

令和 元年 6 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04303

研究課題名(和文) 昆虫の飛翔における創成流場を用いた適応的運動能力のシステムバイオロジーによる解明

研究課題名(英文) Understanding of Adaptive Motion Capability in Insect Flight that Interacts with Generated Flow-field by Using Systems Biology

研究代表者

泉田 啓 (Senda, Kei)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：60206662

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,800,000円

研究成果の概要(和文)：生物学的アプローチと工学的アプローチを併用するシステムバイオロジー・アプローチにより、創成環境との非線形相互作用を用いる運動知能を研究している。

A. 生体の蝶を用いて関節の構造柔軟性を計測し、その効果を数値モデルに加え、飛翔安定性などの制御に及ぼす影響を解析している。B. 自由飛翔時の羽ばたき動作を計測している。筋肉に刺激を与えて動作を計測している。これらのデータを基に生体の蝶の制御を調べている。C. 環境がもたらす効果および制御方法を調査し、運動知能の構成方法を研究している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、流体環境中にある蝶という多体系が環境を創成しつつ羽ばたき飛翔とマヌーバを実現することに対する、物理的・生物学的・システム論的観点からの系統的な研究で、他に類を見ない独創的なものである。羽ばたき飛翔の理解と実現のために身体-神経系(制御)-流場(環境)の動的相互作用により創成環境との非線形相互作用を用いる適応的運動能力(運動知能)を解明する新たな手法と新たな研究領域を開拓している。身体機構や制御系に埋め込まれた運動知能の解明は進化の過程を辿る作業でもあり、研究成果とアプローチは生物学や知能機械学において普遍化され、大きな波及効果が期待できる。

研究成果の概要(英文)：We are studying motion intelligence using nonlinear interaction with the created environment by a system biology approach that combines the biological approach and the engineering approach.

A. The structural flexibility of joints in living butterflies is measured, the effect is added to the numerical model, and its influence on control such as flight stability is analyzed. B. Flapping motion during free flight is measured. The muscles are stimulated to measure movement. Based on these data, we investigate the control of living butterflies. C. We investigate the effects and control methods brought by the environment, and study how to construct motion intelligence.

研究分野：航空宇宙システム

キーワード：昆虫 流体 生物・生体工学 知能機械 航空宇宙工学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

蝶は環境に渦列流場を創成しつつ羽ばたき飛翔する。蝶の飛翔では、レイノルズ数は 10^3 のオーダーである。同程度のレイノルズ数では一様流中に置かれた円柱周りでもカルマン渦列が生じ、周期的に渦を生成する渦列流場パターンへと引き込まれ、比較的安定に渦列を生じ続ける。蝶も羽ばたき動作により逆カルマン渦列を生成するため、飛翔の安定化とマヌーバに適した環境を創成して飛翔を実現するという環境創成による運動知能という想定に至った。

蝶が飛翔しているとき、神経系は概ね周期的な制御指令を出し、翅は振動的に運動し、流場に周期的な渦列が創られる。各要素は個別の振動子のように振舞うが、力学的に情動的に強い相互作用を持っている。このような神経系 - 身体 - 環境の要素ダイナミクスと相互作用は蝶の飛翔に本質的であり、歩行などの他の運動知能にも共通する構造である。さらに、素早いマヌーバは適応的運動能力(運動知能)の現れであり、環境との強い非線形相互作用を活用すると考えられる。蝶では均質な流場を不均質な渦列流場に変化させ、創成環境と身体との非線形相互作用を引き出している可能性が高い。このように創成環境との非線形相互作用を利用する運動知能の発現という想定に至ったが、その発現メカニズムは未だ解明されていない。そのため、蝶の飛翔という問題は運動知能の発現メカニズム、特に環境の役割を理解する上で重要な意味を持つと考えられる。

2. 研究の目的

蝶の羽ばたき飛翔は不安定そうだが安定化されており、ヒラヒラと舞うようにマヌーバして捕食から逃れる。このような羽ばたき飛行は身体 - 神経系(制御) - 流場(環境)の動的相互作用により成立する運動形態で、適応的運動能力の発現である。ここでは、特に羽ばたきにより創成される渦列流場という環境を用いてマヌーバという適応的運動を実現するという観点から、蝶が適応的運動能力(運動知能)を発現するメカニズムの解明を目的とする。具体的には

- A. 生体の蝶の身体機構のモデル化(バイオメカニクス)が制御にどのように影響するか
- B. 感覚器(センサ)と身体機構(アクチュエータ)の入出力関係(制御)の解明
- C. 蝶が創成環境(流場)との非線形相互作用を如何に利用して運動知能を発現するか

という点について、生体の蝶の実験観測による生物学的な解析と様々なモデルの構成をとおした工学的な実現を併用するシステム論的アプローチ(システムバイオロジー)により調査する。これまで、工学的・生物学的に解明する本研究の準備を整えてきており、流体力学、昆虫学、システム工学の専門家が一致協力し課題遂行にあたる。これにより、創成環境との非線形相互作用を利用する運動知能という新領域を開拓しつつ、進化の過程で獲得されてきた運動知能の発現メカニズムの解明に貢献する。

3. 研究の方法

生物学的アプローチと工学的アプローチを併用するシステムバイオロジー・アプローチにより以下の課題を研究し、創成環境との非線形相互作用を用いる運動知能を解明する。

A. 蝶の身体機構のモデル化(バイオメカニクス)が制御に及ぼす影響

生体の蝶を用いて関節の構造柔軟性を計測し、その効果を数値モデルに加え、飛翔安定性などの制御に及ぼす影響を解析する。

B. 応答動作と制御信号(筋電)計測に基づく生体の制御系の解明

まず、自由飛翔する蝶の運動を高精度に計測することにより、蝶の頭胸部の姿勢運動などに対する翅の応答動作を明らかにする。次に、自由飛翔時の羽ばたき動作と筋電を計測する。また、ロボットアームに蝶を取付けて強制的に姿勢を変化させるなどの刺激を与えて羽ばたき動作と筋電を計測する。さらに、これらのデータを基に生体の蝶の制御を調べる。

C. 創成された流場との強い非線形相互作用を利用するマヌーバ(運動知能)

環境がもたらす効果および制御方法を明らかにし、運動知能の構成方法を研究する。

4. 研究成果

上述の目的と方法に従いシステムバイオロジー手法、すなわち、(1) 生体の蝶の実験観測による生物学的な解析、および、(2) 様々なモデルの構成をとおした工学的な実現、により研究を行ない、上記 A, B, C について以下の研究成果を得た。

A. 蝶の身体機構のモデル化(バイオメカニクス)が制御に及ぼす影響

(1) 生物学的な解析

研究対象であるアサギマダラ蝶の飼育系統を確立し、常時生体を実験に供する状態を維持した。CT 画像、外骨格の実体顕微鏡画像、外骨格を脱色した個体の観察等により、飛翔に関する筋肉や骨格の同定と計測を行った。

二酸化炭素を充満させたケースに生体の蝶を入れて麻酔をかけ、胸部を固定した蝶の腹部や翅に静的および動的荷重をかけ、応答を計測した。また、身体の構造柔軟性を関節の柔軟性と

してモデル化し、関節柔軟性を表すパラメータを同定した。

(2) 工学的なモデル解析

蝶の身体の3次元動的な動力学を剛体多体系でモデル化し、身体の構造柔軟性を関節柔軟性として考慮し、流体をポテンシャル流でモデル化して流体力を渦法(パネル法)で計算する数値モデルを構築した。この数値モデルを用い、A(1)で計測した生体の関節柔軟性を参考値とし、関節柔軟性をパラメータとしてパラメトリック・スタディを行った。その結果、飛翔の安定性に関節柔軟性が影響を及ぼすこと、飛翔を安定化しやすい関節柔軟性のパラメータ領域があることが明らかになった。なお、A(1)で計測された生体の関節柔軟性は、この数値モデルを安定化する関節柔軟性パラメータ領域に近い。このことは、生体の蝶においても、身体の構造柔軟性が飛翔の安定化に役立っていることを示唆している。

さらに、粘性もある現実の空気中でも同様の結果が得られることを確認するために、関節が柔軟な蝶の羽ばたき模型飛行機を作り、風洞内で飛翔実験を行なった。数値シミュレーションと同様に、上で求められた関節柔軟性パラメータの模型は安定に飛翔したが、関節が剛な模型では安定に飛翔することができなかった。

B. 応答動作と制御信号(筋電)計測に基づく生体の制御系の解明

(1) 生物学的な解析

まず、蝶の飛翔筋の筋電位を4チャンネル同時に取得する計測装置を開発した。以前に開発した無線送信器はアサギマダラ蝶の体重(300 mg程度)より重いため無線送信は断念し、長さ1 m超の細いワイヤで送信する方式にした。当初、蝶から離れたデータ・ロガー近くに設置したメインアンプのみで筋電位を増幅する予定であったが、微弱な筋電位にワイヤ部でノイズが重畳し、計測した筋電位信号がノイズまみれになった。そこで、胸部にプリアンプを搭載してSN比を高め、この問題を解決した。プリアンプはチョウの細長い胸部背面に取付け可能な3×6 mmとし、メインアンプは目的に合わせて増幅率やフィルタを設定できる設計とした。

つぎに、生体の蝶を自由飛翔させた状態で羽ばたき飛翔の運動と筋電を同時に計測する予定であったが、運動計測プログラムの開発が予定通り進まなかった(後述)ので、同時計測は断念した。その代わりに、胸部を固定した蝶の筋肉に刺激を加えて運動の様子を計測した。

(2) 工学的なモデル解析

上の筋肉に対する刺激と運動のデータを用いて筋モデルを同定した。また、蝶の羽ばたき飛翔の運動学的制御系をヒューリスティックに構成し、渦法を用いて構築した数値モデルにより、生体の蝶と同様の羽ばたき飛翔を再現した。

C. 創成された流場との強い非線形相互作用を利用するマヌーバ(運動知能)

(1) 生物学的な解析

生体の蝶を自由飛翔させ、様々な羽ばたき飛翔の運動をビデオ撮影した。撮影したビデオ画像から自動的に運動計測を行うプログラム開発を行ったが、予定通り進まなかったため、画像中の特徴点の座標を人間が読み取って運動計測を行った。そのため、運動計測できたビデオ画像は限られるが、定常飛翔と上昇飛翔(遅いマヌーバ)の運動を計測することができた。

(2) 工学的なモデル解析

工学的にフィードフォワード制御とフィードバック制御を組合せた2自由度制御系を設計し、A(2)で構築した非線形の数値モデルに適用した。その結果、蝶モデルは安定に定常な水平飛行を達成した。しかし、生体の感覚器や脳神経系に存在する時間遅れを考慮すると、この制御系は不安定化した。そこで、時間遅れを考慮してフィードバック制御系を再設計したところ、蝶モデルは安定に飛翔することができた。さらに、制御系に適切に目標値を入力することにより、上昇や下降の遅いマヌーバを起すことができた。その運動の様子は、C(1)で計測した生体の運動と同様のものであった。このことは、ここで設計した制御系と同様のものが生体内に存在することを示唆すると考えられる。

羽ばたき運動の大変化が引き起こす飛翔挙動の変化(マヌーバ)を解析する基礎研究を行った。羽ばたき翼からの剥離渦が構成する渦構造変化を解析するため、剥離渦の形成過程を2次元モデルである単一渦近似法による解析を行い、翼形状による剥離渦の吸引点の有無や位置、形成された剥離渦の切り離し前後における剥離渦運動の変化を研究した。マヌーバのうち、特に翼運動と渦運動の関係を調べるため、非定常(非周期)翼運動を経由することで、一様流中の振動翼の後流に形成される渦構造を変化させられるかどうかを調べた。羽ばたき1周期程度の間、振動数を下げることで構造変化を引き起こす翼運動を与えた。振動数低減の開始位相と継続時間を様々に変えた結果、特定の組合せ付近で渦構造が速やかに反転し、同時に揚力の符号を逆転させられることがわかった。この結果は、翼運動の変化で渦構造を経由して揚力の制御を行った例であり、蝶の適応的運動能力の発現の解明に寄与するものであると考えられる。

2次元蝶モデルを用いて、スライディングモード制御による姿勢制御を数値的に行った。胸部姿勢に大きな擾乱が加わっても、腹部角のみを動的に変化させることで、短時間で胸部姿勢を適切な状態へと復帰できることがわかった。このことは、突風などの外乱に対して、腹部を用いた安定化が可能であることを示している。また、腹部運動と翅運動の両方を用いることにより、上昇や下降の遅いマヌーバを起すことができることを示した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)

1. J. Jayakumar, K. Senda and N. Yokoyama, “Control of Pitch Attitude by Abdomen During Forward Flight of Two-Dimensional Butterfly,” *Journal of Aircraft*, 有, 55-6, 2019, 2327-2337, doi: 10.2514/1.C034767
2. 泉田 啓, 大坪立サミュエル, “強化学習における方策の性能を向上するサンプリング方策”, 計測自動制御学会論文集, 有, 54-3, 2018, 365–372, doi: 10.9746/sicetr.54.365
3. T. Hishinuma and K. Senda, “An Approximate Bayesian Reinforcement Learning Approach Using Robust Control Policy and Tree Search,” *International Conference on Automated Planning and Scheduling*, 有, 2018, 417-421, doi: 10.1201/9781315166056
4. Y. Hasegawa, T. Takeuchi and N. Hirai, “Difference of photosensitive period and variation of voltinism in populations of a butterfly, *Ypthima multistriata*, inhabiting similar latitudes and altitudes, ” *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 有, in press
5. N. Yamamoto, N. Hirai and S. Ueda, “The tiger beetle, *Therates alboobliquatus* W. Horn, 1909 (Coleoptera: Cicindelidae), spends its immature stages inside rotting wood, *Coleopterists Bulletin*, ” 有, 72, 2018, 522-524, doi: 10.1649/0010-065X-72.3.522
6. N. Ando, “Diversity of flight control strategies in insects: lessons from hawkmoths, *Hikaku seiri seikagaku* (Comparative Physiology and Biochemistry),” 有, 35, 2018, 108-118, doi: 10.3330/hikakuseiriseika.35.108
7. M. Iima, N. Yokoyama and K. Senda, “Active lift inversion process of heaving wing in uniform flow by temporal change of wing kinematics,” *Physical Review E*, 有, 99, 2019, 043110-1 ~ 043110-10, doi: 10.1103/PhysRevE.99.043110
8. K. Senda and Y. Tani, “Reinforcement Learning of Robotic Manipulators, *Adaptive Control for Robotic Manipulators*,” 有, Ch. 4, 2017, 49-69, doi: 10.1201/9781315166056
9. T. Hishinuma and K. Senda, “Robust and explorative behavior in model-based Bayesian reinforcement learning,” *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence*, 有, Proceedings, 2016, 1-8, doi: 10.1109/SSCI.2016.7849370
10. 泉田 啓, 天野恒佑, “強化学習における線形計画法を用いた効率的解法”, 計測自動制御学会論文集, 有, 52-10, 2016, 566–572
11. 泉田 啓, 大坪 立サミュエル, 谷 百合夏, “無限プラント集合で表される変動に対するロバスト強化学習”, 計測自動制御学会論文集, 有, 52-9, 2016, 474–480
12. 泉田 啓, “強化学習における効率的な計算法”, *システム / 制御 / 情報*, 有, 60-6, 2016, 238-243
13. N. Hirai, Y. Hirai and M. Ishii, “Differences in pupal cold hardiness and larval food consumption between overwintering and non-overwintering generations of the common yellow swallowtail, *Papilio machaon* (Lepidoptera: Papilionidae), from the Osaka population,” *Entomological Science*, 有, 19, 2016, 180–187, doi: 10.1111/ens.12182

〔学会発表〕(計 27 件)

1. K. Senda, N. Hirai, N. Ando, M. Iima and N. Yokoyama, “A Study on Implicit and Explicit Controls of Flapping Butterflies,” *International Symposium on Aero Aqua Bio-mechanisms (ISABMEC)*, 2018
2. T. Hishinuma and K. Senda, “An Approximate Bayesian Reinforcement Learning Approach Using Robust Control Policy and Tree Search,” *International Conference on Automated Planning and Scheduling*, 2018
3. 山口雪菜, 泉田 啓, J. Jayakumar, “粘性流体における 2 次元蝶モデルのシミュレーション”, *生物流体力学の展望 (RIMS 共同研究研究集会)*, 2018

4. 谷畑智彦, 泉田 啓, “蝶の羽ばたき飛翔における UVLM の計算条件に対する収束性”, 生物流体力学の展望 (RIMS 共同研究研究集会), 2018
5. 泉田 啓, “蝶の羽ばたき飛翔の力学と制御について”, システム制御情報学会研究発表講演会 (招待講演), 2018
6. 飯間 信, “振動翼の運動変化に導かれる渦構造の遷移”, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019
7. 飯間 信, “翼運動の変化による wake deflection の反転メカニズム”, 第 22 回日本流体力学会中四国・九州支部講演会, 2018
8. 飯間 信, “渦剥離ダイナミクスの位相縮約とはばたき翼の摂動応答”, 生物流体力学の展望(RIMS 共同研究研究集会), 2018
9. 飯間 信, “渦構造に着目した振動物体の揚力制御”, 第 7 回岐阜数理科学研究会 (招待講演), 2018
10. K. Senda, N. Yokoyama, Y. Inoue, N. Hirai, M. Iima and N. Ando, “Hierarchic control of flapping flight of a butterfly, Congress of the International Society of Biomechanics,” 2017
11. K. Senda, “Implicit and explicit controls of butterfly flapping flight,” International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (招待講演), 2017
12. 平井規央, “天敵から逃げる？アサギマダラの移動”, 第 74 回レピドプテリストゼミナール, 2017
13. 白石麻佑子, 上田昇平, 平井規央, “スジグロカバマダラとリュウキュウアサギマダラ的生活史の違い”, 関西昆虫学研究会 2017 年度大会・日本鱗翅学会近畿支部第 156 回例会, 2017
14. 飯間 信, “振動翼の停止が作る渦構造が導く揚力変化”, エアロ・アクアバイオメカニズム学会第 38 回定例講演会, 2018
15. T. Hishinuma and K. Senda, “Robust and explorative behavior in model-based Bayesian reinforcement learning,” IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, 2016
16. 春尾七星, 泉田 啓, “分散情報構造を用いたマルチエージェントによる協調タスクのモデル化”, システム制御情報学会研究発表講演会, 2016
17. 長谷川湧人, 竹内剛, 平井規央, 上田昇平, “日長を感受する期間の違いがもたらす不思議な生活史:緯度クラインを示さないウラナミジャノメの化性変異”, 第 64 回日本生態学会大会, 2017
18. 長谷川湧人, 竹内剛, 平井規央, 上田昇平, “絶滅危惧種ウラナミジャノメの遺伝的多様性:近縁普通種ヒメウラナミジャノメとの比較”, 昆虫学公開研究発表会(日本昆虫学会近畿支部 2016 年度大会・日本鱗翅学会近畿支部第 154 回例会), 2016
19. 白石麻佑子, 上田昇平, 平井規央, “八重山諸島産スジグロカバマダラの温度・日長反応”, 昆虫学公開研究発表会, 昆虫学公開研究発表会(日本昆虫学会近畿支部 2016 年度大会・日本鱗翅学会近畿支部第 154 回例会), 2016
20. 吉田 周, 平井規央, 上田昇平, 石井 実, “大阪および京都市周辺でのツマグロヒョウモンの越冬”, 第 28 回日本環境動物昆虫学会年次大会, 2016
21. 平井規央, 中村康弘, 佐藤大輔, 石井実, “ツシマウラボシシジミの人工飼料による飼育と日長反応”, 日本鱗翅学会第 63 回大会, 2016
22. 石井実, 浅井悠太, 西中康明, 平井規央, “三草山ゼフィルスの森における 24 年間のチョウ類群集の変化”, 日本鱗翅学会第 63 回大会, 2016
23. 村山裕哉, 安藤規泰, 平井規央, 神崎亮平, “飛行昆虫の運動解析における小型慣性センサの利用”, 第 36 回エアロ・アクアバイオメカニズム学会, 2017
24. 安藤規泰, “Flexible body: how do neurogenic signals control wing kinematics?”, 日本比較生理生化学会第 38 回大会, 2016

25. 飯間 信, “単一渦近似における剥離渦の切り離し基準”, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016
26. 山口崇幸, 飯間 信, “流体制御に向けた不安定不動点の近傍を通る軌道における摂動の長時間挙動の解析”, 日本流体力学会年会 2016, 2016
27. 横山直人, “蝶の羽ばたき飛翔の力学”, 2016 年度第 1 回日本流体力学会中四国・九州支部講演会 (招待講演), 2016

〔図書〕(計 3 件)

1. Kei Senda and Yurika Tani, CRC Press, Adaptive Control for Robotic Manipulators (分担執筆), 2017, 440 (49-69)
2. 平井規央, 東海大学出版部, 鱗翅類学入門 (分担執筆), 2016, 295 (80-86)
3. M. Iima, T. Yamaguchi, T. Watanabe, A. Kawaharada, Y. Tasaka and E. Shoji, Springer, Mathematical Fluid Dynamics, Present and Future (分担執筆, eds. Y. Shibata and Y. Suzuki), 2016, 613 (139-158)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ: 京都大学 航空宇宙力学講座 <http://space.kuaero.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 平井 規央
ローマ字氏名: HIRAI, Norio
所属研究機関名: 大阪府立大学
部局名: 生命環境科学研究科
職名: 教授
研究者番号 (8 桁): 70305655

研究分担者氏名: 安藤 規泰
ローマ字氏名: ANDO, Noriyasu
所属研究機関名: 前橋工科大学
部局名: 工学部
職名: 准教授
研究者番号 (8 桁): 70436591

研究分担者氏名: 飯間 信
ローマ字氏名: IIMA, Makoto
所属研究機関名: 広島大学
部局名: 理学研究科
職名: 准教授
研究者番号 (8 桁): 90312412

研究分担者氏名: 横山 直人
ローマ字氏名: YOKOYAMA, Naoto
所属研究機関名: 大阪大学
部局名: 基礎工学研究科
職名: 特任准教授
研究者番号 (8 桁): 80512730

(2) 研究協力者

ローマ字氏名: HAN, Jae-Hung (KAIST, 韓国)

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、研究者個人に帰属されます。