

昆虫の飛行制御の研究

Study on Flight Dynamics of Insect

河内 啓二 (KEIJI KAWACHI)
東京大学・大学院工学系研究科・教授



研究の概要

昆虫は3億年に及ぶ自然淘汰の歴史に耐え抜いた信頼性と実績のある飛行制御システムを持っている。このシステムを細胞レベルからシステムレベル、さらに人工物による実証機レベルまで統一的に解明する。

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・生体生命情報学

キーワード：システム生物学

1. 研究開始当初の背景

昆虫は3億年に及ぶ自然淘汰の歴史に耐え抜いた信頼性と実績のある飛行制御システムを持っている。その運動のほとんどは外部から与えられた刺激に対する条件反射であると考えられ、それでいて極めて複雑巧妙な運動が可能である。これらの特色はそれ自体で極めて興味深いものであるが、近年注目を浴びている微小飛行体の制御則としても適合性が高いと考えられる。

2. 研究の目的

飛行昆虫の制御応答システムを細胞レベルからシステムレベル、さらに人工物による実証機レベルまで統一的に解明する。得られた結果は制御則としてまとめ、実証機を用いた飛行試験等によりその特徴を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 細胞レベルでは飛行制御に関係する神経経路を調べる。(2) システムレベルでは、高速度ビデオにより運動を記録し、飛行制御則を伝達関数を用いて調べる。テザード飛行で視覚刺激に対する応答を、自由飛行で、風や胴体の運動を含んだ総合的な応答を調べる。(3) 実証機レベルでは昆虫のはばたき飛行の特色を調べるとともに、微小飛行体の制御則と設計指針を検討する。(4) 運動シミュレータでは、CFDを用いて非定常空気力を求め、飛行運動と連立させて解析する。

4. これまでの成果

システムレベルの研究

(1) マルハナバチを用いてテザード状態における上下運動の視覚刺激(図1)をシステムへの入力とし、はばたき翼に発生する力を出力とする関係を調べ、伝達関数の形に整理した。

(2) ハチの発生する力を視覚刺激にフィードバックすることに成功し、ハチの制御系の伝達関数が航空機のパイロットに近く、常に一巡伝達関数を一定にするように制御していることを世界で初めて見いだした。人間の伝達関数はクロスオーバーモデルとして知られているが、マルハナバチのそれは2乗クロスオーバーモデルと呼べるものであった。

(3) チョウの滑空飛行の安定性を定量的に解析し、その運動方程式と運動特性を明らかにした。

細胞レベルの研究

(1) スズメガのはばたき運動を感知する機械感覚の神経経路を同定し、全ての神経経路が食道下神経節へ投射されていることを確認した。これは機械感覚情報が視覚情報と統合され、羽ばたき運動の調整を行うことを示唆し、システムレベルの研究とよく合致する結果である。

実証機レベルの研究

(1) 回転翼型の微小飛行体(図2)の制御系と空力特性を上記のシステムレベル研究を指針として改修し、2m/sの風まで位置制御ができることを実証した。

[4. これまでの成果 (続き)]

(2) 実用化を考慮し固定翼型の微小飛行体を開発し、5m/sの風まで安定して飛行できることを実証した。

(3) はばたき型の微小飛行体 (図3) を開発し、はばたき飛行の安定性と重心位置の関係を明らかにした。さらにMEMSの技術を用いて羽に昆虫サイズの翅脈を作ることにより成功した。翅脈の配置を変えることにより受動的制御ではあるが羽の振り角を制御できることを実証した。これらの結果は世界で初めての知見である。

運動シミュレーションによる研究

(1) CFDを用いて空気力計算を行い、胴体の運動と連立して解析する運動シミュレータを用いて、サイズの異なる4種類の昆虫のはばたき飛行を統一的に解明した。

(2) 大きさの異なる昆虫のはばたき飛行は多様性に富み、羽周りの空気流の構造も大きく異なることを世界で初めて示した。

(3) 大きさの異なる昆虫の飛行安定性を統一的に解明した。

これらの結果は昆虫の飛行の多様性を示す世界で初めての成果であり、通常、1種類の研究に特化して調べる従来の研究に大きな影響を与えるだろう。

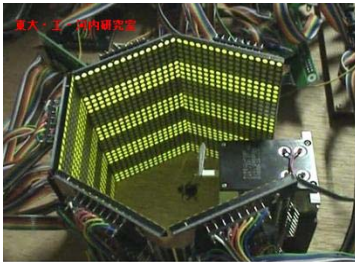


図1 視覚刺激装置



図2 回転翼型微小飛行体



図3 はばたき翼型微小飛行体

5. 今後の計画

(1) 細胞レベルでは脳からの指令情報と翅から脳へのフィードバック情報の役割を分離して調べる。(2) システムレベルでは、昆虫の自由飛行の運動を計測し、テザード飛行と比較する。(3) 実証機レベルではMEMS圧力センサーを用いて羽ばたき翼の圧力差分布を計測する。また固定翼型の微小飛行体を開発する。(4) 運動シミュレータでは、レイノルズ数や生活環境等の差異が動的安定性に及ぼす影響を調べる。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

(研究代表者は太字、研究分担者は二重下線、連携研究者は一重下線)

(1)Tanaka, Kensaku, **Kawachi, Keiji**, Response characteristics of visual altitude control system in *Bombus terrestris*, J.of Experimental Biology, 209, 4533-4545, 2006

(2)Makoto Okamoto, Shigeru, Sunada, Hiroshi, Tokutake, Stability analysis of gliding flight of a swallowtail butterfly *Papilio xuthus*, J. of Theoretical Biology, 257, 191-202, 2009

(3)藤永仁, 得竹浩, 砂田茂: 小型無人航空機の誘導制御と自律飛行試験、日本航空宇宙学会誌、Vol.56, No.649, 57-64, 2008

(4)Hao, Liu, Integrated modeling of insect flight: From morphology, kinematics to aerodynamics, J. of Computational Physics, 228, 439-459, 2009

(5)Hikaru Aono, Fuyou Liang, Hao Liu, Research article Near- and far-field aerodynamics in insect hovering flight:an integrated computational study, J. of Experimental Biology, 211, 239-257, 2008

(6)Hao Wang, Noriyasu Ando, Ryohei Kanzaki, Active control of free flight manoeuvres in a hawkmoth, *Agrius convolvuli*, J. of Experimental biology, 211, 423-432, 2008

(7)Hiroto, Tanaka, Kiyoshi, Matsumoto, Isao Shimoyama, Fabrication of a three-dimensional insect-wing model by micromolding of thermosetting resin with a thin elastomeric mold, J. of Micromech. Microeng. 17, 2485-2490, 2007

ホームページ等

<http://www.kawachi.rcast.u-tokyo.ac.jp/>