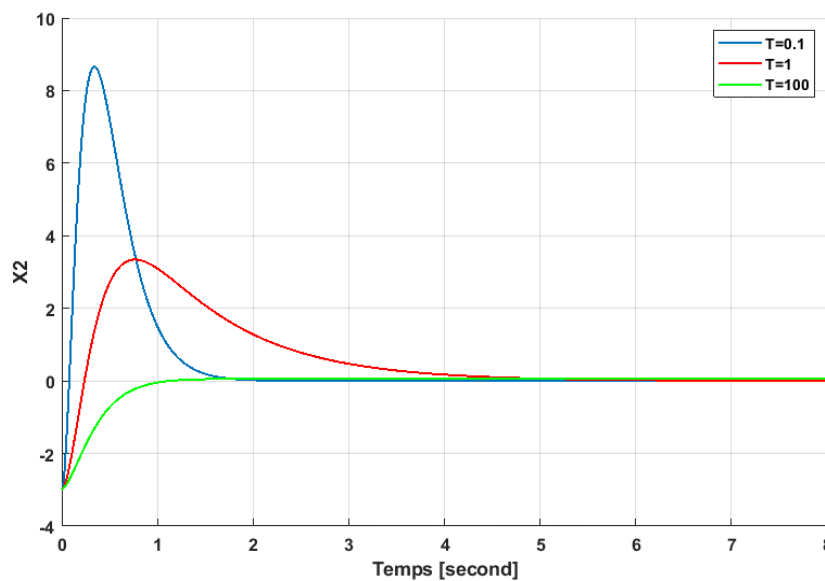


Figure (III-3) Trajectoires de la variable x_2 pour différente valeurs de T

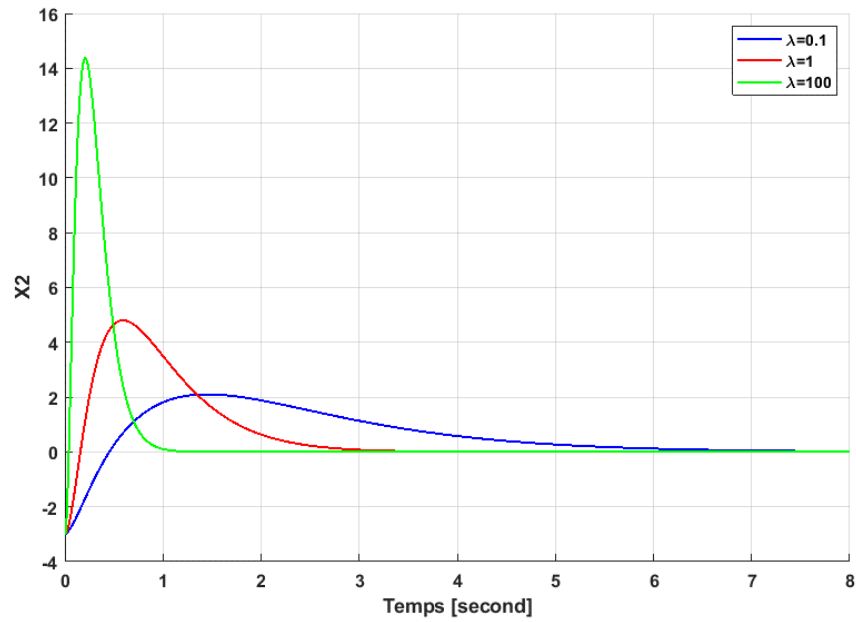


Figure (III-4) Trajectoires de la variable x_2 pour différentes valeurs de λ

On peut voir sur la figure (III.3) que pour une valeur constante de λ le temps de stabilisation augmente et le dépassement diminue avec l'augmentation de la valeur de T et de la figure (III.4) que pour une valeur constante de T , le temps d'établissement et de stabilisation diminue et le dépassement augmente avec une augmentation de λ . Ainsi, le choix de ces deux variables a un effet considérable sur les performances de la boucle fermée du système.

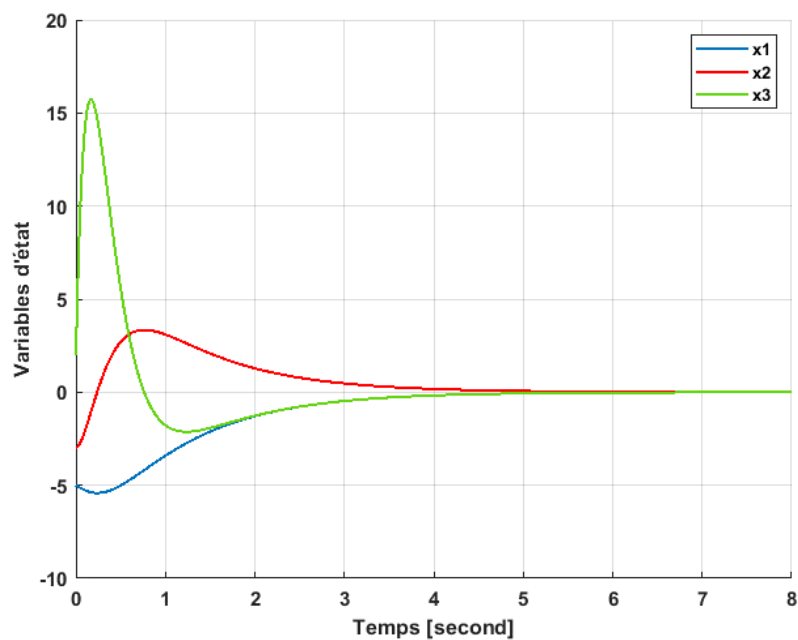


Figure (III-5) Trajectoires des variables du système pour $\lambda = 5$, $T = 1$

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la manière dont la macro-variable est formulée dépend de la nature du système avec lequel nous travaillons.

III.5 Synthèse de la commande Synergétique appliquée au modèle

La figure suivante montre la structure du contrôleur proposé [70].

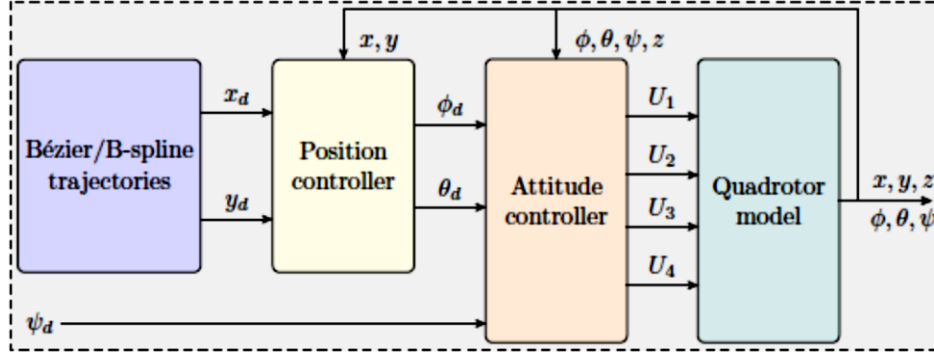


Figure (III-6) Boucle interne et externe du contrôleur proposé

Sur la base de la théorie du contrôleur synergétique, les macrovariables sont considérées comme suit :

$$\begin{aligned}
 \varphi_1 &= \omega_\theta - k_1(\theta_d - \theta) - d_\theta \\
 \varphi_2 &= \omega_\phi - k_2(\phi_d - \phi) - d_\phi \\
 \varphi_3 &= \omega_\psi - k_3(\psi_d - \psi) - d_\psi \\
 \varphi_4 &= V_z - k_4(z_d - z) - d_z
 \end{aligned}
 \tag{III.60}$$

Où k_1, k_2, k_3 sont les constantes positives.

Les macrovariables φ_1, φ_2 et φ_3 servent à assurer la convergence des angles d'orientation (θ, ϕ, ψ) du Quadrirotor vers les valeurs souhaitées $(\theta_0, \phi_0, \psi_0)$. L'étape suivante consiste à synthétiser une loi de commande qui forcerait le système à atteindre de façon exponentielle le manifold désiré ($\varphi=0$) avec une évolution dynamique de φ , qui peut être énoncé comme suit :

$$T\dot{\varphi}_i + \varphi_i = 0, \quad i \in 1, 2, 3, 4 \tag{III.61}$$

Où $T = T^T > 0$ spécifie le taux de convergence des états du système.

La loi de contrôle synergétique peut être calculée en résolvant le système (III.36) avec l'évolution (III.61) et les macrovariables correspondantes décrites dans (III.60), qui donnent ce qui suit :

$$\begin{aligned}
U_1 &= \Gamma (Tg - Td_z + Tk_4 z_d - Tk_4 z + Td_z - V_z + k_4 z_d + k_4 z - d_z) \\
U_2 &= \frac{1}{Tl} (-TI_x^{-1} \omega_\theta \omega_\psi (I_y - I_z) + TI_x^{-1} J \omega_\theta \Omega - Td_\phi + Tk_2 \dot{\phi}_d - Tk_2 \phi \\
&\quad + Td_\phi - \omega_\phi + k_2 \phi_d - k_2 \phi + d_\phi) \\
U_3 &= \frac{1}{Tl} (-TI_y^{-1} \omega_\phi \omega_\psi + TI_y^{-1} J \omega_\phi \Omega - Td_\theta + Tk_1 \dot{\theta}_d - Tk_1 \omega_\theta \\
&\quad + Td_\theta - \omega_\theta + k_1 \theta_d + k_1 \theta + d_\theta) \\
U_4 &= \frac{1}{Tl} (-TI_z^{-1} \omega_\phi \omega_\theta (I_x - I_y) - Td_\psi + Tk_3 \dot{\psi}_d - Tk_3 \psi \\
&\quad + Td_\psi - \omega_\psi + k_3 \psi_d - k_3 \psi + d_\psi)
\end{aligned} \tag{III.62}$$

$$\text{Où } \Gamma = \frac{m}{(\cos \theta \cos \phi) T}$$

Stabilité du système

Théorème 1 Les signaux de commande U en équation (III.62) garantissent la stabilité du système Quadrirotor et restent dans le manifold désiré [70].

Preuve La fonction Lyapunov suivante est choisie en termes de macro-variables :

$$V = \frac{1}{2} (\varphi_1^T \varphi_1 + \varphi_2^T \varphi_2 + \varphi_3^T \varphi_3 + \varphi_4^T \varphi_4) \tag{III.63}$$

En prenant la dérivée temporelle de l'équation ci-dessus, on obtient :

$$\dot{V} = \varphi_1^T \dot{\varphi}_1 + \varphi_2^T \dot{\varphi}_2 + \varphi_3^T \dot{\varphi}_3 + \varphi_4^T \dot{\varphi}_4 \tag{III.64}$$

Remplacement de (III.61) dans (III.64)

$$\begin{aligned}
\dot{V} &= \varphi_1 \left(-\frac{1}{T_1} \varphi_1 \right) + \varphi_2 \left(-\frac{1}{T_2} \varphi_2 \right) + \varphi_3 \left(-\frac{1}{T_1} \varphi_3 \right) + \varphi_4 \left(-\frac{1}{T_2} \varphi_4 \right) \\
&= - \left[\frac{1}{T_1} \varphi_1^2 + \frac{1}{T_2} \varphi_2^2 + \frac{1}{T_1} \varphi_3^2 + \frac{1}{T_2} \varphi_4^2 \right]
\end{aligned} \tag{III.65}$$

Par conséquent, $\dot{V} \leq 0$. Ainsi, la stabilité du système Quadrirotor est garantie.

III.6. Génération de trajectoire pour le quadrirotor

Lors de sans vol, un quadrirotor est mené à changer fréquemment sa direction ou son altitude pour suivre sa trajectoire. Si cette trajectoire est discontinue, le système volant doit s'arrêter et redémarrer fréquemment, ce qui entraîne un gaspillage d'énergie d'où l'importance de générer des trajectoires lisses.

Plusieurs techniques de lissage ont été introduites. La première technique proposée consistait à générer une trajectoire optimale formée par des segments de droite reliés tangentiellement par des arcs de cercles [2]. Ces trajectoires n'assurent cependant pas la continuité de la courbure. *Fraichard et al* [71] ont proposé, par la suite, une seconde méthode permettant de déterminer des trajectoires lisses à courbure bornée et dérivée de la courbure. L'idée de cette méthode est de fournir une solution constituée de segments de droite, d'arcs de cercle et d'arcs de clothoïde [72]. Cependant, les clothoïdes n'ont pas d'équations simples et doivent être approximées par des splines et des polynômes d'ordre élevé, ce qui limite leur utilisation pour les applications robotiques en temps réel.

Les courbes de Bézier et les B-splines sont des courbes paramétriques couramment utilisées dans les applications de conception assistée par ordinateur (CAO). Les caractéristiques de ces courbes ont motivé leur utilisation dans des applications de navigation de systèmes [73]. Certains travaux proposent des splines d'interpolation comme méthode de lissage, tandis que d'autres utilisent des splines d'approximation.

Dans nos travaux, nous avons choisi d'exploiter les caractéristiques de ces méthodes paramétriques afin de générer des trajectoires lisses pour un système volant. De plus, ces techniques se base sur l'utilisation de points de contrôle pour créer des chemins de vol. Ces points de contrôle ne sont pas parcourus par la trajectoire mais guide son allure et sa courbure. De ce fait, si le système de navigation temps réel détecte un obstacle, il peut le considérer comme un nouveau point de contrôle afin de générer un nouveau tronçon du tracer qui permet d'éviter cet obstacle sans s'éloigner de trajet initial.

Dans la section suivante, un aperçu des méthodes paramétriques des courbes de Bézier et des courbes B-spline est donné.

III.6.1 Courbes de Bézier

L'interpolation n'est pas toujours très adaptée pour certaines utilisations telles que la conception assistée par ordinateur CAO. Les courbes de Bézier sont des courbes

polynomiales paramétriques qui ont été développées pour le domaine de la CAO et plus précisément dans l'industrie automobile. L'idée révolutionnaire des courbes de Bézier est l'utilisation de points de contrôle et non de points d'interpolation. Cela signifie que la courbe ne passe pas par les points donnés mais s'en approche. Pour $n + 1$ points de contrôle (P_0, \dots, P_n) , une courbe de Bézier de degré n est définie par :

$$c(u) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(u) P_i \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (\text{III.66})$$

où les fonctions de base $B_{i,n}(u)$ sont les polynômes Bernstein classiques de degré n , définis par :

$$B_{i,n}(u) = \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i} \quad (\text{III.67})$$

L'algorithme de Casteljau [74] est le moyen le plus efficace de tracer une courbe de Bézier. En effet, la construction est entièrement géométrique et consiste à dessiner la courbe tout en déplaçant le barycentre des points de contrôle. Comme le montre la figure (III.7), la courbe se trouve à l'intérieur de l'enveloppe convexe des points de contrôle (formant le polygone de contrôle). Il interpole les deux points extrêmes, mais ne passe pas par les autres points, qui définissent, cependant, la forme de la courbe.

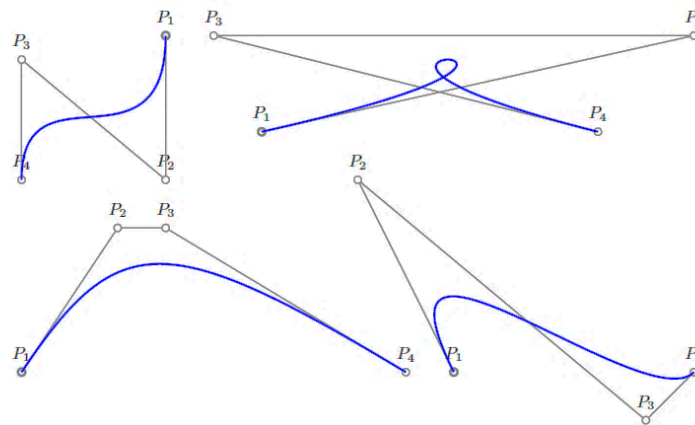


Figure (III.7) Courbes de Bézier de degré 3 et avec quatre points de contrôle

Ainsi, les avantages d'une courbe de Bézier sont résumés dans le contrôle intuitif, l'inclusion de la courbe dans le polygone convexe et la simplicité de mise en œuvre. D'autre part, les limites sont, tout d'abord, un support (ou une prise en charge) global. En effet, la modification d'un point change la forme générale de la courbe, et par conséquent, le contrôle

n'est pas local. Deuxièmement, un degré élevé est nécessaire pour satisfaire un grand nombre de contraintes.

En effet, pour une courbe de Bézier passant par n points donnés, un degré égal à $(n-1)$ est requis. Cependant, les courbes à haut degré sont instables numériquement.

En plus des propriétés mentionnées précédemment, les courbes de Bézier sont invariantes sous les transformations habituelles telles que les rotations, les translations et les mises à l'échelle, c'est-à-dire qu'on applique la transformation à la courbe en l'appliquant au polygone de contrôle.

Dans tout schéma de représentation de courbe, le choix des fonctions de base détermine les caractéristiques géométriques du schéma. Les fonctions de base $\{B_{i,n}(u)\}$ ont les propriétés suivantes :

P1 Non négativité : $B_{i,n}(u) \geq 0$ pour tout i, n et $0 \leq u \leq 1$;

P2 Partition d'unité : $\sum_{i=0}^n B_{i,n}(u) = 1$ pour tout $0 \leq u \leq 1$;

P3 $B_{0,n}(0) = B_{n,n}(1) = 1$;

P4 $B_{i,n}(u)$ atteint exactement un maximum sur l'intervalle $[0,1]$, c'est-à-dire, à $u = i/n$;

P5 Symétrie : pour tout n , l'ensemble des polynômes $\{B_{i,n}(u)\}$ est symétrique par rapport à $u = 1/2$

P6 Définition récursive : $B_{i,n}(u) = (1-u)B_{i,n-1}(u) + uB_{i-1,n-1}(u)$ on définit $B_{i,n}(u) \equiv 0$ si $i < 0$ ou $i > n$;

P7 Dérivés : $B'_{i,n}(u) = \frac{dB_{i,n}(u)}{du} = n(B_{i-1,n-1}(u) - B_{i,n-1}(u))$ avec $B_{-1,n-1}(u) \equiv B_{n,n-1}(u) \equiv 0$

Il est à constater que la propriété P6 autorise des algorithmes simples pour calculer les valeurs des polynômes de Bernstein à des valeurs fixes de u .

III.6.2 Courbes B-splines

Les courbes constituées d'un seul segment polynomial ou rationnel sont souvent inadaptées. Il s'agit donc de concevoir une courbe qui présente tous les avantages des courbes de Bézier mais sans leurs inconvénients. En d'autres termes, la courbe doit se rapprocher des points de contrôle, avoir les mêmes propriétés que les courbes de Bézier, être simple à manipuler et le degré de la courbe ne doit pas être proportionnel au nombre de points de contrôle mais fixe, et la modification d'un point ne doit pas affecter toute la courbe. La solution consiste à utiliser des courbes polynomiales segmentées (par morceaux) ; Par conséquent, la définition des B-splines est la suivante :

$$c(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) P_i \quad a \leq u \leq b \quad (\text{III.68})$$

Où $\{P_i\}$ sont les points de contrôle (formant un polygone de contrôle). Les $\{N_{i,p}(u)\}$ sont les fonctions B-spline de base de degré p définies sur le vecteur normal comme suit :

$$U = \left\{ \underset{p+1}{a, \dots, a}, \underset{p+1}{u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}}, \underset{p+1}{b, \dots, b} \right\}$$

Ces fonctions sont définies par la formule récursive de Cox et DeBoor :

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{si } u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{III.69})$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u)$$

Calculer un point sur la courbe B-spline pour une valeur donnée de u implique les étapes suivantes : Déterminer l'intervalle contenant u , puis calculer les fonctions de base non nulles et finalement multiplier les valeurs des fonctions de base non nulles par les coordonnées des points correspondants.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé le modèle du système robotique considéré à savoir un robot volant de type quadrirotor. La théorie de la technique de commande synergétique a été exposé en détail et appuyé par des exemples d'application. Cette commande a été ensuite appliqué au modèle du quadrirotor développé afin de le contrôler dans sa poursuite. Les algorithmes de génération de trajectoires basées sur les courbes de Bézier et les courbes B-splines ont été présenté. Ces algorithmes permettent la génération une trajectoire lisse permettant une navigation stable et admissible du drone.

CHAPITRE IV

RESULTATS DE SIMULATIONS ET EXPERIMENTAUX

CHAPITRE IV

Résultats de Simulations et expérimentaux

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente les résultats de simulation numérique et expérimentaux obtenus pour la poursuite, par un UAV de type quadrirotor, des trajectoires optimisées qui sont générées par les techniques des courbes de Bézier et des courbes B-splines. Cette poursuite des trajectoires parcourues par le drone est assurée grâce à un contrôleur synergétique. Ce contrôleur assure en premier lieu l'atteinte d'une altitude de vol donnée et la stabilisation des angles du robot.

Les essais expérimentaux en temps réel sont mis en œuvre pour valider la partie théorique de notre analyse.

Nous commencerons par détailler les éléments constitutifs du banc d'essai ainsi que les caractéristiques du système de pilotage automatique. Nous exposerons les résultats des essais suivants :

- Essai portant sur la capacité du contrôleur à stabiliser les angles de roulis et de tangage.
- Des essais où le quadrirotor est mené à générer et suivre, par la commande synergétique, des trajectoires précises en exploitant des points de contrôle imposés. Deux techniques (Courbes de Bézier et B-spline) vont être utilisées pour générer la trajectoire de vol.
- Les mêmes essais auront pour objectif la validation de la commande synergétique pour le suivi de trajectoire ainsi que sa robustesse.

IV.2 La plateforme expérimentale

Pour les expériences, la plate-forme (illustrée à la Figure (IV.1)) pour le contrôle d'attitude est composée du DIY Quad. Le DIY Quad est un Quadcopter équipé de :

1. Un support avec rotule de rotation
2. Châssis de quad

3. Pilote automatique Pixhawk PX4.
4. Quatre contrôleurs de vitesse électroniques (ESC)
5. Quatre moteurs sans balais avec hélices
6. Récepteur RC Graupner
7. Radios de télémétrie 3DR
8. GPS u-blox avec boussole
9. Tableau de distribution d'énergie et batterie LiPo
10. Module APM Power pour mesurer la consommation de courant et la tension de la batterie.

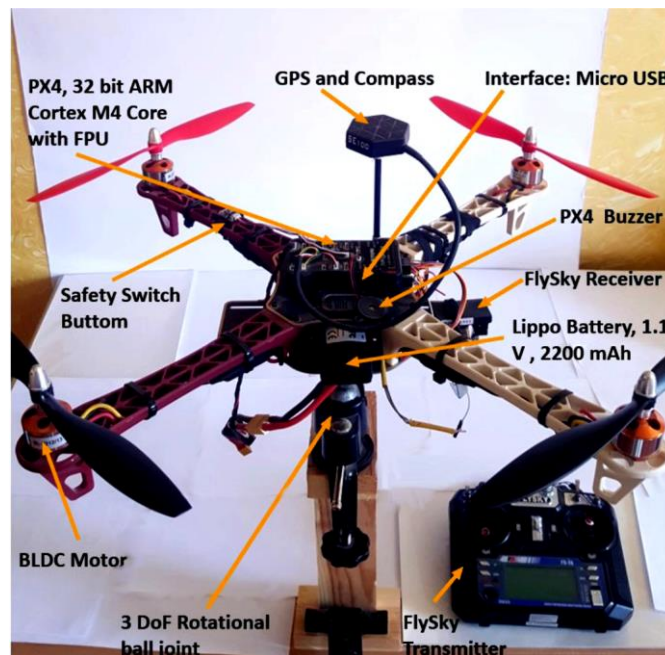


Figure (IV.1) Configuration expérimentale du Quadrirotor

IV.2.1 Pixhawk 1

PX4 est le pilote automatique professionnel. Développé par des développeurs de classe mondiale issus de l'industrie et du monde universitaire, et soutenu par une communauté mondiale active, il équipe toutes sortes de véhicules, des drones de course et de transport de marchandises aux véhicules terrestres et submersibles.



Figure (IV.2) Pixhawk utilisé

Le PX4 utilisé (figure (IV.2)) est fabriqué autour un cœur STM32F427 Cortex M4 32 bits. Le système embarqué est équipé d'un accéléromètre/gyroscope 6 degrés de liberté MPU-6000 et d'un accéléromètre/magnétomètre 3 axes ST Micro LSM303D.

Avantages du Pixhawk:

- Conception modulaire avec un large choix de carte porteuses (carrier board)
- Le Multi GPS est un standard sur le Pixhawk, qui a la capacité d'accueillir un GPS RTK,
- Double redondance des centrales inertielles (IMU)
- Centrales inertielles isolées, amortie avec contrôle de la température. Un système de chauffage par résistance permet aux IMUs de fonctionner à température négative. Elles sont isolées du système de gestion de vol (FMU) par une mousse afin de réduire les vibrations haute fréquence, les interférences et le bruit mesuré par les capteurs.
- Le Pixhawk intègre un port pour mini-ordinateur (ex : Intel Edison) qui se trouve être une solution simple pour ajouter plus de puissance de calcul avec un seul connecteur.

IV.2.2 Radio Control (RC)

L'émetteur RC est utilisé pour effectuer le contrôle manuel et la sélection du mode de vol.

La radio commande fonctionne avec un signal AFHDS 2A 2,4 GHz. Ce dernier garantit à l'émetteur une transmission longue portée sans brouillage. La radio commande opère sur 6 canaux et utilise le principe de l'identifiant unique lors de la liaison avec un récepteur.

Une station au sol open source (QGroundControl ou Mission Planner) est utilisée pour visualiser les données de télémétrie, configurer les paramètres du mode de vol et permet de calibrer les capteurs.



Figure (IV.3) Radio Control utilisé

IV.3 Résultats de simulation

Les paramètres du modèle Quadrirotor utilisé sont illustrés dans tableau (IV.1). Les conditions initiales des angles de roulis, de tangage et de lacet sont, respectivement :

$$\phi_0 = 0.6\text{rad/s}, \theta_0 = 0.4\text{rad/s} \quad \psi_0 = -0.5\text{rad/s}.$$

Paramètre	Valeur	Unit (MKSA)
m	0.65	kg
I_x	$7.5e^{-3}$	kgm^2
I_y	$7.5e^{-3}$	kgm^2
I_z	$1.3e^{-2}$	kgm^2
b	$3.13e^{-5}$	Ns^2
d	$7.5e^{-7}$	Nms^2
J_r	$6e^{-5}$	kgm^2
l	0.23	m

Tableau (IV.1) Paramètres du banc d'essai Quadrirotor

IV.3.1 Test 1 : stabilisation

La figure (IV.4) montre la stabilisation des angles du Quadrirotor. On peut voir, sur les différentes courbes, que le contrôleur synergétique proposé a bien stabilisé les angles de roulis et de tangage.

Pour le test de robustesse, une force externe a été appliquée au Quadrirotor afin de démontrer la capacité du contrôleur proposé à gérer de telles perturbations le long des trajectoires prévues et à maintenir la stabilité du système. Le contrôleur synergétique présente une grande aptitude à stabiliser la dynamique non-linéaire en boucle fermée.

On peut observer que le Quadrirotor suit les angles d'orientation avec une grande précision.

De plus, les signaux de contrôle appliqués au Quadrirotor sont de valeur acceptable et physiquement réalisables. Par définition : Pitch – Tangage, Roll – Roulis et Yaw – Lacet.

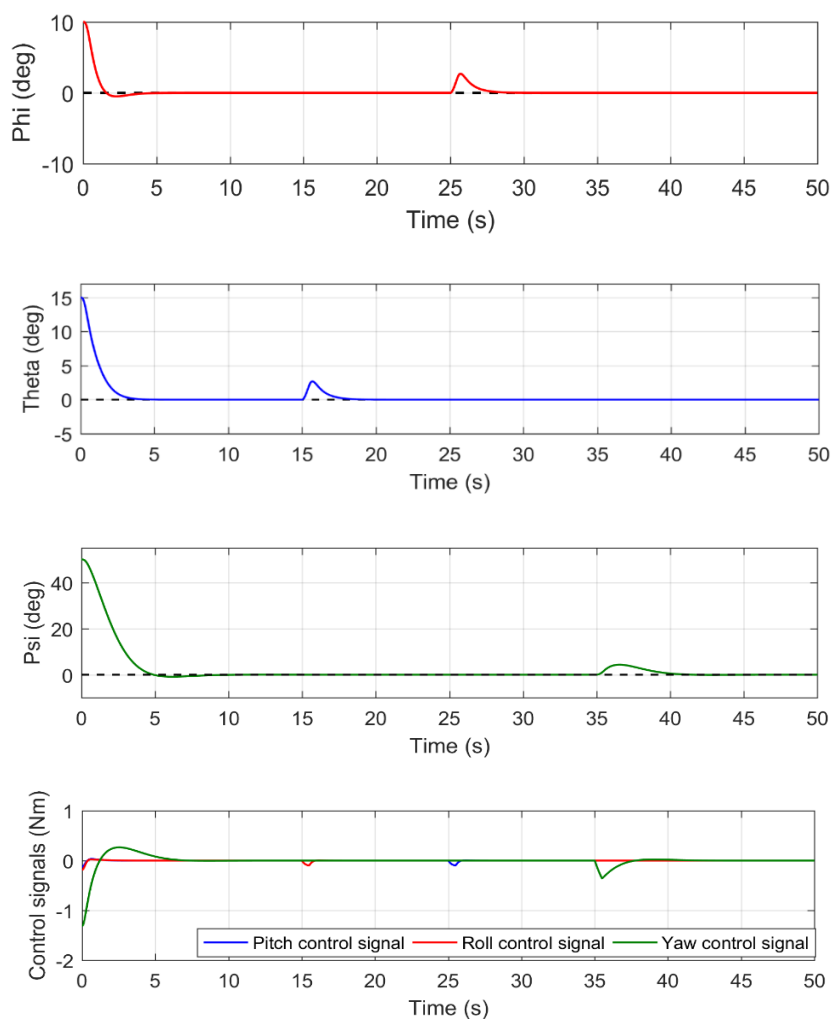


Figure (IV.4) Résultats de la simulation de l'essai de stabilisation.
De haut en bas : angle de roulis, angle de tangage, angle de lacet et signaux de commande

Les planifications de trajectoire du Quadrirotor par les méthodes paramétriques des courbes de Bézier et B-splines sont Testées dans les tests ci-dessous.

Les points de contrôle nécessaires à la génération des courbes sont donnés dans le tableau (IV.2), ils permettent une navigation avec évitement d'obstacles, en gardant une grande précision pour la détection.

Méthodes de génération des trajectoires Bézier et B-spline														
Coordonner les points de contrôle	x	1	1	1	1	2	3	4	5	5	7	8	10	8
	y	1	4	7	9	10	8	6	4	1	0	0	1	8

Table (IV.2) Coordonnées des points de contrôle des méthodes paramétrique Bézier et B-spline.

IV.3.2 Test 2 : Méthode de Bézier

Les avantages de la courbe de Bézier peuvent être résumés dans le contrôle intuitif, l'inclusion de la courbe dans le polygone convexe et la simplicité de mise en œuvre.

D'autre part, les limites de cette méthode se situent en premier lieu dans le fait que le contrôle de la courbe est global, où la modification d'un point de contrôle modifie la forme générale la courbe, et non pas un voisinage de ce point de contrôle, par conséquent le contrôle n'est pas local.

Deuxièmement, un degré élevé de contrôle est nécessaire pour satisfaire un grand nombre de contraintes. En effet, pour une courbe de Bézier passant par n points donnés, un degré égal à $(n-1)$ est requis.

La figure (IV.5) montre l'évolution des angles du Quadrirotor (roulis, tangage et lacet) pour le cas où les angles souhaités sont donnés à partir de la méthode Bézier.

On peut observer un bon suivi des angles vers les orientations souhaitées, les erreurs sont faibles, et les signaux de contrôle appliqués au Quadrirotor sont physiquement réalisables.

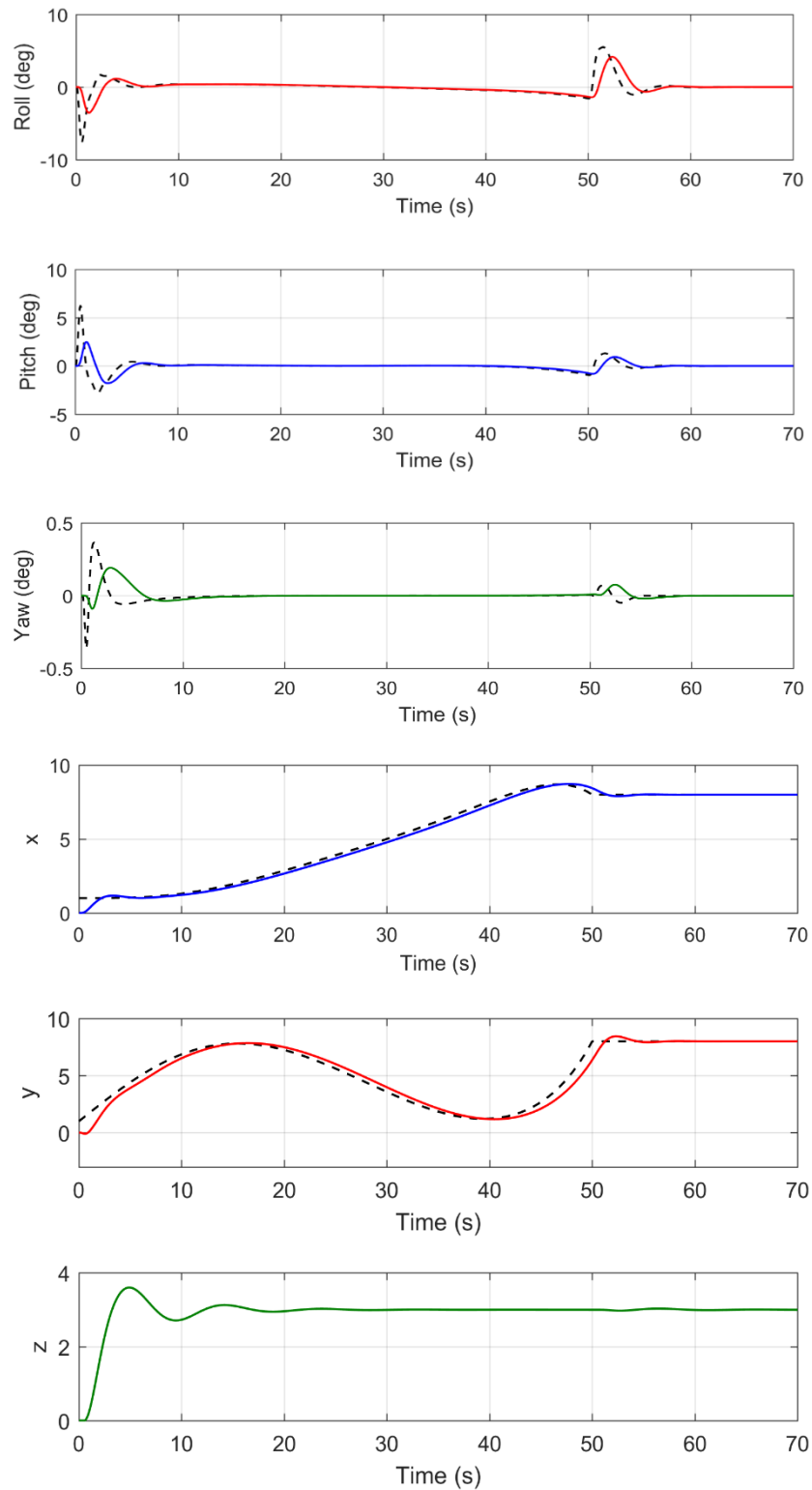


Figure (IV.5) Résultats de la simulation du deuxième essai (méthode de Bézier).
 Les lignes pointillées servent de références ; les lignes pleines servent à des mesures réelles.
 De haut en bas : les angles (tangage, roulis et lacet) et les positions en (x (en mètre), y et z)

Les figures (IV.6) et (IV.7) montrent le suivi de la trajectoire du quadrirotor dans les plans x - y et x - y - z , respectivement. Encore une fois, on peut observer que le contrôleur proposé a réussi à maintenir la trajectoire du système à la trajectoire désirée.

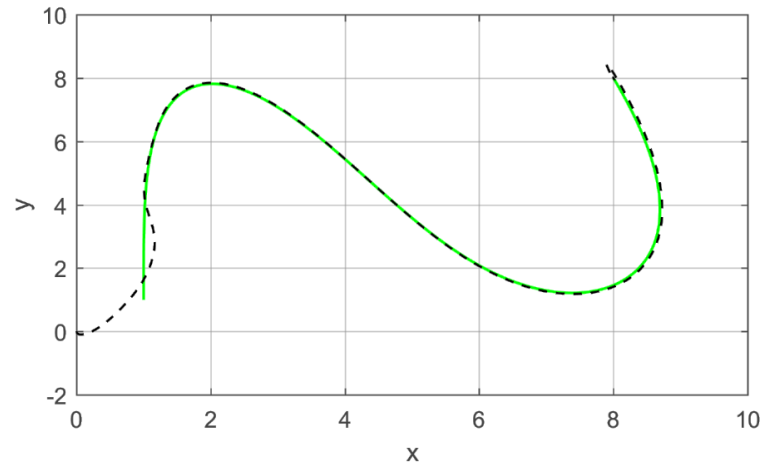


Figure (IV.6) Trajectoire du Quadrirotor dans le plan x - y (position en mètre).
Les lignes pointillées correspondent à la trajectoire désirée.
La ligne continue représente la trajectoire réelle.

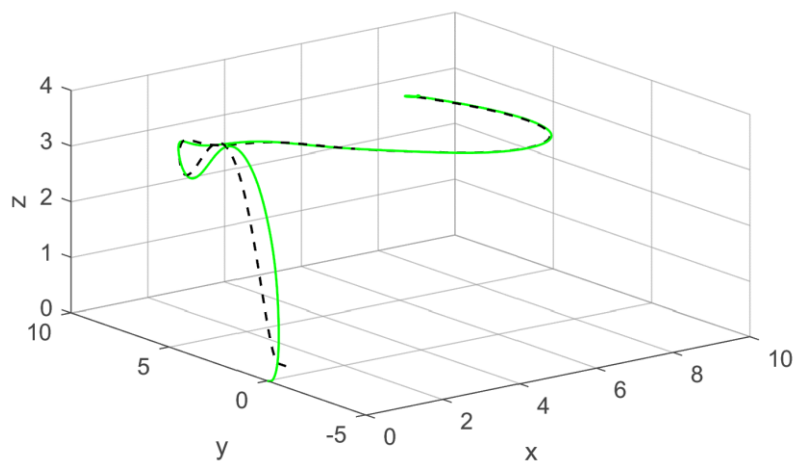


Figure (IV.7) Trajectoire du Quadrirotor dans le plan x - y - z .
Les lignes pointillées sont pour le la trajectoire souhaitée
La ligne continue représente la trajectoire réelle

IV.3.3 Test 3: Méthode B-spline

Le fait que les courbes B-splines ont des points de contrôle pondérés permet de tracer leur allure à partir d'un ou de plusieurs points et ainsi d'obtenir la trajectoire souhaitée. Ils conservent l'indépendance du degré (contrairement aux courbes de Bézier où le degré dépend du nombre de points de contrôle) ainsi que la propriété de modification locale de l'allure qui caractérise les courbes B-splines.

Les figures (IV.8) et (IV.9) montrent l'évolution des angles Quadrirotor pour le cas où les angles désirés sont donnés par la trajectoire générée par la méthode B-spline.

Encore une fois, le contrôleur synergétique proposé a réussi à maintenir les angles de roulis et de tangage identiques aux trajectoires souhaitées fournies par la méthode B-spline. Un bon suivi des trajectoires est obtenu ; on peut voir à nouveau que les erreurs convergent vers zéro et que les signaux de contrôle sont de faible valeur, donc physiquement réalisables.

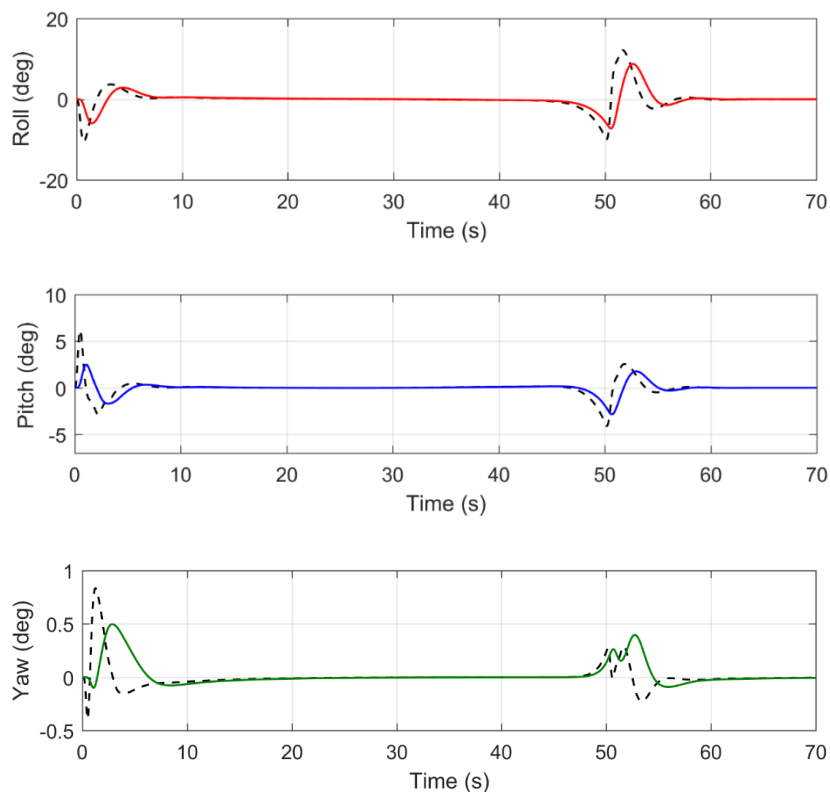


Figure (IV.8) Résultats de la simulation du troisième essai (Méthode B-spline). Les lignes pointillées servent de références ; les lignes pleines servent à des mesures réelles. De haut en bas : angle de tangage, angle de roulis et angle de lacet.

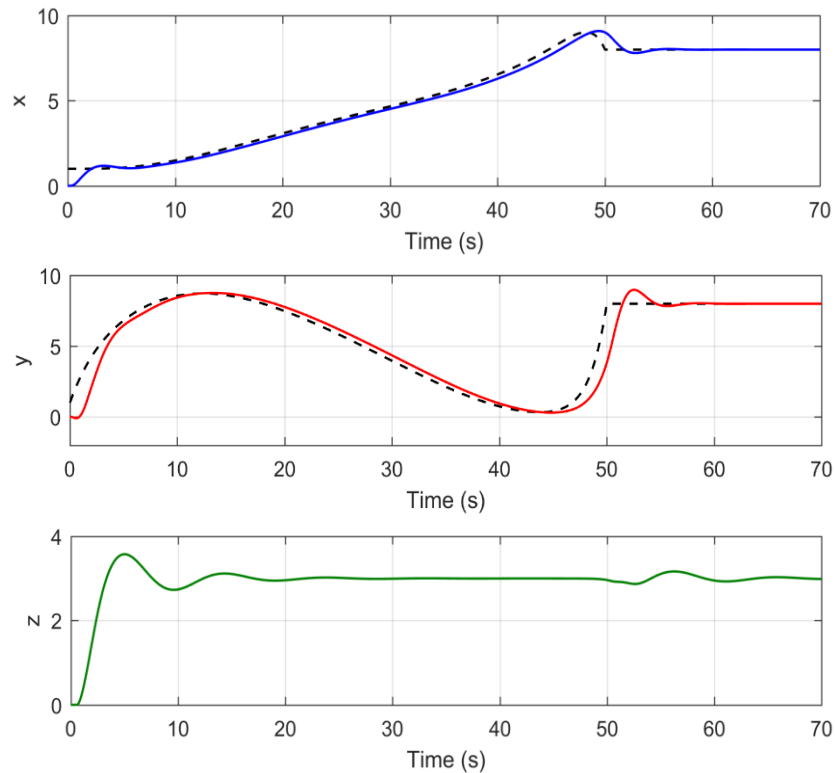


Figure (IV.9) Résultats de la simulation du troisième essai (Méthode B-spline). Les lignes pointillées servent de références ; les lignes pleines servent à des mesures réelles. De haut en bas : position x (en mètre), position y et position z

L'approche de contrôle proposée est composée des boucles de commande de position et d'angle (attitude). Les figures (IV.10) et (IV.11) présentent les résultats de contrôle et le suivi de la trajectoire du Quadrirotor dans les plans x - y et x - y - z , respectivement. Les résultats de simulation confirment la robustesse du contrôleur synergétique pour la méthode de calcul de trajectoire B-spline.

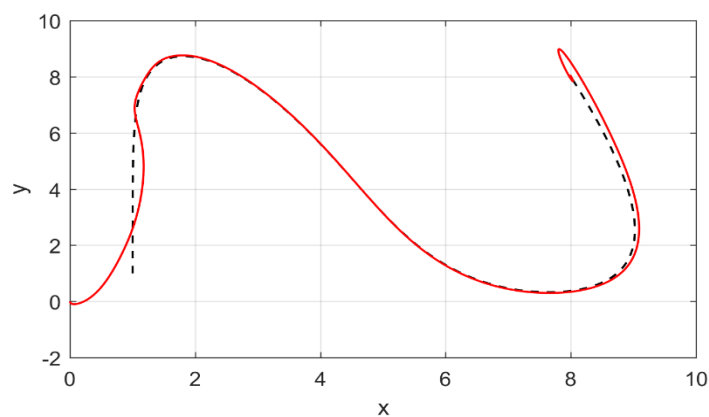


Figure (IV-10) Trajectoire du Quadrirotor dans le plan x - y . Les lignes pointillées correspondent à la trajectoire désirée ; ligne continue représente la trajectoire réelle

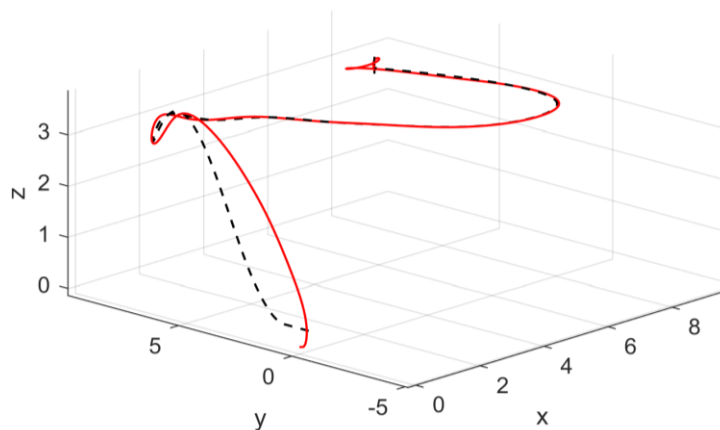


Figure (IV-11) Trajectoire du Quadrirotor dans le plan x - y - z . Les lignes pointillées sont pour le la trajectoire souhaitée ; ligne continue représente la trajectoire réelle

IV.4 Résultats expérimentaux

IV.4.1 Test 1 Stabilisation

Les résultats expérimentaux du premier test sont présentés sur la Figure (IV.12). Une bonne stabilisation d'attitude est obtenue. Encore une fois, le contrôleur synergique a réussi à maintenir la stabilité du système Quadrirotor,

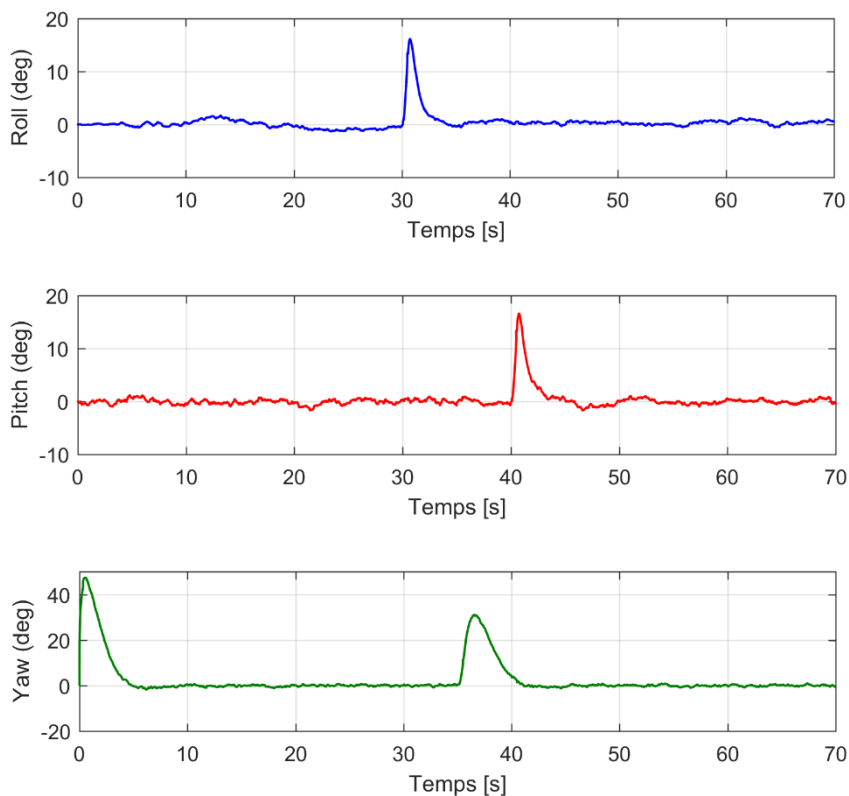


Figure (IV.12) Résultats expérimentaux du test de stabilisation.

IV.4 .2 Test 2 Méthode de Bézier

Les résultats expérimentaux du deuxième test sont présentés sur les Figures (IV.13) et (IV.14). On peut observer que le contrôleur synergétique proposé a réussi à maintenir les angles de roulis et de tangage comme les trajectoires souhaitées fournies par la méthode des courbes de Bézier. L'erreur de suivi est faible et les entrées de commande ne nécessitent pas beaucoup d'efforts pour maintenir le suivi de la trajectoire du Quadrirotor.

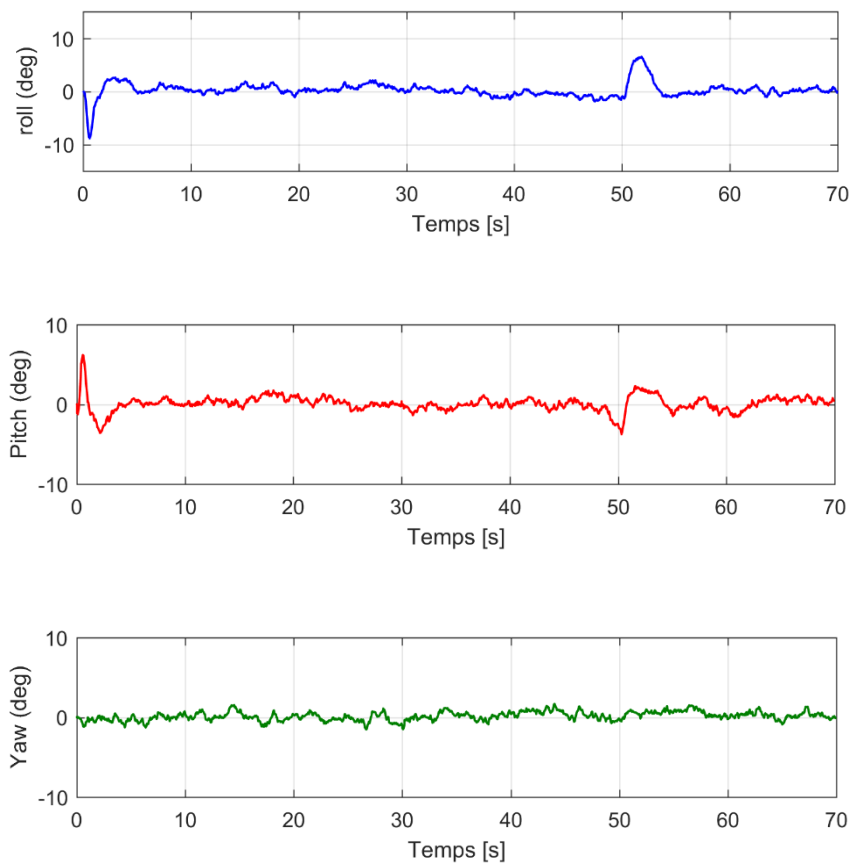


Figure (IV.13) Résultats expérimentaux du deuxième test (méthode de Bézier).
De haut en bas : angle de tangage, angle de roulis et angle de lacet

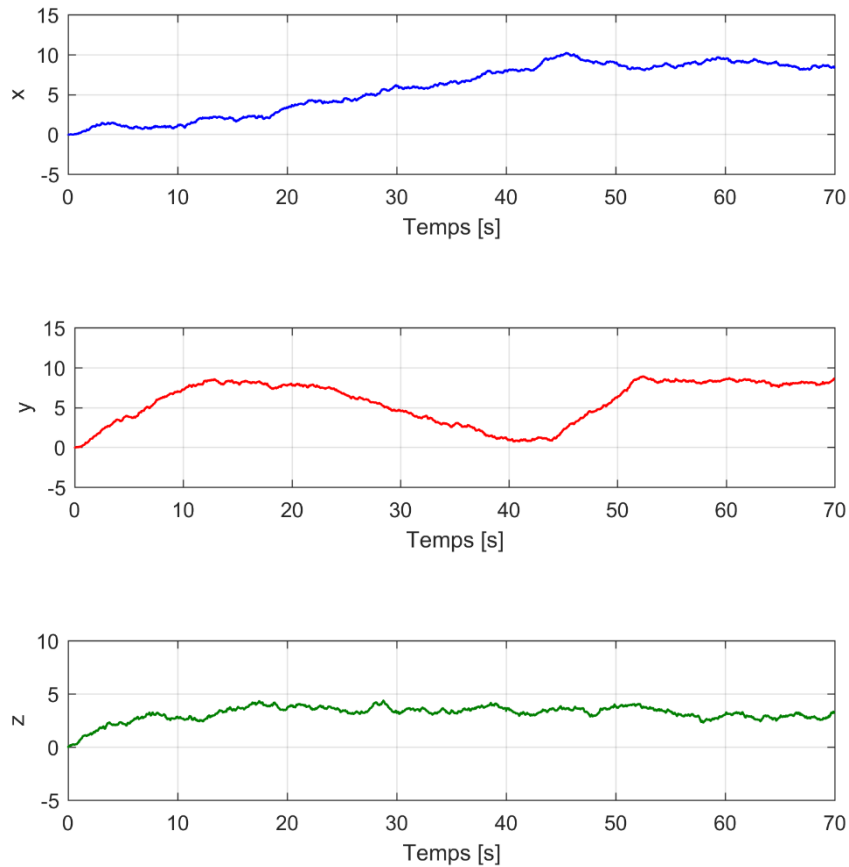


Figure (IV.14) Résultats expérimentaux du deuxième essai (méthode de Bézier).
De haut en bas : position x (en mètre), position y et position z

IV.4.3 Test 3 méthode de B-splines

Les résultats expérimentaux du troisième test sont présentés aux figures (IV.15) et (IV.16). Les résultats obtenus montrent l'efficacité du contrôleur proposé. Les angles du Quadrirotor suivent bien les trajectoires souhaitées données par la méthode B-spline avec des erreurs de poursuites faibles.

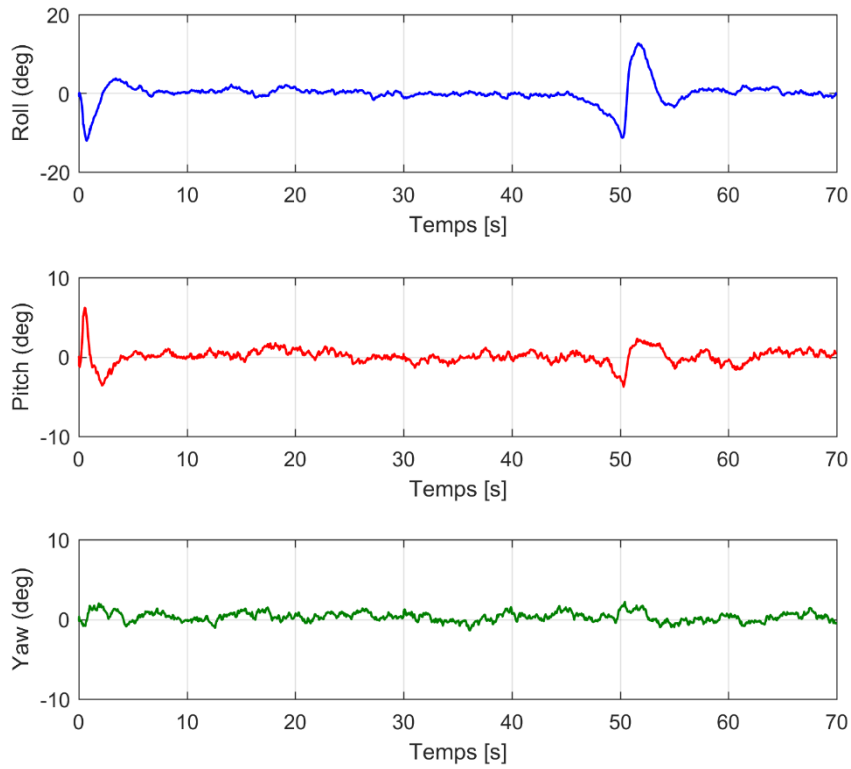


Figure (IV.15) Résultats expérimentaux du deuxième test (méthode de B-spline).
De haut en bas : angle de tangage, angle de roulis et angle de lacet

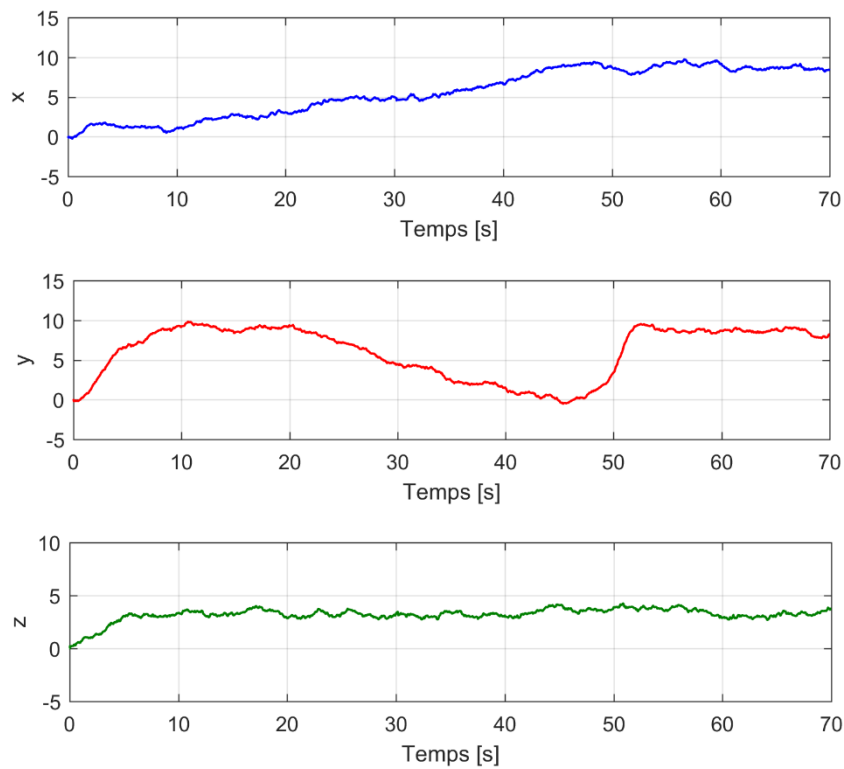


Figure (IV.16) Résultats expérimentaux du deuxième essai (méthode de Bspline).
De haut en bas : position x (en mètre), position y et position z

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a exposé les résultats de tests effectués afin valider les approches proposées pour la réalisation d'un contrôleur de vol automatique (sans aide humaine au pilotage) de système robotique.

Ces résultats ont mis en évidence la fiabilité de l'approche faite pour la génération de trajectoire par des méthodes paramétriques tel que les courbes de Bézier et conforté par une comparaison avec les courbes B-spline.

En premier lieu, des résultats de simulations probants ont permis la validation numériquement de ces méthodes de génération de trajectoire et aussi de vérifier la fiabilité de la loi de commande proposée avant les tests sur banc expérimental.

Les résultats de simulation sont validés expérimentalement à l'aide d'un banc d'essai Quadrirotor. Les données expérimentales montrent clairement les performances du contrôleur synergétique synthétisé pour le contrôle d'attitude du Quadrirotor. Des tests ont clairement démontré la stabilité des méthodes et lois de commandes mis en œuvre.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans cette thèse, le problème de l'application des commandes robustes aux systèmes robotiques mobiles terrestres et volants sans pilote a été abordé.

L'idée première est de travailler sur la commande robuste des systèmes robotiques, la forte dépendance entre le contrôle et la planification nous a mené à considérer le domaine de la navigation et de la génération de trajectoire afin d'assurer une autonomie des systèmes considérés.

Notre étude a porté sur deux systèmes robotiques qui sont les robots mobiles à roues et les UAV de type quadrirotor.

La première partie de l'étude porte sur commande des robots mobiles où, on a mis en œuvre des méthodes de détection de cible basées sur les algorithmes génétiques. Ces cibles ou objets colorés sont placées dans l'environnement du robot et peuvent être considéré comme des balises permettant au robot de se localiser dans cet environnement.

Une technique de contrôle backstepping adaptatif a été utilisé afin que le robot mobile assure la navigation autonome, la détection, et la poursuite de cibles dans son environnement. L'avantage le plus remarquable de cette stratégie de contrôle est sa robustesse contre les perturbations externes.

Des essais expérimentaux ont été effectués avec un robot mobile à roues équipé de capteurs à ultrasons et d'une caméra. Ces tests ont permis d'obtenir des résultats très satisfaisants appuyant nos choix de la technique de détection et de localisation.

L'étape suivante a consisté à tester le contrôleur adaptatif backstepping proposé en simulation à l'aide de Matlab/ Simulink®, où les résultats obtenus étaient satisfaisants.

Dans la deuxième partie de l'étude, nous avons développé et mis en œuvre la commande synergétique robuste afin de guider et de contrôler d'un Quadrirotor dans un environnement complexe.

La planification et la génération de la trajectoire optimale douce de vol du Quadrirotor a été développé en introduisant les techniques de tracer des courbes de Bézier. Ces techniques utilisent des points de contrôle générés automatiquement lors de la détection d'obstacle afin d'éviter tout risque de collision.

De plus, une méthode de calcul des trajectoires basé sur les courbes B-splines est introduite afin de comparer les performances stratégiques proposées.

Le contrôleur synergétique est synthétisé et la stabilité de la méthode proposée est établie pour le contrôle du Quadrirotor.

Des tests expérimentaux en temps réel pour la validation des techniques choisies ont été réalisés sur un banc d'essais avec un Quadrirotor.

Ces essais ont permis de conforter les résultats théoriques de simulation. Elles ont permis d'établir la robustesse de cette loi de contrôle aux perturbations externes et d'établir formellement sa stabilité asymptotique ainsi que sa grande capacité à suivre les trajectoires générées.

Ce contrôleur synergétique proposé a montré sa capacité à stabiliser les dynamiques non linéaires en boucle fermée du Quadrirotor et de conclure sur sa grande efficacité et robustesse. Cette approche constitue la contribution originale majeure de nos travaux de recherche.

Comme perspectives futures pour des travaux de recherche dans le domaine :

- Génération et/ou correction des trajectoires avec des amers dont les positions sont aléatoires par exemple des obstacles inattendus (amers dynamique).
- Avec le développement des systèmes de contrôle embarqués dans les UAVs et le robot mobiles dont les capacités de calculs et de mémoires (DSP, DSPIC,....etc) importantes et considérables permettent l'implémentation en temps réel des techniques intelligences artificielles (neuro floue, ANFIS, techniques évolutionnaires (OEP) ...) pour la détection et la commande intelligente de tels système.
- Application des techniques hybrides de commande synthétique et d'intelligence artificielle comme outil d'optimisation et évitement des obstacles.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] Scherer S, Singh S, Chamberlain L, Elgersma M Flying fast and low among obstacles: methodology and experiments. *Int J Robot Res* 27(5):549 (2008).
- [2] Sabetghadam B, Cunha R, Pascoal A Real-time trajectory generation for multiple drones using bézier curves (2020).
- [3] Chen X, Xue W, Qiu H, Ye H A moving target tracking control and obstacle avoidance of quadrotor uav based on sliding mode control using artificial potential field and rbf neural networks, 2020 39th Chinese Control Conference (CCC) (2020).
- [4] Cai Z, Lou J, Zhao J, Wu K, Liu N, Wang YX Quadrotor trajectory tracking and obstacle avoidance by chaotic grey wolf optimization-based active disturbance rejection control. *Mech Syst Signal Process* 128:636 (2019).
- [5] Zheng L, Yang R, Pan J, Cheng H, Hu H Safe online learning tracking control for quadrotors under wind disturbances, arXiv:2009.01992 (2020).
- [6] HuangY, LiuW, Li B, YangY, XiaoB Finite-time formation tracking control with collision avoidance for quadrotor UAVs. *J Frankl Inst* 357(7):4034 (2020).
- [7] Zhang N, Gai W, Zhong M, Zhang J A fast finite-time convergent guidance law with nonlinear disturbance observer for unmanned aerial vehicles collision avoidance. *Aerosp Sci Technol* 86:204 (2019).
- [8] Russel, S., Norwig, P.: *Artificial Intelligence*. Prentice Hall, Upper Saddle River (2003)
- [9] Kumar, V., Zefran, M., Ostrowski, J.: Motion planning and control of robots. In: Nof, S. (ed.) *Handbook of Industrial Robotics*, pp. 295–315. New York, Wiley (1999)
- [10] Kim, J.M., Chung, M.J.: SLAM with omnidirectional stereo vision sensor. In: *Proceedings of 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 442–447, Las Vegas (2003)
- [11] Adams, M.D.: *Sensor Modeling Design and Data Processing for Automation Navigation*. World Scientific, Singapore (1999)

- [12] Davis, E.R.: *Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities*. Morgan Kaufmann, San Francisco (2005)
- [13] Tzafestas, S.G.: *Introduction to Mobile Robot Control*. Elsevier, Inc., New York (2004)
- [14] Jaulin, L.: *Mobile Robotics*. ISTE Press-Elsevier, New York (2017)
- [15] Garrido, S., Moreno, L., Blanco, D., Jurewicz, P.: Path planning for mobile robot navigation using Voronoi diagram and fast marching. *Int. J. Robot. Autom.* **2**(1), 42–64 (2011)
- [16] David, J., Manivanan, P.V.: *Control of Truck-Trailer Mobile Robots: a Survey*. Intelligent Service Robotics. Springer, Berlin, (Online) (2014)
- [17] Marino, R., Tomei, P.: *Nonlinear Control Design: Geometric, Adaptive and Robust*. Prentice Hall, Upper River (1995)
- [18] Marino, R.: Adaptive control of nonlinear systems: basic results and applications. *IFAC-Rev. Control* **21**, 55–66 (1997)
- [19] Zadeh, L.A.: Fuzzy sets. *Inf. Control* **8**, 338–353 (1965)
- [20] Tzafestas, S.G. (ed.): *Soft Computing and Control Technology*. World Scientific Publishers, Singapore/London (1997)
- [21] Das, T., Narayan, K.I.: Design and implementation of a adaptive fuzzy logic-based controller for wheeled mobile robots. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* **14**(3), 501–510 (2006)
- [22] Castillo, O., Aguilar, L.T., Cardenas, S.: Fuzzy logic tracking control for unicycle mobile robots. *Eng. Lett.* **13**(2), EL.13-2-4:73-77 (2006)
- [23] Driesen, B.J., Feddema, J.T., Kwok, K.S.: Decentralized fuzzy control of multiple nonholonomic vehicles. *J. Intell. Robot. Syst.* **26**, 65–78 (1999)
- [24] Stotine, J.J., Li, W.: *Applied Nonlinear Control*. Prentice Hall, Engewood Cliffs (1991)
- [25] Zhang, Y., Hong, D., Chung, J.H., Velinsky, S.: Dynamic model-based robust tracking control of differentially steered wheeled mobile robot. In: *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 850–855, Philadelphia (1988)
- [26] Yang, J.M., Kim, J.K.: Sliding mode control for trajectory tracking of nonholonomic wheeled mobile robots. *IEEE Trans. Robot. Autom.* **15**(3), 578–587 (1999)
- [27] Haralik, R.M., Shapiro, L.G.: *Computer and Robot Vision*. Addison Wesley, Reading (1993)
- [28] Corke, P.: Visual control of robot manipulators: a review. In: Hashimoto, K. (ed.) *Visual Servicing*, pp. 1–31. Word Scientific, Singapore (1993)

- [29] Cherubini, A., Chaumette, F., Oriolo, G.: A position-based visual servoing scheme for following paths with nonholonomic robots. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2008), pp. 1648–1654, Nice (2008)
- [30] Burshka, D., Hager, G.: Vision-based control of mobile robots. In: Proceedings of 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1707–1713, Seoul (2001)
- [31] Kong, Z., Korukanti, V., Mettler B.: Mapping 3D guidance performance using approximate optimal cost-to-go function. In: AIAA Navigation, Guidance and Control Conference, Chicago, IL (2009)
- [32] Zhang, Y., Chen, J., and Shen, L. Hybrid hierarchical trajectory planning for a fixed-wing UCAV performing air-to-surface multi-target attack. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 23(4):536–552. (2012).
- [33] Fügenschuh, A. and Müllenstedt, D. Flight Planning for Unmanned Aerial Vehicles. Technical Report AMOS #34(2015), Helmut Schmidt University / University of the Federal Armed Forces Hamburg. (2015).
- [34] Forsmo, E. J.. Optimal Path Planning for Unmanned Aerial Systems. Msc. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway (2012).
- [35] G. Veselov, A. Sklyrov, A. Mushenko, S. Sklyrov “Synergetic Control of a Mobile Robot Group”, (2014) Second International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation
- [36] abbadi M, Cherkaoui M Robust adaptive backstepping fast terminal sliding mode controller for uncertain quadrotor UAV. *Aerosp Sci Technol* 93:105306 (2019)
- [37] Muliadi J, Kusumoputro B Neural network control system of UAV altitude dynamics and its comparison with the PID control system. *J Adv Transp* 3823201(2018)
- [38] Koch W, Mancuso R, West R, Bestavros A Reinforcement learning for UAV attitude control. *ACM Trans Cyber-Phys Syst* 3(2):1–21(2019)
- [39] Guanglei M, Haibing P. The application of ultrasonic sensor in the obstacle avoidance of quadrotor UAV. In: Proceedings of 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference; 12–14 August 2016; Nanjing. China: pp. 976-981
- [40] Zhao J, Li Y, Hu D, Pei Z. Design on altitude control system of quad rotor based on laser radar. In: 2016 IEEE/CSAA International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS); 10–12 October 2016; Beijing: China; pp. 105-109 (2016).

- [41] Ali Q, Montenegro S. "Explicit model following distributed control scheme for formation flying of mini UAVs". *IEEE Access.*;4:397-406 (2016)
- [42] L. Marce, M Juliere et H. Place, "Stratégie de contournement d'obstacles pour un robot mobile," *Rairo*, vol. 15, no. 1, (1981).
- [43] C. Canudas de Wit, B. Siciliano and G. Bastin *Theory of Robot Control*, Springer-verlag, London. (1998).
- [44] D. NGANGA-KOUYA ; M. SAAD, L. LAMARCHE C. KHAIRALLAH., "Backstepping Adaptive Position Control for Robotic Manipulators", *Proc. of the American Control Conference*, vol 1, pp 636-640, (2001).
- [45] Sontag, E.D., Sussman, H.J., Further comments on the stabilizability of the angular velocity of a rigid body, *Systems and Control letters* vol.12, p 437-442 (1988)
- [46] Sussman, H.J., Kokotović, P., the peaking phenomenon and the global stabilization of nonlinear systems *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol 39 p. 424-440 (1991)
- [47] F. Srairi, L. Saidi, F. Djeflal, and M. Meguellati, "Modeling, Control and Optimization of a New Swimming Microrobot Design," *Engineering Letters*, vol. 24, pp. 106-112, (2016).
- [48] C. P. Tang, P. T. Miller, V. N. Krovi, J. C. Ryu, and S. K. Agrawal, "Differential-flatness-based planning and control of a wheeled mobile manipulator—Theory and experiment.," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 16, pp. 768-773, (2010).
- [49] E. Masehian and N. Amin, "Mobile robot online motion planning using generalized Voronoi graphs," *Journal of Industrial Engineering*, vol. 5, pp. 1-15, (2010).
- [50] H. Ghazouani, "Shape and Color Object Tracking for Real-Time Robotic Navigation," *arXiv:1410.3970v1* (2014).
- [51] F. Srairi, L. Saidi, A. Hassam, Modeling Control and Optimization of a New Swimming Microrobot Using Flatness-Fuzzy-Based Approach for Medical Applications, *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 43, pp 3249–3258, (2018).
- [52] F. Srairi, L. Saidi, F. Djeflal, and M. Meguellati, Modeling, Control and Optimization of a New Swimming Microrobot Design, *Engineering Letters*, vol. 24, no.1, pp106-112, (2016).
- [53] Y. Messai, K. Chara, F. Srairi, F. Douak Realization of Object Tracking System for Color Object Detection Using Genetic Algorithm Optimization *Proc. of IEEE 2020 the 2nd International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering (ICECCE), Istanbul, Turkey April 2020.*

- [54] Goerzen C, Kong Z, Mettler B A survey of motion planning algorithms from the perspective of autonomous UAV guidance. *J Intell Robot Syst* 57(1–4):65 (2010).
- [55] Mokhtari K, Elhadri A, Abdelaziz M A passivity-based simple adaptive synergetic control for a class of nonlinear systems. *Int J Adapt Control Signal Process* 33(9):1359 (2019).
- [56] Liu CH, HsiaoMY A finite time synergetic control scheme for robot manipulators. *Comput Math Appl* 64(5):1163 (2012).
- [57] Al-Hussein ABA, Tahir FR, Pham VT Fixed-time synergetic control for chaos suppression in endocrine glucose-insulin regulatory system. *Control Eng Pract* 108:104723 (2021).
- [58] Boonyaprapasorn A, Choopojcharoen T, Pengwang E, Natsupakpong S, Maneewarn T, Sa-Ngiamsunthorn P, Thung-od K The design of a synergetic controller for tuberculosis epidemic system. *Int J Mech Eng Robot Res* 9:1439–1446 (2020).
- [59] Zerroug N, Harmas MN, Benaggoune S, Bouchama Z, Zehar K DSP-based implementation of fast terminal synergetic control for a DC-DC Buck converter. *J Frankl Inst* 355(5):2329 (2018).
- [60] Lu S, Tian C, Yan P Adaptive extended state observerbased synergetic control for a long-stroke compliant microstage with stress stiffening. *IEEE/ASME Trans Mechatron* 25(1):259. (2020)
- [61] Cao N, Lynch AF Inner-outer loop control for quadrotor UAVs with input and state constraints. *IEEE Trans Control Syst Technol* 24(5):1797 (2015)
- [62] Carrillo LRG, López AED, Lozano R, Pégard C Quad rotorcraft control: vision-based hovering and navigation. Springer, Berlin (2012).
- [63] Kolesnikov, A. A, Modern Applied control Theory: Synergetic Approach in Control Theory, TRTU, Moscow-Taganrog, (2000).
- [64] Nusawardhana, Zak, S. H, Crossley, W. A., “Nonlinear Synergetic Optimal Controllers,” *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 30, No. 4:1134-1147, July-August(2007).
- [65] Sklyarov, A. A., Veselov, G. E., Sklyarov, S. A. et Pohilina, T. E. Synthesis of the synergetic control law of the transport robotic platform. In *2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS)*, pages 285–288. IEEE (2017).
- [66] Nusawardhana, Zak, S. et Crossley, W. Discrete-time synergetic optimal control of nonlinear systems. *Journal of guidance, control, and dynamics*, 31(6):1561–1574 (2008).
- [67] Kolesnikov AA Introduction of synergetic control. In: 2014 American control conference (IEEE) (2014).

- [68] Ettouil, R., Chabir, K. et Abdelkrim, M. N.. Synergetic fault-tolerant control for pitch control of wind turbine system. *Electrical Engineering*, 100(4):2527–2535 (2018).
- [69] Slotine, J., and Li, W., *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, (1991).
- [70] k. Chara., Y. Abdessemed., F. Srairi. *et al.* A robust synergetic controller for Quadrotor obstacle avoidance using Bézier curve versus B-spline trajectory generation. *Intelligent Service Robotics* **15**, 143–152 (2022).
- [71] Fraichard T, Scheuer A From Reeds and Shepp’s to continuous-curvature paths. *IEEE Trans Robot* 20(6):1025 (2004)
- [72] Vinokursky DL, Mezentceva OS, Samoylov PV. Trajectory planning of uav group: Pythagorean hodograph and Bernstein–Bezier composite curves in the plane (2020).
- [73] Jung D, Tsiotras P On-line path generation for unmanned aerial vehicles using b-spline path templates. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)* (2013).
- [74] Piegl LA, Rajab K, Smarodzinava V, Valavanis KP Using a biarc filter to compute curvature extremes of NURBS curves. *Eng Comput* 25(4):379 (2009)