

# 昆虫の神経系に学んだ視覚フィードバック制御を行う 小型自律飛行ロボットの開発

Development of a small unmanned aerial vehicle controlled by insect-inspired visual signal processing

2151005



研究代表者

大阪工業大学 情報科学部

講師

奥野 弘 嗣

## [研究の目的]

近年、小型飛行体の自律制御手法が盛んに研究されている。このような自律制御は主として姿勢制御用の慣性センサ（加速度センサ、ジャイロセンサ）や周囲環境把握用のセンサ（赤外線センサ、超音波センサ等）、位置方向把握用のセンサ（GPS、地磁気など）といった多数のセンサを協調的に利用することで実現されている。しかし、この方法では制御システムの大規模化、複雑化は避けられない。小型飛行体の自律飛行を実現するためには、このように多様なセンサに頼ることなく、少数のセンサ情報を元に制御することが望ましい。

一方で、昆虫を始めとした飛行を行う生物は、必ずしも高精度ではない感覚系と、小規模で処理能力の限定された神経回路系しか持たないにもかかわらず、ロバストに自己運動を制御している。このような生物の運動制御は、主に視覚情報を用いて実現されている。中でも視覚情報のうち網膜上で観測される速度場であるオプティカルフロー（OF）が運動制御に有用な情報をもたらすと考えられている。

本研究の目的は、OFパターンを利用して小型飛行体の自己運動を識別するアルゴリズムを開発し、実環境で評価すること、並びに本アルゴリズムによって制御されるモータ駆動系とこれを搭載するドローン機体を開発することであ

る。OFパターン取得において重要な役割を果たす画像局所速度の検出には、昆虫の視覚神経系に着想を得た簡便なアルゴリズムを用いた。また、制御信号生成回路等を実装するための回路として、プログラム可能な回路である field-programmable gate array (FPGA) を利用した。

## [研究の内容、成果]

### 1. 自己運動識別アルゴリズムの開発

本研究では、まず画像局所速度の検出アルゴリズム、及びこの検出器によって得られたOFパターンを元に自己運動を識別するアルゴリズムを提案した。本研究で提案するアルゴリズムは、飛行体の左右に180度の角度を持って取り付けられた二つの視覚センサからの撮像を想定した。この様な広い視野角のOFパターンを利用する理由は、昆虫が非常に広い視野からの入力を利用しており、また自己運動の識別のためには、広い視野のOFパターンを取得することが有効であるためである。

図1に自己運動とOFパターンの関係を示す。図中、四角の枠で囲まれた矢印群はOFパターンを表す。前進をした場合（図1(a)）、右側に設置されたセンサからは画面全体が左から右方向へ流れるOFが得られ、左側に設置されたセンサからはその逆方向のOFが得られる。また

ヨーイング、ピッチング運動を行った場合も同様に、右側および左側に設置されたセンサから図中の矢印で示された OF が観測される（図 1 (b), (c)）。このように自己運動の種類によって観測される OF は異なったものとなる。

視覚対象までの距離を一定とすると、6 自由度の運動（XYZ 軸に対する自己の水平移動と回転運動）が定めれば、OF は数式によって一意に定まる。これによって定まる 6 つの OF（以下、参照 OF）と、イメージセンサによって観測した実際の OF との類似度を計算することにより、自己運動の推定を行う。

このアルゴリズムの流れを図 2 に示す。飛行体に設置された 2 つのカメラから撮像された画

像は、それぞれ局所運動検出器に入力される。ここで得られる OF パターンの一例としてピッチング運動時の局所運動検出器の出力結果を図 2 枠内に示す。次にこの出力結果を自己運動推定器に入力し、6 自由度それぞれの参照 OF との相関をとることで自己運動が検出される。図 2 の例では、ピッチングの参照 OF（図 1(c)）と相関が高くなるため、アルゴリズムは自己運動をピッチングと判定する。（アルゴリズムの詳細は研究成果 [1] を参照。）

## 2. 自己運動識別アルゴリズムの評価

図 3 に示す環境によってイメージセンサに模擬的な自己運動を与えることによりアルゴリズムの検証を行った。提示画像を 4 方に設置したアクリル板及び床面に設置した。この領域の中央に、左右に 2 つイメージセンサが接続されたボードと、それを稼働させるサーボモータを設置した。イメージセンサは、サーボモータによりヨー方向とロール方向への回転運動が可能である。この実験環境を用いてヨー方向の回転、ロール方向運動、ヨー方向とロール方向の複合運動の種類運動についてイメージセンサで撮像した。

アルゴリズムを試験するため、CMOS イメージセンサ (OmniVision OV7725), FPGA (XILINX XC6SLX45), PC (Core i5-3470, 3.2 GHz) で構成されるシステムに前章で述べたア

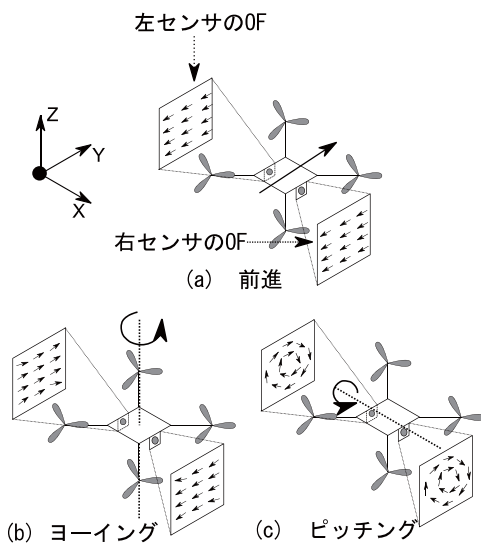


図 1 飛行体の自己運動と、OF パターンの関係。センサは飛行体の左右に 180 度の角度をなして設置されているものとする。図中の枠に囲まれた矢印群は OF パターンを表す。

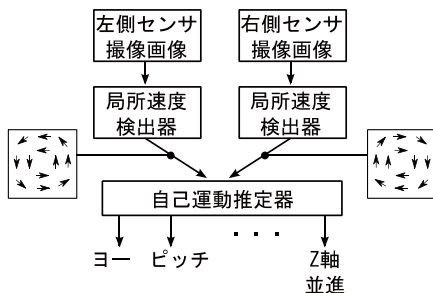


図 2 アルゴリズムの流れ。局所速度検出器の出力はピッチング時の OF を表す。

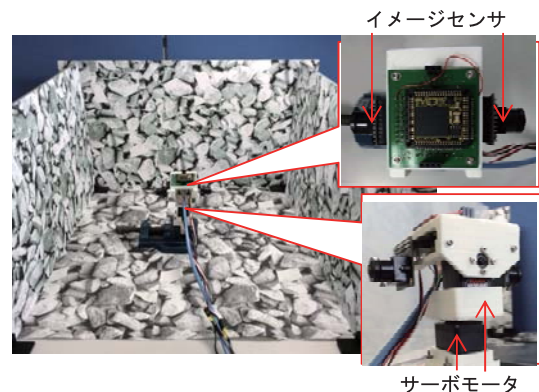


図 3 本実験で設定した環境。提示画像によって囲まれた環境でサーボモータによって CMOS イメージセンサに動きを与える。

ルゴリズムを実装した (図 4)。本研究ではアルゴリズムの検証のため PC を用いたが、検証後は FPGA にハードウェア実装することを想定している。

イメージセンサをヨー方向に回転させた場合のシステムの出力結果を図 5 に示す。図 5(a) は、アルゴリズムの出力結果である XYZ 軸方向に対する並進速度 ( $V_x, V_y, V_z$ ), 回転速度 ( $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ ) に対応する 6 種類の出力を示し、図 5(b) は、サーボモータのエンコーダより得た回転角速度を示す。図 5(a) からヨー方向回転時はこの運動に対応する  $\omega_z$  検出器の出力が高い値を示し、その他の 5 つの出力は、相対的に小さな値となっていることが確認できる。同様にイメージセンサをロール方向に回転させた場合のアルゴリズムの出力も、ロール回

転に対応する検出器の出力が有意に大きくなった。

### 3. ドローン機体の開発

前節で説明した視覚情報から自己運動を推定するアルゴリズムを実装でき、これによってモータ制御が可能なドローン機体の開発を行った (外観は図 6)。視覚情報処理からモータ制御信号の生成までの遅延時間を極力短くするため、全ての処理過程がハードウェアベースで完了する構成となっている (図 7)。モータ制御基板の設計・製造を行い、機体本体の 3D 設計・3D プリンタによる造形を行った。

次に、モータ制御信号生成回路を設計し、機体に搭載した FPGA にこの回路を実装し、試作ドローンの飛行試験を行った。自己運動識別アルゴリズムがまだ回路実装されていないため、基本的な離着陸の試験を行い、適切に行えることを確認した。これにより、広い視野の視覚情報を元にリアルタイム視覚情報処理を行い、その結果を元にドローンの制御が行えるプラットフォームが完成した。

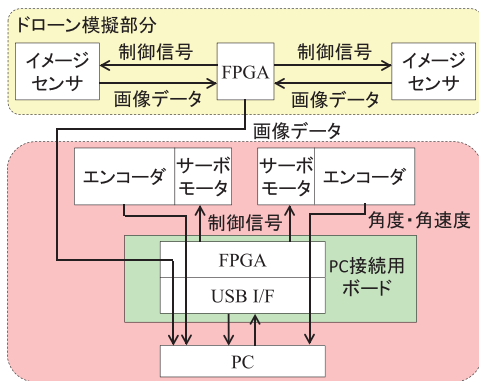


図 4 アルゴリズムの評価に用いたシステムの構成

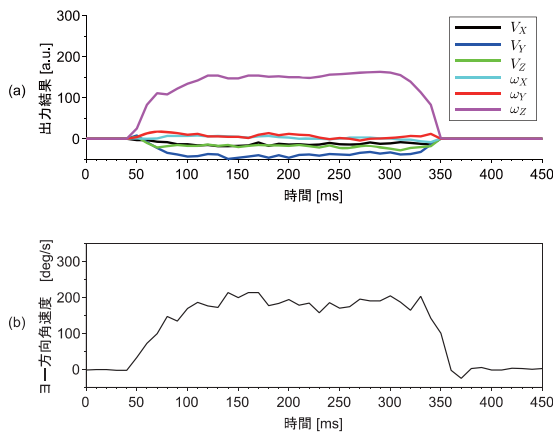


図 5 (a) ヨー方向回転時のアルゴリズムの出力結果。(b) サーボモータのエンコーダより取得したモータの回転角速度。横軸は時間である。



図 6 リアルタイム視覚情報処理回路を実装可能なドローンの外観

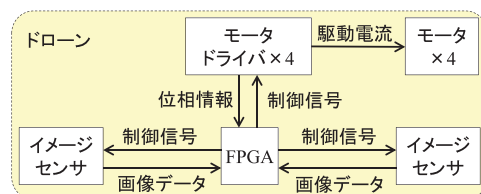


図 7 アルゴリズムの評価に用いたシステムの構成

[今後の研究の方向, 課題]

本研究では、OF パターンを利用して小型飛行体の自己運動を識別するアルゴリズムを開発し、本アルゴリズムによって制御されるモータ駆動系とこれを搭載するドローン機体を開発した。今後は、本研究で開発したアルゴリズムを、本研究で開発したドローン機体に搭載されている FPGA に実装し、昆虫のように空中を自由に飛び回るドローンの実現を目指す。

[成果の発表, 論文等]

発表・論文

- [1] 常川尚汰, 上野冬貴, 石井和男, 八木哲也, 奥野弘嗣, “昆虫視覚系の運動検出モデルに学んだ小型自律飛行体のための自己運動推定システム”, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 北九州, 2016/1/28, 信学技報, vol. 115, no. 426, pp. 33-38.
- [2] Shota Tsunekawa, Fuyuki Ueno, Kazuo Ishii,

Tetsuya Yagi, Hirotsugu Okuno, “Computing ego-motion of a small UAV with image processing inspired by the visual neuronal circuit of insect,” The SICE Life Engineering Symposium 2016, Osaka, 2016/11/3-5, Proceedings of Life Engineering Symposium 2016, pp. 26-27.

招待デモ・招待講演

- [1] 奥野弘嗣, “小型飛行ロボット制御のための昆虫に学んだ視覚システム,” NEDO エネルギー・環境新技術先導プログラムワークショップ「人工知能の応用範囲を拓く超高速・低消費電力ハードウェア技術」, 東京, 2016/10/27.
- [2] 奥野弘嗣, “神経に学んだ視覚情報処理システム,” 公益社団法人精密工学会 —— 第 70 回超精密加工専門委員会「脳型コンピューティングの最前線——生物, ニューロモルフィックから人工知能まで——」, 大阪, 2016/12/16.

受賞

- [1] IEEE Computational Intelligence Society Japan Chapter Young Researcher Award: 発表・論文 [1] において, 筆頭著者の学生が受賞。