

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14254

研究課題名(和文) 複眼視覚航法を用いたロバスト自律航法システムの開発

研究課題名(英文) Robust autonomous navigation system based on compound eye systems of flying insects

研究代表者

外本 伸治 (Hokamoto, Shinji)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：80199463

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)：複眼の視覚処理システムに基づき、飛行体の自律航行を可能にする工学システムについて研究した。このシステムは、オプティックフローを広範囲に統合することで、小型・軽量・低計算量で、しかも環境にロバストな運動推定を可能にする。理論と工学システムとの違いを考慮し、オプティックフローを得るカメラの個数や配置/向き、またフローの統合方法について、計算機シミュレーションと実験の両面から研究した。オプティックフローを得るためのセンサボードのプログラムについても研究した。さらに、他のセンサと組み合わせる場合や、障害物の検知のための物体までの距離推定法についても研究した。

研究成果の概要(英文)：This research aims to develop a feasible engineering system to robustly estimate a vehicle's motion variables for autonomous flight, based on Wide-Field-Integration (WFI) of optic flow. Because optic flow is obtained from image sensors with restricted field of views, the number and placement/optical axes of image sensors are the important factors for the accurate estimation. This research investigated the effect of them as well as the combination method of optic flow by using numerical simulations and experiments. A sensor board to experimentally obtain optic flow has been improved to realize a practical WFI of optic flow sensor. Furthermore, this research showed some guidelines to combine with other sensors and some distance estimation methods to obstacles for autonomous obstacle detection and avoidance.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：自律航法 運動推定 オプティックフロー 広域統合 距離推定

1. 研究開始当初の背景

飛翔する昆虫の一部は、複眼によって得られる Optic Flow を広範囲にわたって統合処理する (Wide-Field-Integration of Optic Flow: WFI of Optic Flow) ことで、自らの運動状態を認識していると考えられている。この認識システムは、計算量が少なく、小型・軽量の装置で構築できるため、小型飛行体に適した特長を持つ。しかも、GPS 信号を必要とせず、周囲環境にロバストであるため、飛行体の自律化にとって望ましい。

しかし、WFI of Optic Flow の理論では、飛行体の重心まわりに構成される球状画像面の全方向にわたって Optic Flow が得られることが仮定されており、実際の工学システムでの実現は難しく、これまでに航空機や宇宙機のような 3次元運動をする飛行体へ適用された例はない。

2. 研究の目的

本研究では、WFI of Optic Flow 理論とその理論を工学システムで実現する際の「違い／ずれ」を考慮した上で、WFI of Optic Flow を実用的な運動推定システムとすることを目的とする。そのために、計算機シミュレーションで「違い／ずれ」の影響を数値的に評価し、適切なシステムとするための構築指針を明確にするだけでなく、実験的にその効果を検証し実用化に向けた研究開発をする。また WFI of Optic Flow の理論では、基本的には移動体の速度と角速度だけを推定するが、本研究では推定する変数を増やす／減らすことについても研究する。具体的には、速度・角速度と同時に距離も推定する手法を開発し障害物を検知・回避すること、またジャイロセンサ出力と融合させて速度推定精度を向上させること、について検討する。

3. 研究の方法

計算機シミュレーションと実システムを用いた実験の両面から本研究を進めた。

(1) 計算機シミュレーションによる検討

球状画像面の全方向にわたり Optic Flow が得られると仮定する理論に対し、実際のシステムでは視野角が有限なイメージセンサによって Optic flow を得る。そのため、全方向の Optic Flow を得ることは難しい。また速度・角速度を推定するには、別のセンサで測定された姿勢角や高度の情報を用いるため、それらのセンサに含まれるノイズも推定精度に影響する。そこでまず、別センサのノイズの影響を解析的・数値的に調べたところ、Optic Flow にランダムノイズを加えることで議論できることが分かった。さらに、地表面の起伏についても Optic Flow のずれとして表現できる。

そこで、Optic Flow にランダムノイズを加えた上で、以下の項目が速度・角速度の推定誤差の標準偏差にどのように影響するかを調べ、推定精度を向上させる実用的なシステ

ムの構成について検討する。

- 視野角の広さ／狭さ
- (同じ視野角での) Optic Flow の数
- イメージセンサの数と向き
- イメージセンサの取り付け位置
- Optic Flow を統合する感度関数の形

また、WFI of Optic Flow の理論において、移動体の運動と Optic Flow との関係式には、速度・角速度だけでなく、姿勢角や距離も含まれる。そこで、速度・角速度と同時に、より多くの変数を推定する手法についても研究する。

(2) 実験装置を用いた開発研究

(1)の計算機シミュレーションによる検討結果に基づき、複数の Optic Flow センサボードを飛行体に搭載し、飛行体の速度・角速度を推定する実験を行う。飛行体は、手に持って動かすだけでなく、実際にフリーフライトさせる。このとき、WFI of Optic Flow の推定精度を定量的に評価するために、飛行体の運動は同時にモーションキャプチャで計測し、その出力の時間変化から速度・角速度を推定する。

また、実際の飛行体の多くは、角速度を計測するジャイロセンサを搭載している。そこで、角速度変数はジャイロセンサの出力を用いることにし、WFI of Optic Flow で推定する変数を速度だけにすることで、推定精度がどのように変化するかを実験的に調べる。

4. 研究成果

本研究によって得られた成果の概要を、代表的な結果の図と共に、下記にまとめる。

なお、図1は飛行体固定の座標系  $(x_b, y_b, z_b)$  と飛行体の重心まわりに定義される球状画像面を示している。 $\beta$  と  $\gamma$  は、それぞれ  $z_b$  軸と  $x_b$  軸からの俯角と方位角であり、球状画像面上の位置を表す。また以下の結果の図における、 $u, v, w$  は  $x_b, y_b, z_b$  方向の並進速度であり、 $p, q, r$  は各軸まわりの角速度である。

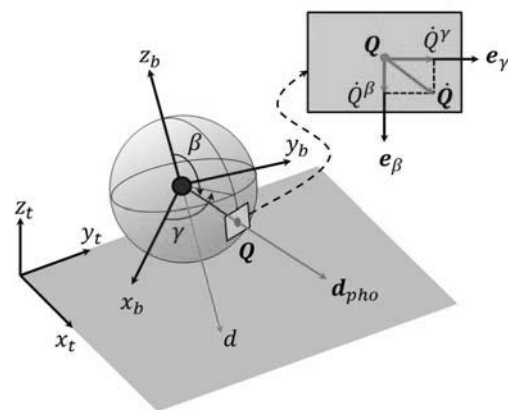


図1 飛行体固定座標系と球状画像面

(1) 計算機シミュレーションによる検討から得られた主な成果

- 視野角の広さと Optic Flow の数についての検討

ある飛行状態に対して、(Optic Flow の数を一定として) WFI of Optic Flow で統合する領域を変化させたときの推定誤差の標準偏差の一例を図 2 に示す。図より、統合する領域が広がるにつれ、速度・角速度はいずれも、標準偏差が顕著に小さくなり、推定精度が向上することが分かる。これは、飛行状態(飛行の方向/速度/姿勢/高度など)に関係なく、共通に得られる傾向である。逆に、Optic Flow を統合する領域を一定として Optic Flow の数を増加させると、推定精度は向上するが、図 2 に比べると向上の程度は緩やかである。

このことより、WFI of Optic Flow において、推定精度を向上させるには統合領域を広くすることが効果的であり、このことは昆虫の複眼が広い視野角を持つように進化してきたことと一致する。

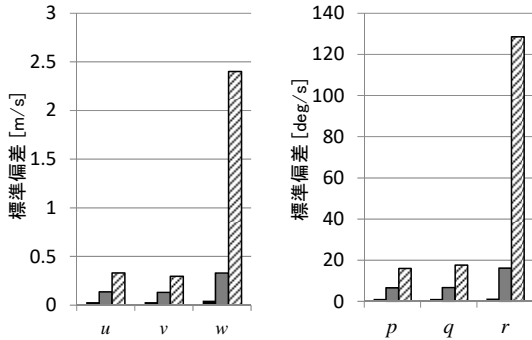


図 2 統合領域の違いに対する標準偏差  
■ 90° ≤ β ≤ 180°, ■ 140° ≤ β ≤ 180°, ▨ 160° ≤ β ≤ 180°

- イメージセンサの数と向き

一定の視野角を持つイメージセンサの個数を 1 個~4 個まで変えて、イメージセンサの向きと推定精度との関係を調べた。このとき、飛行体の姿勢/高度や移動方向による影響についても調べた。

その結果、イメージセンサの俯角 β は鉛直下向きによりも水平方向に近い方がいいことが分かった。ただし水平に近すぎると、飛行体の姿勢が変動したときに地表面が見られなくなる。そのため、イメージセンサの適切な俯角は、予想される姿勢変動量の最大値に基づき決めればよいことになる。

イメージセンサの方位角方向の配置については、センサが 2 個ならば両者の間がおおよそ 90 度になるように、3 個目以降を設置する場合は、センサ間の最大方位角が等分されるようにセンサを追加すれば、精度の向上が期待できることが分かった。

- イメージセンサの取り付け位置

WFI of Optic Flow の理論は、飛行体の重心まわり球状画像面が構成されると仮定し

ている。このような配置は現実的ではないため、本研究では、重心から離れた位置にあるイメージセンサによって得られる Optic Flow から運動変数を推定できるように関係式を拡張した。さらに、その有効性を計算機シミュレーションにより検証した。

- Optic Flow を統合する感度関数の形

WFI of Optic Flow では、感度関数を用いて、広領域にわたる Optic Flow を統合する。空間積分を Riemann 和に置き換えてもよいことはすでに学会誌にて発表済みであるが、本研究では感度関数の形に検討を加えて、画面上での Optic Flow の 2 成分を独立に評価できるようにした。

結果の一例を図 3 に示す。図より、新しい感度関数の形を用いることで、推定精度が改善できることが明らかである。

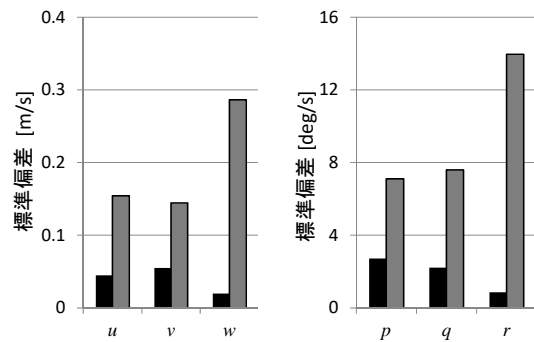


図 3 感度関数による標準偏差の改善

■ 改善後, ■ 従来法

- Optic Flow から高度/距離を推定する手法の検討

イメージセンサの重心からの距離の違いを利用して、速度・角速度と同時に飛行体の高度を推定する手法を複数検討した。また、それらの有効性を計算機シミュレーションで確認した。

さらに、画像面をコンピュータビジョンの考え方にに基づき分割した後に、各領域に WFI of Optic Flow を適用することで、運動変数の推定と同時に、障害物の検知や障害物までの距離を推定できる手法を考案した。

(2) 実験装置を用いた研究から得られた主な成果

- Optic Flow を得るセンサボードの開発

当初、Optic Flow を得るセンサボードとして、ZMP 製の OpticalFlow-Z を用いた。ただし、市販の状態では 4×3 の Optic Flow しか得られないため、ボードの性能上限である 79×59 の Optic Flow が得られるようプログラムの変更を委託した。しかし、実験を繰り返す中で、そのボードが領域ごとに偏った Optic Flow を出力しており、それが原因で推定精度が低下することが分かった。

そこで、センサボードを 3DR 製の PX4FLOW に変更した。ただこちらも市販の状態では

Optic Flow の数が十分でないため、 $30 \times 20$  の Optic Flow が得られるようプログラムを改良したものをを用いることにした。

- 飛行体に搭載しての運動推定の実験

Optic Flow センサボードを飛行体に搭載し、WFI of Optic Flow の手法により飛行体の速度・角速度を推定する実験を行った。推定精度を検証するために、実験室内にはモーションキャプチャが設置してあり、飛行体に取り付けたマーカー位置から飛行体の位置・姿勢、さらにその時間変化から速度・角速度を推定した。イメージセンサの位置・向きは、計算機シミュレーションの検討結果から定めた。図 4 は、フリーフライト実験の様子の一例である。

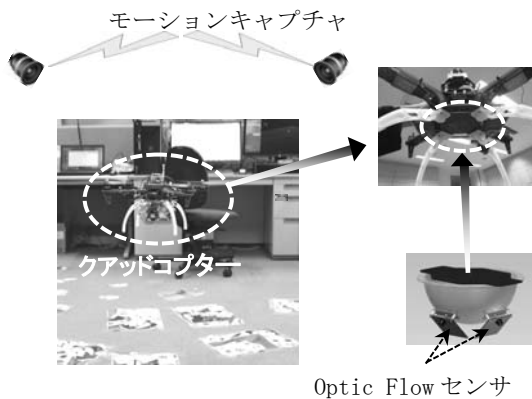


図 4 飛行体に搭載しての実験の様子

図 5 は、飛行実験により得られた運動変数推定値の時間履歴の一例である。黒線が WFI of Optic Flow の手法で推定した結果で、灰色線がモーションキャプチャによる推定値

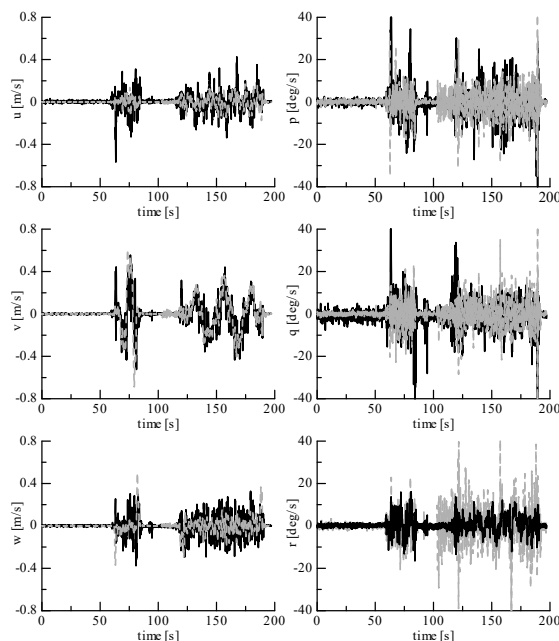


図 5 運動変数推定の一例

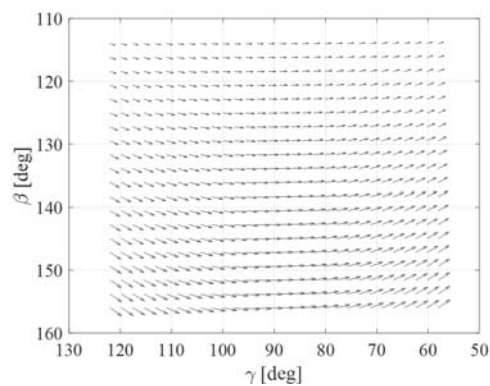
— WFI of optic flow による推定値  
 — モーションキャプチャによる推定値

の履歴である。両者の傾向はおよそ一致しているが、特に角速度では定量的に一致しているとは言い難いほどの差も見られる。

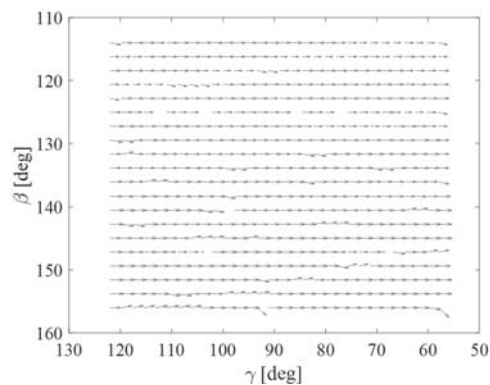
- センサボードにおける Optic Flow 換算式の再検討

上記の実験において、WFI of Optic Flow とモーションキャプチャで推定結果がずれた原因として、画像面形状の違い（球状画像面と平面画像面）が原因の一つと考えられた。そこで、両者の幾何学的関係を再度検討し、Optic Flow を求める過程を見直した。

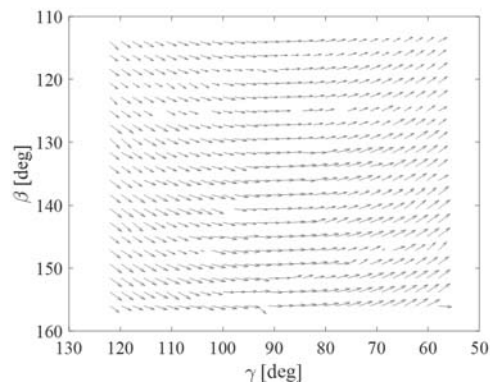
図 6(a) は、実験のある瞬間にモーションキャプチャにより推定された運動状態に対して計算された(理想的な)Optic Flow である。(b) はその瞬間にセンサボードから得られた Optic Flow であり、画像面の外側ではずれが大きくなっていることが分かる。そこで、幾



(a) 運動状態からの理想的な Optic Flow



(b) 実験時の Optic Flow



(c) 再検討後の Optic Flow

図 6 球状画像面に対する補正の効果

科学的関係を考慮して補正した Optic Flow が(c)である。これは、(a)とかなり近い結果となっており、Optic Flow センサボードにおけるプログラム改善の成果である。

さらに、多くの飛行体では、角速度を計測するためのジャイロセンサが搭載されている。角速度はジャイロセンサの出力を利用することにし、WFI of Optic Flow では速度だけを推定する場合について検討した。まず、イメージセンサの配置を再検討し、その後、推定精度についての実験を実施した。

結果の一例を図7に示す。ここでは上述の画像面の違いに対する検討が入っていないため、定量的なずれは6変数を推定する場合に比べて小さくなっている。

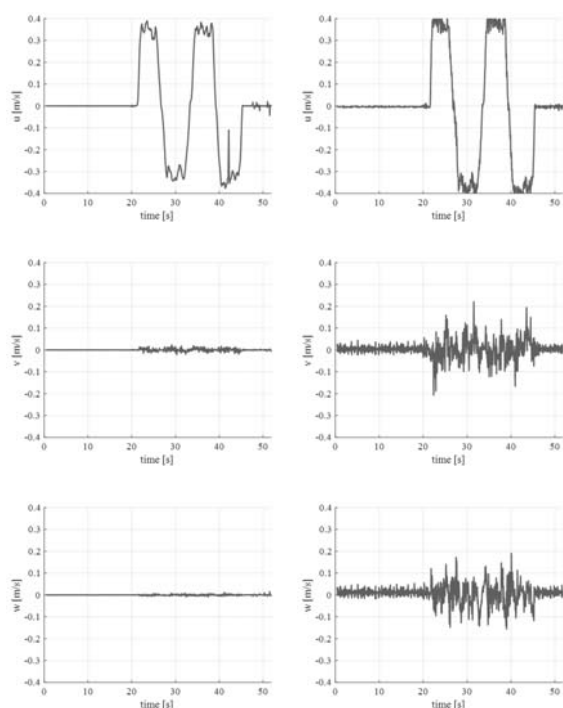


図7 ジャイロセンサと統合することによる速度の推定  
(左側：モーシオンキャプチャの推定，  
右側：WFI of optic flow の推定)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① 外本伸治, 複眼視角航法を用いた航空機・宇宙機の運動推定システム, 計測と制御, Vol. 57, 4月号, pp. 266-271, 2018
- ② Naoto Kobayashi, Mai Bando, Shinji Hokamoto, Improvement of Wide-Field-Integration of Optic Flow Considering Practical Sensor Restrictions, Journal of Mechanical Engineering and Automation, 査読有, Vol. 7, No. 2, pp. 53-62, 2017, doi:10.5923/j.jmea.20170702.04

〔学会発表〕(計6件)

- ① Shinji Hokamoto, Bio-inspired Navigation for Autonomous Vehicles, The 9th Kyushu University-KAIST Symposium on Aerospace Engineering, Keynote speech
- ② 丸山慶一郎, 小林直人, 坂東麻衣, 外本伸治, Wide-Field Integration of Optic Flow を用いた運動推定における画像センサ位置の影響, 日本航空宇宙学会西部支部講演会(2017)
- ③ Naoto Kobayashi, Ryusuke Nakata, Mai Bando, Shinji Hokamoto, Optic flow-based environment recognition system for planetary rovers, Proc. of the 68th International Astronautical Congress, IAC-17, 2017
- ④ Ryusuke Nakata, Naoto Kobayashi, Mai Bando, Shinji Hokamoto, Altitude and Motion Estimation for Autonomous Vehicles through Wide-Field-Integration of Optic Flow, Proc. of the 31st International Symposium on Space Technology and Science, 2017 - d - 173p, 2017
- ⑤ Ryusuke Nakata, Naoto Kobayashi, Mai Bando, Shinji Hokamoto, Altitude and motion estimation for small UAVs by using optic flow, Proc. of the 8th KAIST-Kyushu University Symposium on Aerospace Engineering, 2016
- ⑥ Naoto Kobayashi, Ryusuke Nakata, Mai Bando, Shinji Hokamoto, A Novel Attitude Estimation Method Based on Wide-Field-Integration of Optic Flow for Autonomous Navigation, Proc. of the 2016 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT), 2016

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

外本 伸治 (HOKAMOTO, Shinji)  
九州大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号：80199463

### (2) 研究分担者

坂東 麻衣 (Bando, Mai)  
九州大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：40512041