

令和元年6月3日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14192

研究課題名(和文) 神経機能代替を利用した昆虫の飛行制御システムの同定

研究課題名(英文) Identification of insect flight control system by neuroprosthetic method

研究代表者

安藤 規泰 (Ando, Noriyasu)

東京大学・先端科学技術研究センター・特任講師

研究者番号：70436591

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、平衡感覚を喪失したスズメガに慣性センサを搭載し、得られた情報をもとに筋肉に電気刺激を行い飛行の安定性を回復させることを目指した。主要な成果として、1) スズメガに搭載可能な40 mgの慣性センサユニットを開発し、6軸の加速度・角速度情報を自由飛行下で高速に計測することに成功した、2) 慣性センサ・コントローラ・電気刺激からなる飛行制御回路を試作し、ピッチ角速度に応じて腹部の屈曲を制御することに成功した、3) 触角切除により平衡感覚を喪失しても、スズメガは安定なホバリング飛行が可能であることを示した、4) 平衡感覚の情報が頭部の運動を介して視野の安定に寄与していることを示した、が挙げられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人工の回路を昆虫に組み込み、機能の回復を試みることを通して、その制御系を明らかにする新しい研究手法を提案した。生物と機械の制御系を交換して比較することはこれまでにないアイデアであり、生物学のボトムアップ的手法と工学のトップダウン的手法を結びつける点でその学術的意義は高い。また、超小型の慣性センサを用いて自由飛行する昆虫の運動情報を計測することに成功したが、従来の撮影による手法に対してより低価格で広範囲を飛行する昆虫から大量のデータを取得することが可能になった。この研究手法は例えば高等学校などの教育現場でも導入可能であり、自然科学の裾野を広げるといって大きな社会的意義を持つ。

研究成果の概要(英文)：In this project, we tried to identify the flight control system of hawkmoths by a neuroprosthetic method. We implemented an inertial measurement unit (IMU) to an antennae-ablated hawkmoth instead of its lost equilibrium sensing organ and tried to recover flight stability of the moth by electrical stimulation to muscles. The major results are 1) we developed a 40-mg IMU board which enabled us to acquire body acceleration and angular velocity in six-degrees of freedom at a high sampling rate, 2) we developed an artificial feedback controller which controlled abdominal deflection based on the angular velocity of body pitch, 3) we found that antennae-ablated hawkmoths which lost equilibrium sensing still could hover in front of a flower, and 4) we showed that equilibrium sensing has an important role in controlling head rotation, which stabilizes visual gaze.

研究分野：神経行動学, 生物規範ロボティクス

キーワード：羽ばたき飛行 昆虫 平衡感覚 制御 視覚 慣性センサ

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

1. 研究開始当初の背景

マルチコプターに代表されるように、近年小型航空機が身近になりつつあり、安定したホバリングや高い機動性が実現している。一方、これらマルチコプターの近年の進歩は、ジャイロ・加速度センサやカメラ、プロセッサ、そしてアクチュエータの小型集積化・高性能化の恩恵によるところが大きく、各センサ類からのフィードバックによりアクチュエータを操作する能動的な制御により姿勢を保っている。一方自然界に目を向けると、より小型の飛翔体である昆虫の飛行においても同様のことが言える。彼らは、翅基部を中心に全身に張り巡らされたひずみセンサや気流センサ、触角基部やハエでは平均棍（後翅の退化した構造物）とよばれるジャイロセンサ、さらに複眼からの視覚情報をもとに、翅を駆動する飛翔筋を能動的に制御している¹⁻⁴⁾。一方でこのことは、昆虫サイズの羽ばたき機を実現するためには、膨大な数のセンサ網を小さなサイズに張り巡らすことを意味し、絶望感すら覚える。しかし、近年の研究では、昆虫の羽ばたき飛行が乱流に強いだけでなく、乱れた姿勢の回復に受動的な安定性が大きく寄与していることが示唆されている⁵⁾。神経系による情報伝達には、「遅い」という宿命的な欠点があり（視覚系による姿勢制御で 100 ms）、受動的な特性をうまく利用して神経系の遅れの問題を回避していると考えられる。この示唆は我々を大変勇気づけるものであるとともに、既存のセンサを用いたフィードバック系で昆虫の姿勢制御ができないか、という課題を与えてくれる。そしてこれが仮に実現できれば、昆虫サイズの羽ばたき機に必要なセンサの特性や制御システムを直接知ることができるかもしれない。

2. 研究の目的

この課題に答えるために、本研究では人為的にジャイロセンサの役割を持つ感覚器の機能を失わせた昆虫（エビガラスズメ、大型のガの一種でホバリングが可能）にジャイロセンサを搭載し、このセンサ出力をもとに翅を駆動する飛翔筋、もしくは胴体の運動を制御する筋を電気刺激し、任意のモデルで姿勢を回復させることを目指す。そして、制御モデルのパラメータを変化させ、姿勢制御への影響を評価することで、この姿勢制御に関わるシステムを同定する(図1)。本研究の学術的な特色は、運動シミュレーションや羽ばたきロボットではなく、人工の感覚フィードバックを実際の昆虫に埋め込むという神経機能代替を利用することで、生物（神経系）と人工物（搭載する感覚フィードバック系）を直接比較し理解する研究手法を確立できる点にある。さらに、この知見が将来進展するであろう昆虫サイズの小型の羽ばたき機の制御に有用な知見を得ることができる。

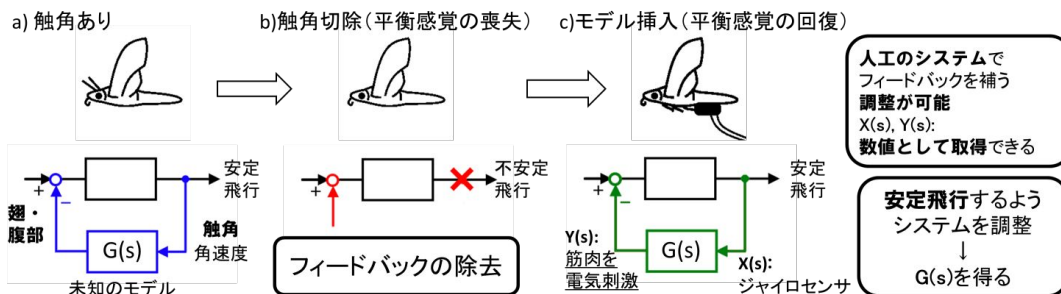


図1 研究の概念図

3. 研究の方法

先行研究²⁾から実験対象であるスズメガ（エビガラスズメ、*Agrius convolvuli*）の平衡感覚は、飛行中に振動する触角の基部にあるひずみセンサ（ジョンストン器官）が担っていると考えられる。予備実験においても、触角の切除もしくは基部の可動部を接着剤で固定することで、飛行は可能であるものの、ホバリング中にとりわけピッチが不安定化することが観察された。そこで、平衡感覚を人為的に失わせたスズメガに、ジャイロセンサとその情報をもとに電気刺激のパターンを決定し、適切な筋肉を電気刺激する人工の感覚フィードバック回路を介入させ、姿勢の回復を図ることを目指した。これを実現するために以下の研究項目を実施した。

1) 平衡感覚を失うことによる運動の変化の解析

触角切除による平衡感覚の喪失により、ホバリングができずに後退しながら壁に衝突する回数が増大することが報告されているが²⁾、具体的にどの運動に影響を与えるのかわからない。また、触角の切除によりピッチ運動に対する腹部屈曲が見られなくなる¹²⁾、触角運動にはたらく筋肉を電気刺激することで腹部の屈曲が起こることも報告されている¹³⁾。本項目では、触角切除前と後の自由飛行の様子を高速度カメラで撮影し、三次元再構成を行うことでピッチ・ロール・ヨーそれぞれの運動に与える影響を解析し、運動の変化を解析した(図2)。また、完全な自由飛行では個体や試行ごとに飛行パターンが変化するため、スズメガが花の前でホバリングしながら蜜を吸う行動を利用し、アリーナ(60 cm 立法のアクリルケース)内に設置した造花に対するホバリング飛行のみを解析の対象と

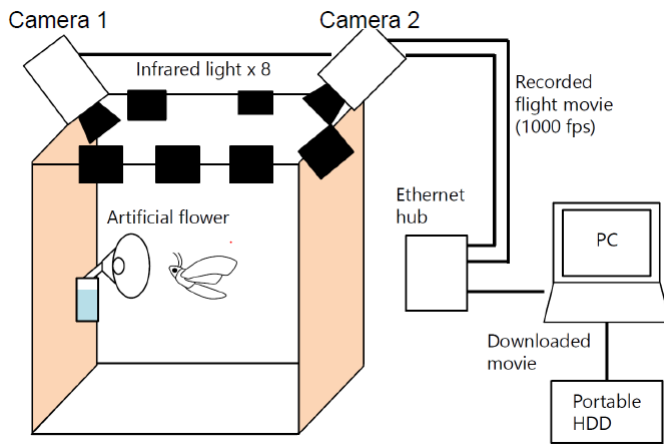


図2 運動解析のための実験装置。

センサチップ単体は 40 mg 以下のため、本研究では薄いフレキシブル基板を用いて回路を設計し試作を行った。センサとの通信は I₂C で行い、100 mm の銅線を介してマイクロコントローラ (Arduino UNO) で運動情報を取得した。電気刺激は、マイクロコントローラの実出力 (5V) を用い、取得したピッチ角速度がある閾値を越えた際にパルス刺激を筋肉に加えた。

4. 研究成果

1) 平衡感覚を失うことによる運動の変化の解析

まず、触角切除後の飛行の様子を観察した。58 個体の雄ガを用い、うち 28 個体が造花に対して口吻を伸ばしホバリング飛行を示した。この状態 (コントロール) の撮影を行った後、両触角を基部の付近で切除した。触角切除直後は安定を失い、アリーナの壁に衝突する行動が観察されたが、30 分以上経過すると安定を取り戻す個体が見られ、最終的に 28 個体中 11 個体が引き続き造化の前でホバリング飛行を示した。これは先行研究からの予想に反する結果であり、触角基部のジョンストン器官による平衡感覚を失ってもなお、他の感覚で姿勢を維持できることを示唆するものである。この予想外の結果に対しさらに詳細な運動解析を進めたところ、視野の安定に重要な役割を果たす頭部の運動が触角切除後に不安定になることが明らかになった。頭部のロール角の周波数解析を行ったところ、8-20 Hz の周波数帯で新たな振動のピークが認められ、これは体のロール角にも認められた。この新たな振動は、40 Hz 前後の羽ばたき周波数とは異なること、また、頭部のロール運動が胴体の運動に先行することから、受動的な振動ではなく神経系の制御によるものと考えられた。一つの仮説として、応答の速い機械受容器による平衡感覚がなくなったこと

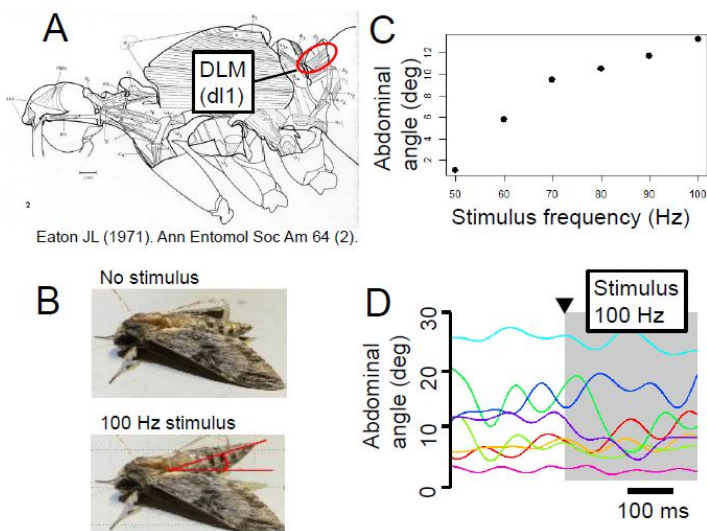


図3 電気刺激による腹部の屈曲角の人為制御。(A) 腹部第一節の背縦走筋(DLM)の位置,(B) 電気刺激に対する腹部の背側への屈曲と屈曲角の定義,(C) 刺激頻度と屈曲角の関係,(D) 自由飛行中の DLM 刺激の前後 (灰色: 刺激期間) における屈曲角の時系列変化。

した。

2) 平衡感覚に基づく姿勢制御を実現するための電気刺激部位 (筋肉) の選定

先行研究 (12) をもとに、腹部の上下の屈曲を制御する筋肉を同定し、電気刺激で動作を確認した。

3) 昆虫に搭載するセンサ基板の開発、実験システムの構築

超小型の 9 軸慣性センサ (Invensense MPU-9250) を用いたユニットは市販されているが重量が 0.55 g と重く、スズメガが飛行可能な 500 mg 未満まで軽量化する必要がある。セン

サの遅い視覚がその役割を担うが、制御に大きな位相差を生じ発振を起こしている可能性が挙げられる。この現象についてはさらなる解析が必要であるが、従来知見と異なり、昆虫の飛行制御の冗長性を示す結果と言える。

一方、先行研究では、平衡感覚と体のピッチ角や腹部の運動との関連が、昆虫を固定した状態 (拘束飛行) で報告されている。そこで、触角切除後のこれらの運動パラメータを評価したところ、ピッチ角は有意に減少したが ($P < 0.05$, ウィルコクソン符号順位検定)、腹部の角度には有意な変化は認められなかった。一方、羽ばたき周波数には触角切除後に有意な増加がみられた ($P < 0.05$) ことから、触角の切除による影響に対して、揚力を

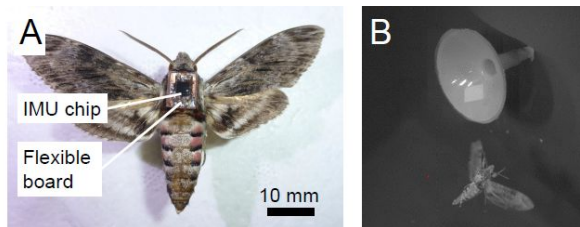


図4 IMUによる運動計測とその評価。(A) IMUを搭載したスズメガ,(B) 造花に接近するIMUを搭載したスズメガ,(C) 実験システムの概要。

増加させて補償を行っていることが示唆された。

2) 平衡感覚に基づく姿勢制御を実現するための電気刺激部位(筋肉)の選定

スズメガの筋肉の解剖学的知見¹⁴⁾を参照しながら解剖を行い、胸部と腹部の接合部にある筋肉(腹部第一節の背縦走筋)に電気刺激(1 V, パルス幅 4 ms)を加えた(図 3A,B)。電気刺激の周波数を 50 Hz から 100 Hz まで変化させたところ、腹部を背側に屈曲させる運動が観察され、図 3C に示すような刺激頻度と腹部角度の関係を得た。この結果に基づき、自由飛行中に該当する筋肉の電気刺激を行い、姿勢制御への影響を評価した。実験の結果、自由飛行時においては、静止時に見られた腹部の屈曲が観察されず、有意な運動の変化は認め

られなかった(図 3D, $N=8$)。これは刺激した背側の筋肉の拮抗筋である腹側の筋の活動が考えられる。また、刺激電圧を高めると(2 V~)姿勢自体を崩して墜落し、評価が困難であった。したがって拮抗筋を切除するなど、さらなる操作が必要であると考えられた。

3) 昆虫に搭載するセンサ基板の開発、実験システムの構築

厚さ 85 μm のフレキシブル基板に回路パターンをエッチングし、IMU 及びカップリングコンデンサを実装し、質量 40 mg のセンサユニットを開発した。通信と電源供給の配線を含めた重量は、長さ 1 m で 250 mg 程度となり、スズメガに十分搭載可能な質量となった(図 4)。高速度カメラで取得した胴体のピッチ・ロール・ヨーの角速度と IMU で取得したデータの比較では、IMU の計測結果はカメラを用いた従来手法と同等の計測が可能であることを示した。また、より体重の軽いチョウであるアサギマダラ(スズメガ体重 1 g に対し、アサギマダラは 300 mg 前後)にも搭載可能であり、チョウの独特の飛行であるピッチ角の振動をとらえることにも成功した。この IMU を用いた安価で簡易な運動計測法は、本研究課題の大きな成果の一つである。

また、データ取得に要する時間遅れは、125 Hz のサンプリングレートで 1-2 サンプル(8-16 ms)であった。これはスズメガの羽ばたき周期(27 ms 程度)より小さく、本研究の目的である人工のフィードバックで飛行制御を行う用途に適うものであった。前述の自由飛行中の腹部屈曲角の制御には課題を残したものの、研究の目的であるセンサ・コントローラ・電気刺激からなる人工のフィードバック回路を製作し、ピッチ角の角速度の閾値に対して腹部の背側への屈曲が起こることを静止状態で確認した。このような人工のセンサを介したフィードバック回路は、飛行だけでなく歩行といった運動全般に関わる自己受容フィードバックのしくみを明らかにするうえで重要なツールとなると考えられる。

<引用文献>

- 1) Pringle JWS. 1957 Insect flight. London, Cambridge University Press.
- 2) Sane et al., 2007 Antennal mechanosensors mediate flight control in moths. Science 315, 863-866.
- 3) Wang, Ando, Kanzaki. 2008 Active control of free flight manoeuvres in a hawkmoth, *Agrius convolvuli*. J. Exp. Biol. 211, 423-432.
- 4) Ando et al., 2011 Central projections of the wing afferents in the hawkmoth, *Agrius convolvuli*. J Insect Physiol 57, 1518-1536.
- 5) Ravi et al., 2013 Rolling with the flow: bumblebees flying in unsteady wakes. J Exp Biol 216, 4299-4309.
- 6) Ando et al., 2002 A dual-channel FM transmitter for acquisition of flight muscle activities from the freely flying hawkmoth, *Agrius convolvuli*. J Neurosci Methods 115, 181-187.
- 7) Sato et al., 2015 Deciphering the Role of a Coleopteran Steering Muscle via Free Flight Stimulation. Curr Biol 25, 798-803.
- 8) Ando et al., 2013 Odour-tracking capability of a silkworm driving a mobile robot with turning bias and time delay. Bioinspir Biomim 8, 016008.

- 9) Ma et al., 2013 Controlled Flight of a Biologically Inspired, Insect-Scale Robot. *Science* 340, 603-607.
- 10) Tanaka & Kawachi 2006 Response characteristics of visual altitude control system in *Bombus terrestris*. *J Exp Biol* 209, 4533-4545.
- 11) Dyhr et al., 2013 Flexible strategies for flight control: an active role for the abdomen. *J. Exp. Biol.* 216, 1523-1536.
- 12) Hinterwirth & Daniel 2010 Antennae in the hawkmoth *Manduca sexta* (Lepidoptera, Sphingidae) mediate abdominal flexion in response to mechanical stimuli. *J Comp Physiol A* 196, 947-956.
- 13) Hinterwirth et al. 2012 Wireless Stimulation of Antennal Muscles in Freely Flying Hawkmoths Leads to Flight Path Changes. *Plos One* 7.
- 14) Eaton, J. L. 1971 Morphology of the head and thorax of the adult tobacco hornworm, *Manduca sexta* (Lepidoptera: Sphingidae). 1. Skeleton and muscles. *Ann Entomol Soc Am* 64, 437-445.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- 1) 安藤規泰* (2018) スズメガで知る昆虫飛行の多様性. *比較生理生化学*, 35, pp. 108-118. doi: 10.3330/hikakuseiriseika.35.108.
- 2) Hao Wang*, Noriyasu Ando*, Hirokazu Takahashi, and Ryohei Kanzaki (2017) Visuomotor response to object expansion in free-flying bumblebees. *Journal of Insect Behavior* 30, pp. 612-631. doi: 10.1007/s10905-017-9645-x

〔学会発表〕(計7件)

- 1) Noriyasu Ando, Yuya Murayama, Ryohei Kanzaki (2018) Free flight behavior of antenna-ablated hawkmoths, 13th International Congress of Neuroethology (Brisbane, Australia, July 15-20).
- 2) Noriyasu Ando, Ryohei Kanzaki (2018) The insect-driven hybrid robot bridges the gap between biological and artificial systems, 11th FENS Forum of Neuroscience: Symposium S44 'From neuroethology to autonomous robot' (Berlin, Germany, July 10)
- 3) Yuya Murayama, Noriyasu Ando, Ryohei Kanzaki (2017) Kinematics analysis of antennae-ablated hawkmoths during free flight. The 39th Annual Meeting of the Japanese Society for Comparative Physiology and Biochemistry (福岡, 11月25-26日).
- 4) 安藤規泰, 村山裕哉, 神崎亮平 (2017) 神経機能代替を利用した昆虫の飛行システムの解明. 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会2017 (静岡, 11月25-27日).
- 5) Noriyasu Ando (2017) Connecting insect and machine: robotics facilitates biological analysis for adaptive behavior, The 8th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (Sapporo, Japan, June 30)
- 6) Yuya Murayama, Noriyasu Ando, Ryohei Kanzaki (2017) Hybrid sensory-motor control for the recovery from reduced flight stability of an antenna-ablated hawkmoth, The 8th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (Sapporo, Japan, June 27-30).
- 7) 村山裕哉, 安藤規泰, 平井規央, 神崎亮平 (2017) 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 (千葉, 3月21日).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)

取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<https://sites.google.com/view/andolab-j/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：村山 裕哉

ローマ字氏名：(MURAYAMA, Yuya)

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。