

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04364

研究課題名（和文）鳥類の気流に合わせた羽ばたきの変化および樹枝への着陸のメカニズムの解明

研究課題名（英文）Studies on changes in wing flapping in response to air currents in birds and the mechanism of landing on tree branches

研究代表者

大竹 博（Ohtake, Hiroshi）

九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授

研究者番号：60377017

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：陸上や樹上で生活する陸鳥は地上で突発的に乱気流が発生しても墜落することなく飛行できる機動性能を有する。また、樹枝へのピンポイント着陸ができる強靱な脚部を持つ。本研究では、陸鳥の機動性能、脚による着陸の実現を目指し、令和2～4年度の3年間で以下の研究成果を得た。ツイストドライブによる筋構造を模倣したフラッピング動作を実現した。2つのツイストドライブによるフラッピングとフェザリングの同期動作を実現した。エアフローセンサアレイによって飛行ロボット周りの風向を推定し、風上に向かう操舵制御を実現した。鳥の脚の筋骨格系の知見を取り入れた把持ハンドを開発し、樹枝を安定して把持することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球環境に適合したエネルギー効率の良い飛行ロボットを実現するためには飛行生物をよく知る必要がある。しかし、飛行生物である鳥類の複雑な翼運動のメカニズムや飛行以外の機能を工学的に再現することは難しく、研究が進んでいない。本研究課題の遂行によってその一端を切り開くことができた。本研究で取り組んだ筋骨格系の模倣や風の計測および風を利用した飛行制御、樹枝に着陸できる脚の開発やそれらの研究成果は、地球環境に適合したエネルギー効率の良い飛行ロボットの実現に繋がっていきと考えている。

研究成果の概要（英文）：Land birds that live on land or in trees have mobility that allows them to fly without crashing even if turbulence suddenly occurs. They also have strong legs that enable pinpoint landing on tree branches. In this research, we aim to achieve the mobility performance of land birds and landing on tree branches by legs, and obtained the following research results in the three years from 2020 to 2022. 1) Development of a flapping robot that mimics the muscle structure of birds using a twistdrive mechanism, 2) Achievement of synchronous operation of flapping and feathering by two twistdrives. 3) Estimation of the wind direction around the flying robot by the airflow sensor array, and control steering toward the windward direction, 4) Development of a grasping hand which can stably grasp tree branches incorporating knowledge of the musculoskeletal system of the legs of birds.

研究分野：バイオミメティクス

キーワード：羽ばたき飛行ロボット 筋骨格構造 ツイストドライブ 脚ロボット 風向・風速の推定

## 1. 研究開始当初の背景

近年、生物の動きや機能を模倣する生物規範型ロボットや生物模倣型ロボットが世界中で研究されている。その中でも本研究課題では飛行生物に注目した。飛行する鳥は昆虫に比べて質量が大きく、粘性力よりも慣性力の影響を大きく受ける。鳥は翼を上下に動かし、空気を後方に押し出すことで前進する推力を得る。そして、前方に推進することで翼に風を当て、重力に打ち勝つための揚力を生み出し、飛行する。鳥類は進化の末にたどり着いた、地球上で飛行を伴った生活を行うための最適な形状と機能を有していると言える。

鳥類の複雑な翼運動のメカニズムや飛行以外の機能の解明は、生物学や動物解剖学の分野で古くから研究が行われているが、それらの人工的な再現は工学分野の領域となる。近年になってようやく、エネルギー密度の高い軽量の電池や軽量・高強度材料の登場、MEMS技術の進展、小型・高性能モータの開発によって、飛行できる羽ばたき翼機が開発されるようになった。単純に翼を上下に動かす羽ばたき動作による飛行のメカニズムは解明されてきており、ロボットによる羽ばたき飛行が実現している。しかし、鳥類のより複雑な飛行・機能の再現に関しては研究が進んでいない。

## 2. 研究の目的

飛行する鳥類は、水辺に生息する水鳥、海洋の近くに生息する海鳥、陸上や樹上で生活する陸鳥に分類され、生態や飛行特性、機能が異なる。本研究課題では陸鳥に注目した。陸鳥は地上で突発的に乱気流が発生しても墜落することなく飛行できる機動性を有し、また滑空によってエネルギー消費を抑えて長距離移動もできる。地上では二足歩行し、また樹枝へのピンポイント着陸、地面や樹枝を蹴って短距離離陸ができる強靱な脚部を持つ。

本研究の目的は、生物学や動物解剖学の分野で得られた鳥類の筋骨格系やセンシング機能に関する知見、特に、翼の動作や気流の感知、脚構造に関する知見を取り入れた生物規範型ロボットを再現し、工学的な観点からこれらのメカニズムや機能を解明することである。特に、本研究課題では、鳥類の筋骨格系、気流の感知、樹枝へのピンポイント着陸に注目した。

## 3. 研究の方法

本研究課題では、以下の4つの点について研究を遂行した。

### (1) 筋構造を模倣した羽ばたき機によるフラッピング動作の実現

鳥は振り下げ時と振り上げ時で使う筋肉が異なり、無駄なエネルギー消費や重量の増加を防ぎ、効率の良い運動を行っている。ツイストドライブの原理を利用して筋構造を模倣したフラッピング動作の実現を試みた。

### (2) 筋骨格系を模倣した多自由度羽ばたき翼を持つ飛行ロボットの実現と動作の検証

ツイストドライブによる翼の駆動アクチュエータを体幹部に配置し、関節部の駆動アクチュエータは翼の根元に取り付けることで翼の慣性モーメントを小さくし、筋構造だけでなく、骨格系も模倣した2自由度を持つ羽ばたきロボットの実現を試みた。

### (3) フローセンサを用いた機体周りの流れ場の推定と流れに合わせた羽ばたき動作の検証

複数のエアフローセンサを用いて、周囲の気流の流れを推定した。また、エアフローセンサを飛行ロボットに取り付け、周囲から送風機で風を当て、機体周りの風向を推定した。さらに、操舵制御によって風上に向かって移動させることを試みた。

### (4) 鳥類の脚構造の知見を取り入れた把持ハンドの実現と樹枝へのピンポイント着陸の検証

鳥の脚の筋骨格系の知見を取り入れた把持ハンドを開発した。把持ハンドの上に飛行ロボットを取り付け、樹枝を把持して安定して静止させること、および、把持ハンドを取り付けた状態での羽ばたき飛行ロボットの実現を試みた。

## 4. 研究成果

### (1) 筋構造を模倣した羽ばたき機によるフラッピング動作の実現

初めに、翼の上下運動を実現するための回転力の計算モデルおよびツイストドライブに必要な引張力を導出する計算モデルを構築し、それらに基づき、ツイストドライブ用モータに必要なトルクと回転速度を算出した。当初の想定では、翼の振り下げと振り上げでは必要な力が異なり、大きさの異なるモータを選定する必要があると考えていたが、計算結果より、翼の振り下げと振り上げでは、ほぼ同等のモータが必要であることが分かった。次に、この結果に基づき、モータを選定し、図1に示すツイストドライブ機構を用いた羽ばたき機構を設計した。最後に、設計に基づき、図2に示す実機を製作し、フラッピング動作を検証した。ツイストドライブ機構を駆動したところ、図3に示すように、上側は36°まで振り上げることができ、下側は53°まで降り下げることができた。ツイストドライブ機構を用いて筋構造を模倣したフラッピング動

作を実現した。

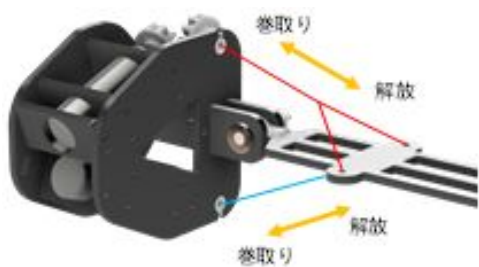


図1：ツイストドライブ機構を用いた羽ばたき機構（CAD 図）



図2：ツイストドライブ機構を用いた羽ばたき機構（実機）



図3：フラッピング動作の様子

（2）筋骨格系を模倣した多自由度羽ばたき翼を持つ飛行ロボットの実現と動作の検証

フラッピング運動だけでなく、フェザリング運動も取り入れた機体の設計・製作を行った。ツイストドライブによる翼の駆動アクチュエータを体幹部に配置し、フェザリングの駆動アクチュエータは翼の根元に取り付けることで翼の慣性モーメントを小さくし、筋構造だけでなく、骨格系も模倣した2自由度を持つ羽ばたきロボットを設計・製作した。当初のフラッピング運動とフェザリング運動は非常に遅かったが、ツイストドライブのワイヤの素材や径の検討および効率的な力の伝達が行われるように機構の見直しを行った。図4に骨格構造が分かるCAD図を、図5に製作した機体を示す。フラッピングは2Hzでの動作を、フェザリングは0.17sでの動作を実現した。これにより、フェザリング運動を織り交ぜたフラッピング運動が実現できるようになった。また、フラッピングとフェザリングの駆動システム内のコンピュータ間で通信を行うことでタイミングを合わせ、フラッピングとフェザリングの同期動作に成功した。図6に、同期動作の様子を示す。



図4：フラッピングおよびフェザリング機構（CAD 図）

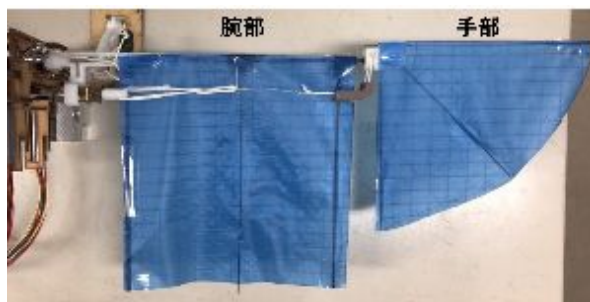
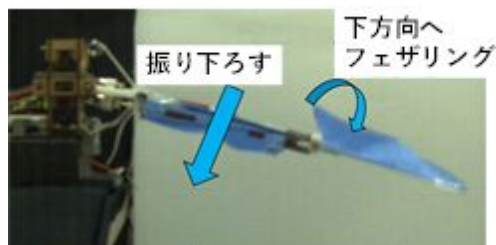


図5：フラッピングおよびフェザリング機構(実機 .翼あり)



(a)振り上げ



(b)振り下ろし

図6：同期動作の様子

### (3) フローセンサを用いた機体周りの流れ場の推定と流れに合わせた羽ばたき動作の検証

飛行ロボットの周囲の流れ場の推定を行うために、小型エアフローセンサを用いて、風向の推定を行った。図7に示すように、3つのエアフローセンサの向きをいろいろ変えて設置し、正面から送風機で風を送り、センサの向きの違いによるセンサの出力値の違いを比較し、風向の推定ができることを確認した。次に、エアフローセンサを用いて、図8に示すように、飛行状態を模擬して2方向からの風を当て、強い風の方向を推定することができることを確認した。最後に、図9に示すようにエアフローセンサアレイを飛行ロボットに取り付けて、図10に示すように、地面を走行させ、送風機を用いて周囲から風をあて、強い風の吹いている方向を感知し、自動的に舵を切って風上に向かっていくシステムを開発した。今後は、羽ばたき飛行ロボットに搭載し、羽ばたき飛行中に、自動的に風上に向かわせることができるかを検証する。風上に向かうことで対気速度が増し、あまり羽ばたかなくても飛行を維持できるかを検証する。これにより、エネルギー効率の良い飛行の実現が期待できる。



図7：フローセンサの検証

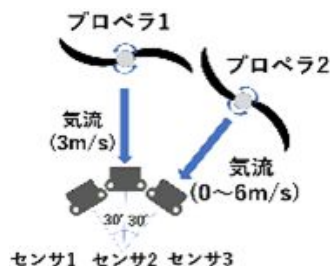


図8：2方向からの計測



図9：飛行ロボットへの搭載

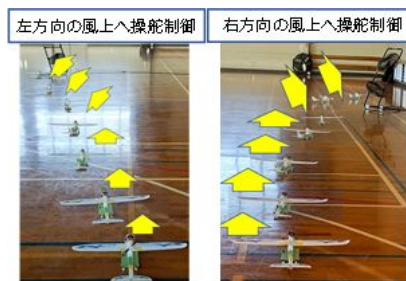


図10：自動操舵実験の様子

### (4) 鳥類の脚構造の知見を取り入れた把持ハンドの実現と樹枝へのピンポイント着陸の検証

初めに、鳥の脚構造の調査を行った。鳥類の趾の構成や爪の形状の調査を行い、枝などの把持に適した形として、三前趾足と鍵爪を脚構造に採用した。図11に示す三前趾足の構造、鍵爪、腱鞘の固定機構を取り入れた脚ロボットを試作し、棒を使い把持性能を検証した。静かに固定した状態では図12に示すように十分な把持能力があることを確認した。上方から落下させたところ、把持が成功することもあるが、鍵爪や腱鞘の固定が機能しないときもあり、安定した把持を行うためには更なる改良が必要であることが分かった。

次に、脚機構の構造や設計の見直しを行い、図13に示す把持力を強化した脚機構を製作した。これにより安定した把持を行えるようになった。また、脚を取り付けた状態での羽ばたき飛行ロボットの飛行可能性について検討するために、ラジコンの羽ばたき飛行ロボットに脚を取り付け、飛行可能な脚の取付位置の検討と尾翼操作による羽ばたきから着陸動作への手動での遷移について動作確認を行った。操縦者の操作で頭上げの状態に移行し、その後、脚から落下させることが可能であることを確認した。

最後に、再度、脚機構の設計を見直し、羽ばたき飛行ロボットに脚を取り付けるのではなく、脚構造を組み込んだ羽ばたき飛行ロボットを一から設計した。脚機構では膝と踵を介して腱を引っ張ることで趾を曲げ、枝を把持していたものを、踵だけで把持を行えるように変更した。これにより全体の軽量化を実現した。軽量化の効果によって、脚機構を取り付けた機体が飛行できることを確認した。しかし、樹枝へのピンポイント着陸はまだ実現できていない。現在は手動操作で羽ばたき機を操縦しているが、手動操作では安定して樹枝に近づくことが難しいため、小型カメラを用いたビジュアルフィードバックによって樹枝に接近し、樹枝への着陸に挑戦していく。

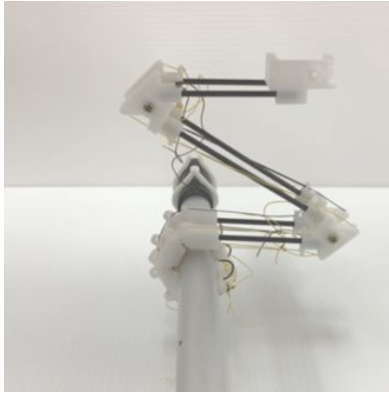


図 1 1 : 脚ロボットの試作機



図 1 2 : 安定に把持している様子

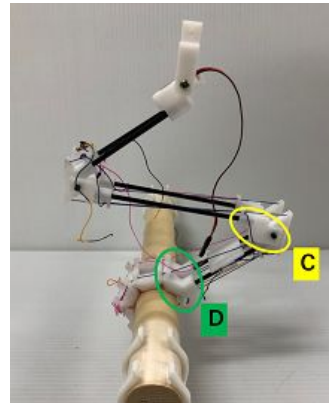
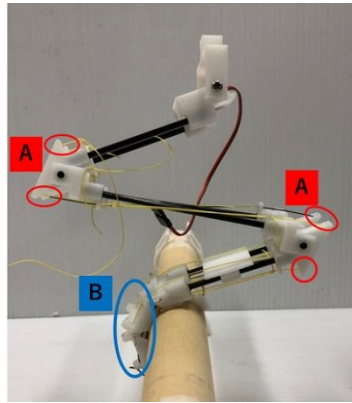


図 1 3 : 把持力を強化した脚機構

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 寺迫龍之介, 大竹博
2. 発表標題 フローセンサを用いた気流の計測と飛行ロボットの操舵制御に関する研究
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Jun Iwao, Hiroshi Ohtake
2. 発表標題 Synthesis of Drive Systems of Flapping and Feathering Motions for Bird-like Robot using Twist Drive Mechanism
3. 学会等名 2023 International Conference on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Jun Iwao, Hiroshi Ohtake
2. 発表標題 Development of flapping robot achieving both flapping and feathering motions using twist drive mechanism
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋芳史聖, 大竹博
2. 発表標題 羽ばたき飛行ロボットの樹枝への着陸を目的とした把持脚機構の開発
3. 学会等名 第41回計測自動制御学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福原海, 大竹博
2. 発表標題 把持・開放機構を搭載した後肢の開発と樹枝からの飛び立ちに向けた飛行試験
3. 学会等名 第41回計測自動制御学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松浦琴子, 大竹博
2. 発表標題 複数の小型フローセンサによる飛行ロボットのための風速と風向の推定
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大竹博
2. 発表標題 青空高く羽ばたく鳥型ロボットの開発を目指して
3. 学会等名 第24回日本知能情報ファジィ学会九州支部学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大竹博
2. 発表標題 鳥型羽ばたき飛行ロボットに関する研究
3. 学会等名 2022年度研究集会「生物流体力学と生物運動」（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中天太, 大竹博
2. 発表標題 樹枝への着陸を目的とした鳥型ロボットの後肢の開発と制御
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩尾潤, 大竹博
2. 発表標題 鳥の筋骨格構造を模倣した羽ばたきおよび捻り運動の実現
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大竹博
2. 発表標題 鳥型ロボットの開発 - 羽ばたき飛行から脚による離着陸まで -
3. 学会等名 エアロ・アクアバイオメカニズム学会第44回定例講演会(招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	田中 一男  (Tanaka Kazuo)  (00227125)	電気通信大学    (12612)	



6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	岩尾 潤  (Iwao Jun)	九州工業大学  (17104)	
研究協力者	松浦 琴子  (Matsuura Kotoko)	九州工業大学  (17104)	
研究協力者	寺迫 龍之介  (Terasako Ryunosuke)	九州工業大学  (17104)	
研究協力者	田中 天太  (Tanaka Tenta)	九州工業大学  (17104)	
研究協力者	高橋 芳史聖  (Takahashi Yoshimasa)	九州工業大学  (17104)	
研究協力者	福原 海  (Fukuhara Kai)	九州工業大学  (17104)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関