



# Modélisation et commande d'un robot biomimétique volant

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Hala Rifai

**gipsa-lab**, Département d'Automatique  
Grenoble-FRANCE



Jury de thèse

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Président  
Rapporteurs

Examineur  
Directeur de thèse  
Co-directeurs de thèse

M. Tarek HAMEL  
M. Pascal MORIN  
M. Frédéric BOYER  
M. Stéphane VIOLLET  
M. Mazen ALAMIR  
M. Nicolas MARCHAND  
Mme. Guylaine POULIN

Professeur à l'université de Nice-Sophia-Antipolis, I3S  
Chargé de recherche INRIA, Sophia-Antipolis  
Professeur à l'école des Mines de Nantes, IRCCyN  
Chargé de recherche CNRS, ISM  
Directeur de recherche CNRS, **gipsa-lab**  
Chargé de recherche CNRS, **gipsa-lab**  
Chargé de recherche CNRS, Unité Imagerie et Cerveau





# SOMMAIRE

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## 1 Introduction

- Projets sur les drones à ailes battantes
- Contexte du travail: Projet OVMI
- Avantages - Inconvénients du vol battu
- Bilan de littérature et des contributions

## 2 Modèle simple pour la commande

- Paramétrisation du mouvement des ailes
- Modèle simplifié du drone à ailes battantes
- Calcul du modèle moyen

## 3 Commande du drone à ailes battantes

- Commande de l'attitude
- Commande de la position

## 4 Tests de robustesse

## 5 Contributions et Perspectives



# Sommaire

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## 1 Introduction

- Projets sur les drones à ailes battantes
- Contexte du travail: Projet OVMI
- Avantages - Inconvénients du vol battu
- Bilan de littérature et des contributions

## 2 Modèle simple pour la commande

- Paramétrisation du mouvement des ailes
- Modèle simplifié du drone à ailes battantes
- Calcul du modèle moyen

## 3 Commande du drone à ailes battantes

- Commande de l'attitude
- Commande de la position

## 4 Tests de robustesse

## 5 Contributions et Perspectives

# Projets sur les drones à ailes battantes

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

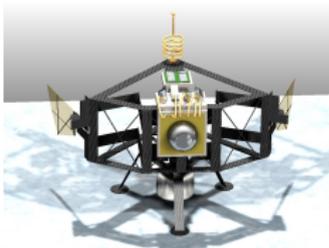
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



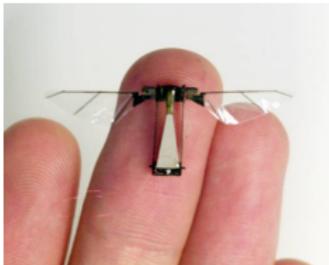
MFI  
Université de Berkeley -  
USA (1998)



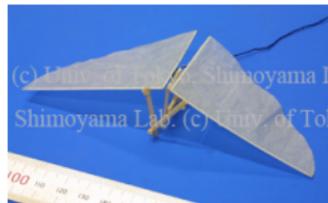
Delfly  
Université de Delft -  
Pays Bas (2005)



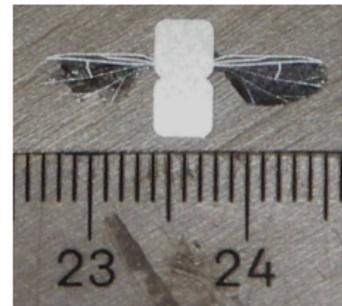
Remanta  
ONERA - France  
(2002-2006)



Microrobotic Fly  
Université d'Harvard-  
USA (2005)



BTO  
Université de Tokyo -  
Japon



OVMI  
ANR - France  
(2006-2008)



# Partenaires du project

## Projet OVMI: Objet Volant Mimant l'Insecte

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai



### ANR Jeune Chercheur

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Partenaires du project

## Projet OVMI: Objet Volant Mimant l'Insecte

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai



Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

### ANR Jeune Chercheur

**gipsa-lab** (Grenoble)

Modélisation et commande

**ONERA** (Palaiseau)

Mécanique des fluides

**IEMN** (Valenciennes, Lille)

Étude microélectronique

**SATIE** (Cachan)

Énergie



# Avantages - Inconvénients du vol battu

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

## Avantages:

- Grande manœuvrabilité

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVM1

**Avantages**  
**Inconvénients**  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Avantages - Inconvénients du vol battu

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

## Avantages:

- Grande manœuvrabilité
- Faible consommation d'énergie

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Avantages - Inconvénients du vol battu

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVM1

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Avantages:

- Grande manœuvrabilité
- Faible consommation d'énergie
- Décollage et atterrissage verticaux



# Avantages - Inconvénients du vol battu

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

## Avantages:

- Grande manœuvrabilité
- Faible consommation d'énergie
- Décollage et atterrissage verticaux
- Vol stationnaire



# Avantages - Inconvénients du vol battu

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

## Avantages:

- Grande manœuvrabilité
- Faible consommation d'énergie
- Décollage et atterrissage verticaux
- Vol stationnaire
- Faible bruit



# Avantages - Inconvénients du vol battu

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Avantages:

- Grande manœuvrabilité
- Faible consommation d'énergie
- Décollage et atterrissage verticaux
- Vol stationnaire
- Faible bruit
- Discrétion



# Avantages - Inconvénients du vol battu

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Avantages:

- Grande manœuvrabilité
- Faible consommation d'énergie
- Décollage et atterrissage verticaux
- Vol stationnaire
- Faible bruit
- Discrétion

## Inconvénients:

- Complexité du vol naturel



# Avantages - Inconvénients du vol battu

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Avantages:

- Grande manœuvrabilité
- Faible consommation d'énergie
- Décollage et atterrissage verticaux
- Vol stationnaire
- Faible bruit
- Discrétion

## Inconvénients:

- Complexité du vol naturel
- Limitations de reproduction technologique



# Bilan de littérature et des contributions

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

## Modélisation:

- Approche complexe (Navier-Stokes)

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients

**Bilan**

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude

Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Bilan de littérature et des contributions

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

## Modélisation:

- Approche complexe (Navier-Stokes)
- Approche simple (simple représentation des efforts aérodynamiques)

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients

**Bilan**

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude

Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Bilan de littérature et des contributions

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients

**Bilan**

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude

Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

Modélisation:

- Approche complexe (Navier-Stokes)
- Approche simple (simple représentation des efforts aérodynamiques)

Commande:

- Commande linéaire (stabilité locale)



# Bilan de littérature et des contributions

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients

**Bilan**

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude

Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

## Modélisation:

- Approche complexe (Navier-Stokes)
- Approche simple (simple représentation des efforts aérodynamiques)

## Commande:

- Commande linéaire (stabilité locale)
- Commande par backstepping (réduite à certains axes)

# Bilan de littérature et des contributions

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients

Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude

Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

## Modélisation:

- Approche complexe (Navier-Stokes)
- Approche simple (simple représentation des efforts aérodynamiques)

## Commande:

- Commande linéaire (stabilité locale)
- Commande par backstepping (réduite à certains axes)
- Évitement d'obstacles (procédures par flux optique)



# Bilan de littérature et des contributions

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients

Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude

Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

## Modélisation:

- Approche complexe (Navier-Stokes)
- Approche simple (simple représentation des efforts aérodynamiques)

## Commande:

- Commande linéaire (stabilité locale)
- Commande par backstepping (réduite à certains axes)
- Évitement d'obstacles (procédures par flux optique)

## Contributions:

- Modèle très simple pour la commande



# Bilan de littérature et des contributions

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients

Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude

Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

## Modélisation:

- Approche complexe (Navier-Stokes)
- Approche simple (simple représentation des efforts aérodynamiques)

## Commande:

- Commande linéaire (stabilité locale)
- Commande par backstepping (réduite à certains axes)
- Évitement d'obstacles (procédures par flux optique)

## Contributions:

- Modèle très simple pour la commande
- Commandes bornées à faible coût de calcul



# Bilan de littérature et des contributions

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients

Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude

Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

## Modélisation:

- Approche complexe (Navier-Stokes)
- Approche simple (simple représentation des efforts aérodynamiques)

## Commande:

- Commande linéaire (stabilité locale)
- Commande par backstepping (réduite à certains axes)
- Évitement d'obstacles (procédures par flux optique)

## Contributions:

- Modèle très simple pour la commande
- Commandes bornées à faible coût de calcul
- Stabilité globale du système



# Sommaire

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## 1 Introduction

- Projets sur les drones à ailes battantes
- Contexte du travail: Projet OVMI
- Avantages - Inconvénients du vol battu
- Bilan de littérature et des contributions

## 2 Modèle simple pour la commande

- Paramétrisation du mouvement des ailes
- Modèle simplifié du drone à ailes battantes
- Calcul du modèle moyen

## 3 Commande du drone à ailes battantes

- Commande de l'attitude
- Commande de la position

## 4 Tests de robustesse

## 5 Contributions et Perspectives

# Degrés de liberté d'une aile battante

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

- Projets ailes battantes
- Projet OVMI
- Avantages
- Inconvénients
- Bilan

Modélisation

- Paramétrisation des ailes
- Modèle simplifié
- Modèle moyen

Commande

- Attitude
- Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Degrés de liberté d'une aile battante

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

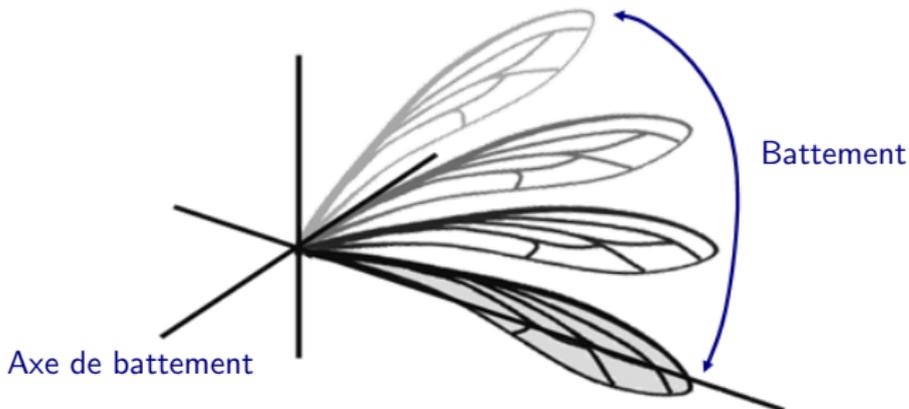
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives





# Degrés de liberté d'une aile battante

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

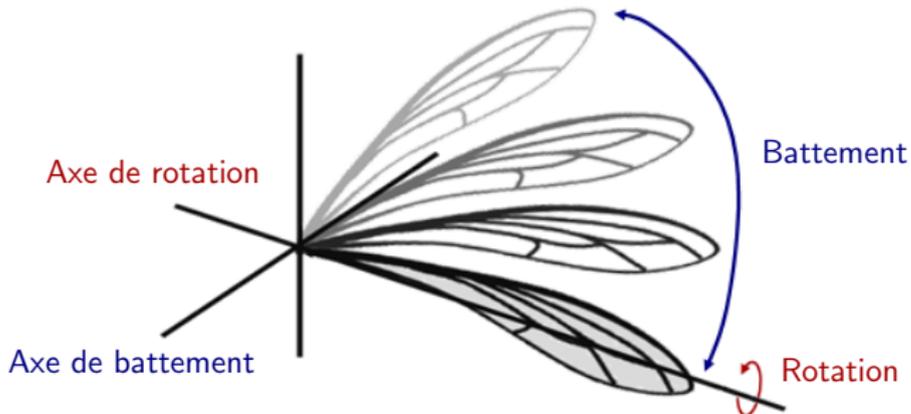
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives





# Degrés de liberté d'une aile battante

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

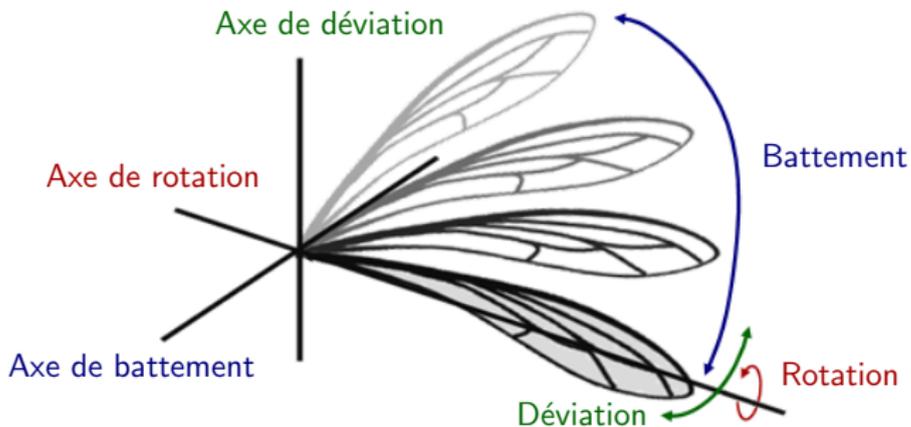
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



# Degrés de liberté d'une aile battante

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

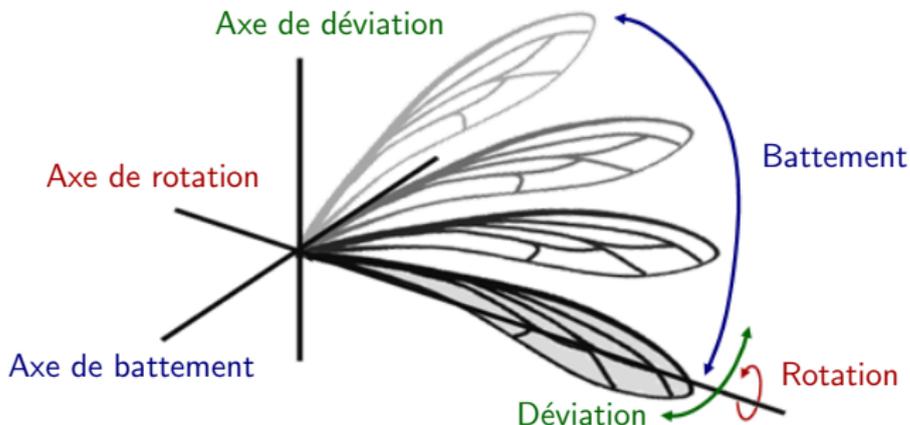
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



Autres phénomènes complexes : – Flexion de l'aile  
– Torsion de l'aile

# Simple paramétrisation du mouvement des ailes

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

- Projets ailes battantes
- Projet OVMI
- Avantages
- Inconvénients
- Bilan

Modélisation

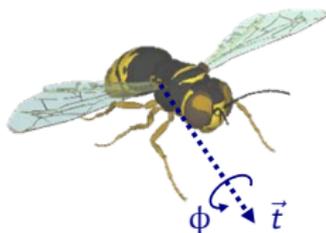
- Paramétrisation des ailes
- Modèle simplifié
- Modèle moyen

Commande

- Attitude
- Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



# Simple paramétrisation du mouvement des ailes

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

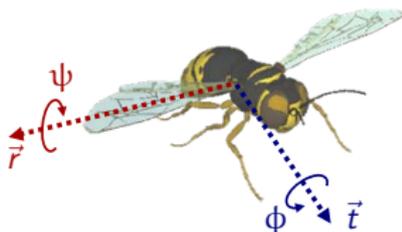
Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives





# Simple paramétrisation du mouvement des ailes

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

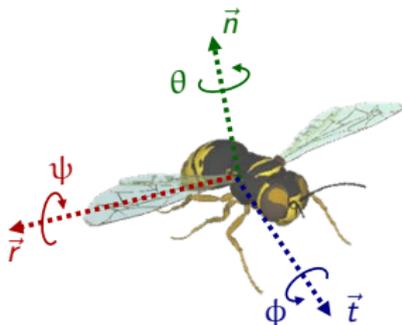
Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives





# Simple paramétrisation du mouvement des ailes

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

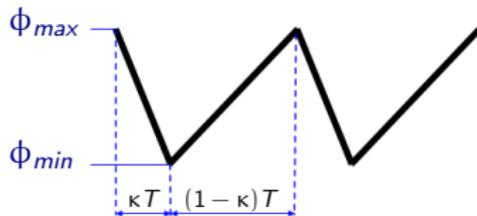
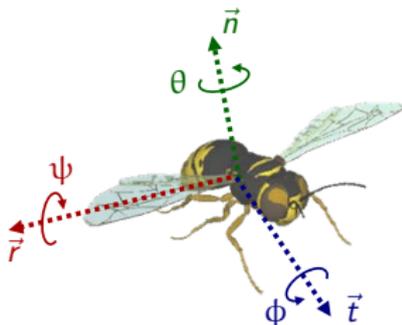
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives





# Simple paramétrisation du mouvement des ailes

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

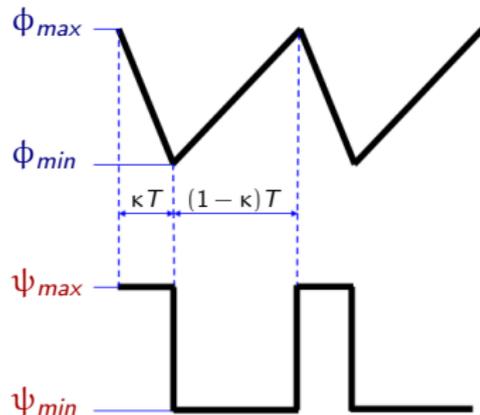
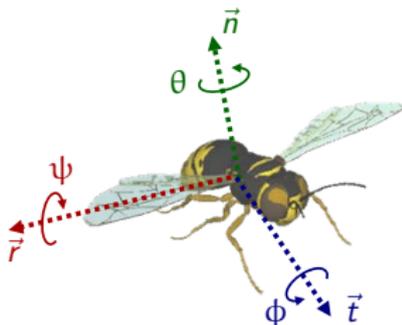
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives





# Simple paramétrisation du mouvement des ailes

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

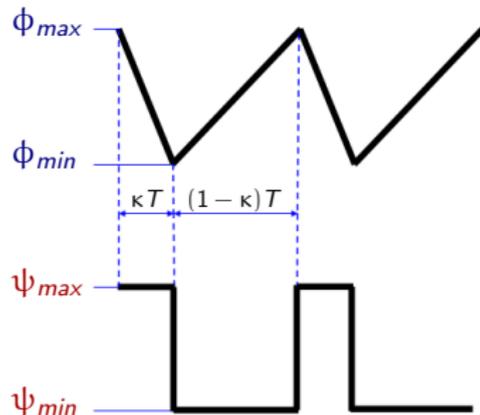
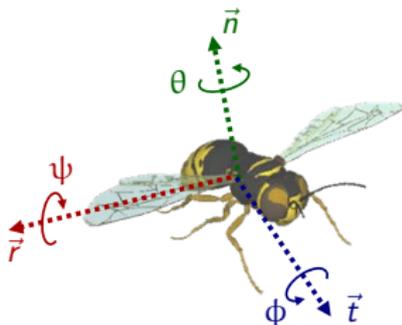
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



$\theta$  NUL



# Simple paramétrisation du mouvement des ailes

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

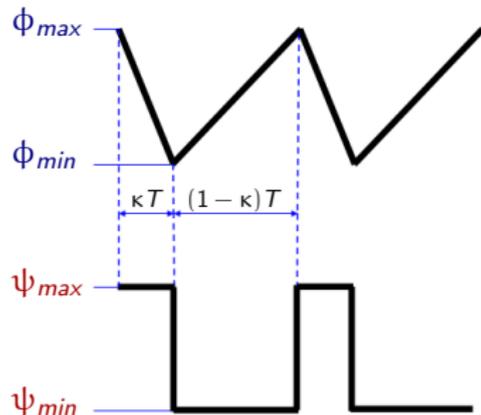
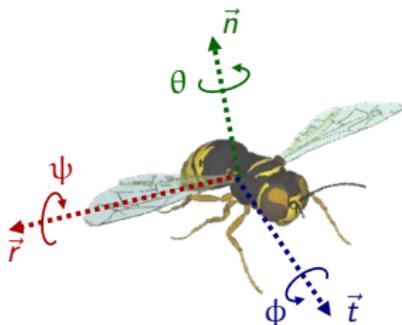
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



$\theta$  NUL



Génération des forces et  
couples aérodynamiques



# Simple paramétrisation du mouvement des ailes

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

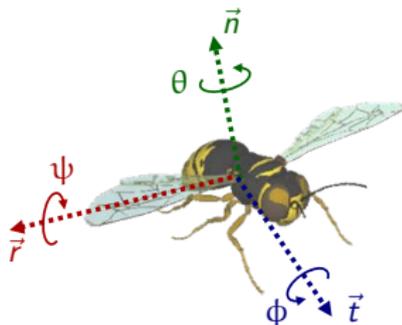
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

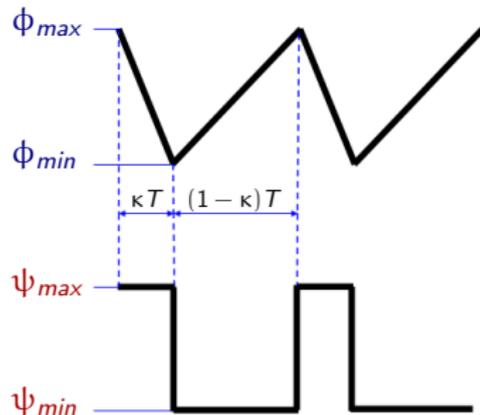
Robustesse

Contributions  
Perspectives



$(\phi, \psi) \rightarrow$  couples de roulis et  
lacet, forces longitudinale et ver-  
ticale

$\theta = 0 \rightarrow$  couple de tangage généré  
par une masse interne



$\theta$  NUL



Génération des forces et  
couples aérodynamiques

# Simple paramétrisation du mouvement des ailes

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

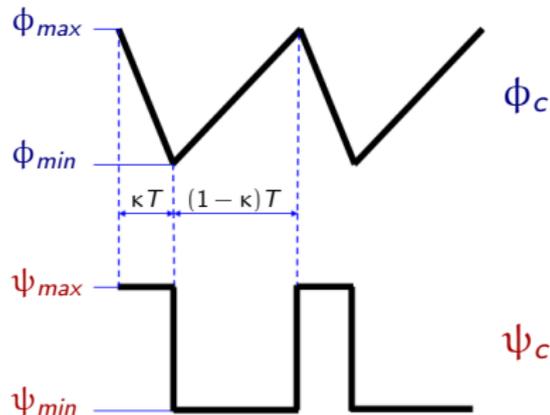
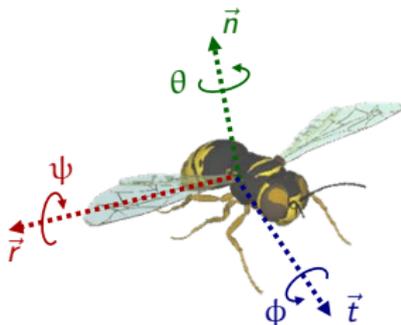
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



$(\phi, \psi) \rightarrow$  couples de roulis et  
lacet, forces longitudinale et ver-  
ticale

$\theta = 0 \rightarrow$  couple de tangage généré  
par une masse interne

$\theta$  NUL



Génération des forces et  
couples aérodynamiques



# Simple paramétrisation du mouvement des ailes

## Transmission par des actionneurs

### Boucle locale d'actionnement:

Actionneur modélisé par un filtre passe-bas

$$\ddot{\phi} = -\lambda_1(\dot{\phi} - \dot{\phi}_c) - \lambda_2(\phi - \phi_c)$$

$$\ddot{\psi} = -\lambda_1(\dot{\psi} - \dot{\psi}_c) - \lambda_2(\psi - \psi_c)$$

$\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont ajustés tel que la constante de temps de l'actionneur soit de  $\tau = 10^{-4}$  (céramique piézoélectrique).

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude

Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

# Simple paramétrisation du mouvement des ailes

## Transmission par des actionneurs

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

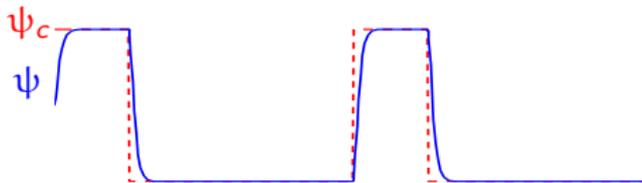
Boucle locale d'actionnement:

Actionneur modélisé par un filtre passe-bas

$$\ddot{\phi} = -\lambda_1(\dot{\phi} - \dot{\phi}_c) - \lambda_2(\phi - \phi_c)$$

$$\ddot{\psi} = -\lambda_1(\dot{\psi} - \dot{\psi}_c) - \lambda_2(\psi - \psi_c)$$

$\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont ajustés tel que la constante de temps de l'actionneur soit de  $\tau = 10^{-4}$  (céramique piézoélectrique).





# Modélisation du drone à ailes battantes

## Composantes des forces aérodynamiques

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

- Force aérodynamique stationnaire (due au battement des ailes)

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

**Modèle simplifié**

Modèle moyen

Commande

Attitude

Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Modélisation du drone à ailes battantes

## Composantes des forces aérodynamiques

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

**Modèle simplifié**

Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

- Force aérodynamique stationnaire (due au battement des ailes)
- Forces aérodynamiques instationnaires (due à la rotation des ailes)



# Modélisation du drone à ailes battantes

## Composantes des forces aérodynamiques

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
**Modèle simplifié**  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

- Force aérodynamique stationnaire (due au battement des ailes)
- Forces aérodynamiques instationnaires (due à la rotation des ailes)
  - De rotation



# Modélisation du drone à ailes battantes

## Composantes des forces aérodynamiques

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

- Force aérodynamique stationnaire (due au battement des ailes)
- Forces aérodynamiques instationnaires (due à la rotation des ailes)
  - De rotation
  - Des masses ajoutées



# Modélisation du drone à ailes battantes

## Composantes des forces aérodynamiques

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

- Force aérodynamique stationnaire (due au battement des ailes)
- Forces aérodynamiques instationnaires (due à la rotation des ailes)
  - De rotation
  - Des masses ajoutées
  - Capture de sillage



# Modélisation du drone à ailes battantes

## Composantes des forces aérodynamiques

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

- Force aérodynamique stationnaire (due au battement des ailes)
- Forces aérodynamiques instationnaires (due à la rotation des ailes)
  - De rotation
  - Des masses ajoutées
  - Capture de sillage
  - Retard au décrochage



# Modélisation du drone à ailes battantes

## Composantes des forces aérodynamiques

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude

Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

- Force aérodynamique stationnaire (due au battement des ailes)
- Forces aérodynamiques instationnaires (due à la rotation des ailes)
  - De rotation
  - Des masses ajoutées
  - Capture de sillage
  - Retard au décrochage
  - . . .



# Modélisation du drone à ailes battantes

## Forces aérodynamiques (stationnaires)

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
**Modèle simplifié**  
Modèle moyen

Commande

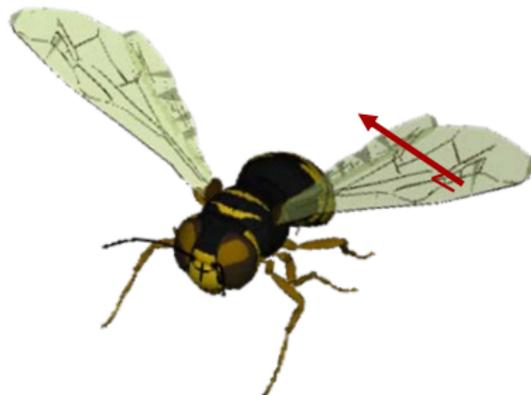
Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

Battement vers le bas





# Modélisation du drone à ailes battantes

## Forces aérodynamiques (stationnaires)

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
**Modèle simplifié**  
Modèle moyen

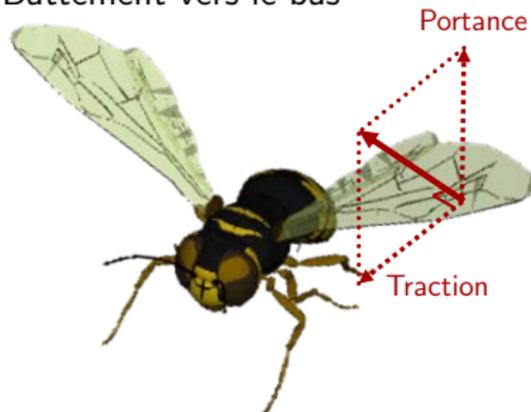
Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Battement vers le bas



# Modélisation du drone à ailes battantes

## Forces aérodynamiques (stationnaires)

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

- Projets ailes battantes
- Projet OVMI
- Avantages
- Inconvénients
- Bilan

Modélisation

- Paramétrisation des ailes
- Modèle simplifié
- Modèle moyen

Commande

- Attitude
- Position

Robustesse

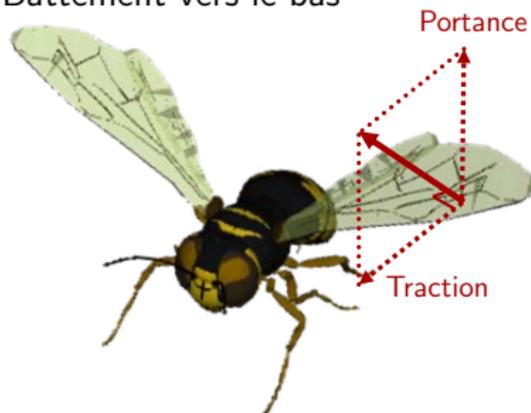
Contributions

Perspectives

Battement vers le haut



Battement vers le bas





# Modélisation du drone à ailes battantes

## Forces aérodynamiques (stationnaires)

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

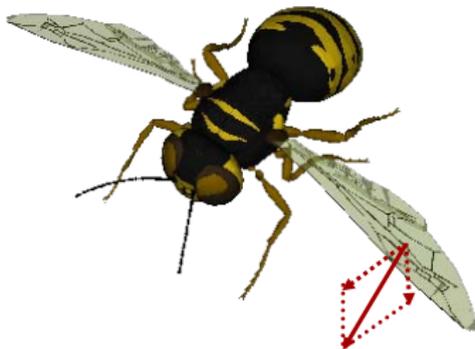
Attitude  
Position

Robustesse

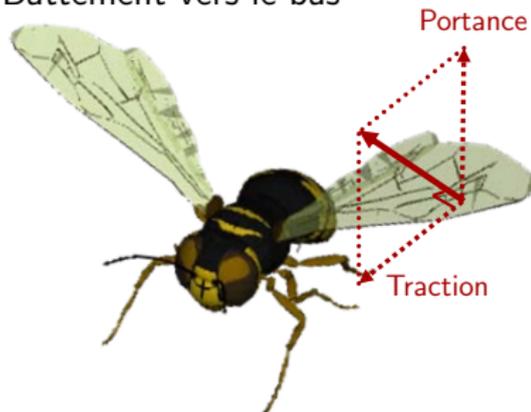
Contributions

Perspectives

Battement vers le haut



Battement vers le bas



# Modélisation du drone à ailes battantes

## Forces aérodynamiques (stationnaires)

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

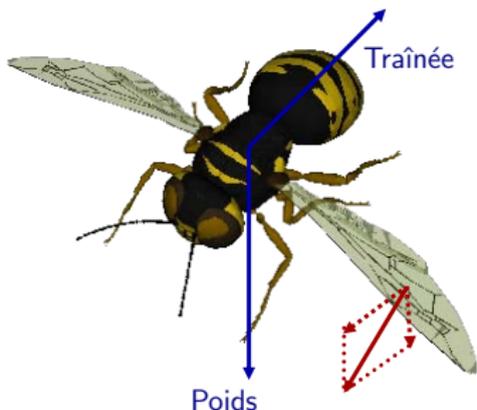
Commande

Attitude  
Position

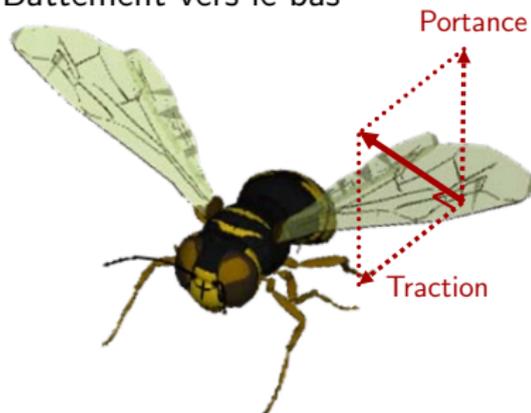
Robustesse

Contributions  
Perspectives

Battement vers le haut



Battement vers le bas





# Modélisation du drone à ailes battantes

## Forces aérodynamiques (stationnaires)

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVM1

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

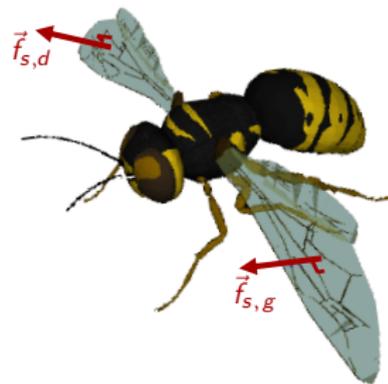
Force aérodynamique stationnaire:

(créée par la pression de l'air sur un profil d'aile)

$$f_s^a = -\frac{1}{2} \rho C S v^a |v^a|$$

- $\rho$  : densité de l'air  
 $S$  : surface de l'aile  
 $v^a$  : vitesse de l'aile dans  $\mathcal{R}^a$   
 $C$  : coefficient aérodynamique

$$(C_{batt.haut} < C_{batt.bas})$$



# Modélisation du drone à ailes battantes

## Forces aérodynamiques (instationnaires)

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

### Force des masses ajoutées:

(créée par l'accélération de la masse de l'air qui entoure  
l'aile)

$$f_{ma}^a = -\frac{\pi}{4} \rho l^2 x L \ddot{\phi}$$

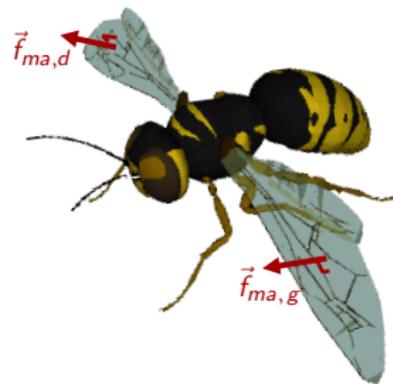
$l$  : corde de l'aile

$L$  : longueur de l'aile

$x$  : abscisse du centre aérodynamique

$\rho$  : densité de l'air

$\ddot{\phi}$  : dérivée seconde de l'angle de battement





# Modélisation du drone à ailes battantes

## Forces aérodynamiques (instationnaires)

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

### Force de rotation:

(créée par la rotation de l'aile)

$$f_r^a = -\frac{\pi}{2} \rho l^2 L v^a \dot{\psi}$$

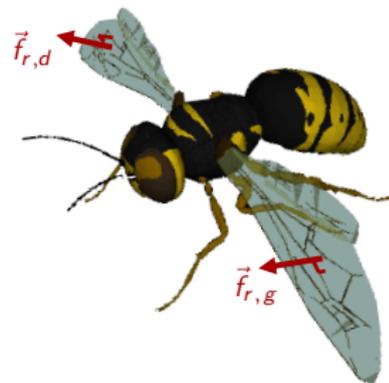
$l$  : corde de l'aile

$L$  : longueur de l'aile

$v^a$  : vitesse de l'aile dans  $\mathcal{R}^a$

$\rho$  : densité de l'air

$\dot{\psi}$  : dérivée de l'angle de rotation



Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



# Modélisation du drone à ailes battantes

## Force/couple aérodynamiques

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

**Modèle simplifié**

Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

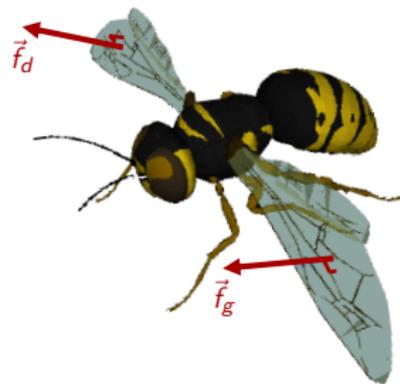
Contributions

Perspectives

- Force aérodynamique totale (dans  $\mathcal{R}^a$ ):  
(perpendiculaire au profil de l'aile)

$$f^a = f_s^a + f_{ma}^a + f_r^a$$

$f^a$  parallèle à  $\vec{n}$





# Modélisation du drone à ailes battantes

## Force/couple aérodynamiques

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude

Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

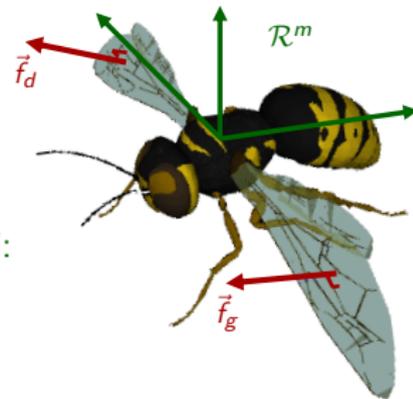
- Force aérodynamique totale (dans  $\mathcal{R}^a$ ):  
(perpendiculaire au profil de l'aile)

$$f^a = f_s^a + f_{ma}^a + f_r^a$$

$$f^a \text{ parallèle à } \vec{n}$$

- Force aérodynamique exprimée dans  $\mathcal{R}^m$ :

$$f^m = f_d^m + f_g^m = R_{ad}^m f_d^{ad} + R_{ag}^m f_g^{ag}$$



# Modélisation du drone à ailes battantes

## Force/couple aérodynamiques

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

- Force aérodynamique totale (dans  $\mathcal{R}^a$ ):  
(perpendiculaire au profil de l'aile)

$$f^a = f_s^a + f_{ma}^a + f_r^a$$

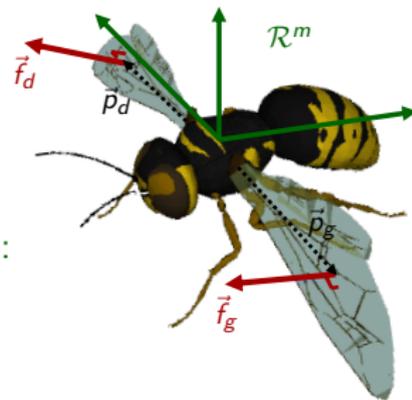
$$f^a \text{ parallèle à } \vec{n}$$

- Force aérodynamique exprimée dans  $\mathcal{R}^m$ :

$$f^m = f_d^m + f_g^m = R_{ad}^m f_d^{ad} + R_{ag}^m f_g^{ag}$$

- Couple aérodynamique dans  $\mathcal{R}^m$ :

$$\tau^m = p_d^m \times f_d^m + p_g^m \times f_g^m$$





# Modélisation du drone à ailes battantes

## Dynamique du corps

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude

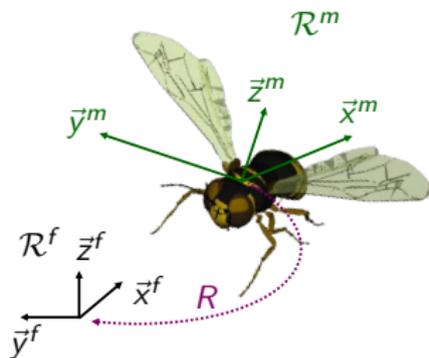
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

$$\begin{aligned}\dot{P}^f &= V^f \\ \dot{V}^f &= \frac{1}{m} R f^m - c V^f - g \\ \begin{pmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_v \end{pmatrix} &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -q_v^T \\ I_3 q_0 - q_v^\times \end{pmatrix} \omega^m \\ \dot{\omega}^m &= J^{-1} (\tau^m - \omega^m \times J \omega^m)\end{aligned}$$



$R$  : Matrice de rotation de  $\mathcal{R}^m$  à  $\mathcal{R}^f$

$\mathcal{R}^f$  : Repère fixe  
 $\mathcal{R}^m$  : Repère mobile



# Modélisation du drone à ailes battantes

## Dynamique du corps

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude

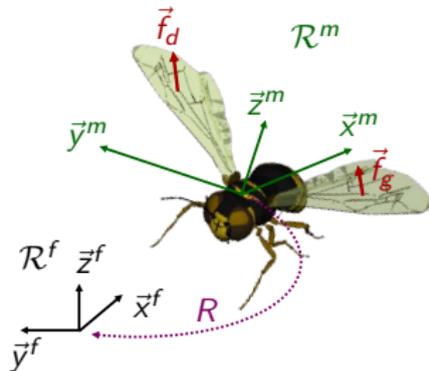
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

$$\begin{aligned}\dot{P}^f &= V^f \\ \dot{V}^f &= \frac{1}{m} R f^m - c V^f - g \\ \begin{pmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_v \end{pmatrix} &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -q_v^T \\ I_3 q_0 - q_v^\times \end{pmatrix} \omega^m \\ \dot{\omega}^m &= J^{-1} (\tau^m - \omega^m \times J \omega^m)\end{aligned}$$



$R$  : Matrice de rotation de  $\mathcal{R}^m$  à  $\mathcal{R}^f$

$f^m, \tau^m$  : Force et couple aérodynamiques dans  $\mathcal{R}^m$

$P^f, V^f$  : Position et vitesse linéaires dans  $\mathcal{R}^f$

$\mathcal{R}^f$  : Repère fixe

$\mathcal{R}^m$  : Repère mobile

$m$  : Masse du corps

$c$  : Coefficient de viscosité

$g$  : Gravité



# Modélisation du drone à ailes battantes

## Dynamique du corps

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

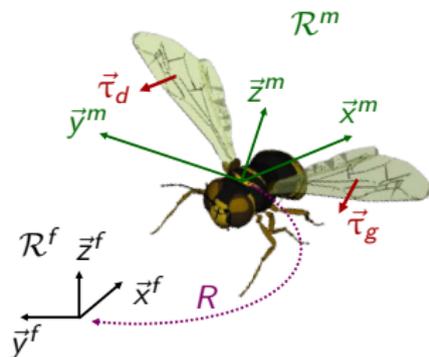
Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

$$\begin{aligned}\dot{P}^f &= V^f \\ \dot{V}^f &= \frac{1}{m} R f^m - c V^f - g \\ \begin{pmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_v \end{pmatrix} &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -q_v^T \\ I_3 q_0 - q_v^\times \end{pmatrix} \omega^m \\ \dot{\omega}^m &= J^{-1} (\tau^m - \omega^m \times J \omega^m)\end{aligned}$$



$R$  : Matrice de rotation de  $\mathcal{R}^m$  à  $\mathcal{R}^f$

$f^m, \tau^m$  : Force et couple aérodynamiques dans  $\mathcal{R}^m$

$P^f, V^f$  : Position et vitesse linéaires dans  $\mathcal{R}^f$

$q = [q_0 \ q_v]^T$  : Quaternion

$q_v^\times$  : Matrice antisymétrique associée à  $q_v$

$\omega^m$  : Vitesse angulaire dans  $\mathcal{R}^m$

$\mathcal{R}^f$  : Repère fixe

$\mathcal{R}^m$  : Repère mobile

$m$  : Masse du corps

$c$  : Coefficient de viscosité

$g$  : Gravité

$I_3$  : Matrice identité

$J$  : Matrice d'inertie



# Modélisation du drone à ailes battantes

## Dynamique du corps

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

$$\dot{P}^f = V^f$$

$$\dot{V}^f = \frac{1}{m} R f^m - c V^f - g$$

$$\begin{pmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_v \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -q_v^T \\ I_3 q_0 - q_v^\times \end{pmatrix} \omega^m$$

$$\dot{\omega}^m = J^{-1} (\underline{\tau}^m - \omega^m \times J \omega^m)$$

$R$  : Matrice de rotation de  $\mathcal{R}^m$  à  $\mathcal{R}^f$

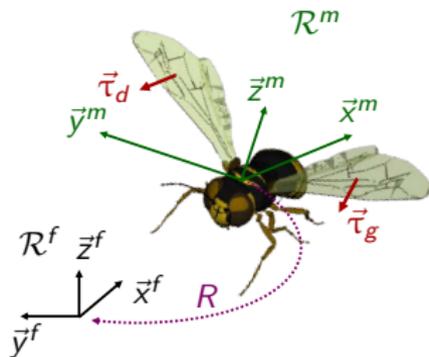
$f^m, \tau^m$  : Force et couple aérodynamiques dans  $\mathcal{R}^m$

$P^f, V^f$  : Position et vitesse linéaires dans  $\mathcal{R}^f$

$q = [q_0 \ q_v]^T$  : Quaternion

$q_v^\times$  : Matrice antisymétrique associée à  $q_v$

$\omega^m$  : Vitesse angulaire dans  $\mathcal{R}^m$



$\mathcal{R}^f$  : Repère fixe

$\mathcal{R}^m$  : Repère mobile

$m$  : Masse du corps

$c$  : Coefficient de viscosité

$g$  : Gravité

$I_3$  : Matrice identité

$J$  : Matrice d'inertie



# Modélisation du drone à ailes battantes

## Dynamique du corps

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

$$\begin{aligned}\dot{P}^f &= V^f \\ \dot{V}^f &= \frac{1}{m} R f^m - c V^f - g\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\begin{pmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_v \end{pmatrix} &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -q_v^T \\ I_3 q_0 - q_v^\times \end{pmatrix} \omega^m \\ \dot{\omega}^m &= J^{-1} (\tau^m - \omega^m \times J \omega^m)\end{aligned}$$

$R$  : Matrice de rotation de  $\mathcal{R}^m$  à  $\mathcal{R}^f$

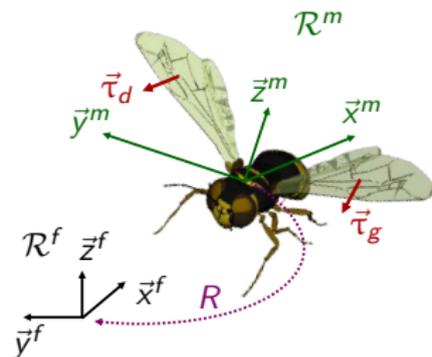
$f^m, \tau^m$  : Force et couple aérodynamiques dans  $\mathcal{R}^m$

$P^f, V^f$  : Position et vitesse linéaires dans  $\mathcal{R}^f$

$q = [q_0 \ q_v]^T$  : Quaternion

$q_v^\times$  : Matrice antisymétrique associée à  $q_v$

$\omega^m$  : Vitesse angulaire dans  $\mathcal{R}^m$



$\mathcal{R}^f$  : Repère fixe

$\mathcal{R}^m$  : Repère mobile

$m$  : Masse du corps

$c$  : Coefficient de viscosité

$g$  : Gravité

$I_3$  : Matrice identité

$J$  : Matrice d'inertie



# Dimensionnement de l'OVM

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVM

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

masse du corps	200 <i>mg</i>
envergure	3 <i>cm</i>
surface alaire	0.57 <i>cm</i> <sup>2</sup>
fréquence de battement	100 <i>Hz</i>
angle de battement maximal $\tilde{\phi}_0$	60°
angle de rotation maximal $\tilde{\psi}_0$	90°



# Théorie de moyennisation

Equivalence entre la stabilité du système moyen et instantané

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Approche par moyennisation

$$\begin{array}{l}
 \text{temps} \\
 \text{variant}
 \end{array}
 \left\{ \begin{array}{l}
 (\dot{P}, \dot{V}, \dot{q}, \dot{\omega}) = f(P, V, q, \omega, \text{angles des ailes}) \\
 \text{angles des ailes} = \text{amplitudes} \cdot \underbrace{g(t)}_{\text{périodique de période } T}
 \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l}
 \text{temps} \\
 \text{invariant}
 \end{array}
 \left\{ \begin{array}{l}
 (\bar{\dot{P}}, \bar{\dot{V}}, \bar{\dot{q}}, \bar{\dot{\omega}}) = \bar{f}(\bar{P}, \bar{V}, \bar{q}, \bar{\omega}, \text{amplitudes}) \\
 \text{amplitudes} = h(\bar{P}, \bar{V}, \bar{q}, \bar{\omega})
 \end{array} \right.$$

temps invariant  $\leftrightarrow$  corps rigide

Si le système temps invariant est asymptotiquement stable, alors il existe un  $k > 0$  tel que  $\forall T$  petit,  $\|(P, V, q, \omega) - (\bar{P}, \bar{V}, \bar{q}, \bar{\omega})\| < kT$  pour  $t \in [0, \infty[$ .

$T$  est la période de moyennisation = période de battement.



# Approche par moyennisation

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai



Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan



$\theta$  NUL

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Approche par moyennisation

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

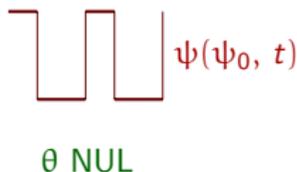
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



forces et couples  
aérodynamiques

$$f = \begin{pmatrix} f_x \\ 0 \\ f_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{traction} \\ 0 \\ \text{portance} \end{pmatrix}$$

$$\tau = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ 0 \\ \tau_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{roulis} \\ 0 \\ \text{lacet} \end{pmatrix}$$



# Approche par moyennisation

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



$\theta$  NUL

Masse mobile

forces et couples  
aérodynamiques

$$f = \begin{pmatrix} f_x \\ 0 \\ f_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{traction} \\ 0 \\ \text{portance} \end{pmatrix}$$

$$\tau = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ 0 \\ \tau_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{roulis} \\ 0 \\ \text{lacet} \end{pmatrix}$$

$$\tau = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_2 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \text{tangage} \\ 0 \end{pmatrix}$$



# Approche par moyennisation

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



$\theta$  NUL



forces et couples  
aérodynamiques  
 $(f, \tau)$

moyenne  
sur une  
période de  
battement

forces et couples  
aérodynamiques  
moyens  
 $(\bar{f}, \bar{\tau})$



# Approche par moyennisation

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

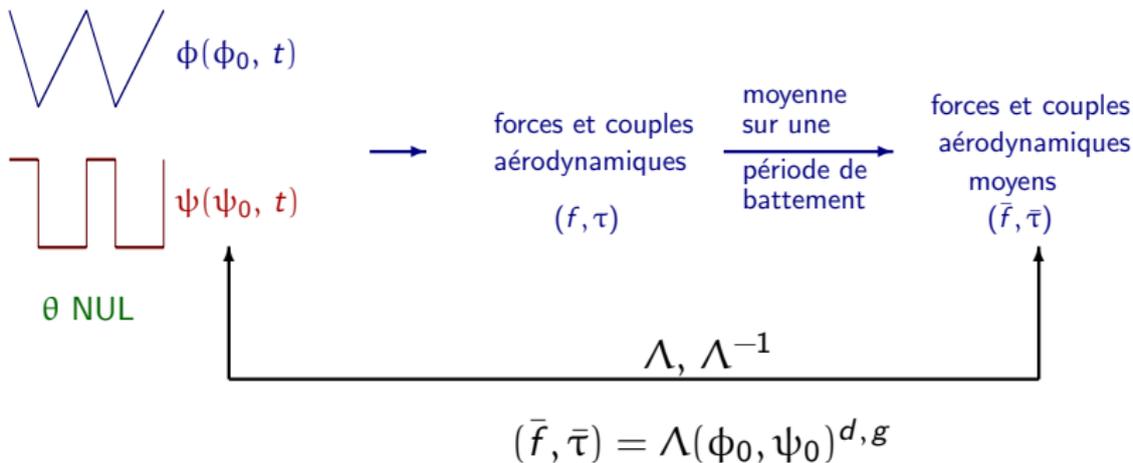
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives





# Approche par moyennisation

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

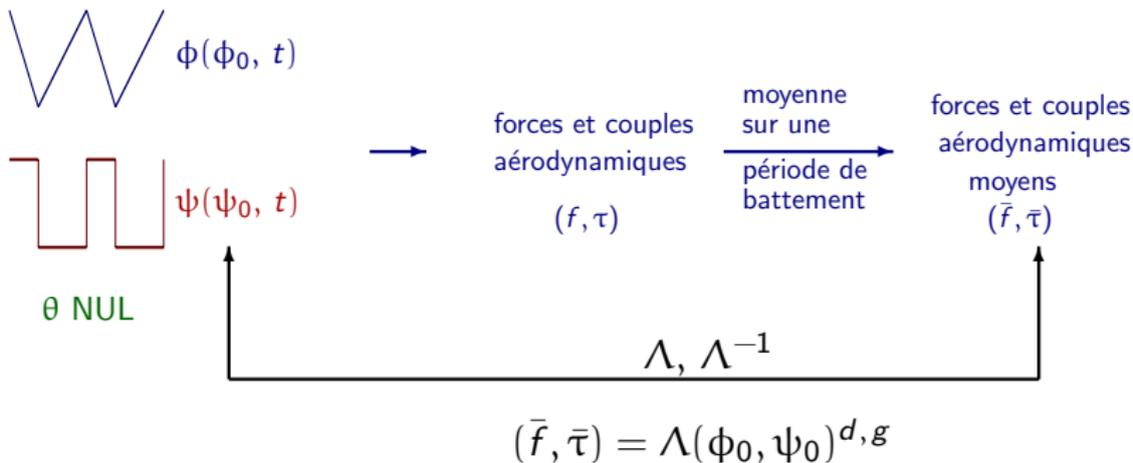
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



Chercher  $\bar{f} = f(\bar{P}, \bar{V}, \bar{q}, \bar{\omega})$  et  $\bar{\tau} = \tau(\bar{P}, \bar{V}, \bar{q}, \bar{\omega})$  pour que  
le système ait le comportement désiré



# Définition de la fonction $\Lambda$

Relation entre les amplitudes des angles des ailes et les forces et couples moyens (variables de commande)

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Modèle simple: **seulement les forces aérodynamiques stationnaires et les couples correspondants sont considérés**

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
**Modèle moyen**

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Définition de la fonction $\Lambda$

Relation entre les amplitudes des angles des ailes et les forces et couples moyens (variables de commande)

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

$$\left\{ \begin{array}{l} -\alpha \left[ \phi_0^d \sin \phi_0^d \sin \psi_0^d + \phi_0^g \sin \phi_0^g \sin \psi_0^g \right] = \bar{f}_x \\ \beta \left[ \phi_0^d \sin \phi_0^d \cos \psi_0^d + \phi_0^g \sin \phi_0^g \cos \psi_0^g \right] = \bar{f}_h \\ \beta x \left[ \phi_0^{d^2} \cos \psi_0^d - \phi_0^{g^2} \cos \psi_0^g \right] = \bar{\tau}_1 \\ \alpha x \left[ \phi_0^{d^2} \sin \psi_0^d - \phi_0^{g^2} \sin \psi_0^g \right] = \bar{\tau}_3 \end{array} \right.$$

avec

$\alpha, \beta = f_{\alpha, \beta}$  (fréq. de battement, géométrie de l'aile, coef. aérodyn., densité de l'air)

$x_1 =$  distance entre la base de l'aile et son centre aérodynamique

$\bar{\tau}_2$  est généré par une masse qui se déplace à l'intérieur du corps



# Étude des saturations

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Amplitudes des  
angles des ailes  
 $(\phi_0, \psi_0)^{d, g}$



Forces et couples  
moyens  
 $(\bar{f}, \bar{\tau})$

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



# Étude des saturations

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Amplitudes des  
angles des ailes  
 $(\phi_0, \psi_0)^{d, g}$

$\Lambda$

Forces et couples  
moyens  
 $(\bar{f}, \bar{\tau})$



Contraintes

$$0 \leq \phi_0 \leq \tilde{\phi}_0$$

$$-\tilde{\psi}_0 \leq \psi_0 \leq \tilde{\psi}_0$$

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Étude des saturations

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

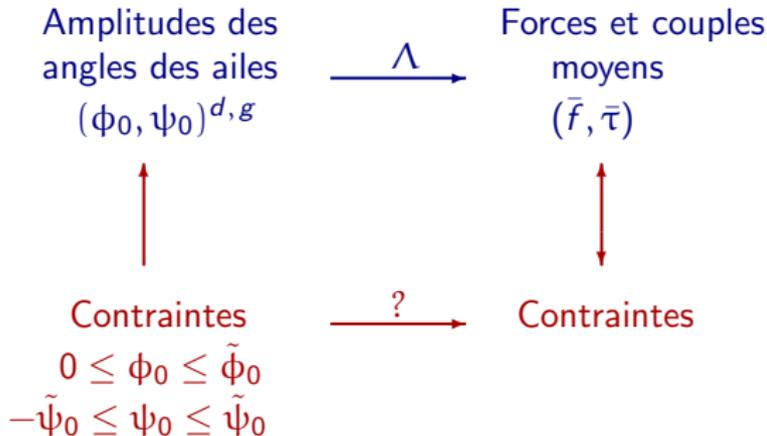
Attitude

Position

Robustesse

Contributions

Perspectives





# Étude des saturations

## Ensemble de saturation des couples

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

### Limitations physiques

- Saturation des angles des ailes

Hala Rifai

$$\begin{array}{ccccc} 0 & \leq & \phi_0 & \leq & \tilde{\phi}_0 \\ -\tilde{\psi}_0 & \leq & \psi_0 & \leq & \tilde{\psi}_0 \end{array}$$

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

$$\beta x \left[ \phi_0^{d^2} \cos \psi_0^d - \phi_0^{g^2} \cos \psi_0^g \right] = \bar{\tau}_1$$

$$\alpha x \left[ \phi_0^{d^2} \sin \psi_0^d - \phi_0^{g^2} \sin \psi_0^g \right] = \bar{\tau}_3$$



# Étude des saturations

## Ensemble de saturation des couples

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

### Limitations physiques

- Saturation des angles des ailes

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \leq & \phi_0 & \leq & \tilde{\phi}_0 \\ -\tilde{\psi}_0 & \leq & \psi_0 & \leq & \tilde{\psi}_0 \end{array}$$

$$\beta x \left[ \phi_0^{d^2} \cos \psi_0^d - \phi_0^{g^2} \cos \psi_0^g \right] = \bar{\tau}_1$$

$$\alpha x \left[ \phi_0^{d^2} \sin \psi_0^d - \phi_0^{g^2} \sin \psi_0^g \right] = \bar{\tau}_3$$

- Saturations couplées des couples de commande

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude

Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Étude des saturations

## Ensemble de saturation des couples

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Limitations physiques

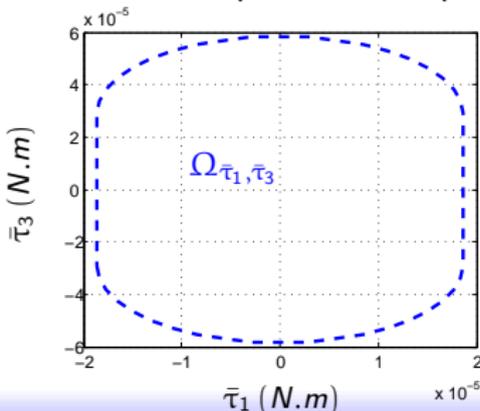
- Saturation des angles des ailes

$$\begin{array}{rcl} 0 & \leq & \phi_0 \leq \tilde{\phi}_0 \\ -\tilde{\psi}_0 & \leq & \psi_0 \leq \tilde{\psi}_0 \end{array}$$

$$\beta x \left[ \phi_0^{d^2} \cos \psi_0^d - \phi_0^{g^2} \cos \psi_0^g \right] = \bar{\tau}_1$$

$$\alpha x \left[ \phi_0^{d^2} \sin \psi_0^d - \phi_0^{g^2} \sin \psi_0^g \right] = \bar{\tau}_3$$

- Saturations couplées des couples de commande



Ensemble de saturation admissible



# Étude des saturations

## Ensemble de saturation des couples

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

### Limitations physiques

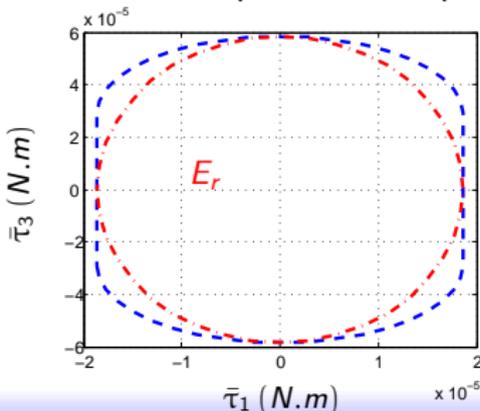
- Saturation des angles des ailes

$$\begin{aligned} 0 &\leq \phi_0 \leq \tilde{\phi}_0 \\ -\tilde{\psi}_0 &\leq \psi_0 \leq \tilde{\psi}_0 \end{aligned}$$

$$\beta x \left[ \phi_0^{d^2} \cos \psi_0^d - \phi_0^{g^2} \cos \psi_0^g \right] = \bar{\tau}_1$$

$$\alpha x \left[ \phi_0^{d^2} \sin \psi_0^d - \phi_0^{g^2} \sin \psi_0^g \right] = \bar{\tau}_3$$

- Saturations couplées des couples de commande



Ensemble de saturation admissible  
Réduit à une ellipse pour simplifier  
le calcul

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

# Étude des saturations

## Ensemble de saturation des couples

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

### Limitations physiques

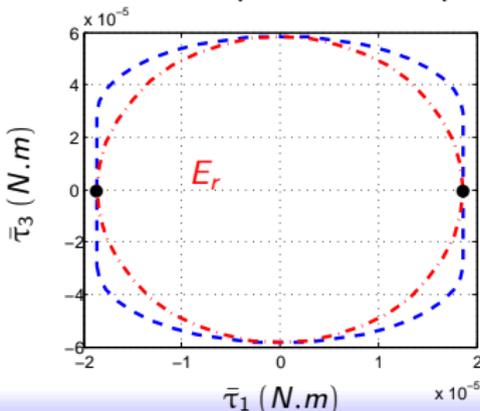
- Saturation des angles des ailes

$$\begin{aligned} 0 &\leq \phi_0 \leq \tilde{\phi}_0 \\ -\tilde{\psi}_0 &\leq \psi_0 \leq \tilde{\psi}_0 \end{aligned}$$

$$\beta x \left[ \phi_0^{d^2} \cos \psi_0^d - \phi_0^{g^2} \cos \psi_0^g \right] = \bar{\tau}_1$$

$$\alpha x \left[ \phi_0^{d^2} \sin \psi_0^d - \phi_0^{g^2} \sin \psi_0^g \right] = \bar{\tau}_3$$

- Saturations couplées des couples de commande



Ensemble de saturation admissible  
Réduit à une ellipse pour simplifier  
le calcul

Couple de lacet nul pour un couple  
de roulis maximal

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



# Étude des saturations

## Ensemble de saturation des couples

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

### Limitations physiques

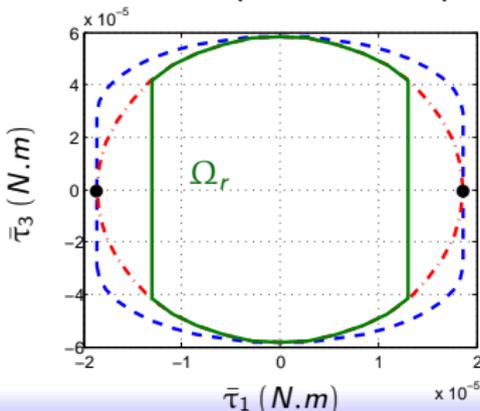
- Saturation des angles des ailes

$$\begin{aligned} 0 &\leq \phi_0 \leq \tilde{\phi}_0 \\ -\tilde{\psi}_0 &\leq \psi_0 \leq \tilde{\psi}_0 \end{aligned}$$

$$\beta x \left[ \phi_0^{d^2} \cos \psi_0^d - \phi_0^{g^2} \cos \psi_0^g \right] = \bar{\tau}_1$$

$$\alpha x \left[ \phi_0^{d^2} \sin \psi_0^d - \phi_0^{g^2} \sin \psi_0^g \right] = \bar{\tau}_3$$

- Saturations couplées des couples de commande



Ensemble de saturation admissible  
Réduit à une ellipse pour simplifier  
le calcul

Couple de lacet nul pour un couple  
de roulis maximal

Stabilisation du roulis privilégiée  
pour ramener le microdrone à plat





# Étude des saturations

## Ensemble de saturation des forces

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

### Limitations physiques

- Saturation des angles des ailes

$$\begin{array}{ccccc} 0 & \leq & \phi_0 & \leq & \tilde{\phi}_0 \\ -\tilde{\psi}_0 & \leq & \psi_0 & \leq & \tilde{\psi}_0 \end{array}$$

$$-\alpha \left[ \phi_0^d \sin \phi_0^d \sin \psi_0^d + \phi_0^g \sin \phi_0^g \sin \psi_0^g \right] = \bar{f}_x$$

$$\beta \left[ \phi_0^d \sin \phi_0^d \cos \psi_0^d + \phi_0^g \sin \phi_0^g \cos \psi_0^g \right] = \bar{f}_h$$

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude

Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Étude des saturations

## Ensemble de saturation des forces

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

### Limitations physiques

- Saturation des angles des ailes

$$\begin{array}{ccccc} 0 & \leq & \phi_0 & \leq & \tilde{\phi}_0 \\ -\tilde{\psi}_0 & \leq & \psi_0 & \leq & \tilde{\psi}_0 \end{array}$$

$$-\alpha \left[ \phi_0^d \sin \phi_0^d \sin \psi_0^d + \phi_0^g \sin \phi_0^g \sin \psi_0^g \right] = \bar{f}_x$$

$$\beta \left[ \phi_0^d \sin \phi_0^d \cos \psi_0^d + \phi_0^g \sin \phi_0^g \cos \psi_0^g \right] = \bar{f}_h$$

- Saturations couplées des forces de commande

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

Attitude

Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Étude des saturations

## Ensemble de saturation des forces

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

### Limitations physiques

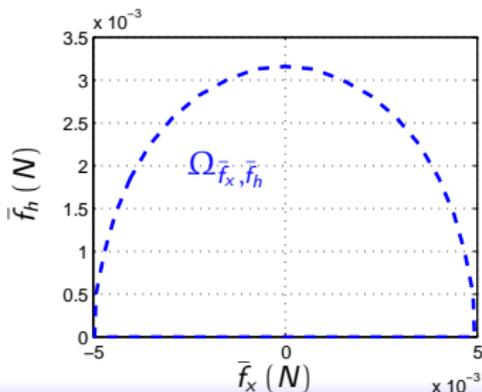
- Saturation des angles des ailes

$$\begin{array}{rcccl} 0 & \leq & \phi_0 & \leq & \tilde{\phi}_0 \\ -\tilde{\psi}_0 & \leq & \psi_0 & \leq & \tilde{\psi}_0 \end{array}$$

$$-\alpha \left[ \phi_0^d \sin \phi_0^d \sin \psi_0^d + \phi_0^g \sin \phi_0^g \sin \psi_0^g \right] = \bar{f}_x$$

$$\beta \left[ \phi_0^d \sin \phi_0^d \cos \psi_0^d + \phi_0^g \sin \phi_0^g \cos \psi_0^g \right] = \bar{f}_h$$

- Saturations couplées des forces de commande



Ensemble de saturation admissible



# Étude des saturations

## Ensemble de saturation des forces

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

### Limitations physiques

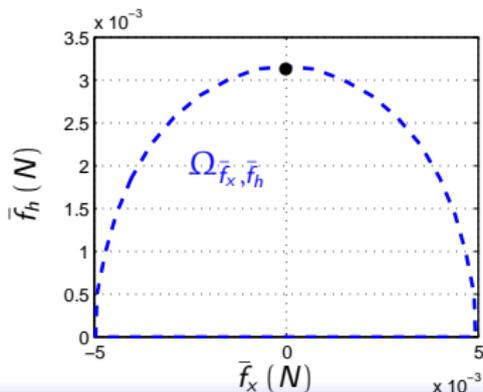
- Saturation des angles des ailes

$$\begin{array}{rcccl} 0 & \leq & \phi_0 & \leq & \tilde{\phi}_0 \\ -\tilde{\psi}_0 & \leq & \psi_0 & \leq & \tilde{\psi}_0 \end{array}$$

$$-\alpha \left[ \phi_0^d \sin \phi_0^d \sin \psi_0^d + \phi_0^g \sin \phi_0^g \sin \psi_0^g \right] = \bar{f}_x$$

$$\beta \left[ \phi_0^d \sin \phi_0^d \cos \psi_0^d + \phi_0^g \sin \phi_0^g \cos \psi_0^g \right] = \bar{f}_h$$

- Saturations couplées des forces de commande



Ensemble de saturation admissible

Force de traction nulle pour une force  
de portance maximale

# Étude des saturations

## Ensemble de saturation des forces

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

### Limitations physiques

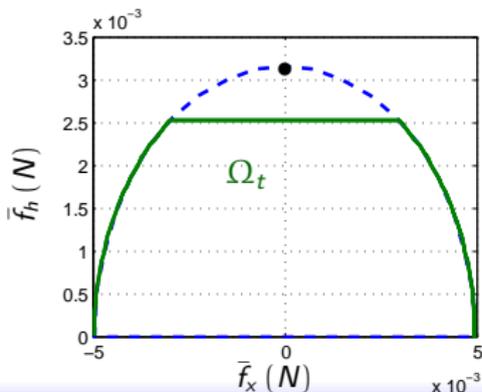
- Saturation des angles des ailes

$$\begin{array}{rcccl} 0 & \leq & \phi_0 & \leq & \tilde{\phi}_0 \\ -\tilde{\psi}_0 & \leq & \psi_0 & \leq & \tilde{\psi}_0 \end{array}$$

$$-\alpha \left[ \phi_0^d \sin \phi_0^d \sin \psi_0^d + \phi_0^g \sin \phi_0^g \sin \psi_0^g \right] = \bar{f}_x$$

$$\beta \left[ \phi_0^d \sin \phi_0^d \cos \psi_0^d + \phi_0^g \sin \phi_0^g \cos \psi_0^g \right] = \bar{f}_h$$

- Saturations couplées des forces de commande



### Ensemble de saturation admissible

Force de traction nulle pour une force  
de portance maximale

Stabilisation de la force verticale  
privilegiée pour raison de couplage  
avec le roulis



# Sommaire

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## 1 Introduction

- Projets sur les drones à ailes battantes
- Contexte du travail: Projet OVMI
- Avantages - Inconvénients du vol battu
- Bilan de littérature et des contributions

## 2 Modèle simple pour la commande

- Paramétrisation du mouvement des ailes
- Modèle simplifié du drone à ailes battantes
- Calcul du modèle moyen

## 3 Commande du drone à ailes battantes

- Commande de l'attitude
- Commande de la position

## 4 Tests de robustesse

## 5 Contributions et Perspectives



# Schéma de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

$$\phi(\phi_0, t)$$

Sommaire

$$\psi(\psi_0, t)$$

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

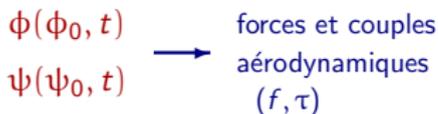
Perspectives



# Schéma de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai



Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Schéma de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

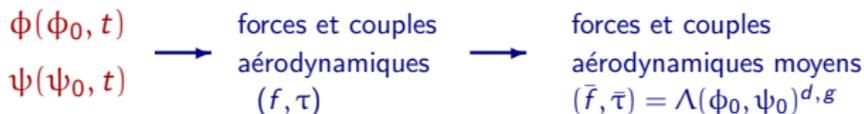
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives





# Schéma de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVM1  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

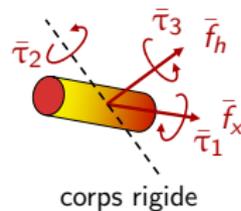
Robustesse

Contributions  
Perspectives

$\phi(\phi_0, t)$   
 $\psi(\psi_0, t)$

→ forces et couples  
aérodynamiques  
( $f, \tau$ )

→ forces et couples  
aérodynamiques moyens  
( $\bar{f}, \bar{\tau}$ ) =  $\Lambda(\phi_0, \psi_0)^{d, g}$





# Schéma de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

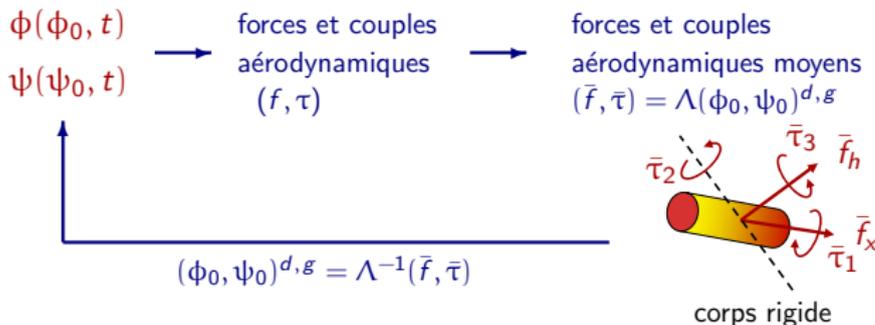
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



# Schéma de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

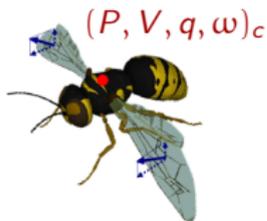
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



$P_e$   
 $V_e$   
 $q_e$   
 $\omega_e$

$(P, V, q, \omega)_d$



# Schéma de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

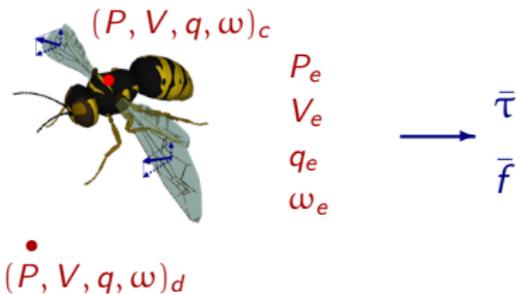
Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives





# Schéma de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

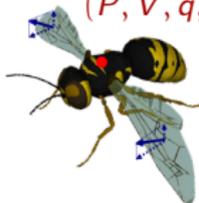
Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

$(P, V, q, \omega)_c$



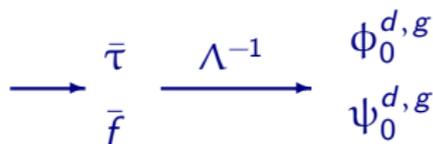
$(P, V, q, \omega)_d$

$P_e$

$V_e$

$q_e$

$\omega_e$





# Schéma de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

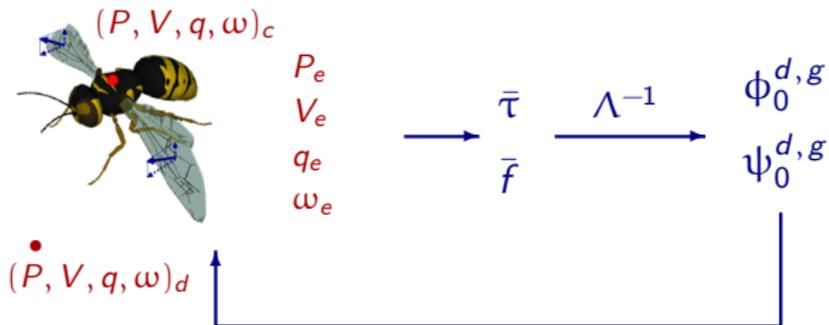
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives





# Stabilisation de l'attitude

## Commande par retour d'état

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

## Couples de commande

$$\bar{\tau}_j = -\text{sat}_{\bar{\tau}_j}(\lambda_j[\delta_j\bar{\omega}_j + \text{sign}(\bar{q}_0)\text{sat}_{M_{1,j}}(\rho_j\bar{q}_j)]) \quad j = \{1, 2, 3\}$$

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

$\lambda_j, \delta_j, \rho_j$  : paramètres de réglage positifs  
 $\text{sat}_{M_{1,j}}, \text{sat}_{\bar{\tau}_j}$  : fonctions de saturation  
 $\bar{\omega}_j$  : vitesse angulaire moyenne  
 $\bar{q}_j$  : quaternion moyen

[J.F. Guerrero-Castellanos et al., ICRA'07]



# Stabilisation de l'attitude

## Commande par retour d'état

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

## Couples de commande

$$\bar{\tau}_j = -\text{sat}_{\bar{\tau}_j}(\lambda_j[\delta_j \bar{\omega}_j + \text{sign}(\bar{q}_0) \text{sat}_{M_{1,j}}(\rho_j \bar{q}_j)]) \quad j = \{1, 2, 3\}$$

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

$\lambda_j, \delta_j, \rho_j$  : paramètres de réglage positifs

$\text{sat}_{M_{1,j}}, \text{sat}_{\bar{\tau}_j}$  : fonctions de saturation

$\bar{\omega}_j$  : vitesse angulaire moyenne

$\bar{q}_j$  : quaternion moyen

[J.F. Guerrero-Castellanos et al., ICRA'07]

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Stabilité prouvée (corps rigide) par la fonction de Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2} \bar{\omega}^T J \bar{\omega} + \kappa((1 - q_0)^2 + \bar{q}^T \bar{q})$$

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



# Stabilisation de l'attitude

## Commande par retour d'état

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

## Couples de commande

$$\bar{\tau}_j = -\text{sat}_{\bar{\tau}_j}(\lambda_j[\delta_j \bar{\omega}_j + \text{sign}(\bar{q}_0) \text{sat}_{M_{1,j}}(\rho_j \bar{q}_j)]) \quad j = \{1, 2, 3\}$$

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

$\lambda_j, \delta_j, \rho_j$  : paramètres de réglage positifs  
 $\text{sat}_{M_{1,j}}, \text{sat}_{\bar{\tau}_j}$  : fonctions de saturation  
 $\bar{\omega}_j$  : vitesse angulaire moyenne  
 $\bar{q}_j$  : quaternion moyen

[J.F. Guerrero-Castellanos et al., ICRA'07]

Stabilité prouvée (corps rigide) par la fonction de Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2} \bar{\omega}^T J \bar{\omega} + \kappa((1 - q_0)^2 + \bar{q}^T \bar{q})$$

Étendue aux ailes battantes grâce à la théorie de moyennisation



# Stabilisation de l'attitude

## Capteurs d'attitude

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVM1  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

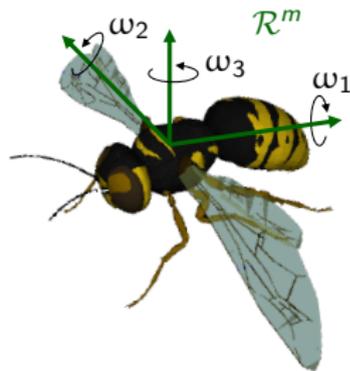
Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Deux types de capteurs existent:

- **Gyromètre**: Capteur donnant la mesure, dans le repère mobile, de la vitesse angulaire du corps



# Stabilisation de l'attitude

## Capteurs d'attitude

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

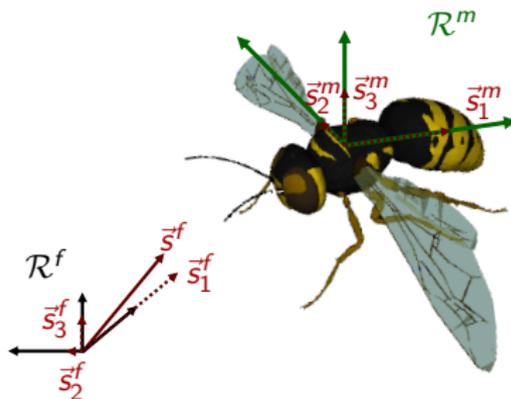
Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Deux types de capteurs existent:

- **Gyromètre**: Capteur donnant la mesure, dans le repère mobile, de la vitesse angulaire du corps
- **Capteur de référence**: Capteur donnant la mesure, dans le repère mobile, d'un vecteur fixe dans l'espace (accéléromètre, magnétomètre)

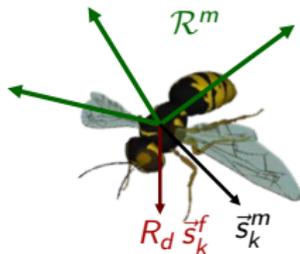




# Stabilisation de l'attitude

## Erreur d'attitude

Exemple d'un accéléromètre:



Vecteur courant:  $s_k^m = R s_k^f$

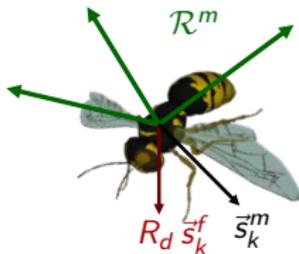
Vecteur désiré:  $s_{k_d}^m = R_d s_k^f$



# Stabilisation de l'attitude

## Erreur d'attitude

Exemple d'un accéléromètre:



Vecteur courant:  $s_k^m = R s_k^f$

Vecteur désiré:  $s_{k_d}^m = R_d s_k^f$

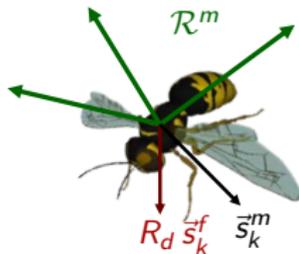
- Commande du lacet impossible
- Rajouter un autre capteur fournissant une mesure non colinéaire (magnétomètre par exemple)



# Stabilisation de l'attitude

## Erreur d'attitude

Exemple d'un accéléromètre:



Vecteur courant:  $s_k^m = R s_k^f$

Vecteur désiré:  $s_{k_d}^m = R_d s_k^f$

- Commande du lacet impossible
- Rajouter un autre capteur fournissant une mesure non colinéaire (magnétomètre par exemple)
- Nombre de capteurs non colinéaires  $n \geq 2$



# Stabilisation de l'attitude

## Erreur d'attitude

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

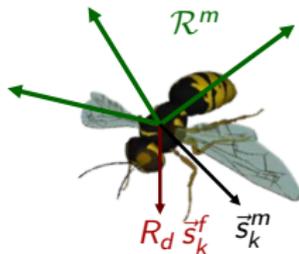
Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Exemple d'un accéléromètre:



Vecteur courant:  $s_k^m = R s_k^f$

Vecteur désiré:  $s_{k_d}^m = R_d s_k^f$

Erreur d'attitude:

$$\vec{\zeta} = \frac{\Delta^{-1}}{n} \sum_{k=1}^n \vec{s}_k^m \times R_d \vec{s}_k^f$$

$\Delta$  : matrice diagonale de pondération (à termes positifs)

$n$  : nombre de capteurs

$R_d$  : matrice de rotation désirée (orientation désirée de  $\mathcal{R}^f$  par rapport à  $\mathcal{R}^m$ )

Si  $\vec{s}_k^m$  et  $R_d \vec{s}_k^f$  sont colinéaires,  $\vec{\zeta} = 0$



# Stabilisation de l'attitude

## Commande par retour de mesure

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Capteurs utilisés: Gyromètre et capteurs de référence

## Couples de commande

Hala Rifai

$$\bar{\tau}_j = -\text{sat}_{\bar{\tau}_j}(\lambda_j[\bar{\omega}_{G_j} + \rho_j \bar{\zeta}_j]) \quad j = \{1, 2, 3\}$$

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

$\lambda_j, \rho_j$  : paramètres de réglage positifs

$\text{sat}_{\bar{\tau}_j}$  : fonction de saturation

$\bar{\omega}_{G_j}$  : vitesse angulaire moyenne (mesurée par le gyromètre)

$\bar{\zeta}_j$  : erreur d'attitude moyenne

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



# Stabilisation de l'attitude

## Commande par retour de mesure

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Capteurs utilisés: Gyromètre et capteurs de référence

## Couples de commande

$$\bar{\tau}_j = -\text{sat}_{\bar{\tau}_j}(\lambda_j[\bar{\omega}_{G_j} + \rho_j \bar{\zeta}_j]) \quad j = \{1, 2, 3\}$$

$\lambda_j, \rho_j$  : paramètres de réglage positifs

$\text{sat}_{\bar{\tau}_j}$  : fonction de saturation

$\bar{\omega}_{G_j}$  : vitesse angulaire moyenne (mesurée par le gyromètre)

$\bar{\zeta}_j$  : erreur d'attitude moyenne

Stabilité prouvée (corps rigide) par la fonction de Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2} \bar{\omega}^T J \bar{\omega} + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (1 - \bar{s}_k^m{}^T R_d \bar{s}_k^f)$$



# Stabilisation de l'attitude

## Commande par retour de mesure

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Capteurs utilisés: Gyromètre et capteurs de référence

## Couples de commande

$$\bar{\tau}_j = -\text{sat}_{\bar{\tau}_j}(\lambda_j[\bar{\omega}_{G_j} + \rho_j \bar{\zeta}_j]) \quad j = \{1, 2, 3\}$$

$\lambda_j, \rho_j$  : paramètres de réglage positifs

$\text{sat}_{\bar{\tau}_j}$  : fonction de saturation

$\bar{\omega}_{G_j}$  : vitesse angulaire moyenne (mesurée par le gyromètre)

$\bar{\zeta}_j$  : erreur d'attitude moyenne

Stabilité prouvée (corps rigide) par la fonction de Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2} \bar{\omega}^T J \bar{\omega} + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (1 - \bar{s}_k^m T R_d \bar{s}_k^f)$$

Étendue aux ailes battantes grâce à la théorie de moyennisation



# Stabilisation de l'attitude

## Commande par retour de mesure

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Capteurs utilisés: Capteurs de référence

- Pas de gyromètre  $\Rightarrow$  reconstruction de la vitesse angulaire  
(dans une base orthogonale  $\mathbf{U} = [\vec{u}_1, \vec{u}_2, \vec{u}_3] \equiv \mathcal{R}^m$ )

$$\vec{\omega} = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^3 \dot{u}_l \times \vec{u}_l$$



# Stabilisation de l'attitude

## Commande par retour de mesure

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Capteurs utilisés: Capteurs de référence

- Pas de gyromètre  $\Rightarrow$  reconstruction de la vitesse angulaire  
(dans une base orthogonale  $\mathbf{U} = [\vec{u}_1, \vec{u}_2, \vec{u}_3] \equiv \mathcal{R}^m$ )

$$\vec{\omega} = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^3 \dot{u}_l \times \vec{u}_l$$

- Au moins 2 capteurs suffisent pour la construction de  $\mathbf{U}$



# Stabilisation de l'attitude

## Commande par retour de mesure

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Capteurs utilisés: Capteurs de référence

- Pas de gyromètre  $\Rightarrow$  reconstruction de la vitesse angulaire (dans une base orthogonale  $\mathbf{U} = [\vec{u}_1, \vec{u}_2, \vec{u}_3] \equiv \mathcal{R}^m$ )

$$\vec{\omega} = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^3 \dot{\vec{u}}_l \times \vec{u}_l$$

- Au moins 2 capteurs suffisent pour la construction de  $\mathbf{U}$
- Inconvénient des mesures bruitées  $\Rightarrow$  Calcul de la dérivée filtrée  $\vec{v}_l$  vitesse angulaire reconstruite

$$\vec{\vartheta} = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^3 \vec{v}_l \times \vec{u}_l$$



# Stabilisation de l'attitude

## Commande par retour de mesure

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Capteurs utilisés: Capteurs de référence

Couples de commande

Hala Rifai

$$\bar{\tau}_j = -\text{sat}_{\bar{\tau}_j}(\lambda_j[\bar{\vartheta}_j + \rho_j\bar{\zeta}_j]) \quad j = \{1, 2, 3\}$$

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

$\lambda_j, \rho_j$  : paramètres de réglage positifs

$\text{sat}_{\bar{\tau}_j}$  : fonction de saturation

$\bar{\vartheta}_j$  : vitesse angulaire reconstruite moyenne

$\bar{\zeta}_j$  : erreur d'attitude moyenne



# Stabilisation de l'attitude

## Commande par retour de mesure

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Capteurs utilisés: Capteurs de référence

Couples de commande

$$\bar{\tau}_j = -\text{sat}_{\bar{\tau}_j}(\lambda_j[\bar{\vartheta}_j + \rho_j \bar{\zeta}_j]) \quad j = \{1, 2, 3\}$$

$\lambda_j, \rho_j$  : paramètres de réglage positifs

$\text{sat}_{\bar{\tau}_j}$  : fonction de saturation

$\bar{\vartheta}_j$  : vitesse angulaire reconstruite moyenne

$\bar{\zeta}_j$  : erreur d'attitude moyenne

Si filtre suffisamment rapide  $\Rightarrow \vartheta \rightarrow \omega$

Stabilité prouvée (corps rigide) par la fonction de Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2} \bar{\omega}^T J \bar{\omega} + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (1 - \bar{s}_k^m{}^T R_d \bar{s}_k^f)$$



# Stabilisation de l'attitude

Commande par retour de mesure

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Capteurs utilisés: Capteurs de référence

Couples de commande

$$\bar{\tau}_j = -\text{sat}_{\bar{\tau}_j}(\lambda_j[\bar{\vartheta}_j + \rho_j \bar{\zeta}_j]) \quad j = \{1, 2, 3\}$$

$\lambda_j, \rho_j$  : paramètres de réglage positifs

$\text{sat}_{\bar{\tau}_j}$  : fonction de saturation

$\bar{\vartheta}_j$  : vitesse angulaire reconstruite moyenne

$\bar{\zeta}_j$  : erreur d'attitude moyenne

Si filtre suffisamment rapide  $\Rightarrow \vartheta \rightarrow \omega$

Stabilité prouvée (corps rigide) par la fonction de Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2} \bar{\omega}^T J \bar{\omega} + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (1 - \bar{s}_k^m{}^T R_d \bar{s}_k^f)$$

Étendue aux ailes battantes grâce à la théorie de moyennisation



# Stabilisation de l'attitude

Commande par retour de mesure (avec gyromètre)

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Orientation initiale:  $(\eta_1, \eta_2, \eta_3) = (-40, -25, 50)^\circ$

Bruits des capteurs modélisés par des bruits blancs gaussiens  
d'écart types:

- Gyromètre:  $\sigma_G = 10^{-3} \text{ rad/s}$
- Accéléromètre:  $\sigma_A = 10^{-4} \text{ m/s}^2$
- Magnétomètre:  $\sigma_M = 0.01 \text{ mgauss}$



# Stabilisation de l'attitude

Commande par retour de mesure (avec gyromètre)

Orientation initiale:  $(\eta_1, \eta_2, \eta_3) = (-40, -25, 50)^\circ$

Angles (Roulis, Tangage, Lacet) et vitesses angulaires

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

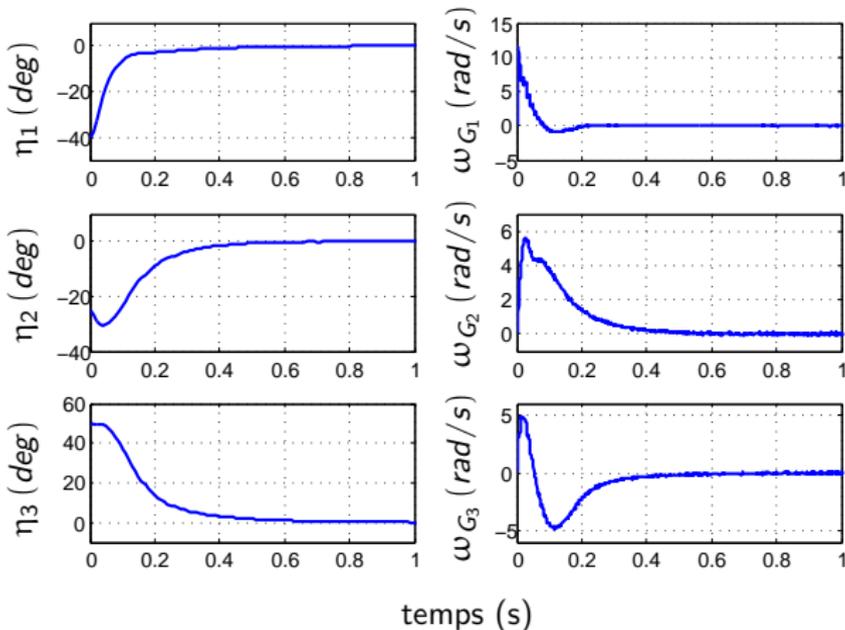
Paramétrisation des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives





# Stabilisation de l'attitude

Commande par retour de mesure (avec gyromètre)

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

## Couples de commande, angles des ailes et sorties des capteurs

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages

Inconvénients

Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

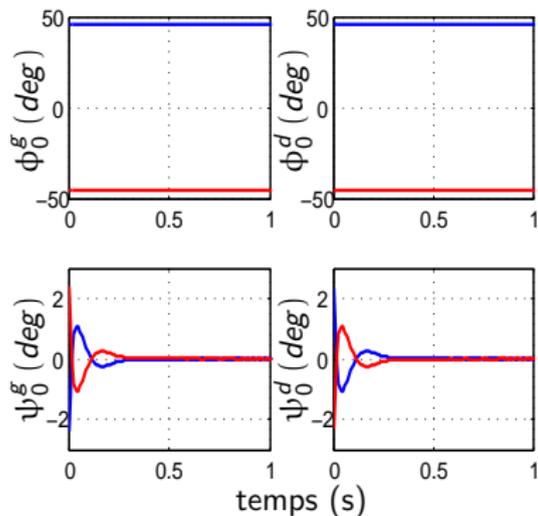
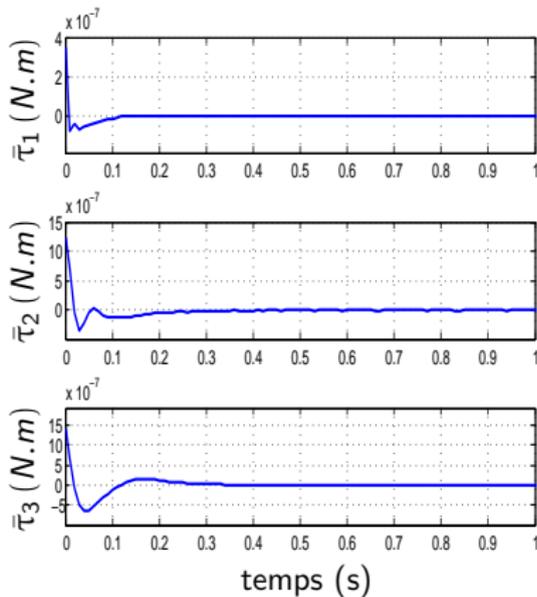
Attitude

Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Stabilisation de l'attitude

Commande par retour de mesure (avec gyromètre)

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

## Couples de commande, angles des ailes et sorties des capteurs

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients

Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes

Modèle simplifié

Modèle moyen

Commande

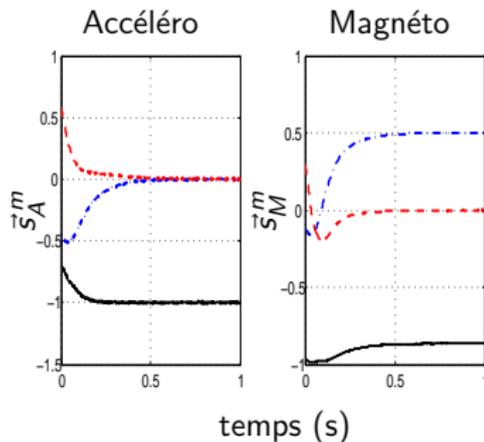
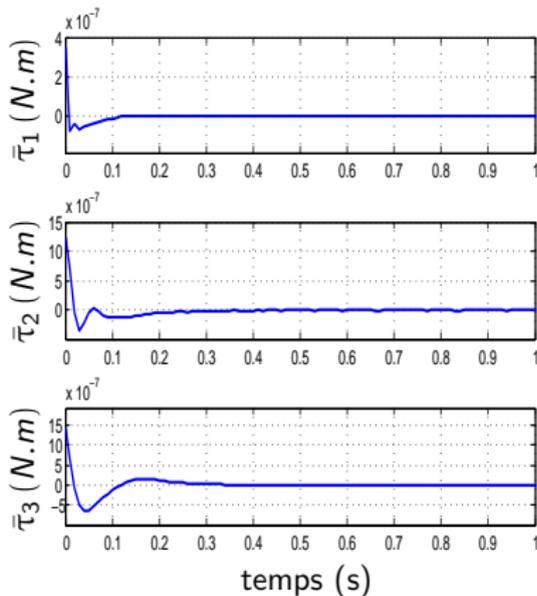
Attitude

Position

Robustesse

Contributions

Perspectives





# Robustesse vis-à-vis de perturbations externes

Commande par retour de mesure (avec gyromètre)

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVM1

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Robustesse vis-à-vis de perturbations externes

Commande par retour de mesure (avec gyromètre)

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Perturbation assimilée à:

un couple d'amplitude  $(1.2 \cdot 10^{-5}, 2 \cdot 10^{-5}, 1.2 \cdot 10^{-5}) \text{ N} \cdot \text{m}$  (dans  $\mathcal{R}^m$ ) appliquée à  $t = 1.5 \text{ s}$  pendant 10 périodes de battement.



# Robustesse vis-à-vis de perturbations externes

Commande par retour de mesure (avec gyromètre)

Orientation initiale:  $(\eta_1, \eta_2, \eta_3) = (70, -50, 30)^\circ$

Angles (Roulis, Tangage, Lacet)

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

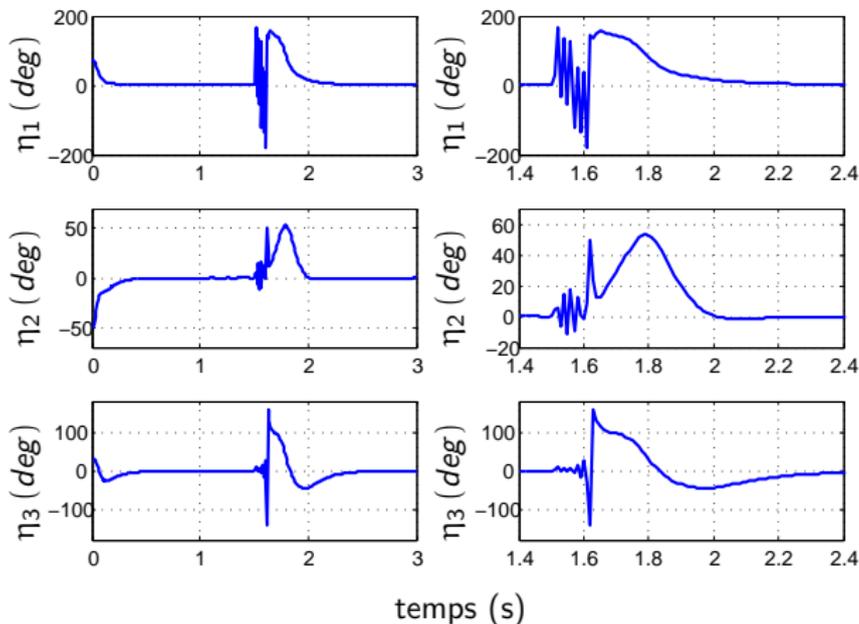
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives





# Robustesse vis-à-vis de perturbations externes

Commande par retour de mesure (avec gyromètre)

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

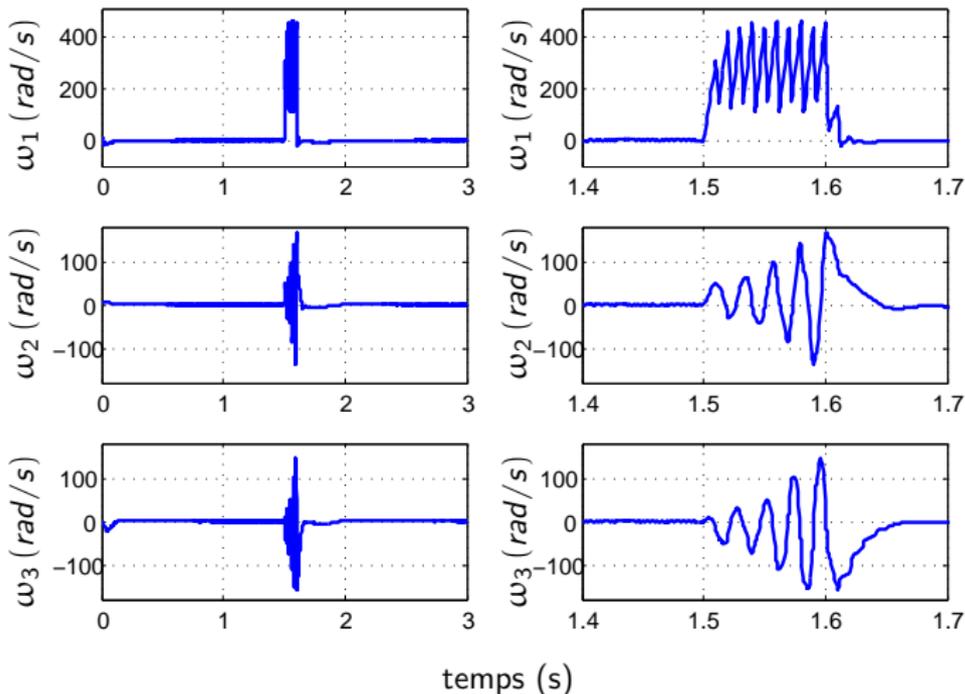
Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Vitesses angulaires





# Robustesse vis-à-vis de perturbations externes

Commande par retour de mesure (avec gyromètre)

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

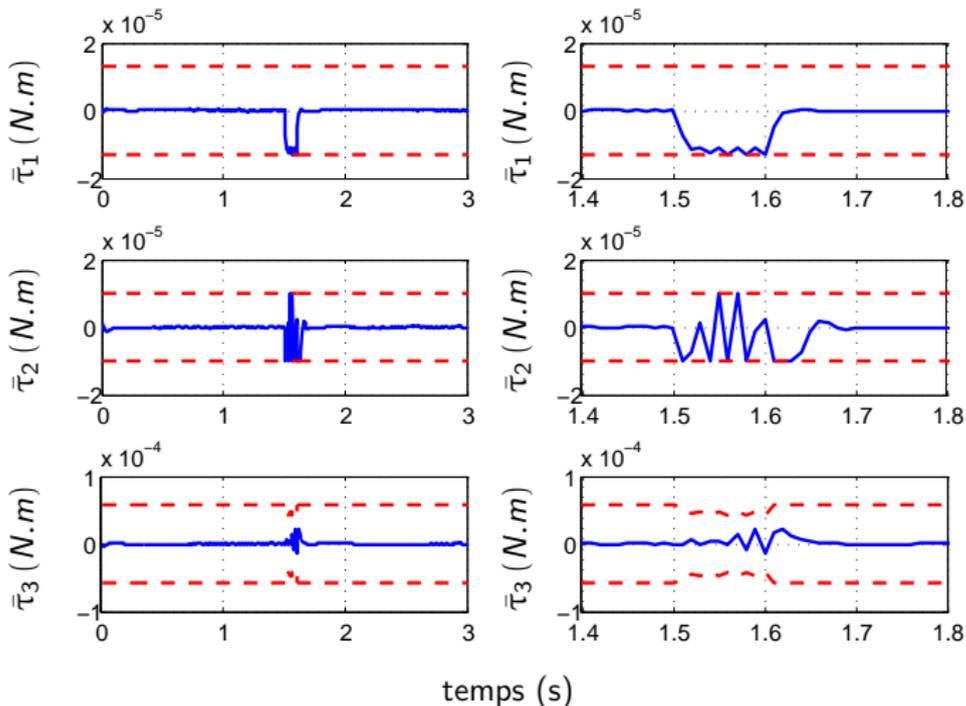
Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Couples de commande





# Propriétés de la commande d'attitude

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

- Complexité extrêmement réduite

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

**Attitude**  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Propriétés de la commande d'attitude

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

- Complexité extrêmement réduite
- Robustesse structurelle

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Propriétés de la commande d'attitude

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

- Complexité extrêmement réduite
- Robustesse structurelle
  - Indépendante de l'inertie

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Propriétés de la commande d'attitude

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

- Complexité extrêmement réduite
- Robustesse structurelle
  - Indépendante de l'inertie
  - Indépendante du coefficient aérodynamique de portance



# Propriétés de la commande d'attitude

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

- Complexité extrêmement réduite
- Robustesse structurelle
  - Indépendante de l'inertie
  - Indépendante du coefficient aérodynamique de portance
  - Robuste vis-à-vis de perturbations en entrée



# Propriétés de la commande d'attitude

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

- Complexité extrêmement réduite
- Robustesse structurelle
  - Indépendante de l'inertie
  - Indépendante du coefficient aérodynamique de portance
  - Robuste vis-à-vis de perturbations en entrée
- Robustesse vérifiée numériquement



# Propriétés de la commande d'attitude

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

- Complexité extrêmement réduite
- Robustesse structurelle
  - Indépendante de l'inertie
  - Indépendante du coefficient aérodynamique de portance
  - Robuste vis-à-vis de perturbations en entrée
- Robustesse vérifiée numériquement
  - Robuste vis-à-vis d'erreurs de modèle (présentée après)



# Commande de la position

## Stratégie de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Mvt longitudinal  $P_x$

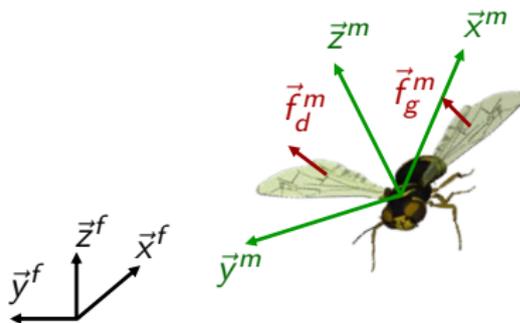
Mvt latéral  $P_y$

Mvt vertical  $P_z$

Mvt de roulis  $\eta_1$

Mvt de tangage  $\eta_2$

Mvt de lacet  $\eta_3$





# Commande de la position

## Stratégie de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Mvt longitudinal  $P_x$

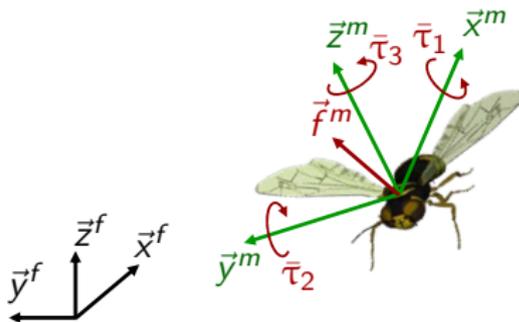
Mvt latéral  $P_y$

Mvt vertical  $P_z$

Mvt de roulis  $\eta_1$

Mvt de tangage  $\eta_2$

Mvt de lacet  $\eta_3$





# Commande de la position

## Stratégie de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

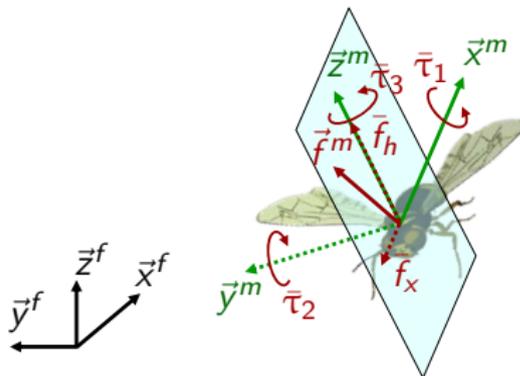
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



Mvt longitudinal  $P_x \leftarrow$  force de traction  $\vec{f}_x$

Mvt latéral  $P_y$

Mvt vertical  $P_z \leftarrow$  force de portance  $\vec{f}_h$

Mvt de roulis  $\eta_1 \leftarrow$  couple de roulis  $\vec{\tau}_1$

Mvt de tangage  $\eta_2 \leftarrow$  couple de tangage  $\vec{\tau}_2$

Mvt de lacet  $\eta_3 \leftarrow$  couple de lacet  $\vec{\tau}_3$



# Commande de la position

## Stratégie de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

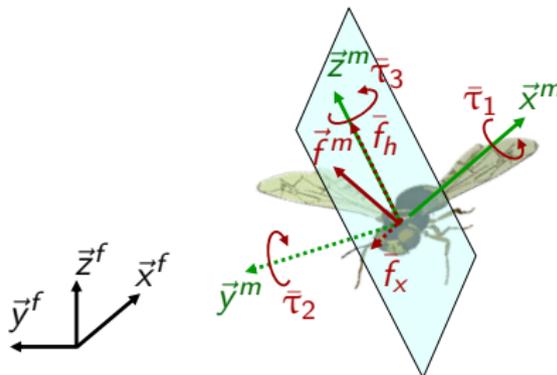
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



Mvt longitudinal  $P_x \leftarrow$  force de traction  $\bar{f}_x$  (chaînes d'intégrateurs)

Mvt latéral  $P_y$

Mvt vertical  $P_z \leftarrow$  force de portance  $\bar{f}_h$

Mvt de roulis  $\eta_1 \leftarrow$  couple de roulis  $\bar{\tau}_1$

Mvt de tangage  $\eta_2 \leftarrow$  couple de tangage  $\bar{\tau}_2$  (commande d'attitude)

Mvt de lacet  $\eta_3 \leftarrow$  couple de lacet  $\bar{\tau}_3$  (commande d'attitude)



# Commande de la position

## Stratégie de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

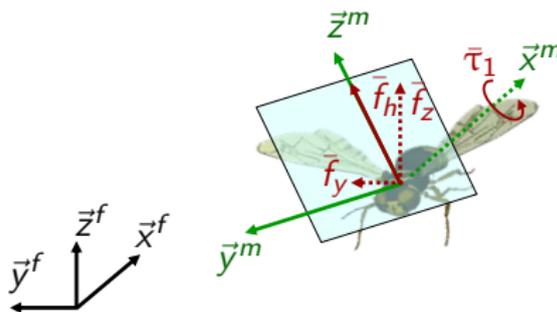
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



Mvt longitudinal  $P_x \leftarrow$  force de traction  $\bar{f}_x$  (chaînes d'intégrateurs)  
 Mvt latéral  $P_y \left. \vphantom{P_x} \right\}$   
 Mvt vertical  $P_z \left. \vphantom{P_x} \right\} \rightarrow$  PVTOL (avion à décollage et atterrissage verticaux)  
 Mvt de roulis  $\eta_1 \left. \vphantom{P_x} \right\} \quad$  (double chaînes d'intégrateurs)  
 Mvt de tangage  $\eta_2 \leftarrow$  couple de tangage  $\bar{\tau}_2$  (commande d'attitude)  
 Mvt de lacet  $\eta_3 \leftarrow$  couple de lacet  $\bar{\tau}_3$  (commande d'attitude)



# Commande de la position

## Stratégie de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

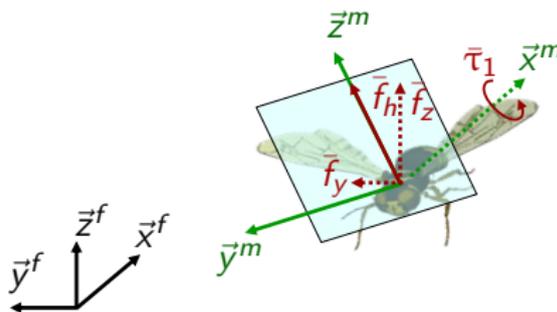
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



Mvt longitudinal $P_x$	} → chaînes d'intégrateurs
Mvt latéral $P_y$	
Mvt vertical $P_z$	
Mvt de roulis $\eta_1$	} → commande d'attitude
Mvt de tangage $\eta_2$	
Mvt de lacet $\eta_3$	



# Commande de la position

## Stratégie de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Chaîne d'intégrateurs d'ordre  $n$ :

$$\begin{cases} \dot{x}_i &= x_{i+1} \\ \dot{x}_n &= u \end{cases} \quad i \in \{1, \dots, n-1\}$$

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
**Position**

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Commande de la position

## Stratégie de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Chaîne d'intégrateurs d'ordre  $n$ :

$$\begin{cases} \dot{x}_i &= x_{i+1} & i \in \{1, \dots, n-1\} \\ \dot{x}_n &= u \end{cases}$$

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVM1  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
**Position**

Robustesse

Contributions

Perspectives

$$\begin{aligned} \dot{p}^f &= V^f \\ \dot{V}^f &= \frac{1}{m} R f^m - c V^f - g \end{aligned}$$



# Commande de la position

## Stratégie de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Chaîne d'intégrateurs d'ordre  $n$ :

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1} & i \in \{1, \dots, n-1\} \\ \dot{x}_n = u \end{cases}$$

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

$$\begin{aligned} \dot{p}^f &= V^f \\ \dot{V}^f &= \frac{1}{m} R^f m - c V^f - g \end{aligned}$$



# Commande de la position

## Stratégie de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Chaîne d'intégrateurs d'ordre  $n$ :

$$\begin{cases} \dot{x}_i &= x_{i+1} & i \in \{1, \dots, n-1\} \\ \dot{x}_n &= u \end{cases}$$

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

$$\begin{aligned} \dot{p}^f &= V^f \\ \dot{V}^f &= \frac{1}{m} R^{fm} - c V^f - g \end{aligned}$$

- Commande d'attitude pour ramener le roulis vers un roulis désiré
- Commande des chaînes d'intégrateurs pour stabiliser la position



# Commande de la position

## Commande de chaînes d'intégrateurs

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Deux approches de commande bornée:

- Approche de Sussmann basée sur la somme de saturations  
(pôles du système placés en  $(-\varepsilon, -\varepsilon^2, \dots, -\varepsilon^n)$ )

$$u = -\varepsilon \operatorname{sat}(y_n) - \varepsilon^2 \operatorname{sat}(y_{n-1}) - \dots - \varepsilon^n \operatorname{sat}(y_1)$$

$$0 < \varepsilon < 1$$

$$y_j = f(x_j)$$

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



# Commande de la position

## Commande de chaînes d'intégrateurs

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Deux approches de commande bornée:

- Approche de Sussmann basée sur la somme de saturations  
(pôles du système placés en  $(-\varepsilon, -\varepsilon^2, \dots, -\varepsilon^n)$ )

$$u = -\varepsilon \operatorname{sat}(y_n) - \varepsilon^2 \operatorname{sat}(y_{n-1}) - \dots - \varepsilon^n \operatorname{sat}(y_1)$$

$$0 < \varepsilon < 1$$

$$y_j = f(x_j)$$

- Approche de Teel basée sur des saturations imbriquées  
(pôles du système placés en  $(-1, -1, \dots, -1)$ )

$$u = -\operatorname{sat}_{M_n}(y_n + \operatorname{sat}_{M_{n-1}}(y_{n-1} + \dots + \operatorname{sat}_{M_2}(y_2 + \operatorname{sat}_{M_1}(y_1)) \dots))$$

$$M_j \quad : \quad \text{borne de saturation}$$

$$y_j = f(x_j)$$



# Commande de la position

## Commande de chaînes d'intégrateurs

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
**Position**

Robustesse

Contributions

Perspectives

- Inconvénient des 2 approches: Lenteur dans la convergence



# Commande de la position

## Commande de chaînes d'intégrateurs

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

- Inconvénient des 2 approches: Lenteur dans la convergence
- Avantage de la commande de Teel: Plus rapide

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
**Position**

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Commande de la position

## Commande de chaînes d'intégrateurs

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
**Position**

Robustesse

Contributions

Perspectives

- Inconvénient des 2 approches: Lenteur dans la convergence
- Avantage de la commande de Teel: Plus rapide
- Choix: Approche de Teel améliorée pour réduire le temps de convergence



# Commande de la position

## Commande de chaînes d'intégrateurs

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

- Inconvénient des 2 approches: Lenteur dans la convergence
- Avantage de la commande de Teel: Plus rapide
- Choix: Approche de Teel améliorée pour réduire le temps de convergence
- Considération d'un étage supplémentaire dans la chaîne d'intégrateurs (équivalent à l'intégrale de la position) pour éliminer les erreurs statiques et améliorer la robustesse de la commande

$$\frac{d}{dt} \left( \int P^f \right) = P^f$$

$$\frac{d}{dt} P^f = V^f$$

$$\frac{d}{dt} V^f = \frac{1}{m} R^f m - c V^f - g$$



# Commande de la position

## Commande à base de saturations imbriquées

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVM1  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

- Amélioration de Johnson et Kannan [ACC'03]  
Placement de pôles en  $(-a_1, -a_2, -a_3) \Rightarrow$  matrice de passage  $\Pi$  ( $y = \Pi x$ )

$$\Pi = \begin{bmatrix} a_1 a_2 a_3 & a_3(a_1 + a_2) & a_3 \\ 0 & a_1 a_2 & a_2 \\ 0 & 0 & a_1 \end{bmatrix}$$

$\Pi_{i,j}$ : l'élément de la  $i^{\text{ème}}$  ligne et la  $j^{\text{ème}}$  colonne de  $\Pi$



# Commande de la position

## Commande à base de saturations imbriquées

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVM1  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

- Amélioration de Johnson et Kannan [ACC'03]  
Placement de pôles en  $(-a_1, -a_2, -a_3) \Rightarrow$  matrice de passage  $\Pi$  ( $y = \Pi x$ )

$$\Pi = \begin{bmatrix} a_1 a_2 a_3 & a_3(a_1 + a_2) & a_3 \\ 0 & a_1 a_2 & a_2 \\ 0 & 0 & a_1 \end{bmatrix}$$

$\Pi_{i,j}$ : l'élément de la  $i^{\text{ème}}$  ligne et la  $j^{\text{ème}}$  colonne de  $\Pi$

- Amélioration de Marchand [CDC'03]  
Bornes de saturation variables



# Commande de la position

## Commande à base de saturations imbriquées

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Forces de commande

$$v_j = -\text{sat}_{\tilde{v}_j} \left( \Pi_{j3,3} \bar{V}_j + \text{sat}_{\gamma_2(\Pi_{j3,3} \bar{V}_j, L_{j3}, M_{j2})} (\Pi_{j2,3} \bar{V}_j + \Pi_{j2,2} \bar{P}_j + \dots \right. \\ \left. \text{sat}_{\gamma_1(\Pi_{j2,3} \bar{V}_j + \Pi_{j2,2} \bar{P}_j, L_{j2}, M_{j1})} (\Pi_{j1,3} \bar{V}_j + \Pi_{j1,2} \bar{P}_j + \Pi_{j1,1} \int \overline{P_j})) \right) \\ j = \{x, y, z\}$$

[Marchand, CDC'03; Johnson & Kannan, ACC'03]

$\text{sat}(\cdot)$  : fonction de saturation différentiable d'ordre 2

$\int \overline{P_j}, \bar{P}_j, \bar{V}_j$  : Intégrale de la position, position et vitesse linéaires moyennes

$\Pi_j$  : matrice de placement de pôles

$\gamma(\cdot, \cdot, \cdot)$  : fonction de niveau



# Commande de la position

## Commande à base de saturations imbriquées

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Forces de commande

$$v_j = -\text{sat}_{\tilde{v}_j} \left( \Pi_{j3,3} \bar{V}_j + \text{sat}_{\gamma_2(\Pi_{j3,3} \bar{V}_j, L_{j3}, M_{j2})} (\Pi_{j2,3} \bar{V}_j + \Pi_{j2,2} \bar{P}_j + \dots \right. \\ \left. \text{sat}_{\gamma_1(\Pi_{j2,3} \bar{V}_j + \Pi_{j2,2} \bar{P}_j, L_{j2}, M_{j1})} (\Pi_{j1,3} \bar{V}_j + \Pi_{j1,2} \bar{P}_j + \Pi_{j1,1} \int \bar{P}_j)) \right) \\ j = \{x, y, z\}$$

[Marchand, CDC'03; Johnson & Kannan, ACC'03]

$\text{sat}(\cdot)$  : fonction de saturation différentiable d'ordre 2

$\int \bar{P}_j, \bar{P}_j, \bar{V}_j$  : Intégrale de la position, position et vitesse linéaires moyennes

$\Pi_j$  : matrice de placement de pôles

$\gamma(\cdot, \cdot, \cdot)$  : fonction de niveau

## Étendue aux ailes battantes grâce à la théorie de moyennisation



# Sommaire

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## 1 Introduction

- Projets sur les drones à ailes battantes
- Contexte du travail: Projet OVMI
- Avantages - Inconvénients du vol battu
- Bilan de littérature et des contributions

## 2 Modèle simple pour la commande

- Paramétrisation du mouvement des ailes
- Modèle simplifié du drone à ailes battantes
- Calcul du modèle moyen

## 3 Commande du drone à ailes battantes

- Commande de l'attitude
- Commande de la position

## 4 Tests de robustesse

## 5 Contributions et Perspectives



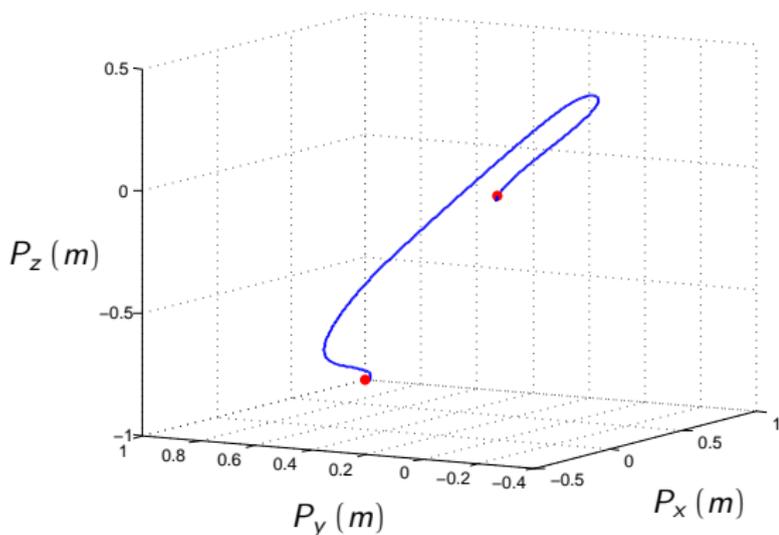
# Test des commandes sur le modèle complet

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

- Dynamique de l'actionneur considérée
- Forces aérodynamiques instationnaires considérées

## Mouvement 3D



Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

# Test des commandes sur le modèle complet

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biométrique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

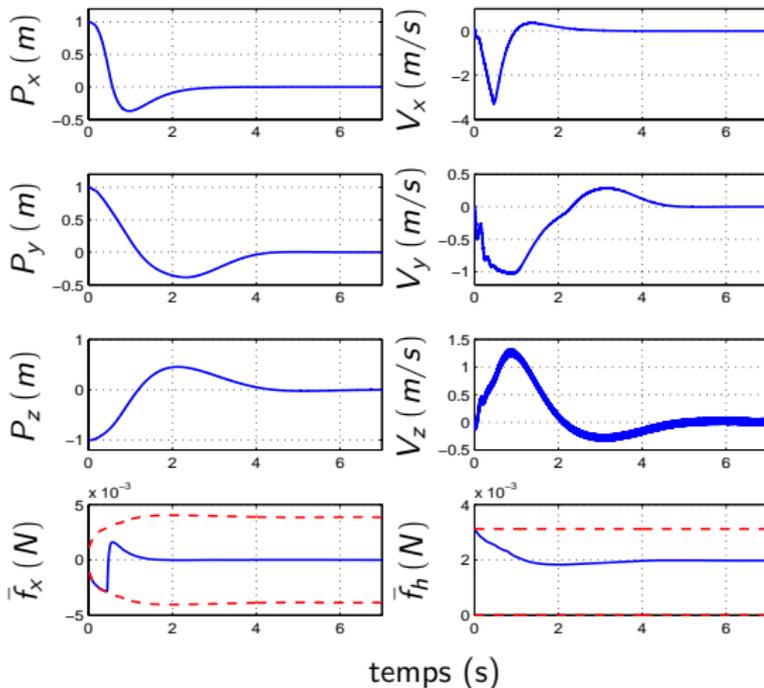
Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Position et vitesse linéaires, forces de commande



# Test des commandes sur le modèle complet

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

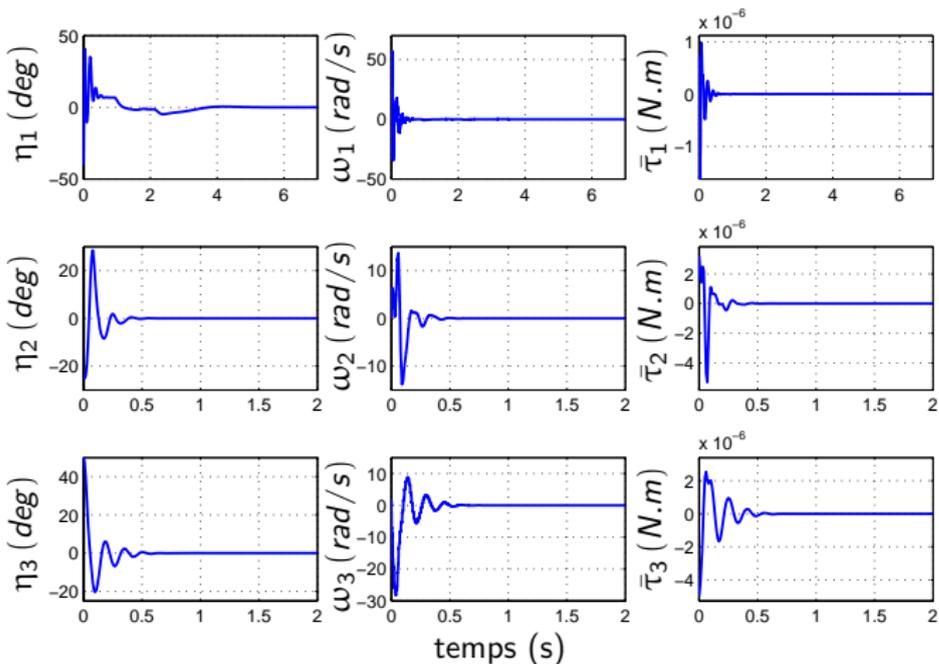
Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Angles (RTL) et vitesse angulaire, couples de commande





# Test des commandes sur le modèle complet

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

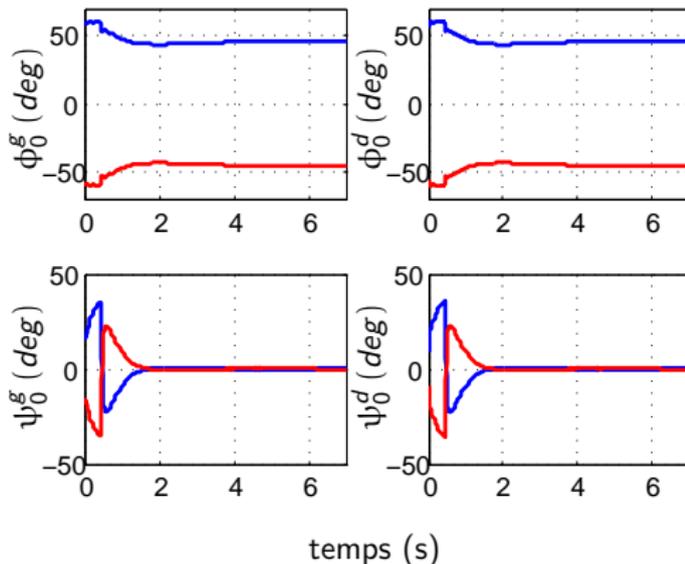
Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

## Amplitudes des angles des ailes



# Mouvement 3D

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

- Projets ailes battantes
- Projet OVMI
- Avantages
- Inconvénients
- Bilan

Modélisation

- Paramétrisation des ailes
- Modèle simplifié
- Modèle moyen

Commande

- Attitude
- Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Robustesse vis-à-vis de perturbations externes

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Poids d'une goutte de pluie varie entre  $5 \cdot 10^{-6} \text{ N}$  et  $65 \cdot 10^{-5} \text{ N}$ .

Une **petite goutte d'eau** par rapport à l'insecte est équivalente à une charge de **200 Kg** par rapport à un Boeing 747.



# Robustesse vis-à-vis de perturbations externes

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Poids d'une goutte de pluie varie entre  $5 \cdot 10^{-6} \text{ N}$  et  $65 \cdot 10^{-5} \text{ N}$ .

Une **petite goutte d'eau** par rapport à l'insecte est équivalente à une charge de **200 Kg** par rapport à un Boeing 747.

Perturbation assimilée à:

- une force d'amplitude ( $5 \cdot 10^{-3} \text{ N}$ ,  $5 \cdot 10^{-3} \text{ N}$ ,  $3 \cdot 10^{-3} \text{ N}$ )
- un couple d'amplitude ( $3 \cdot 10^{-5} \text{ N.m}$ ,  $3 \cdot 10^{-5} \text{ N.m}$ ,  $3 \cdot 10^{-5} \text{ N.m}$ )  
(dans  $\mathcal{R}^m$ ) appliquée à  $t = 7 \text{ s}$  pendant 10 périodes de battement.



# Robustesse vis-à-vis de perturbations externes

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Poids d'une goutte de pluie varie entre  $5 \cdot 10^{-6} \text{ N}$  et  $65 \cdot 10^{-5} \text{ N}$ .

Une **petite goutte d'eau** par rapport à l'insecte est équivalente à une charge de **200 Kg** par rapport à un Boeing 747.

Perturbation assimilée à:

- une force d'amplitude ( $5 \cdot 10^{-3} \text{ N}$ ,  $5 \cdot 10^{-3} \text{ N}$ ,  $3 \cdot 10^{-3} \text{ N}$ )
- un couple d'amplitude ( $3 \cdot 10^{-5} \text{ N.m}$ ,  $3 \cdot 10^{-5} \text{ N.m}$ ,  $3 \cdot 10^{-5} \text{ N.m}$ )  
(dans  $\mathcal{R}^m$ ) appliquée à  $t = 7 \text{ s}$  pendant 10 périodes de battement.

Perturbation considérée représente environ 1000 fois l'effet d'une goutte d'eau



# Test des commandes sur le modèle complet

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

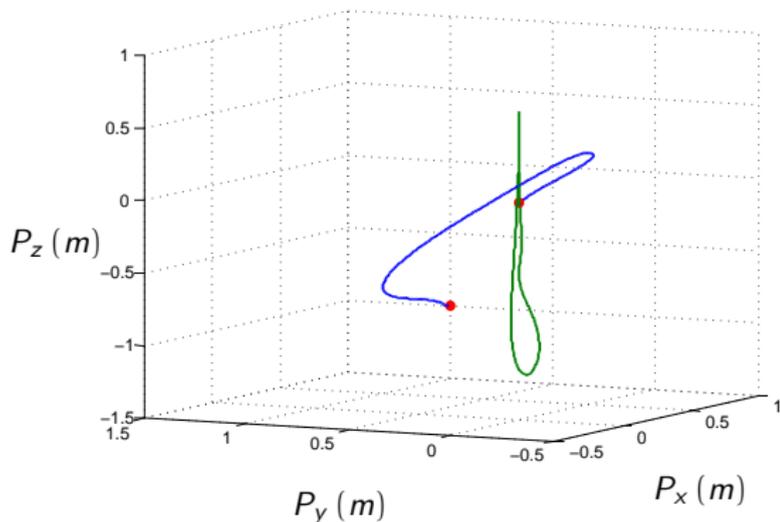
Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Mouvement 3D





# Test des commandes sur le modèle complet

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biométrique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

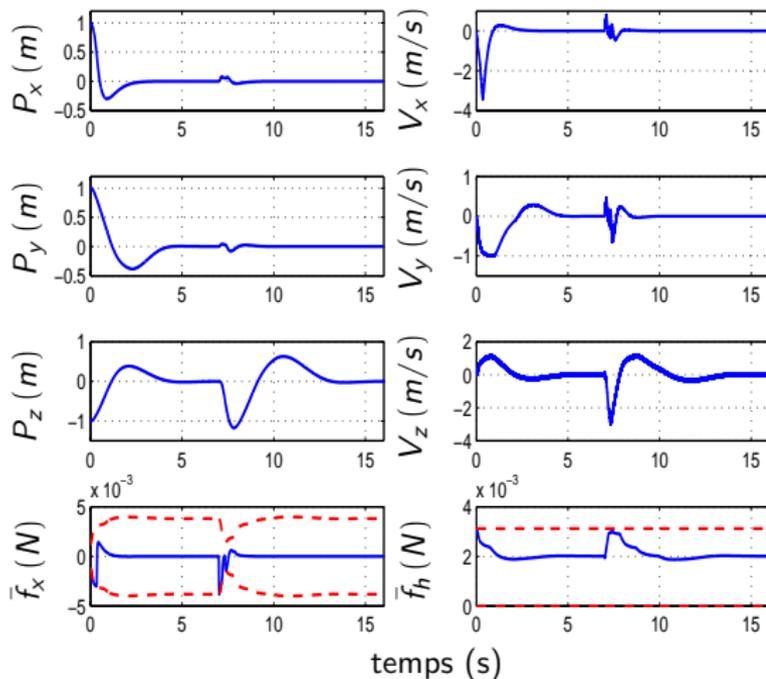
Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Position et vitesse linéaires, forces de commande



# Robustesse vis-à-vis de perturbations externes

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Angles (RTL) et vitesse angulaire, couples de commande

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

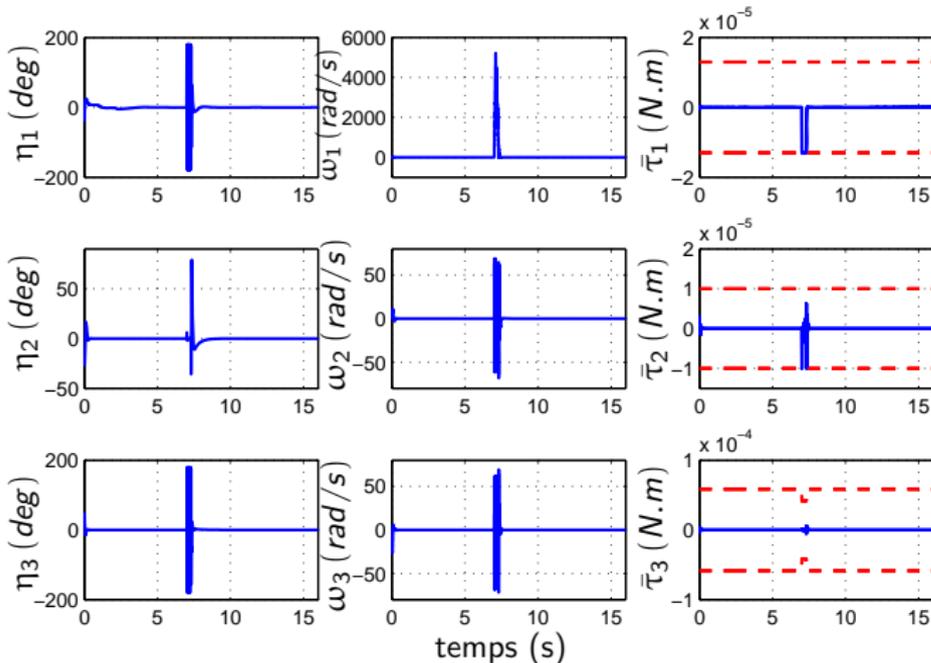
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



# Robustesse vis-à-vis de perturbations externes

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biométrique  
volant

Angles (RTL) et vitesse angulaire, couples de commande

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

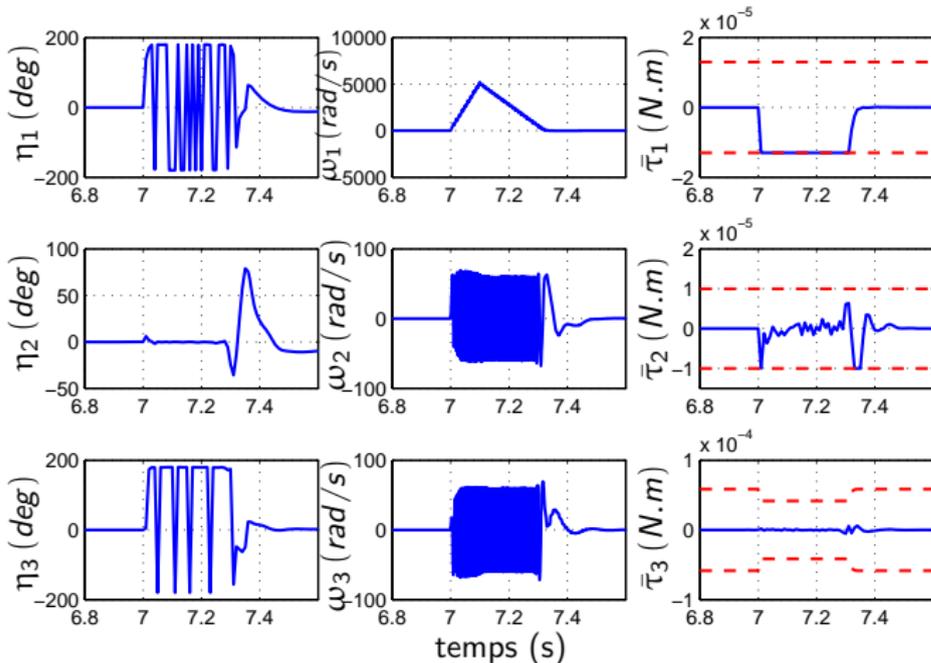
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives





# Robustesse vis-à-vis de perturbations externes

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

## Amplitudes des angles des ailes

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

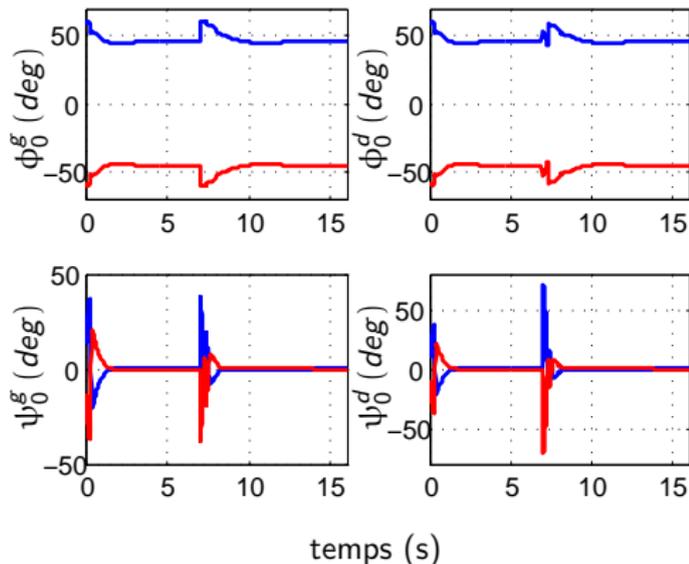
Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives





# Robustesse vis-à-vis d'erreurs aérodynamiques

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Le coefficient aérodynamique est soumis à une perturbation additive:

$$C_{pert} = C - \Delta C$$

$\Delta C$  est une variable aléatoire suivant une loi uniforme.

Sommaire

Introduction

- Projets ailes battantes
- Projet OVMI
- Avantages
- Inconvénients
- Bilan

Modélisation

- Paramétrisation des ailes
- Modèle simplifié
- Modèle moyen

Commande

- Attitude
- Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

**Effet:** Réduction du coefficient aérodynamique de 0 à 57% de sa valeur nominale.



# Robustesse vis-à-vis d'erreurs aérodynamiques

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

## Mouvement 3D

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

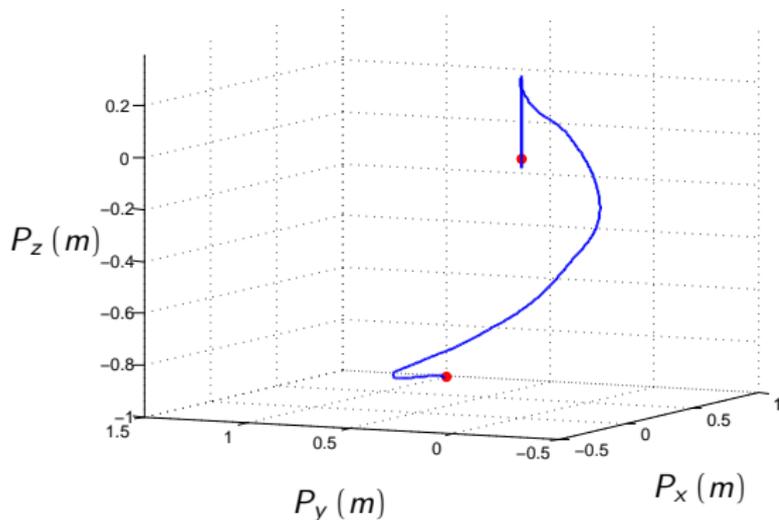
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



# Robustesse vis-à-vis d'erreurs aérodynamiques

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biométrique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

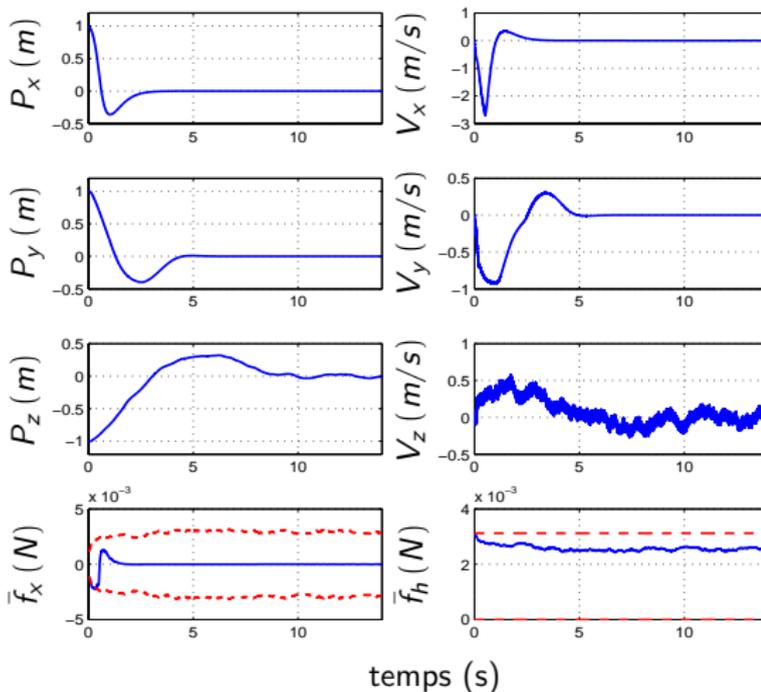
Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Position et vitesse linéaires, forces de commande



# Robustesse vis-à-vis d'erreurs aérodynamiques

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

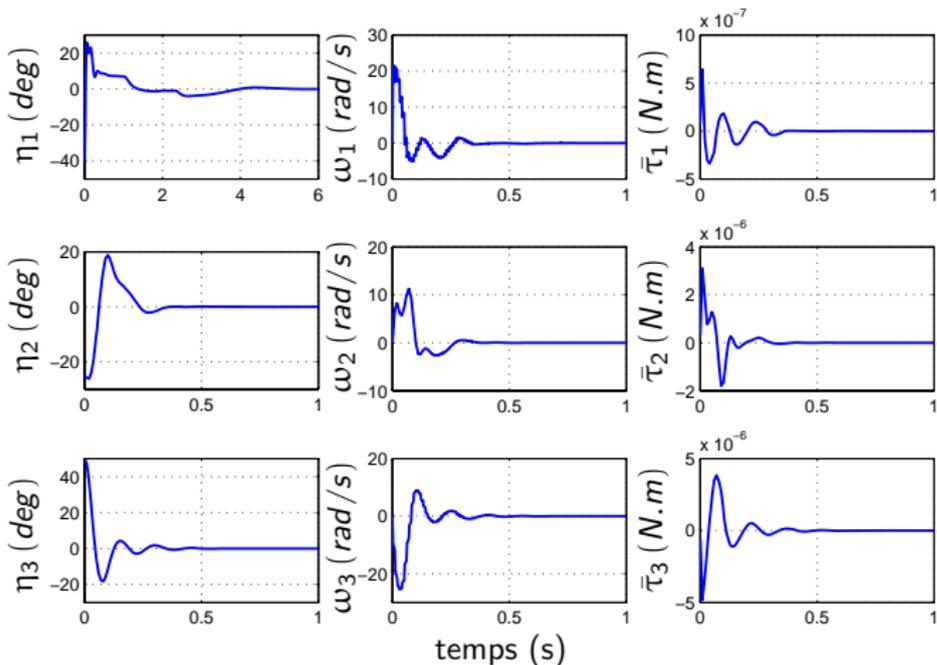
Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Angles (RTL) et vitesse angulaire, couples de commande





# Robustesse vis-à-vis d'erreurs aérodynamiques

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

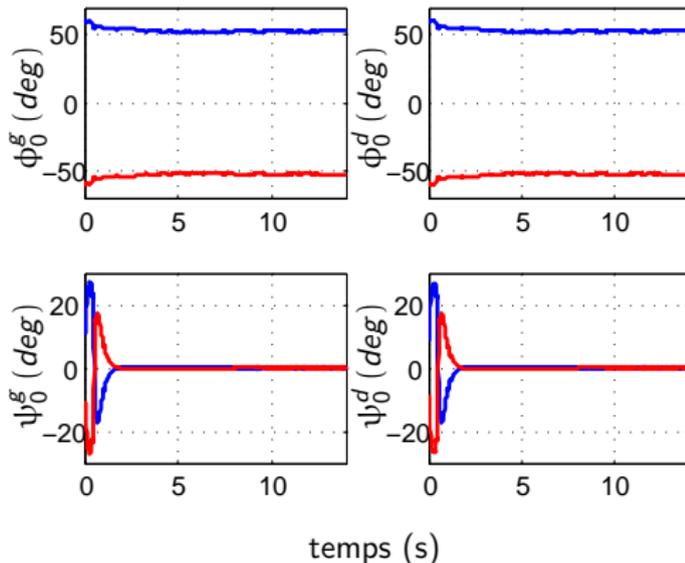
Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

## Amplitudes des angles des ailes





# Robustesse vis-à-vis d'une dissymétrie des forces aérodynamiques

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Réduction de la force développée par l'aile gauche de 10% de sa valeur nominale.

Hala Rifai

Sommaire

## Mouvement 3D

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

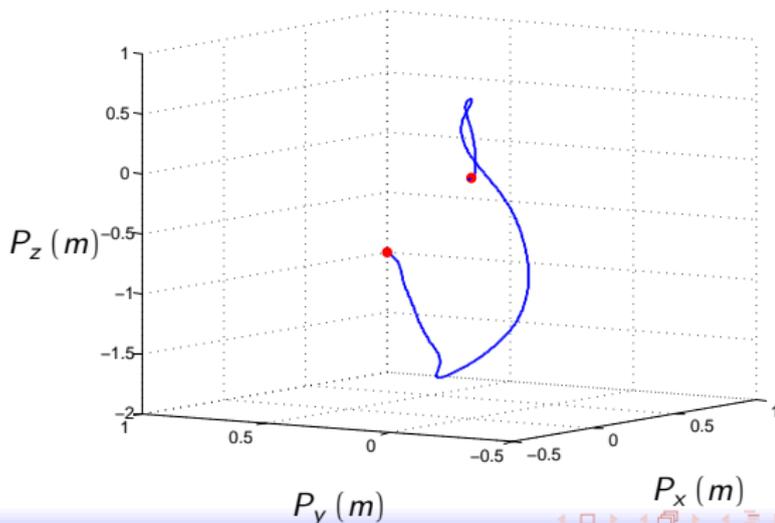
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



# Robustesse vis-à-vis d'une dissymétrie des forces aérodynamiques

## Position et vitesse linéaires, forces de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biométrique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

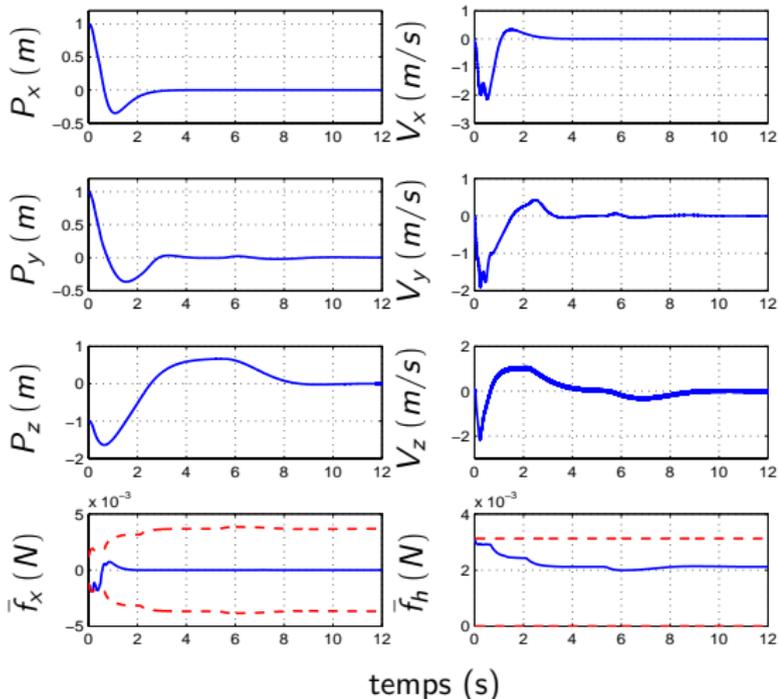
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



# Robustesse vis-à-vis d'une dissymétrie des forces aérodynamiques

Angles (RTL) et vitesse angulaire, couples de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biométrique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

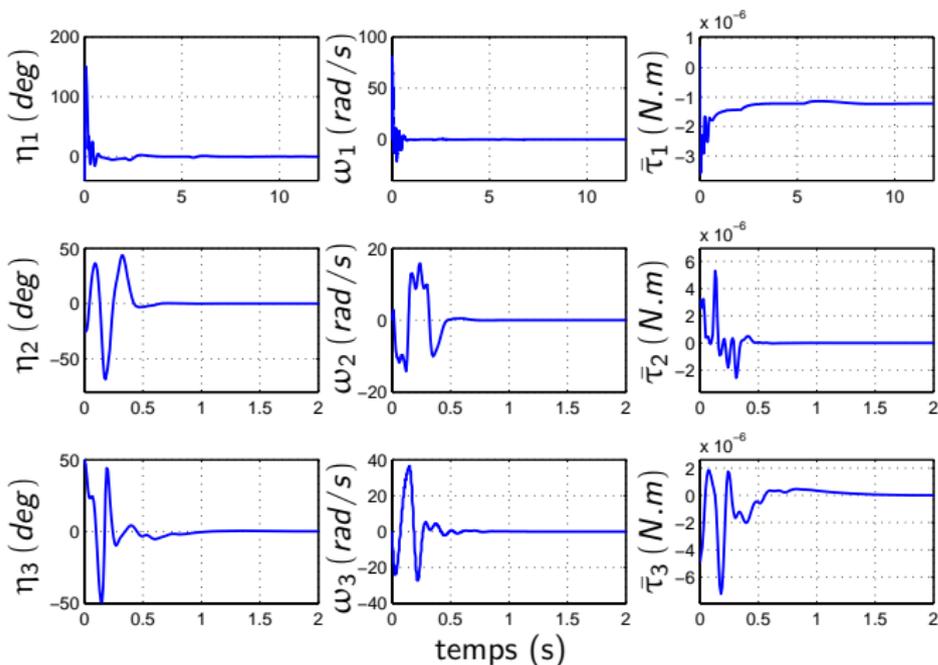
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives





# Robustesse vis-à-vis d'une dissymétrie des forces aérodynamiques

## Amplitudes des angles des ailes

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

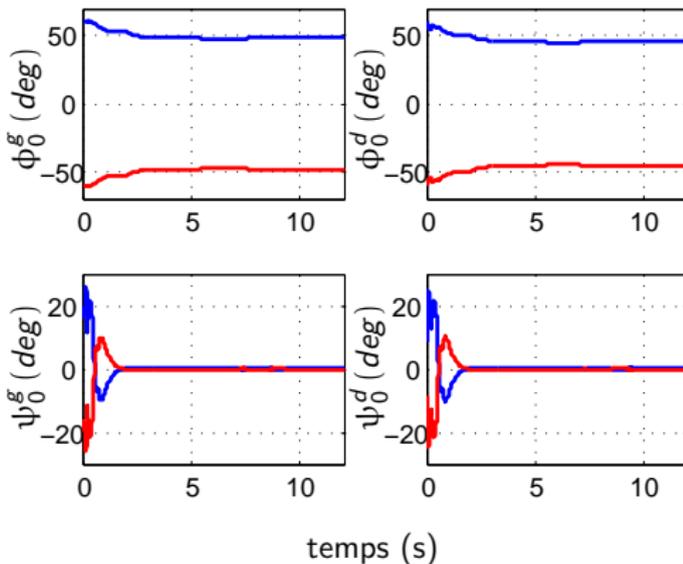
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives





# Robustesse vis-à-vis de la position du centre aérodynamique

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Erreur de  $[5, 50, 0]$  % par rapport à la valeur nominale

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

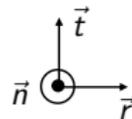
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



Position nominale du centre aérodynamique  
Position réelle du centre aérodynamique



# Robustesse vis-à-vis de la position du centre aérodynamique

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

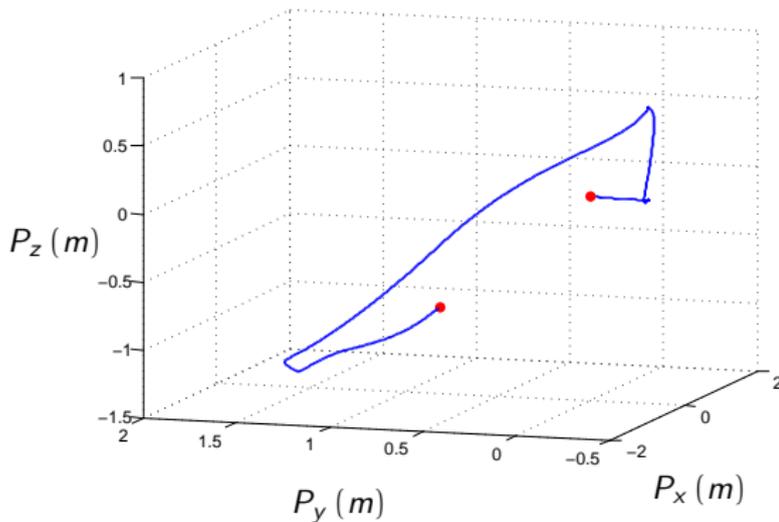
Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Mouvement 3D





# Robustesse vis-à-vis de la position du centre aérodynamique

## Position et vitesse linéaires, forces de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVML  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

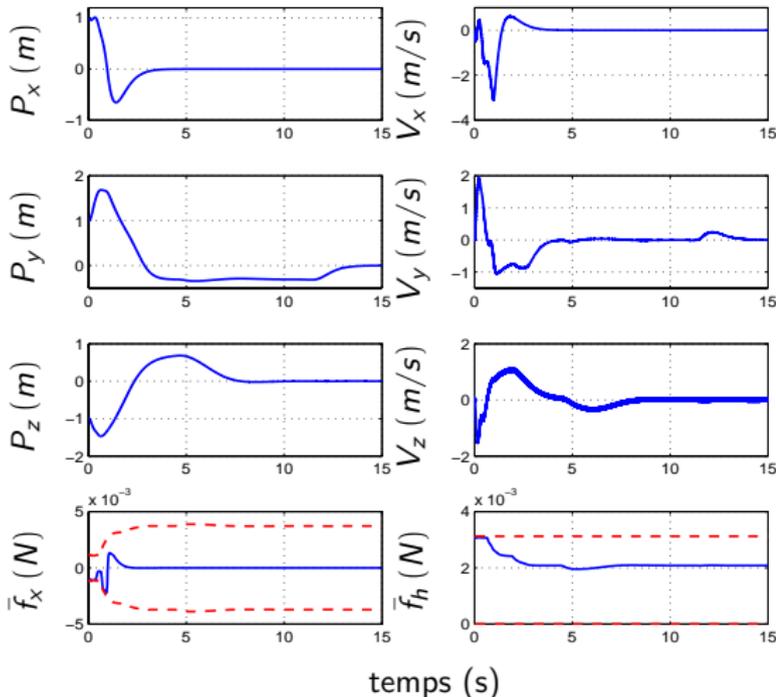
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives



# Robustesse vis-à-vis de la position du centre aérodynamique

## Angles (RTL) et vitesse angulaire, couples de commande

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

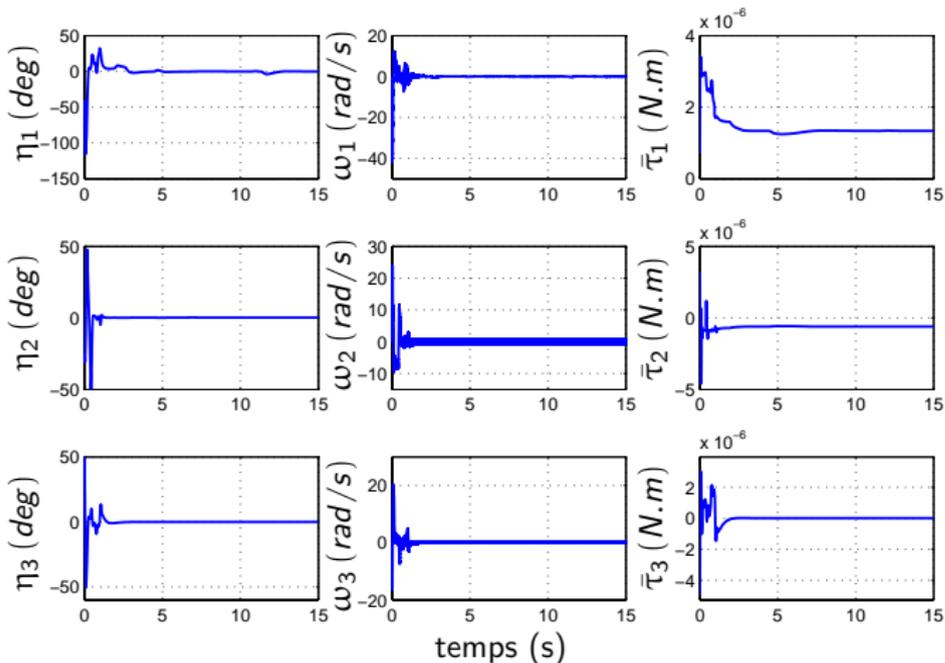
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives





# Robustesse vis-à-vis de la position du centre aérodynamique

## Amplitudes des angles des ailes

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

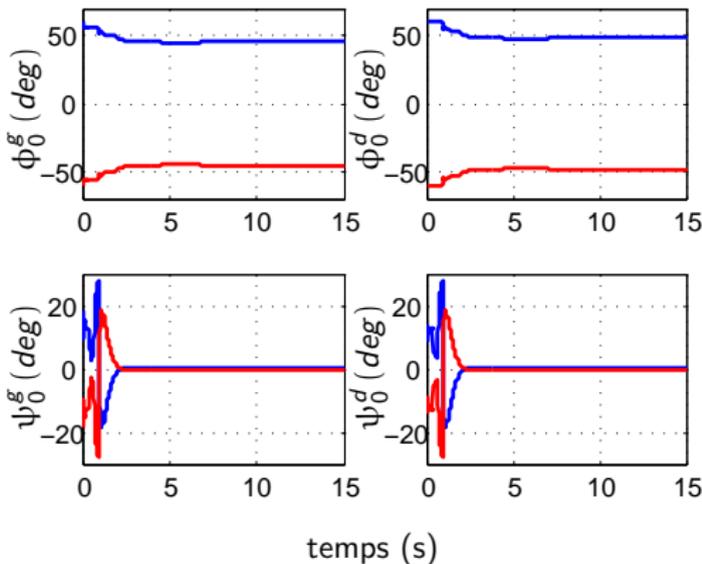
Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives





# Sommaire

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## 1 Introduction

- Projets sur les drones à ailes battantes
- Contexte du travail: Projet OVMI
- Avantages - Inconvénients du vol battu
- Bilan de littérature et des contributions

## 2 Modèle simple pour la commande

- Paramétrisation du mouvement des ailes
- Modèle simplifié du drone à ailes battantes
- Calcul du modèle moyen

## 3 Commande du drone à ailes battantes

- Commande de l'attitude
- Commande de la position

## 4 Tests de robustesse

## 5 Contributions et Perspectives



# Contributions et Perspectives

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVM1

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Contributions au modèle:

- Modèle simple du drone à ailes battantes



# Contributions et Perspectives

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVM1

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

Contributions au modèle:

- Modèle simple du drone à ailes battantes
- Equivalence entre le modèle moyen et le modèle instantané



# Contributions et Perspectives

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Contributions au modèle:

- Modèle simple du drone à ailes battantes
- Equivalence entre le modèle moyen et le modèle instantané

## Contributions à la commande:

- **Stabilisation globale** de l'orientation et de la position

# Contributions et Perspectives

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Contributions au modèle:

- Modèle simple du drone à ailes battantes
- Equivalence entre le modèle moyen et le modèle instantané

## Contributions à la commande:

- **Stabilisation globale** de l'orientation et de la position
- Commande en attitude utilisant **un nombre minimal de capteurs**

# Contributions et Perspectives

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Contributions au modèle:

- Modèle simple du drone à ailes battantes
- Equivalence entre le modèle moyen et le modèle instantané

## Contributions à la commande:

- **Stabilisation globale** de l'orientation et de la position
- Commande en attitude utilisant **un nombre minimal de capteurs**
- Commandes **bornées** (saturation des actionneurs au niveau des ailes)



# Contributions et Perspectives

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Contributions au modèle:

- Modèle simple du drone à ailes battantes
- Equivalence entre le modèle moyen et le modèle instantané

## Contributions à la commande:

- **Stabilisation globale** de l'orientation et de la position
- Commande en attitude utilisant **un nombre minimal de capteurs**
- Commandes **bornées** (saturation des actionneurs au niveau des ailes)
- Commandes à **faible coût de calcul**



# Contributions et Perspectives

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Contributions au modèle:

- Modèle simple du drone à ailes battantes
- Equivalence entre le modèle moyen et le modèle instantané

## Contributions à la commande:

- **Stabilisation globale** de l'orientation et de la position
- Commande en attitude utilisant **un nombre minimal de capteurs**
- Commandes **bornées** (saturation des actionneurs au niveau des ailes)
- Commandes à **faible coût de calcul**
- **Robustesse** vis-à-vis de perturbations, de paramètres de modèle, paramètres aérodynamiques, etc.



# Contributions et Perspectives

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Contributions au modèle:

- Modèle simple du drone à ailes battantes
- Equivalence entre le modèle moyen et le modèle instantané

## Contributions à la commande:

- **Stabilisation globale** de l'orientation et de la position
- Commande en attitude utilisant **un nombre minimal de capteurs**
- Commandes **bornées** (saturation des actionneurs au niveau des ailes)
- Commandes à **faible coût de calcul**
- **Robustesse** vis-à-vis de perturbations, de paramètres de modèle, paramètres aérodynamiques, etc.
- Commandes **indépendantes de l'inertie du système**



# Contributions et Perspectives

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

## Perspectives:

- Finalisation de l'analyse théorique de la robustesse

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Contributions et Perspectives

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

## Perspectives:

- Finalisation de l'analyse théorique de la robustesse
- Commande de la position par retour de mesure

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes

Projet OVMI

Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives



# Contributions et Perspectives

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Perspectives:

- Finalisation de l'analyse théorique de la robustesse
- Commande de la position par retour de mesure
- Couplage entre le lacet et le mouvement longitudinal (orientation de l'insecte dans la direction du vol)



# Contributions et Perspectives

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Perspectives:

- Finalisation de l'analyse théorique de la robustesse
- Commande de la position par retour de mesure
- Couplage entre le lacet et le mouvement longitudinal (orientation de l'insecte dans la direction du vol)
- Étalonnage du modèle de commande par rapport à un modèle aérodynamique plus fin



# Contributions et Perspectives

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVMI  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions  
Perspectives

## Perspectives:

- Finalisation de l'analyse théorique de la robustesse
- Commande de la position par retour de mesure
- Couplage entre le lacet et le mouvement longitudinal (orientation de l'insecte dans la direction du vol)
- Étalonnage du modèle de commande par rapport à un modèle aérodynamique plus fin
- Validation sur un modèle aérodynamique plus fin



# Contributions et Perspectives

Modélisation  
et commande  
d'un robot  
biomimétique  
volant

Hala Rifai

Sommaire

Introduction

Projets ailes  
battantes  
Projet OVM1  
Avantages  
Inconvénients  
Bilan

Modélisation

Paramétrisation  
des ailes  
Modèle simplifié  
Modèle moyen

Commande

Attitude  
Position

Robustesse

Contributions

Perspectives

## Perspectives:

- Finalisation de l'analyse théorique de la robustesse
- Commande de la position par retour de mesure
- Couplage entre le lacet et le mouvement longitudinal (orientation de l'insecte dans la direction du vol)
- Étalonnage du modèle de commande par rapport à un modèle aérodynamique plus fin
- Validation sur un modèle aérodynamique plus fin
- Test des lois de commande sur un prototype (ANR EVA)