

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04306

研究課題名(和文) トビヘビの滑空メカニズムの解明と滑空移動体への工学的応用

研究課題名(英文) Clarification of Gliding Mechanism of the Flying Snake and Engineering Application for Aerial Robots

研究代表者

程島 竜一 (Hodoshima, Ryuichi)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10432006

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)：本研究課題では、トビヘビの滑空メカニズムの解明とその滑空原理の工学的応用を目指して、4つのテーマを実施した。具体的には、1. 数理モデルによるヘビの主要な滑空動作に関する力学特性の解明、2. ロボットに適した滑空時の制御則の構築、3. トビヘビを規範とした軽量滑空ヘビ型ロボットの開発、4. 滑空性能の妥当性の検証およびトビヘビの滑空技術による新たな滑空技術の確立、である。これらの結果から、ある速度以上での蛇行運動により滑空効果がロボットに発現し、蛇行振幅や姿勢変化などがトビヘビと同様の傾向を持つことが明らかになった。これらの研究成果はROBOMECH等で発表され新聞などメディアでも取り上げられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の滑空を行う生物は左右対称の翼を用いて飛行中に滑空形態を変更しない静的滑空を行うが、トビヘビは紐状である身体を蛇行させ形態を積極的に変更させて翼の機能を果たす動的滑空を行うため、トビヘビの滑空技術は従来の翼による滑空技術とは一線を画す革新的な技術である。トビヘビの滑空技術の核となる蛇行運動をモデル化して解析し滑空ヘビ型ロボットの制御法の基礎を構築しただけでなく、生物学におけるトビヘビの研究においても工学的なアプローチから議論を深めることができた。また、トビヘビの滑空に関する技術を工学的に応用することにより、新たな滑空移動体のための離陸技術や操舵技術を検討することができた。

研究成果の概要(英文)：The following four themes were performed to elucidate the aerial gliding mechanism of flying snakes and to apply the gliding principle to robotics: 1. Elucidation of the dynamics properties of the snake's major gliding motion using a gliding snake model, 2. Construction of gliding control methods for a gliding snake-like robot, 3. Development of a lightweight gliding snake-like robot, and 4. Validation of gliding performance and application using the gliding technique of flying snakes. These results showed that the gliding effect were produced in the simulation model and robot by a serpentine motion above a certain speed, and that the simulation model and robot had similar tendencies to flying snakes in amplitude of the serpentine motion and changes in posture. These results were presented at ROBOMECH and other conferences and were covered by newspapers and other media.

研究分野：ロボット工学

キーワード：トビヘビ 滑空メカニズム バイオミメティクス ヘビ型ロボット 機構設計 滑空運動制御 滑空技術の工学応用

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ヘビは手足の様な運動器官がない単純な紐の形状にもかかわらず、自身の身体を蛇行させ進行波を生成することで、不整地移動、遊泳、木登り等の多様な運動を実現できる。この蛇行運動は機構的に実現し易いため、ヘビを模したヘビ型ロボットが半世紀にわたり世界中で研究され多くのロボットが開発されている。近年ではインフラ点検やレスキュー活動などへの応用研究も盛んである。

多くの運動を実現可能なヘビ(ヘビ型ロボット)であるが、東南アジアには空中を滑空するトビヘビと呼ばれる特異な種が存在する。トビヘビは身体を大きく蛇行させる運動と落下時の速度を利用することで、空気抵抗を増加させて揚力を生み出し、時には水平距離で 100 m もの距離を滑空する。近年、トビヘビは多くの研究者の興味を引き付けており、生物学の観点から滑空時の姿勢や体幹の形状、体幹の形状と空力特性、滑空シーケンスに関する観察などが報告されている。しかしながら、トビヘビが落下中に身体を蛇行させることで空中を滑空できるのはなぜか? という疑問への明確な答えはなく、現状では基本的な理解のみに止まっている。そこで、トビヘビの動的滑空を実現させている滑空メカニズムを解析し、トビヘビの機械モデルを用いて工学的に実証すると共に、その滑空原理を優れた滑空・飛行性能を有する飛行ロボットの開発などへ工学的に応用することを考えるに至り、これが本研究の核心となった。

従来の飛行や滑空を行う生物は左右対称の翼を用いるが、トビヘビの滑空技術は紐状である身体が翼の機能を果たす点で、従来の翼による滑空技術とは一線を画す。トビヘビの滑空技術をロボティクスへ工学的に応用できれば、新しい機械設計論や運動制御法の確立、あるいは従来の滑空体の性能向上が期待できる。

### 2. 研究の目的

トビヘビの滑空運動に関する全体像をシステム論的に理解することを目標に、(1)数理モデリングと解析、(2)動力学シミュレーション、(3)ロボット開発と実験、(4)生体データとの比較、を実施することで多角的な研究アプローチを相補的に進め、トビヘビの滑空メカニズムにおける力学構造を明らかにし、その滑空原理を工学へと応用することを研究目的とする。通常時トビヘビの身体は従来のヘビ形状であるが、滑空中は肋骨の動作により自身の身体を扁平に変形させ、身体を極端な S 字状に蛇行させることで「形態可変な翼」の様に滑空を行っている。この蛇行運動は複雑な運動であるため、トビウオ等の翼による滑空生物よりもトビヘビは高度な滑空制御を行っていると考えられるが、明確な原理は詳細には分かっていない。本研究で実現を目指す滑空ヘビ型ロボットでは(1)従来の滑空ロボットでは離陸や滑空に脚や翼などの機構が別々に必要であることに対して、従来のヘビ型ロボットの構造で、離陸、滑空、着陸の一連の動作を全て統一的に実現できる、(2)滑空ロボティクスとしての新たな分野を構築し工学に貢献できるだけでなく、詳細不明なトビヘビの滑空運動に工学的なアプローチによる説明を与えられる点で生物学にも寄与できると考えた。

本研究では、トビヘビの滑空メカニズムを工学的なアプローチにより解明し、その滑空技術を工学的に移動体に応用することを目指す。まず、トビヘビの滑空メカニズムを数理モデルと動力学シミュレーションにより解明する。次に得られた成果によりトビヘビの機械モデルを開発し、滑空実験を行って蛇行運動の振幅、波長、滑空角度、滑空姿勢などの実験データを取得し、生体データと比較してデータの妥当性および相違を検証する。最後に、トビヘビの滑空力学を基にした発展的な滑空技術も検討する。

### 3. 研究の方法

#### (1) トビヘビの数理モデルの構築と運動解析

これまで応募者はヘビ型ロボット研究において回転関節により直列に連結した剛体リンクの連鎖である節体幹モデルを解析に用いてきた。この節体幹モデルを基本としてトビヘビの数理モデルを構築し、シミュレーションにより滑空の力学特性を明らかにする。トビヘビの生体運動データを参考に、図 1 の様な滑空シーケンスに関する力学特性を MATLAB により解析する。滑空解析では、トビヘビの断面形状と空力特性についての報告を参考に作成した簡易的な力学モデルを特別に用いる。

#### (2) 節体幹モデルによる滑空ヘビ型ロボットの滑空制御方法の確立

(1) のトビヘビの滑空解析を基に、ロボットの滑空運動を制御する方法を確立する。滑空時のロボットの蛇行運動を関節角度や関節トルクを入力として制御するシミュレーションを行い、安定性、滑空距離、飛距離などの観点から比較する。そして、良好な結果が得られた制御手法を選択、または両者を混在させる制御手法を改めて開発する。

#### (3) 滑空ヘビ型ロボットの開発(図 2, 以下の(a)~(c)は開発要素)と基礎滑空実験

##### (a) 関節機構

軽量化のため、模型飛行機で用いられる超小型モータを採用する。平面モデル用のヒンジ関節、

および立体モデル用の自在継手関節を検討しロボットを開発する。

(b)体幹構造

通常トビヘビの体幹断面は楕円形状であるが、滑空中は肋骨が広がることで三角形に変形し翼に近い機能を発揮する(図1右上)。そのためトビヘビの体幹断面を規範とした胴体構造を開発する。

(c)センサ系と構造系

滑空中の位置姿勢計測用の小型加速度センサとジャイロ、データ処理やモータ制御のためのワンチップマイコンを搭載する。また機体構造として軽量のカーボン、機能性樹脂、フィルム等を採用する。

(4) 生体データとの比較による妥当性の検証

(3)の基礎滑空実験等において、ジャイロ等の機体搭載センサ、およびロボット外部に設置した運動解析装置によりロボット運動を計測し、位置姿勢等のロボットデータを用意する。そして、トビヘビの生体データとロボットデータを比較し蛇行運動(振幅や波長)、速度、滑空角度等に関して定性的・定量的に検証する。また、この結果を参考に実験機を改良し、繰り返し実験を行う。

(5) 発展的な滑空技術の開発

滑空ヘビ型ロボットの発展的な滑空技術として、空中操舵(方向転換)、落下速度の制御、離陸技術のための跳躍運動などに関する新たな運動生成法を確立する。例えば、空中操舵に関しては局所的な体節の展開度制御、姿勢制御による慣性モーメントの制御、尾による舵取り操舵制御などを試す予定である。

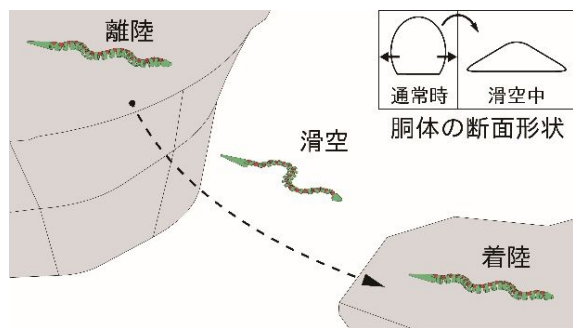


図1 ロボットの滑空シーケンス

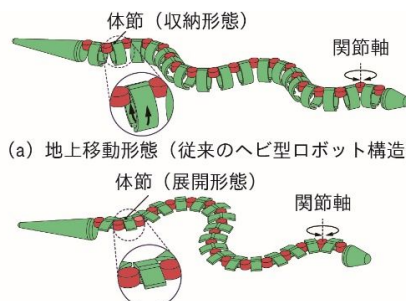


図2 滑空ヘビ型ロボットの概念

4. 研究成果

(1) トビヘビの数理モデルの構築と運動解析

トビヘビの滑空運動が体幹の蛇行運動により発現する条件や、適切な蛇行運動自体を調査するため、図3示すように節体幹による数理モデルを構築し、MATLABによるシミュレーションを行った。運動方程式ではKANE型の運動方程式を用い、ヘビ型ロボットの蛇行運動を表現するサーペノイド曲線の周波数やくねり角について調査を行った。ある初期速度を超えると滑空効果が発現すること、サーペノイド曲線の周波数が1.0Hz前後、くねり角が90度の場合に水平飛距離が最大となる傾向があることを確認した(図3および4)。

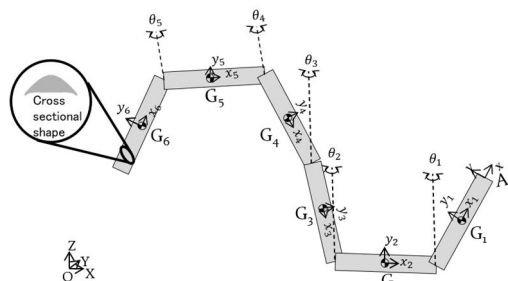


図3 滑空ヘビ型ロボットの数理モデル

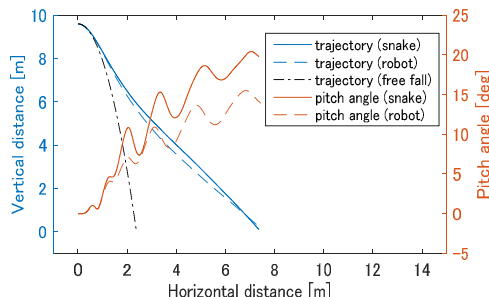


図4 滑空シミュレーション結果

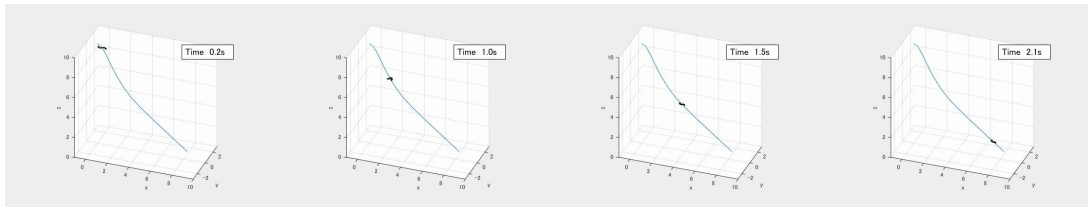


図5 滑空シミュレーションの様子

#### (2) 節体幹モデルによる滑空ヘビ型ロボットの滑空制御方法の確立

(1)で調査した蛇行運動を滑空ヘビ型ロボットで再現するために、運動解析で用いた節体幹による数理モデルを用いて蛇行運動の制御方法の核となる関節制御を検討した。角度制御およびトルク制御にて関節制御を行った結果、異なる制御構造にもかかわらず滑空運動に関しては類似の傾向が得られた。なおこれらの結果から、滑空距離と姿勢の安定化に主に関係する力学のパラメータを明らかにし、滑空ヘビ型ロボットの滑空運動は本質的に不安定であることが判明し、能動的に滑空軌道を安定化させるためには閉ループ制御系が必要になるであろうことが推測できた。そして試作機では実現容易な角度制御により関節を制御し、蛇行運動を運動学的に生成することとした。

#### (3) 滑空ヘビ型ロボットの開発と基礎滑空実験

図6に示すような滑空ヘビ型ロボットの試作機を開発した。軽量化を目指して、8gの超小型サーボモータをアクチュエータとして採用し、カーボンスパーを用いたフレーム構造と発泡ポリプロピレンを用いた外装パネルにより滑空ヘビ型ロボットの構造を構築した。開発したロボットは全長1.0m、重量350gとなった。

この開発した試作機を用いて、図7のように地上7m強の屋内高所から滑空実験を行った。試作機に初速度を与えるために定荷重ばねを用いた発射台を作成し、高所から試作機を射出させ滑空を行うものである。滑空運動の解析シミュレーションと同様にある程度の速度を超えた場合に浮力が発生し滑空運動を観察することができた。ただ、解析シミュレーションにより事前に予測できたように、滑空運動が不安定になる場面も観察された。滑空中の蛇行運動の振幅が小さく、また重心位置が計画からずれる場合に特に顕著に観察された。滑空運動の安定性に関しては、搭載した姿勢センサからのフィードバックによる閉ループ制御系を構築して将来的には改善できる見込みがある。



図6 滑空ヘビ型ロボットの試作機



図7 試作機を用いた滑空実験の様子

#### (4) 生体データとの比較による妥当性の検証

トビヘビの滑空運動の計測から、ある滑空速度において蛇行運動を行うと姿勢が安定化し滑空運動が生成され、蛇行運動の振幅やくねり角が大きくなる特性があることが知られている。これらの特性は、シミュレーションやロボット実験で観察される結果と定性的に同等であった。そこで定量的に特性を比較するために、Sochaら(J. Exp. Biol., 2006)の文献等から既に発表されている生体データを収集し、ロボットデータと比較を行った。解析シミュレーションにおいては、図4に示すように水平滑空距離や姿勢角については定量的にも同等の傾向が見られることが確認できた。また滑空中の蛇行運動の振幅やくねり角と姿勢安定性に相関が見られることも明らかになった。実験における姿勢の乱れに関しては、射出時の外乱や重心位置誤差によりpitch軸に関する姿勢が不安定な姿勢になることが主な原因であることが確認できた。

#### (5) 発展的な滑空技術の開発

発展的な滑空技術として、跳躍による狭所からの離陸、滑空時の尻尾による操舵制御を検討し

た．跳躍による離陸ではトビヘビも行うJループ形跳躍を採用し，ロボットの体幹による振り子運動と組み合わせることで跳躍に必要な速度を生成できること，および滑空時に尻尾を蛇行運動と独立して運動させることで滑空方向の操舵に寄与できることをシミュレーションにより確認した．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高木早人, 程島竜一, 琴坂信哉
2. 発表標題 滑空ヘビ型ロボットNURSE-1の開発 実験機の開発と滑空実験による基礎検証
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤勇貴, 高木早人, 程島竜一, 琴坂信哉
2. 発表標題 滑空ヘビ型ロボットの滑空運動に関するモデル構築と解析
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第27期総会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高木早人, 程島竜一, 琴坂信哉
2. 発表標題 滑空ヘビ型ロボットNURSE1号機の開発 第1報: 滑空ヘビ型ロボットの概要と滑空特化型実験機の試作
3. 学会等名 第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

報道（計1件）  
埼玉新聞，トビへビ滑空の工学的応用，2021年12月15日

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------