

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02354

研究課題名（和文）昆虫複眼システムに基づく完全自律型ドローンの開発と3次元観測ネットワークの構築

研究課題名（英文）Development of autonomous drones based on compound-eye procedure and three-dimensional observation network by multiple drones

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） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：自律ドローンの実現に向けて、運動変数と共に障害物までの距離を推定するシステムについて、PX4FLOWセンサを用いて実験的に研究した。センサが出力するoptic flowの精度と距離推定精度との関係を調べ、複数のPX4FLOWセンサを用いて、運動変数と距離の同時推定ができることを示した。また別のカメラを用いて、一枚の画像データから運動変数・距離を同時に推定する際の精度について実験的に調べた。さらに、自律ドローンを3次元移動可能な観測システムと捉え、複数ドローンが分散制御で構築する観測ネットワークについて検討した。方策ベースの強化学習を用いて、ドローン数の変化に対応できる設計法を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

昆虫の複眼システムを模擬したWFI of optic flowという手法で、飛行体の運動変数と障害物までの距離を同時に推定できるシステムの構成法を示し、その特性を実験的に調べた。これは、小型・軽量・低消費量のセンサと低計算能力のPCで構成されるため、搭載システムだけで障害物がある空間を自在に飛行できる自律ドローンの実現に極めて有用なシステムである。また、ドローン群による観測ネットワークについては、実ミッションで大きな問題となるドローン数の変化に対応できるシステムの設計法を示しており、将来の広域探査システムや被災地での通信網確立に向けて有用である。

研究成果の概要（英文）：For development of autonomous drones, experimental research has been conducted by using PX4FLOW sensors to estimate both vehicle's motion-variables and distances to obstacles. First, the relationship between the accuracy of optic flow and obstacle-distance has been investigated. Then, by utilizing two PX4FLOW sensors, it has been shown that simultaneous estimation for motion-variables and obstacle-distance is possible. The simultaneous estimation from one camera-image has been also experimentally investigated. Furthermore, by utilizing multiple autonomous drones, this research has discussed how to develop effective observation networks for various missions. A design procedure by applying policy-based strategy to a reinforcement learning has been considered, and it shows that the developed drones-network is effectively adaptable for the drone-number change.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：自律航法 オプティックフロー 運動推定 距離推定 ドローン群ネットワーク 強化学習

1. 研究開始当初の背景

国内外の研究機関において、小型無人航空機（通称“ドローン”）を応用したプロジェクトや自動飛行については盛んに研究されているが、搭載センサだけで障害物がある空間を自在に飛行できるシステムは実現できていない。このような自律飛行システムの実現には、ドローンに搭載可能な小型・軽量センサと低計算能力 PC によって、飛行体の運動変数を高速・高精度に推定でき、しかも周囲に存在する障害物を検知し、そこまでの距離を推定できるシステムが必要になる。

2. 研究の目的

本研究では、昆虫の複眼における神経回路網を工学的に模擬した Wide-Field-Integration (:WFI) of optic flow を用いて、自律飛行に必要な運動変数（速度、角速度）を推定し、周囲の未知障害物の検知・距離推定を可能にするシステムを開発する。さらに、開発されたシステムを搭載する自律飛行ドローンを空中観測プラットフォームとして捉え、複数の自律ドローン群による能動的な3次元観測ネットワークの構築法について研究する。

3. 研究の方法

チューリッヒ工科大学にて開発された PX4FLOW センサを用いて、飛行体の運動に伴い生じる optic flow を取得する。ただし、このセンサは視野領域わたる平均値としての optic flow を一つだけ出力するように開発された。そこで、視野領域において 20×20 の optic flow が出力されるように、公開されているファームウェアを書き換え、それらから運動変数が推定できるようにしたものを用いる。

さらに障害物までの距離推定には、PX4FLOW センサを複数使うか、もしくは得られた optic flow を複数の領域に分割し、それぞれに WFI of optic flow の手法を適用する。このとき、センサを搭載した飛行体の運動は等しいという拘束条件から、対象までの距離を逆算する。さらに、視野内で得られる optic flow の領域を細かく分割し、それぞれの領域までの距離を求めることで、障害物全体の形状を再構成する。このとき、形状推定の精度はセンサから得られる optic flow の精度が強く影響し、これは照明条件や対象のテクスチャー特性、さらに optic flow を抽出するあめのマッチング手法にも依存する。そこで、まずそれらの影響を計算機シミュレーションに調べ、その後に PX4FLOW センサを用いて実験的に検証する。さらにその過程で、PX4FLOW センサには本質的な問題があることが判明したため、別のカメラ（Sony α6000）を用いて推定精度を実験的に再検証した。

また、種々のミッションに対応可能な自律ドローン群による能動的3次元観測ネットワークの構築法について検討する。ここでは、搭載 PC の計算能力があまり高くないこと、バッテリー密度が低く飛行時間が限られることが制限となる。その結果、ドローンが充電のために離脱・再帰を繰り返すことが予想されるため、ドローン数の変化に対応でき、かつ分散制御による低計算量の柔軟ネットワークの構築手法を研究した。そのために、各ドローンは近傍に存在するドローンとの相対位置関係から自らの行動を決めるために、強化学習の枠組みの中で、状態や行動、報酬をどのように設定すべきかを研究した。

4. 研究成果

4-1 障害物の形状推定における推定精度

障害物をより効率的に回避するには、その形状を推定することが必要である。そのために、WFI of optic flow の手法で対象の各点までの距離を推定する。形状を詳細に再構成するには領域の細かく分割することが望まれるが、これは optic flow を広範囲に統合するという WFI of optic flow の考えと相容れない。そこで、ある程度の広さを持つ optic flow 領域を細かく移動させることで、ノイズの平滑化と障害物の再構成精度をバランスさせる手法を考えた。

実験で用いる PX4FLOW センサは、照明条件や対象表面テクスチャーにも依存するが、画像面においておよそ 0.03rad/s 程度の誤差を持つことを特定している。このセンサはホビー目的に

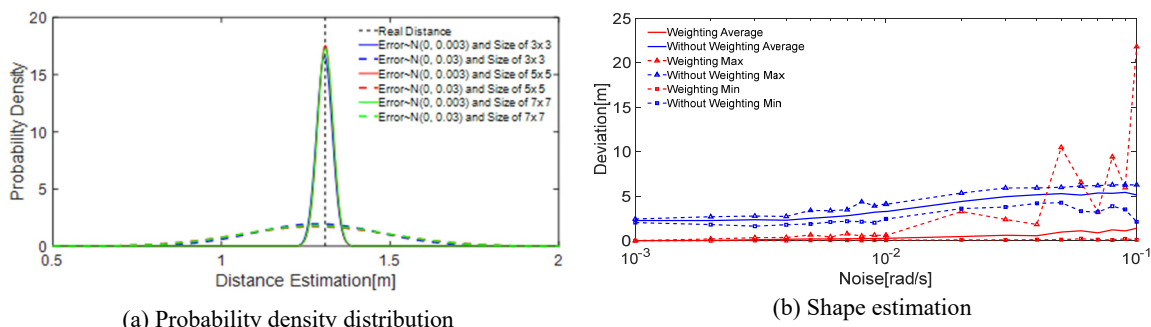


図1 距離の推定精度

開発されており、将来的にはより高精度に **optic flow** を出力するセンサが利用できると予想される。そこで、**WFI of optic flow** 領域の大きさとノイズレベルが距離推定に及ぼす影響を統計的に調べた。

図 1(a)では横軸が推定された距離であり、異なる傾きを持つ微小領域までの推定密度関数を示している。結果は、領域の大きさの影響は小さく、ノイズの大きさが支配的であることを示している。また、PX4FLOW センサを用いると、10~20%程度の距離誤差が生じるが、もし誤差が 0.003rad/s 程度ならば大幅な精度の改善されることを示している。(b)では横軸を誤差の大きさとしており、誤差が 0.01rad/s 程度の **optic flow** ならば、細かく分割した領域に対して **WFI of optic flow** の手法を適用することで、距離誤差が 1~2%程度になる可能性を示唆している。

4-2 PX4FLOW センサを用いた距離推定

二台のカメラを用いて、運動変数と共に距離を推定する 2つの手法について、それぞれの特性を実験的に調べた。

手法 1: 片方のカメラの **optic flow** から「(速度×距離)と角速度」を推定し、他方の **optic flow** から同じ角速度となるように、距離を推定する。

手法 2: 距離を未知数として **optic flow** の式を変形し、距離についての非線形項が消去されるように、式の差分を計算する。残った関係式に対して **WFI of optic flow** の手法を適用し、運動変数と共に距離を推定する。

なお、推定する距離を、障害物までの距離と考えれば障害物回避に有用であり、飛行体の高度と捉えれば高度計を必要としない自律システムに有用である。

図 2 は、PX4FLOW センサ (画角 59°×40°) 2 台を用いて、手法 1 から距離と運動変数を推定した結果の一例である。距離と運動変数共に推定できているが、推定式において距離項の係数が小さくなる瞬間がいくつかあり、その際は推定精度が低下する結果となっている。

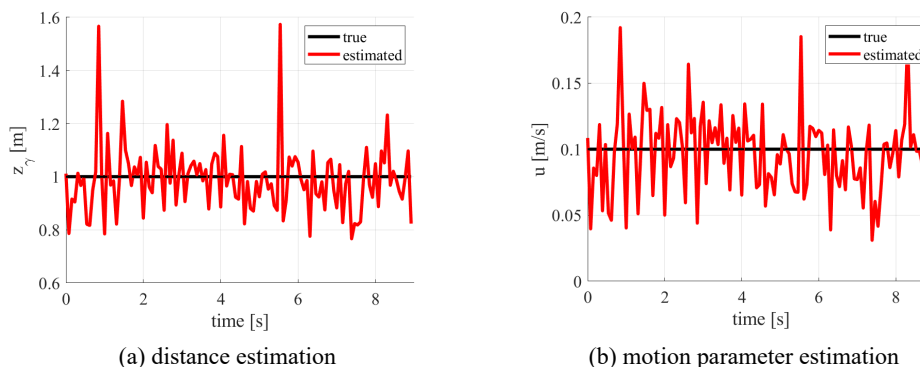


図 2 PX4FLOW センサによる距離推定ならびに運動推定の一例

また、手法 2 は、手法 1 よりもカメラの配置に制限がなく、適切な配置により推定精度の向上が期待されるが、一方で差分を取るため **optic flow** のノイズ (特に領域に関連したノイズ) の影響を強く受ける。そのため、実験で使用できるセンサにおける **optic flow** の精度によって、いずれの手法を用いるかを変えることが望ましい。

4-3 Sony α6000 カメラを用いた推定

一つのカメラを用いて障害物までの距離を推定するには、視野内の **optic flow** を障害物の領域とそれ以外の領域に分割する必要がある。このとき、**optic flow** の大きさの違いから障害物領域を特定できれば、他のセンサを必要とせず望ましい。しかし、PX4FLOW センサを用いた実験の過程で、このセンサでは障害物上の特徴点までの距離が違って **optic flow** の大きさはほとんど変化しないことが分かった (この理由は明確ではないが、PX4FLOW センサが視野範囲の平均値としての **optic flow** を高速に出力するよう開発されたためではないかと推測される)。そのため、公開されているファームウェアのソースプログラムを修正しても、この問題点への対応は難しいと判断した。

そこで、別のカメラ画像から **optic flow** を取得し、領域分割後に各領域に **WFI of optic flow** の手法を適用して、飛行体の運動変数と距離を同時に推定するために、手元にあった Sony α6000 を用いることにした。ただし、PX4FLOW センサと異なり、画像から **optic flow** を高速に取得するプログラムの開発には専門的な知識と時間が必要である。そこで本研究では、10Hz 程度での推定値の更新は諦め、ビデオ画像を保存しておき後処理で運動推定・距離推定の精度を調べることにした。結果より、運動変数と距離の同時推定が可能であり、PX4FLOW センサを用いた場合と同様の特性を持つことが確認された。

また、**optic flow** の大きさから障害物の領域を分離することは、運動変数の推定においても重要である。これは、**optic flow** の式が特徴点までの距離の関数となっているため、PX4FLOW セン

ンサで **optic flow** の大きさが平均化されることは、画像中に障害物が映り込む場合に運動推定の精度を低下させることになる。図 3 は、PX4FLOW センサと Sony $\alpha 6000$ から算出した **optic flow** を用いて、障害物が画像中に徐々に大きくなる環境下で、運動変数の推定精度を実験的に調べた結果の一例である。この例では、進行方向の速度は $u=0.1$ m/s が真値であり、時刻 $t=3$ 付近から障害物が画像中に映り込む。水色は PX4FLOW センサを用いた場合の結果であり、運動変数の推定誤差が徐々に大きくなっている（青色破線の円内）。一方で、Sony $\alpha 6000$ のビデオ画像から **optic flow** を導出した場合の結果が赤色である。この場合は、障害物上の特徴点までの距離が短く **optic flow** がその分大きくなることから障害物が映り込んでいる範囲を特定している。運動変数の推定には、その部分を除く領域において、WFI of **optic flow** の手法で運動変数を推定した。結果より、推定精度の低下は見られないことが分かる。

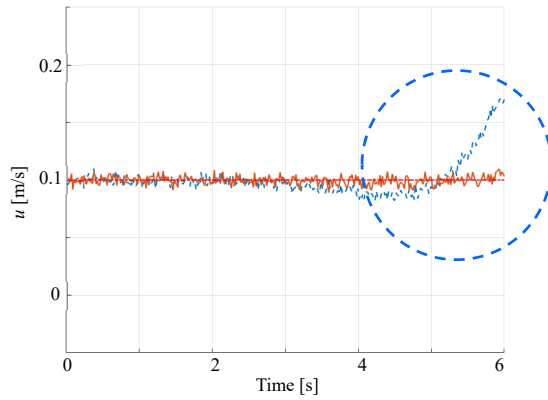
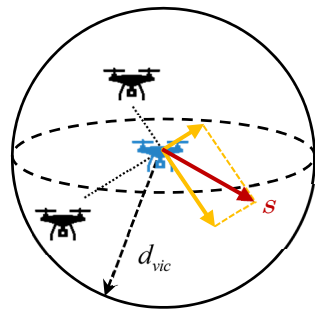


図 3 Sony $\alpha 6000$ による運動推定の一例

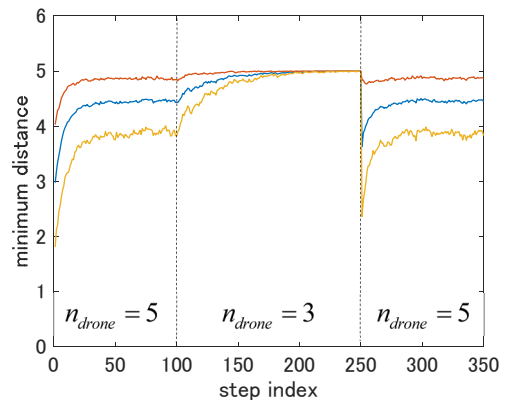
4-4 自律ドローン群による能動的な3次元観測ネットワーク

自律ドローンを 3 次元移動可能な観測システムと考えると、複数のドローンを用いてこれまでにない観測ネットワークを構築できる。そこで、定点観測やターゲット追尾のような種々の観測ミッションのタスクに対応できるように、各ドローンが適度に距離を取る (**disperse**) ことと、ある目標へ近づく (**aggregate**) ことを、組み合わせる自律ドローン群の構築法について検討した。ドローンではバッテリーのエネルギー密度が大きな問題の一つであり、ドローンは充電のために、頻繁にネットワークから離脱/再帰する。したがって、ドローン数の変化に対応できるネットワークを、強化学習に基づく分散制御に構成する手法について研究した。

このとき、3 次元空間での位置や行動を離散的に表現すると“次元の呪い”で計算量が膨大になる。そこで、連続値に基づく方策ベースの強化学習を用い、変化するドローン数に対応できるように、状態/行動ならびに報酬の表現法について検討した。結果的に、近くに存在する他ドローンからの反発力を状態、状態に基づき自らの位置変化量を行動、さらにドローン間の最小距離を報酬、とする強化学習を提案した。図 4(a) は近傍に存在するドローンからの反発力 (: 状態) を示す模式図であり、(b) は一辺 10 の立方空間に 5 機のドローンをランダムに配置して学習した結果を、ドローン数が 5 機 \rightarrow 3 機 \rightarrow 5 機と変化する環境下での最短距離を、100 回のランダム配置に対して示した履歴の一例である。この例では、各ドローンが距離 5 の範囲の近傍ドローンを認識するとしているので、5 機のときは空間の大きさに比べてドローン数が多すぎるために最短距離の平均値が 4.5 程度 (青色) までしか改善されないが、3 機の場合には認識範囲の上限 5 に収束している。赤色/黄色は最大値/最小値を意味する。



(a) state recognizing other drones



(b) distant variation to the nearest drone
(blue: average, red: maximum, yellow: minimum)

図 4 強化学習によるドローン数変化に適応可能な dispersion ネットワークの一例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 平岩央光, 坂東麻衣, 外本伸治	4. 巻 64
2. 論文標題 複眼視覚航法に基づく小型UAVの自律システムについて	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第64回自動制御連合講演会論文集	6. 最初と最後の頁 310-314
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11511/jacc.64.0_310	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Xiaoxu Feng, Mai Bando, Shinji Hokamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Obstacle Shape Estimation by Wide-Field-Integration of Optic Flow	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Symposium on Electric Aviation and Autonomous Systems 2020	6. 最初と最後の頁 93-96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ryota Maikuma, Mai Bando, Shinji Hokamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Construction of 3D Observation Drone Network Using Reinforcement Learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 30th Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics (in press)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hiromitsu Hiraiwa, Mai Bando, Shinji Hokamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Altitude Estimation by Wide-Field-Integration Optic Flow	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences	6. 最初と最後の頁 5643-5653
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryota Maikuma, Tenta Kawai, Mai Bando, Shinji Hokamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Adaptive Dispersion Network of Multiple Drones Based on Reinforcement Learning	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of the 10th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, IEEE Xplore	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Hiromitsu Hiraiwa, Mai Bando, Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Altitude Estimation by Wide-Field-Integration Optic Flow
3. 学会等名 Proceedings of the 33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本田悠樹, 坂東麻衣, 外本伸治
2. 発表標題 複眼視覚航法を用いた小型無人航空機の運動・距離推定
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平岩央光, 坂東麻衣, 外本伸治
2. 発表標題 複眼視覚航法に基づく小型UAVの自律システムについて
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 每熊良太, 坂東麻衣, 外本伸治
2. 発表標題 強化学習を用いた3次元観測ドローンネットワークの構築
3. 学会等名 第34回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 每熊良太, 坂東麻衣, 外本伸治
2. 発表標題 強化学習を用いた3次元観測ドローンネットワークの構築
3. 学会等名 アストロダイナミクス・シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 每熊良太, 坂東麻衣, 外本伸治
2. 発表標題 強化学習を用いた3次元観測ドローンネットワークの構築
3. 学会等名 第8回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Bio-inspired Autonomous Flying System Based on Wide-Field-Integration of Optic Flow
3. 学会等名 Aeronautical & Mechanical Research Conference 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryota Maikuma, Tenta Kawai, Mai Bando, Shinji Hokamoto
2. 発表標題 Adaptive Dispersion Network of Multiple Drones Based on Reinforcement Learning
3. 学会等名 10th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	坂東 麻衣 (Bando Mai) (40512041)	九州大学・工学研究院・教授 (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------