

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04529

研究課題名(和文) 飛行生物の運動データの特性抽出モデルに基づくバイオインスパイアード制御法の構築

研究課題名(英文) Construction of bio-inspired control method based on characteristic extraction model of flight creature's motion data

研究代表者

河辺 徹 (Kawabe, Tohru)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：40224844

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)：鳥類であるウミネコの離着陸の動画データを解析し、位置や速度を制御するメカニズムの解明とモデル化、ならびに人工飛翔体の自律離着陸飛行への応用としてモデル予測制御法を拡張した制御手法として、スケジューリング型モデル予測制御法や、ホライズン可変型モデル予測制御法の開発を行った。また、昆虫であるユスリカの群れの「蚊柱」現象の動画データを解析し、複数の小型人工飛翔体の自律飛行による協調作業への応用のために、相互作用を考慮した群れのモデル化を行った。これらの研究の中で開発したモデル化手法や制御手法を、自律走行パーソナルモビリティの障害物回避制御への展開なども行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

見逃されがちな身近な生物の優れた運動機能に着目し、数理的手法と実験的手法を駆使して、その理学的解明と工学的応用にまたがった成果を挙げた点に学術的意義がある。画像データの解析から抽出した特徴に基づく数理モデリング手法の開発と、既存の制御理論をバイオミメティクスの視点から再検証、再構築することで、実用性を高めた運動制御手法として開発したことにより、次世代の自律人工移動体全般の安全で快適かつ柔軟で高度な運動制御のための基盤技術となることが期待でき、社会的にも意義がある。

研究成果の概要(英文)：Based on the analysis of video data of takeoffs and landings of the black-tailed gull, the flight control mechanism of them is clarified and modeled, and developed an extended model predictive control method for application to the autonomous takeoff and landing flight of UAV (Unmanned Aerial Vehicle). In addition, based on video data analysis of the "mosquito column" phenomenon of swarms of the insect, Chironomidae, a model of swarm that takes into account their interaction, is derived aiming at the application to cooperative work by autonomous flight of multiple small UAV. The modeling and control methods developed in these studies have also been applied to multi-agent control problems and obstacle avoidance control for autonomous personal mobility vehicles.

研究分野：制御およびシステム工学関連

キーワード：バイオインスパイアード制御 数理モデル 特徴抽出 飛行生物 モデル予測制御 UAV 疑似ポテンシャル

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。

1. 研究開始当初の背景

生物の構造や機能を模倣した技術については、バイオメティクスとして材料開発や構造研究等の分野で多くの実用的成果が出されていた。また、バイオメティック制御については、移動ロボットの学習等に基づく環境適応型的手法などが提案されていたが、既存の制御理論をバイオメティクスの視点から再検証し、その結果を活かして新たな制御法の構築を行うような先行研究はあまり例がなかった。

2. 研究の目的

特に飛行生物を対象として、動画データに基づき優れた運動メカニズムの解明と特徴抽出によるモデル化、さらにそれらに基づいてモデル予測制御など既存の制御理論を再検証し、抽出した運動特性を組み入れた手法として構築する。これにより、人工移動体の柔軟で高度に実用的な運動制御技術として体系化すること、ならびに、バイオメティクス研究の新たな展開に寄与することが目的である。

3. 研究の方法

(1) まず、飛行生物の運動に関する画像データの収集と蓄積、ならびに解析を行うために、高解像度カメラ、3次元画像解析ソフトウェア、フィールドでのデータ収集用PC等で構成する環境を整備する。2台のステレオカメラにより飛行動作の動画撮影データを収集し、このデータから飛行軌跡や姿勢角、翼の角度等の計測や解析などを行う。複数種の飛行生物に対し、多数個体が存在する状況、風が強く吹いて着地点が動く状況等、様々な状況での運動データを収集し、各種の飛行動作メカニズムを解析する。

(2) (1)の解析結果に基づいて、各飛行動作の数理モデル化手法を構築する。まず、揚力、抗力、重力に基づく動力学モデルを導出し、3次元飛行軌跡を表現する。揚力、抗力については、人工的な翼を用いた風洞実験による既存結果も参考に、翼や羽の角度に応じて非線形に変化する揚力係数および抗力係数に基づくモデル化を行う。この際、モデルの非線形性や複雑性に起因するモデル化誤差を、深層学習等を用いて補正する機能を加えたモデリング手法も検討する。

(3) (2)で開発する数理モデルに基づいて、飛行生物ごとの各飛行動作における運動制御則を抽出し、運動制御法として体系化する。まず、単体の理想的な状況での飛行を対象に、一般的な非線形最適制御理論の枠組みでの実現可能性の検討を行う。数理モデルと実データから、評価関数の重み関数を調整して飛行データと合致する制御入力の変換を行い、最適制御理論やモデル予測制御による飛行運動の実現性を検証し、運動制御法として構築する。さらに、複数個体での協調制御問題等への応用も視野に入れて、構築した制御法のロバスト性を高める拡張や改良を行い、人工移動体の安全で快適かつ高度で柔軟な運動制御技術としての実用化を目指す。

4. 研究成果

(1) ウミネコの離陸および着陸動作の映像解析に基づく制御法

Fig.1 に示すような流れで研究を行った。まず、はばたきの少ないウミネコの離陸および着陸動作に着目し、その動画データの収集と解析により、翼の角度により位置や速度を再現可能な数理モデルを構築した (Fig.2 参照)。このモデルに基づいて、安全で快適な発進と停止を実現する人工移動体の運動制御法としての応用を目指して、位置や速度の目標値や制約等を考慮する上で効果的なモデル予測制御法を基礎とした制御則を導出し、シミュレーションにより既存の制御法と比較し、有効性を示した。

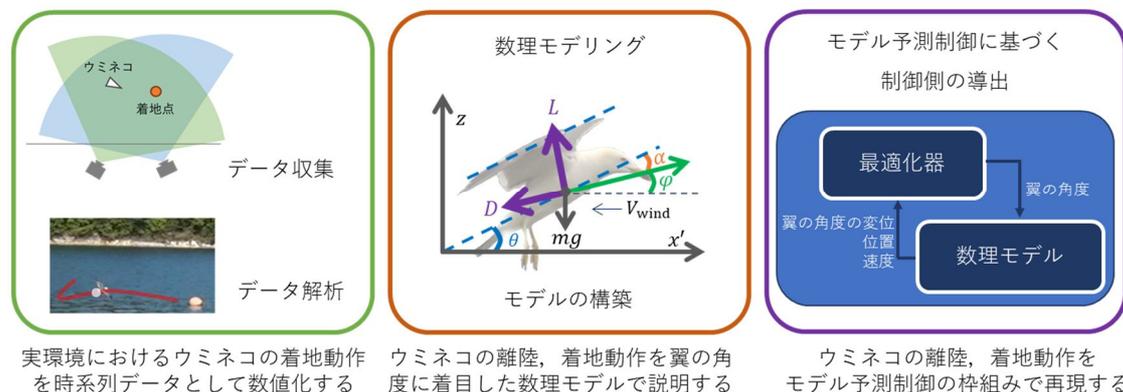


Fig. 1 研究方法の概要

また、熟練者が操縦するドローンの動画データを収集し、その特徴を分析した。この分析結果に基づいて導出した制御則について、自動操縦への実用性の検証を行った。この結果、導出した制御則を用いることで、ドローンの自動操縦による飛行制御が十分可能であることを確認し

た。ただし、荷物搬送などの実応用を目指す場合には、急激な加減速のない滑らかな飛行が求められることから、導出した制御側の更なる改良を行った。これは、状況に応じて異なる制約や目標関数を与えるスケジューリング型のモデル予測制御を用いた手法である。

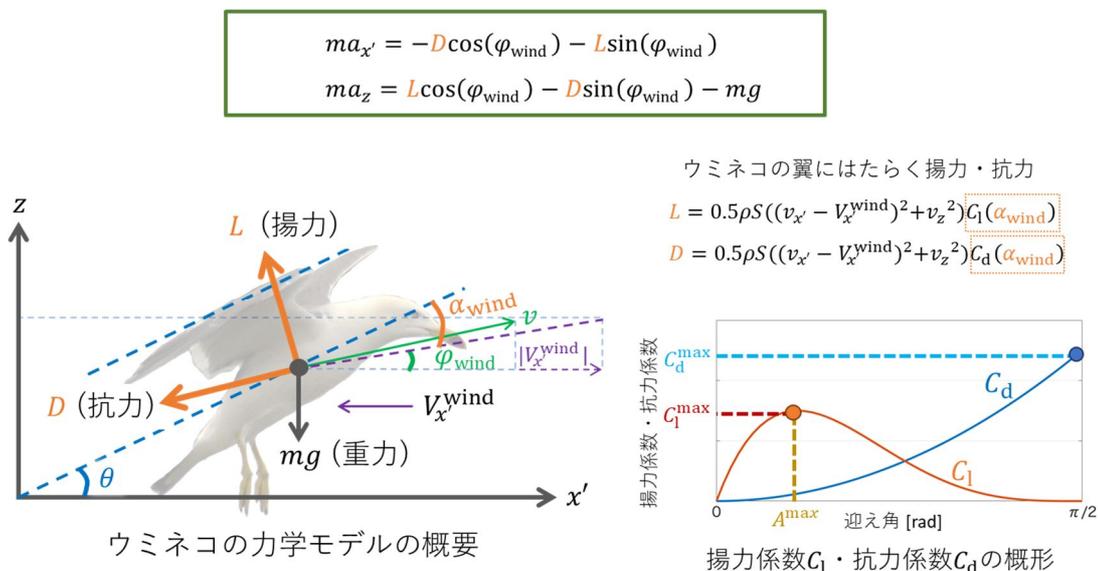


Fig.2 ウミネコの数理モデルの概要

(2) ホライズン可変型モデル予測制御

モデル予測制御法の課題の一つである計算時間の短縮と、それに伴う制御性能の劣化の防止を目的として、ホライズン可変型のモデル予測制御法の開発を行い、数値シミュレーションにより有効性を確認した。これは、本来、一定の長さである制御ホライズンや予測ホライズンの値を、人工飛翔体の飛行状況を分類し、離陸時、着陸時、水平直進飛行時、障害物等の回避のための旋回時といった状況に応じて可変にするものである。この概要を以下の Fig.3 に示す。

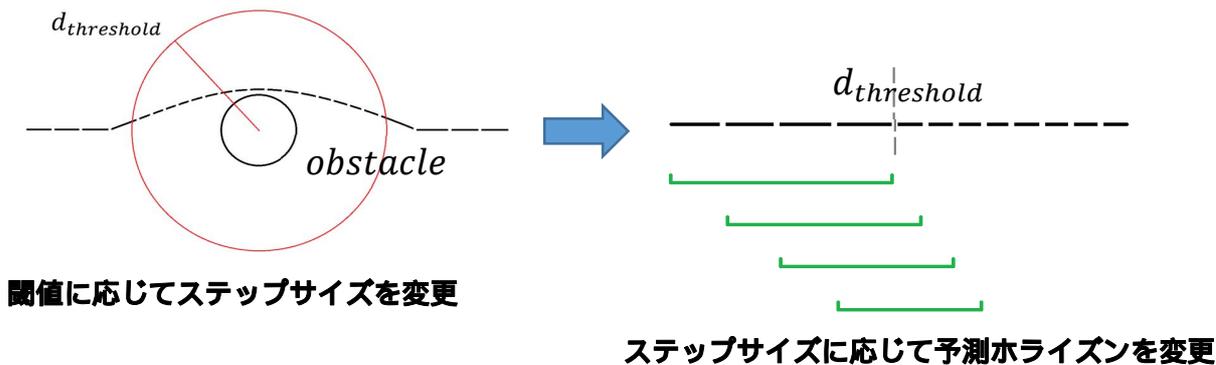


Fig.3 可変ホライズンの概要 (障害物回避時)

(3) ユスリカの「蚊柱」現象の解析

他の生物の群の動きと比べ、独特な動きを行うユスリカの「蚊柱」現象に着目した。「蚊柱」現象は、群れ全体として一定の範囲内に形状を変化させながらとどまり、個々のユスリカは相互にフォーメーションを変え続けながら群を維持するものである。この群の動きを解明するため、動画撮影と解析を行い、その結果、ユスリカの個体間の距離に基づく相互作用を導入した数理モデルを構築した。これは、質点のダイナミクスと頭軸ベクトルのダイナミクスによって、群れの動きを再現している既存モデルを拡張し、引力と斥力の式に、個体間の距離によって相互作用の影響を導入(Fig.4 参照)するとともに、相互作用による揺らぎを再現するためのパラメータならびに外部から群の動きに影響を与える外力パラメータを導入したものである。実際の「蚊柱」の映像と、構築した数理モデルによるシミュレーション結果との比較により、その妥当性が検証できた。これにより、複数の小型人工飛翔体の自律飛行制御による協調作業への応用の基礎となることが期待できる。

【個体間相互作用力の式】

$$\vec{f}_{ij} = -c \left\{ \left(\frac{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|}{r_c} \right)^{-3} - \left(\frac{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|}{r_c} \right)^{-2} \right\} \left(\frac{\vec{r}_j - \vec{r}_i}{r_c} \right)$$

※ c の値を、個体間距離 $|\vec{r}_j - \vec{r}_i|$ 、
 最適個体間距離 r_c 、
 他個体知覚距離 r_k

に基づいて調整

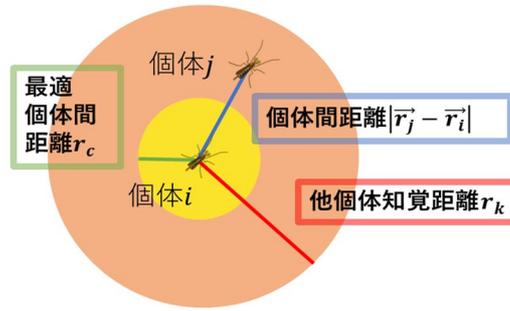


Fig.4 個体間相互作用力の式

(4) 自律走行パーソナルモビリティの障害物回避制御への展開

特に障害物の回避制御を対象として、モデル予測制御を基礎として動的障害物の予測軌道を算出し、これに基づいて柔軟で確実な回避を行うことを目的とした、時空間角度ポテンシャル法を開発した。さらに、時空間ポテンシャル法における計算時間の問題を解決するために、未来の時間のポテンシャル計算ほど計算量を粗くすることで計算量を削減するアルゴリズムを構築し、実用性を高めた。この概要を以下の Fig.5 と Fig.6 に示す。現時点では、自律走行パーソナルモビリティ (PM) への適用を目指した 2 次元平面での数値シミュレーションによる有効性の確認にとどまっているが、ポテンシャル空間の次元を一つ増やし 3 次元空間に拡張することで、開発手法の人工飛翔体への応用も可能であり、障害物回避等の安全性の向上に対する有効性が期待できる。

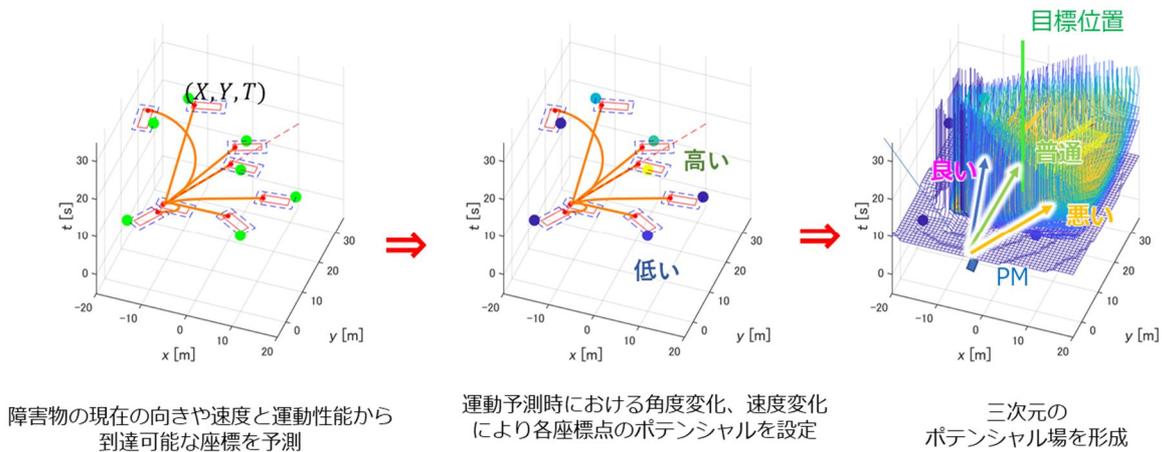


Fig.5 時空間ポテンシャル法の概要

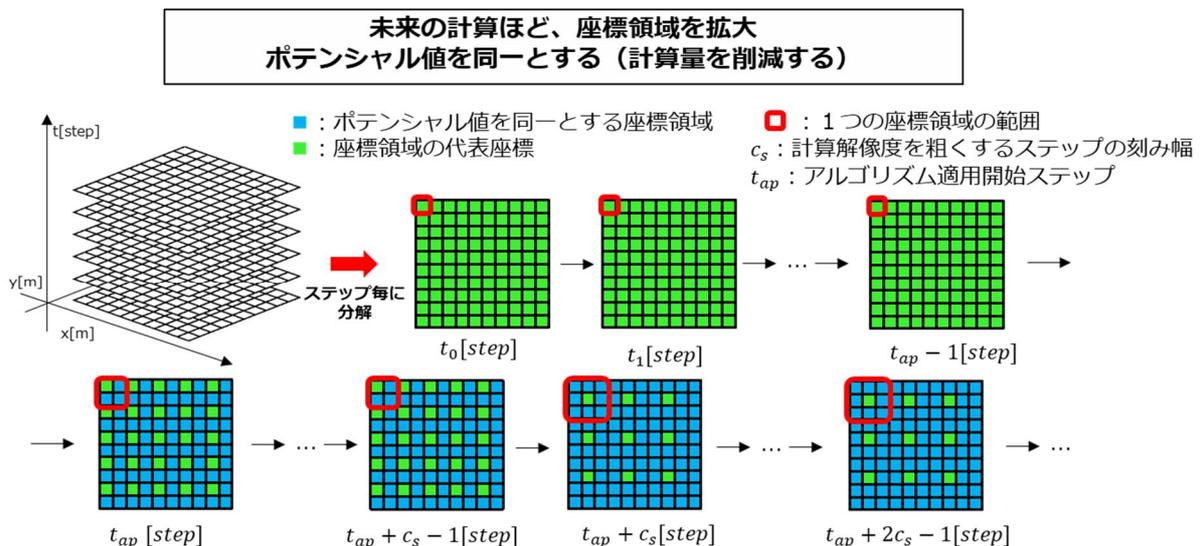


Fig.6 計算量削減アルゴリズムの概要

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kirihara Kenta, Kawabe Tohru	4. 巻 10
2. 論文標題 Power System Frequency Control Architecture Combining Open Charge Point Protocol and Electric Vehicle Model Predictive Charge Rate Control	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 104498 ~ 104511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2022.3211297	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 HIRASAWA Atsuki, AIHARA Ikkyu, KAWABE Tohru	4. 巻 57
2. 論文標題 Motion Control for an Autonomous Personal Mobility Based on the Potential Field Considering the Motion Characteristics of Obstacles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers	6. 最初と最後の頁 421 ~ 432
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.57.421	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kirihara Kenta, Kawabe Tohru	4. 巻 9
2. 論文標題 Novel Emission Dispatch for Adding Electric Vehicles and Renewable Energy Sources With Short-Term Frequency Stability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 110695 ~ 110709
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3102470	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Eisaki Yuri, Hikosaka Isamu, Kawabe Tohru, Aihara Ikkyu	4. 巻 12
2. 論文標題 Landing dynamics of a seagull examined by field observation and mathematical modeling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 205 ~ 224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.12.205	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔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 村社光誠, 河辺徹, 合原一究
2. 発表標題 風速と風向に着目したウミネコの着地軌跡のパターン分け
3. 学会等名 日本鳥学会2022年度大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柴田智史, 河辺徹, 合原一究
2. 発表標題 アラナミキンクロの群れ行動モデルをもとにした電子連結車両の数値シミュレーション
3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村社光誠, 河辺徹, 合原一究
2. 発表標題 ウミネコの着地動作のデータ化とカテゴリズによる分析
3. 学会等名 日本生態学会第69回全国大会
4. 発表年 2022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 分担 者	合原 一究	筑波大学・システム情報系・准教授	
	(Aihara Ikkyu)		
	(70588516)	(12102)	

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