

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	弾性翼とロバスト制御器を有するハチドリ模倣羽ばたき飛行ロボットの開発
Title(English)	Development of a hummingbird-mimetic flapping-wing aerial robot with elastic wings and a robust controller
著者(和文)	Dang Jinqiang
Author(English)	Jinqiang Dang
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12841号, 授与年月日:2024年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:田中 博人,鈴森 康一,山浦 弘,菅原 雄介,三浦 智
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12841号, Conferred date:2024/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 (工学)	Academic Degree Requested Doctor of
学生氏名： Student's Name	Dang Jinqiang		審査員主査： Chief Examiner	田中博人

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は「Development of a hummingbird-mimetic flapping-wing aerial robot with elastic wings and a robust controller」(弾性翼とロバスト制御器を有するハチドリ模倣羽ばたき飛行ロボットの開発)と題し、以下の5章からなる。

第1章「Introduction」(序論)では、本論文の研究背景と目的を述べている。すなわち、ハチドリや昆虫を規範とした小型羽ばたき飛行体には、ホバリング能力と機動能力および高いエネルギー効率が期待され、災害救助活動や環境モニタリングなどの広い応用先があるとしている。その実現の課題として、揚力の増大、姿勢制御、外乱や翼損傷への適応が述べられている。そして本研究の目的が、ハチドリを模倣した羽ばたき飛行体における揚力増大の実現と、翼が変化しても姿勢制御が可能な制御器の実現であると述べている。

第2章「Flapping mechanism and biomimetic wings」(羽ばたき機構と生物模倣翼)では、本研究で提案するラックアンドピニオン機構と2段遊星歯車減速器を用いた羽ばたき機構が説明され、減速比12と16および羽ばたき振幅 $158^\circ$ と $178^\circ$ との比較実験により、減速比16と羽ばたき振幅 $158^\circ$ が、効率、すなわち入力電力当たりの揚力を向上させることを示している。次に、伸縮性のあるシリコン翼膜を機体に接続して翼のフェザリングを少ない衝撃で制限する方法が提案され、従来の剛体ストップによる制限方法よりも、羽ばたき周波数24 Hzにおいて効率が24.2%向上し、翼1枚あたりの揚力116 mN および入力電力当たりの揚力41 mN/W を達成したことが実験により示されている。

第3章「Control mechanism」(制御機構)では、まず3つのサーボモータを用いて翼運動を変化させヨー、ピッチ、ロールの各方向のトルクを発生させる機構について述べている。すなわち、ヨー方向のトルクは、左右の翼を互いに逆方向へひねることで生じる平均抗力の左右差を利用して発生させ、ピッチ方向のトルクは、左右の翼を同方向にひねることで生じる同方向の平均抗力を利用して発生させ、ロール方向のトルクは、左右の翼膜の張力に差を与えることで生じる平均揚力の左右差を利用し、さらにサーボモータの位置の左右変化で重心をずらすことで発生させることを可能としている。次に、両翼を備えた羽ばたき機を6軸力センサに固定した実験により、羽ばたき周波数20 Hzにおいてヨー、ピッチ、ロールの各方向のトルクがそれぞれ最大1.3 mN·m, 1.2 mN·m, 1.2 mN·m 発生できることを示している。

第4章「Attitude controller」(姿勢制御器)では、まず、従来の羽ばたき機のPID (proportional-integral-derivative) フィードバック制御では外乱やモデルの不確実性に対する適応性に課題があることを指摘し、本研究では、非線形外乱オブザーバを含む3重ループのフィードバック制御により、モデルの不確実性に対応できると述べている。次に、ジンバル機構に羽ばたき機を取り付けて外乱を与える実験により、3重ループ制御がPID制御よりも、ヨー、ピッチ、ロールのいずれの外乱に対しても、姿勢回復の角速度と定常偏差のどちらにおいても優れることを示している。さらに、片翼の面積を減らした場合および両翼の面積を減らした場合でも、3重ループ制御はPID制御よりも姿勢回復性能の変化が小さく、3重ループ制御が外乱と翼面積減少に対する適応性に優れていると述べている。

第5章「Conclusions and future prospects」(結論と今後の展望)では、本研究で得られた結果を総括し、今後の展望について述べている。

以上を要するに、本論文は、ハチドリを模倣した羽ばたき飛行体において、揚力を高効率に発生する翼構造と飛行制御のためのトルク発生機構を実現し、非線形外乱オブザーバを含む3重フィードバック制御器を実装して、外乱や翼面積の変化に適応する能力を持たせたものであり、工学的および工業的に大きな貢献が期待される。

備考：論文要旨は、和文2000字と英文300語を1部ずつ提出するか、もしくは英文800語を1部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース : Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野) : Academic Degree Requested	博士 (工学) Doctor of
学生氏名 : Student's Name	Dang Jinqiang		審査員主査 : Chief Examiner	田中博人

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words )

The thesis, titled “Development of a hummingbird-mimetic flapping-wing aerial robot with elastic wings and a robust controller,” is structured into five chapters.

Chapter 1, “Introduction,” outlines the motivation behind the research, highlighting the potential applications of small flapping-wing robots, such as disaster rescue and environmental monitoring, due to their hovering and maneuvering capabilities. The primary objective of the research is to increase lift in a hummingbird-inspired flapping-wing robot and develop a controller capable of maintaining stability even with wing variations.

Chapter 2, “Flapping mechanism and biomimetic wings,” describes the proposed flapping mechanism using a rack-and-pinion system and a two-stage planetary gear reducer. Comparative experiments revealed that a gear ratio of 16 and a flapping amplitude of  $158^\circ$  improved efficiency. Additionally, the wing with a connecting membrane improved efficiency by 24.2% and lift by 8.4% at a flapping frequency of 24 Hz, achieving a lift of 116 mN per wing and 41 mN/W of lift per input power.

Chapter 3, “Control mechanism,” explains the control system utilizing three servo motors to generate torque in yaw, pitch, and roll directions. The mechanism enables attitude control by manipulating the wing roots and adjusting the center of gravity. Experimental results demonstrated that at a flapping frequency of 20 Hz, the system could generate maximum torques of 1.3 mN·m in yaw, 1.2 mN·m in pitch, and 1.2 mN·m in roll.

Chapter 4, “Attitude controller,” introduces a three-loop feedback controller with a nonlinear disturbance observer to address the limitations of traditional PID controller. The experiments demonstrate that this controller offers superior attitude recovery and adaptability to external disturbances and wing variations compared to traditional PD and PID controllers.

Chapter 5, “Conclusions and future prospects,” summarizes the findings and discusses the potential engineering and industrial applications of the developed system, highlighting its contribution to the field.

備考 : 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意 : 論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).