

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：27101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K21008

研究課題名（和文）動的スパースモデリングによる鳥類の波状飛行メカニズムの解明とドローンへの応用

研究課題名（英文）Analysis of bounding flight in birds by dynamic sparse modeling and its application to drones

研究代表者

永原 正章（Nagahara, Masaaki）

北九州市立大学・環境技術研究所・教授

研究者番号：90362582

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、鳥類の波状飛行の分析にスパース最適制御を適用することを提案した。具体的には、非線形制御対象に対するスパース最適制御の必要条件の導出と、その数値計算手法を開発した。これには、Robbins-Monroアルゴリズムとニュートン法が用いられた。成果をOptimal Control, Applications and Methods誌とIEEE Control Systems Letters誌に投稿した。さらに、この理論をマルチドローンの合意制御に応用し、間欠的スパース分散協調制御の実現性を検証した。その結果は、IEEE ICMA2021での最優秀論文賞として評価された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、鳥の波状飛行の原理をスパース最適制御を用いて解析した。学術的には、非線形制御対象へのスパース最適制御の開発と応用に大きな意義がある。社会的な観点からは、ドローン技術へのスパース制御の応用が挙げられる。本研究は、より効率的な飛行経路設計の方向性を示し、それがエネルギーの節約やドローン性能の向上につながる可能性を持つ。また、リアルタイム深層学習を用いたドローンのプラトウニング研究は、配達サービスから搜索救助活動まで、ドローンの活用を推進する。さらにIEEE ICMA2021での受賞は、本研究が持つ社会的価値をより明確に示している。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed applying sparse optimal control to analyze birds' bounding flight. Specifically, we derived the necessary conditions for sparse optimal control for non-linear control targets and developed a numerical calculation method. This involved the use of the Robbins-Monro algorithm and Newton's method. The results were submitted to the Optimal Control, Applications and Methods journal, and IEEE Control Systems Letters. Furthermore, we applied this theory to the consensus control of multiple drones and verified the feasibility of intermittent sparse distributed coordination control. This result was recognized with the Best Paper Award at IEEE ICMA2021.

研究分野：システム制御

キーワード：ドローン 最適制御 スパースモデリング 波状飛行 スパース制御 リアルタイム深層学習 非線形制御 分散協調制御

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

スズメやセキレイ、オナガなど小型の鳥は、波状飛行 (bounding flight) と呼ばれる特徴的な飛行を行うことが知られている。この飛行は、羽ばたき飛行と休止飛行を繰り返す飛行法であり、休止飛行の間は翼を完全に閉じ、慣性運動により移動を行う。小型の鳥がなぜこのような飛び方をするのかは、いまだ完全には解明されていない。

鳥類の波状飛行の理論的研究は Rayner によって始められた (例えば [Rayner, J. of Theoretical Biology, 1985])。Rayner の研究では、定常飛行時 (上空で水平方向に進む飛行時) における鳥の仕事率 (単位時間当たり消費エネルギー) P と飛行の速さ V との関数 $P(V)$ をもとに議論が行われる。これによると、波状飛行により仕事率が減少するのは、最大航続距離に対応する速さ (maximum range speed) V_{mr} よりも速く飛ぶときに限られる。この原理によれば、速さ V_{mr} よりも遅く飛ぶときには波状飛行をするメリットがないことになる。しかし、 V_{mr} よりも遅いスピードでも波状飛行を行う鳥は多く、ホバリングの時 (すなわち水平移動速度がゼロの時) でさえ、図 1 のように間欠的に羽を動作させる鳥も存在する。

2. 研究の目的

本研究の第一の目的は、未解決問題である小型の鳥の波状飛行メカニズムを動的スパースモデリングと呼ばれる手法で解明することである。動的スパースモデリングでは、評価関数として制御が非ゼロの値をとる時間区間 (すなわち、 L_0 ノルム) を考え、それを最小化する最適制御問題を考察する [Nagahara et al. IEEE Trans. Automatic Control 2016]。その解はスパース制御と呼ばれ、間欠的なアクチュエーションとなる。このような運動のスパース性、すなわち筋肉をなるべく使わないという性質が羽ばたき運動の本質であるという仮説を立て、羽ばたき運動のメカニズムを解明することが本研究の目的である。

また、波状飛行は制御 (アクチュエーション) をゼロにするため、その時間区間でエネルギーの消費がゼロとなる。この特性は、ドローンの飛行に応用することが可能である。本研究の第二の目的は、鳥類の波状飛行メカニズムをドローンの飛行制御に応用し、従来よりも電力消費の少ない (よって 1 回の充電でより長い時間の飛行が可能) 超効率的な飛行法を提案することである。

3. 研究の方法

まず鳥類の飛翔を微分方程式で記述する。研究代表者はこれまでに予備検討として、質点として鳥をモデル化し、空気抵抗および重力のもとでの鳥の飛行をニュートンの運動方程式により記述した。そして、その質点系に対してアクチュエーションの時間を最小化する最適制御問題を動的スパースモデリングにより解き、解を導いた。

しかし、現実の鳥類の飛行はこのような単純なものではなく、鳥の羽ばたき運動を微分方程式でモデル化する必要がある。より現実に近い微分方程式モデルをもとに動的スパースモデリングにより最適制御を求め、波状飛行が再現されるかをシミュレーションにより確認する。

さらに、上記で得られた知見を活かし、ドローンのブレードの制御に応用する。ドローンの飛行を同じく微分方程式で表現し、動的スパースモデリングにより最適制御を求める。その解は、図 3 の予備検討から間欠的な制御になると考えられる。すなわち、周期的にブレードを停止させたり作動させたりするような制御になる。この制御をドローンに実装し、間欠的な制御を行ったときのドローンの消費電力を計測する。波状飛行により通常の飛行と比較して省エネルギーを達成する飛行が得られることを実証する。

4. 研究成果

本研究では、鳥類の波状飛行の解析にスパース最適制御を適用し、最適制御の解析や数値計算法の開発、またドローンへの応用を行った。特に非線形制御対象へのスパース制御の適用に重点を置いた。そのために、非線形制御対象に対するスパース最適制御の必要条件の導出と数値計算法の開発を行った。具体的には、Robbins-Monro アルゴリズムを利用した確率的手法により初期推定値を求め、ニュートン法により数値解の精密化を図った。また、スパース最適制御理論をドローンの飛行制御に応用し、鳥の波状飛行を模倣した飛行経路設計を提案した。さらに、マルチドローンの間欠的なスパース分散協調制御を実機にて実証した。鳥類の波状飛行を模倣したスパース制御により、エネルギーの節約や飛行性能の向上が期待できることを示した。さらに、リアルタイム深層学習を活用した小型ドローンのプラトウニング研究を行い、分散協調制御によるプラトウニングが可能であることを示した。これにより、ドローンの更なる活用、例えば配達サービスや捜索救助活動などへの応用が期待される。以上の研究成果は、Optimal Control, Applications and Methods 誌、IEEE Control Systems Letters 誌に投稿した他、国際会議 IEEE ICMA2021 では Best Paper Award in Automation を受賞した。さらに、Advanced Robotics 誌に掲載された。

これらの成果は、スパース最適制御理論の進展とその実応用により、学术界だけでなく、社会全体に貢献することを示している。これらの業績から、本研究は最適制御理論およびドローン技術の発展に大きな貢献をもたらすことが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Fujimoto Yusuke, Sato Hiroki, Nagahara Masaaki	4. 巻 25
2. 論文標題 Controller tuning with Bayesian optimization and its acceleration: Concept and experimental validation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Asian Journal of Control	6. 最初と最後の頁 2408 ~ 2414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/asjc.2847	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 Nagahara Masaaki	4. 巻 33
2. 論文標題 Sparse control for continuous time systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Robust and Nonlinear Control	6. 最初と最後の頁 6 ~ 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/rnc.5858	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 Motonaka Kimiko, Watanabe Takuya, Kwon Yuhwan, Nagahara Masaaki, Miyoshi Seiji	4. 巻 8
2. 論文標題 Control of a quadrotor group based on maximum hands-off distributed control	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Mechatronics and Automation	6. 最初と最後の頁 200 ~ 200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1504/IJMA.2021.120377	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 Schulze Darup Moritz, Book Gerrit, Quevedo Daniel E., Nagahara Masaaki	4. 巻 67
2. 論文標題 Fast Hands-Off Control Using ADMM Real-Time Iterations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 5416 ~ 5423
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAC.2021.3121255	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 該当する

1. 著者名 Ikeda Takuya, Nagahara Masaaki	4. 巻 135
2. 論文標題 Resource-aware time-optimal control with multiple sparsity measures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 109957 ~ 109957
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.automatica.2021.109957	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 Kumar Yogesh, Srikant Sukumar, Chatterjee Debasish, Nagaraha Masaaki	4. 巻 43
2. 論文標題 Sparse optimal control problems with intermediate constraints: Necessary conditions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optimal Control Applications and Methods	6. 最初と最後の頁 369 ~ 385
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/oca.2807	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 該当する

1. 著者名 Ikeda Takuya, Nagahara Masaaki, Chatterjee Debasish, Srikant Sukumar	4. 巻 6
2. 論文標題 Constrained Smoothing Splines by Optimal Control	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 1298 ~ 1303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCSYS.2021.3092638	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 Nagahara Masaaki, Ogura Masaki, Yamamoto Yutaka	4. 巻 6
2. 論文標題 Iterative Greedy LMI for Sparse Control	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 986 ~ 991
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCSYS.2021.3087964	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 Nagahara M., Krishnamachari B., Ogura M., Ortega A., Tanaka Y., Ushifusa Y., Valente T. W.	4. 巻 35
2. 論文標題 Control, intervention, and behavioral economics over human social networks against COVID-19	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 733 ~ 739
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2021.1928553	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 該当する

1. 著者名 Azuma Shun-ichi, Nagahara Masaaki	4. 巻 8
2. 論文標題 Majority Determination in Binary-Valued Communication Networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Control of Network Systems	6. 最初と最後の頁 838 ~ 846
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCNS.2020.3038839	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 Ikeda Takuya, Nagahara Masaaki	4. 巻 5
2. 論文標題 Maximum Hands-Off Control With Time-Space Sparsity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 1213 ~ 1218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCSYS.2020.3023265	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 TOKUSHIGE Tatsuki, FUJIMOTO Yusuke, NAGAHARA Masaaki	4. 巻 57
2. 論文標題 LPV-FIR Modeling of Wheelchair Dynamics and Its Application to Model Predictive Control	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 156 ~ 161
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.57.156	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 Nagahara Masaaki, Chatterjee Debasish, Challapalli Niharika, Vidyasagar Mathukumalli	4. 巻 113
2. 論文標題 CLOT norm minimization for continuous hands-off control	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 108679 ~ 108679
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.automatica.2019.108679	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 該当する

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 T. Ikeda, M. Nagahara, D. Chatterjee, and S. Srikant
2. 発表標題 Constrained smoothing splines by optimal control
3. 学会等名 60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Nagahara, M. Ogura, Y. Yamamoto
2. 発表標題 Iterative greedy LMI for sparse control
3. 学会等名 60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Motonaka, T. Watanabe, Y. Kwon, M. Nagahara, S. Miyoshi
2. 発表標題 Application of maximum hands-off distributed control to a quadrotor group
3. 学会等名 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (IEEE ICMA2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Nagahara
2. 発表標題 Control and intervention over human social networks in COVID-19
3. 学会等名 IEEE International Conference on Advanced Robotics and Its Social Impacts (ARSO) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Ikeda and M. Nagahara
2. 発表標題 Maximum hands-off control with time-space sparsity
3. 学会等名 IEEE L-CSS presentation, American Control Conference (ACC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Z. Zhang and M. Nagahara
2. 発表標題 Linear quadratic tracking control with sparsity-promoting regularization
3. 学会等名 American Control Conference (ACC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永原
2. 発表標題 合意形成の数理: 個の振る舞いと全体最適化
3. 学会等名 第2回新学術領域合同シンポジウム - ソフトロボット学と発動分子科学の融合 - (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永原
2. 発表標題 超スマート社会をつくるサイバーフィジカルシステム
3. 学会等名 第194回産学交流サロン(ひびきのサロン)「AIの新たな地平を切り拓く」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永原
2. 発表標題 スパースモデリングの基礎と応用
3. 学会等名 応用物理学会光波センシング技術研究会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永原
2. 発表標題 マルチエージェントシステムの制御とソフトロボティクス
3. 学会等名 ROBOMECH2021ソフトロボットシンポジウム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Ikeda and M. Nagahara
2. 発表標題 Maximum hands-off control with time-space sparsity
3. 学会等名 American Control Conference(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Z. Zhang and M. Nagahara
2. 発表標題 Linear quadratic tracking control with sparsity-promoting regularization
3. 学会等名 American Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaaki Nagahara, and Dragan Nesic
2. 発表標題 An Approach to Minimum Attention Control by Sparse Derivative
3. 学会等名 59th IEEE Conference on Decision and Control (CDC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Noboru Sakamoto, and Masaaki Nagahara
2. 発表標題 The turnpike property in the maximum hands-off control
3. 学会等名 59th IEEE Conference on Decision and Control (CDC2020), 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yogesh Kumar, Sukumar Srikant, Masaaki Nagahara, Debasish Chatterjee, and Daniel E. Quevedo
2. 発表標題 Maximum hands-off feedback control for finite-time stabilization
3. 学会等名 59th IEEE Conference on Decision and Control (CDC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 田中 聡久、藤本 悠介、永原 正章	4. 発行年 2021年
2. 出版社 コロナ社	5. 総ページ数 256
3. 書名 線形システム同定の基礎	

1. 著者名 Masaaki Nagahara	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Now Publishers	5. 総ページ数 200
3. 書名 Sparsity Methods for Systems and Control	

〔産業財産権〕

〔その他〕

Masaaki Nagaharaのウェブページ https://nagahara-masaaki.github.io/
--

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	佐藤 和也 (Sato Kazuya) (30284607)	佐賀大学・理工学部・教授 (17201)	

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