

令和元年6月21日現在

機関番号：34406

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K16073

研究課題名(和文) 昆虫の視覚制御運動に学んだ小型飛行ロボットによる屋内探索

研究課題名(英文) A small aerial vehicle inspired by vision-controlled movement of insects for indoor exploration

研究代表者

奥野 弘嗣 (Okuno, Hirotugu)

大阪工業大学・情報科学部・講師

研究者番号：30531587

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、昆虫の視覚系に学んでオプティカルフロー(OF)パターンを識別することにより、小型飛行体の自己運動の推定を行うアルゴリズムを考案した。また、このアルゴリズムを、主にCMOSイメージセンサとFPGAからなる小型の回路システムに実装し、実際にこのシステムに運動を加えることにより、考案したアルゴリズムが適切に機能するかを検証した。結果、実際の自己運動の推定も適切に行えることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で取り組んだような動画画像処理を、従来のコンピュータを用いてドローンの制御が行える速度で行うことは容易ではない。本研究では、このような処理を効率よく行っている視覚神経系のアルゴリズムとアーキテクチャを手本として、デジタル回路を用いて視覚情報を並列に処理することにより、実用的かつ低消費電力なシステムを実現した。この成果は、小型・高速・低消費電力なシステムでの画像処理を必要とする他の応用でも生かすことができる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we devised an algorithm that estimates the ego-motion of a small unmanned aerial vehicle by classifying optical flow (OF) patterns, inspired by insect's visuomotor control system. We also implemented the algorithm in a small circuit system composed of a CMOS image sensor and an FPGA, and tested the performance of the system in motion. The results showed that the system estimated the actual ego-motion properly.

研究分野：電子工学

キーワード：視覚情報処理 神経 昆虫 ドローン

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

### 1. 研究開始当初の背景

近年、処理装置・センサ・駆動部品の小型化に伴い、様々な小型飛行ロボットが開発されている。小型飛行ロボットは、人の立ち入りが制限される環境（放射線量が高い、倒壊の危険がある等）において自律的に飛行しながら、偵察や作業を行うことを期待されている。

しかしながら現在、飛行ロボットの多くは、慣性センサ（ジャイロ等）を利用した姿勢制御を除き、人の手あるいは周囲環境に取り付けたセンサによって遠隔操作されており、自律的には行動していない。ロボット自身に取り付けたセンサと処理装置によって、特定の機能（自己運動推定等）を遂行する視覚的自律制御は試されてはいるものの、コンピュータシミュレーションにとどまっているものが多く（一例として[1]）、未知環境での作業等の実現には至っていない。

一方、自然界に目を向けると、飛行を行う昆虫たちは、視覚情報を用いて追跡・回避・着陸といった自律動作を実に巧みにを行っている。昆虫たちが用いている視覚情報は、オプティカルフロー（OF）と呼ばれる網膜上の像の動き情報であり、彼らはこの動き情報から自己の運動を把握するとともに上記動作を実現している（総説として[2]）。シンプルな視覚神経回路から様々な動作を生み出す昆虫たちは、小型視覚制御飛行ロボットの優れた手本である。これら昆虫の視覚神経系を模倣することは、視覚情報を手掛かりとして自律的に飛行できるドローンを実現するための有望な手段の一つである。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、昆虫の視覚神経回路のアーキテクチャとアルゴリズムに学び、OF から飛行ロボットの運動状態等を推定し、その推定結果から機体を制御するシステムを開発することである。

### 3. 研究の方法

(1) 図1に自己運動とOFの関係を示す。図中、四角の枠で囲まれた矢印群はOFを表す。前進をした場合（図1(a)）、右側に設置されたイメージ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、左側に設置されたカメラからはその逆方向のOFが得られる。またヨー回転、ピッチ回転を行った場合も同様に、右側および左側に設置されたイメージセンサから図1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はその運動に固有のものとなる。

また、イメージセンサによって観測されるOFは、飛行体の6自由度の運動（X、Y、Z軸方向への直進速度  $V_x, V_y, V_z$ 、各軸まわりの角速度  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ ）と対象までの距離を用いて幾何学的に算出することができる。この算出した理論的OF（以下、参照OFと呼ぶ）と、次節で述べるアルゴリズムによって得られる自己の運動によって生じるOFとの相関をとることで、自己運動の推定を行うことができる。

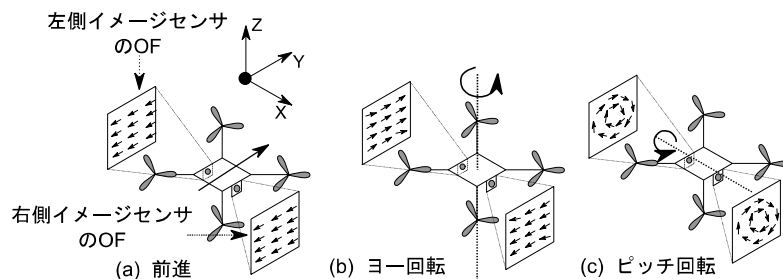


図1：飛行体の自己運動と、OFパターンの関係。イメージセンサは飛行体の左右に180度の角度をなして設置されているものとする。図中の枠に囲まれた矢印群はOFパターンを表す。

(2) 本研究で提案するアルゴリズムの流れを図2に示す。本アルゴリズムは、飛行体の左右に180度の角度をなして配置された2台のイメージセンサから取得された画像を用いて、6自由度の運動を推定する。2台のイメージセンサを設置したことで広い視野を得ることができるため、1台のイメージセンサでは判別が難しい運動の判別が容易になる。

飛行体に設置された2つのイメージセンサ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。局所速度の検出には、EMD（elementary motion detector）と呼ばれる、昆虫視覚系において運動検出を行っていると考えられている神経回路をモデル化したものを用いた[3]。図2枠内に示した矢印は、ピッチ回転時にここで得られる局所運動検出器の出力を、一例として模式的に表したものである。

次にこの出力結果を自己運動推定器に入力し、6自由度それぞれの運動によって生じる参照OFとの相関をとることで自己運動が推定される。相関値  $o_i$  は以下の数式で定義する。

$$o_i = \sum_x \sum_y U(x, y) \cdot F_i(x, y), (i \in (V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z))$$

ここで  $U(x, y)$  は、EMDによって検出された  $(x, y)$  画素における局所速度であり、 $F_i(x, y)$  は6種類の運動に対する参照OFの  $(x, y)$  画素における速度である。この演算を左右両方のイメージセンサ

から得られた入力に対して行う。この演算では、視野全体に対して相関をとるため、個々の速度検出器の精度が多少低くても、視野全体の傾向が検出できてさえいれば、正しく推定できる。

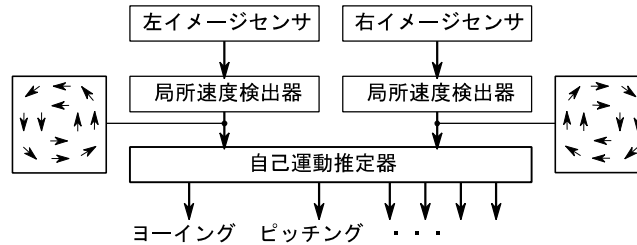


図2：アルゴリズムの流れ。

(3) 図3に、前節のアルゴリズムを試験するために構築したシステムの構成を示す。本システムは、CMOSイメージセンサ(OmniVision OV7725),FPGA(XILINX XC6SLX45),PC(Core i5-3470, 3.2GHz)で構成される。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。

CMOSイメージセンサはFPGAによって制御され、100fpsで画像を取得する。イメージセンサの画素数は $160 \times 120$ であり、画角は水平方向に $120^\circ$ である。イメージセンサ出力は、8bitのデジタル情報としてFPGAに入力される。

FPGAは、PCから送られたパラメータに従ってイメージセンサ、及びサーボモータの制御を行うとともに、画像情報及びサーボモータの角度情報をPCへと送信する。PC内のC言語プログラムが、FPGAから送信されてきた取得画像を用いて前節のアルゴリズムに従って運動推定を行う。

本システムを用い、図4に示す環境によってCMOSイメージセンサに運動を与えることによりアルゴリズムの検証を行った。側方にある4枚の亚克力板及び床面に提示画像を貼り、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回路ボード、及びこれを回転させるサーボモータを設置した。この実験環境を用いて、イメージセンサに並進、回転運動を与えて撮像した画像を用いて、アルゴリズムの検証を行った。

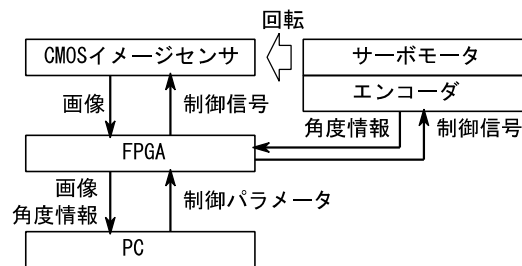


図3：アルゴリズムの試験に用いたシステムの構成。

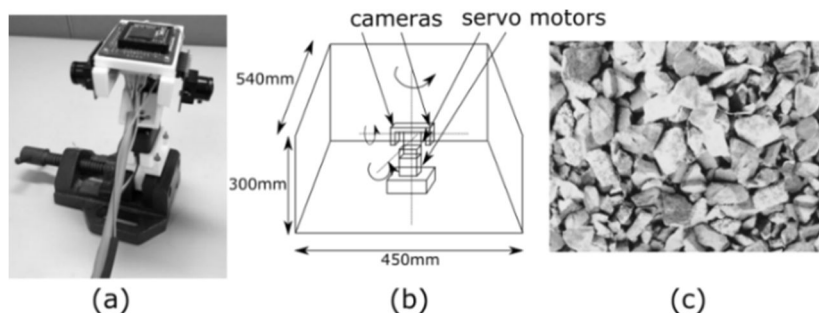


図4：実験環境。(a) 実験システムの外観。CMOSイメージセンサ，FPGA，サーボモータからなる。(b) 実験環境の模式図。曲線矢印はカメラが回転可能な方向を示している。(c) 本実験で使用した提示画像。飛行体の自己運動と、OFパターンの関係。イメージセンサは飛行体の左右に $180^\circ$ の角度をなして設置されているものとする。図中の枠に囲まれた矢印群はOFパターンを表す。

#### 4. 研究成果

前節(3)の実験環境において、イメージセンサをヨー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、6種類の運動 $V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ に対する自己運動推定器の出力を示し、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 $\omega_y$ 検出器の出力が高い値を示し、その他の5つの出力は小さな値となっていることが確認できる。他の運動に対しても同様に、加えた運動に対する検出器の出力のみが高い値となった。

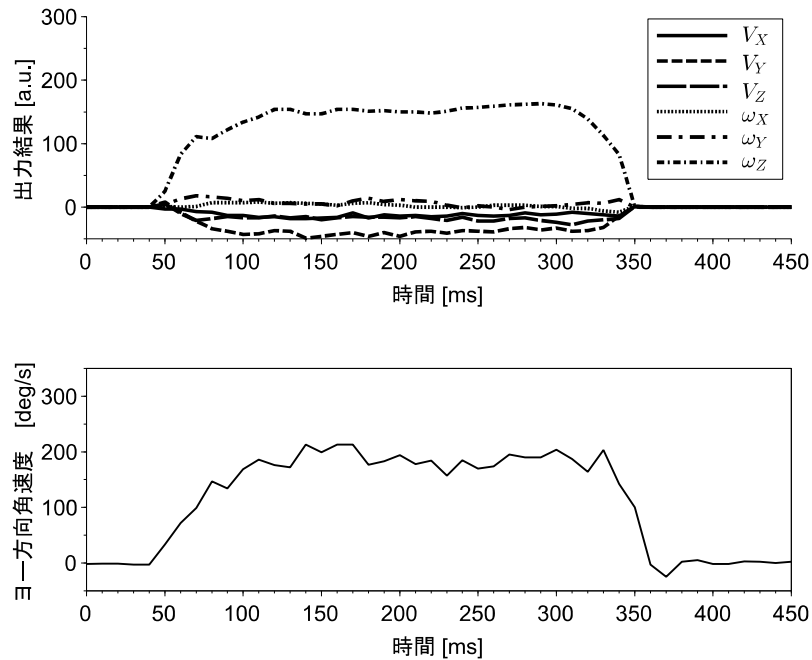


図5：(a)ヨー方向回転時のアルゴリズムの出力結果．(b)サーボモータのエンコーダより取得したモータの回転角速度．横軸は時間である．

以上のように，本研究では視覚神経系に学び，OF から自己運動の推定が行える小型システムを開発するとともに，このシステムを搭載して飛行するドローンを開発した．また，視覚神経系の応答をリアルタイムで模擬する回路の開発も行った．

#### < 引用文献 >

- [1] J. Plett, A. Bahl, M. Buss, K. Kuhnlenz, and A. Borst, "Bio-inspired visual ego-rotation sensor for MAVs," *Biological Cybernetics* 106, pp. 51-63, 2012.
- [2] M. V. Srinivasan, "Honeybees as a Model for the Study of Visually Guided Flight, Navigation, and Biologically Inspired Robotics," *Physiological Reviews* 91, pp. 413-460, 2011.
- [3] V. Hassenstein and W. Reichardt, "System theoretical analysis of time, sequence and sign analysis of the motion perception of the snout-beetle *Chlorophanus*," *Z Naturforsch. B*, 11, pp. 513-524, 1956.

#### 5 . 主な発表論文等

##### [ 雑誌論文 ] ( 計 7 件 )

( 査読あり ) Yuki Hayashida, Yuka Kudo, Ryo Ishida, Hirotsugu Okuno, and Tetsuya Yagi, "Retinal circuit emulator with spatio-temporal spike outputs at milliseconds resolution in response to visual events," *IEEE Transactions on biomedical circuits and systems*, vol. 11, iss. 3, pp. 597-611, 2017.

DOI: 10.1109/TBCAS.2017.2662659

( 査読あり ) Shinsuke Yasukawa, Hirotsugu Okuno, Kazuo Ishii, and Tetsuya Yagi, "Real-time object tracking based on scale-invariant features employing bio-inspired hardware," *Neural Networks*, vol. 81, pp. 29-38, 2016.

DOI: 10.1016/j.neunet.2016.05.002

( 査読なし ) 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," *Proceedings of Life Engineering Symposium 2016*, pp.26-27.

##### [ 学会発表 ] ( 計 14 件 )

( 招待講演 ) 奥野弘嗣, "神経に学んだ視覚情報処理システム," 精密工学会 - 第 70 回超精密加工専門委員会, 2016 年 12 月 16 日, メルパルク大阪 ( 大阪市 ) .

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*, 2016 年 11 月 3-5 日, 大阪国際交流センター ( 大阪市 ) .

Yuka Kudo, Yuki Hayashida, Ryoya Ishida, Hirotsugu Okuno, Tetsuya Yagi, “A retino-morphic hardware system simulating the graded and action potentials in retinal neuronal layers,” The 23rd International Conference on Neural Information Processing, 2016年10月16-21日, 京都大学(京都市).

〔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〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

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。