

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：34416

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13782

研究課題名（和文）カルバック・ライブラー制御を用いた超小型クワッドロータの自律群飛行

研究課題名（英文）Autonomous swarm flight of small quadrotors using Kullback-Leibler control

研究代表者

本仲 君子 (Motonaka, Kimiko)

関西大学・システム理工学部・准教授

研究者番号：70781772

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、カルバック・ライブラー制御を用いて、複数の小型クワッドロータの自律群飛行を実現することを目的とした。まず、クワッドロータ群の自律飛行に不可欠である、衝突回避アルゴリズムについて検討し、buffered Voronoi cellsに基づく相互衝突回避アルゴリズムを実装した。実装結果はシミュレーションにより確認し、新たに生じた問題点に対応するための改良を行った。特に、デッドロックへの対処、LiDARで得られた局所情報のみを用いた移動、高さ方向も含めた3次元空間における衝突回避に関する手法を提案した。また、実機実験の設備を整え、4台のクワッドロータの群飛行実験を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、クワッドロータの群飛行時に必須となる衝突回避アルゴリズムの改良と検証を行った。具体的には、BVCを用いた相互衝突回避アルゴリズムを実装・改良し、デッドロックへの対処や、局所情報のみを用いた移動手法を提案し、3次元空間における衝突回避を実現した。これは群飛行の実現を前進させるものであり、学術的に重要である。また、群飛行技術の進展は物流・監視・災害対策などを目的として社会的にも期待されており、その点でこれらの成果は社会的意義も有している。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to realize autonomous swarm flight of multiple quadrotors using Kullback-Leibler control. First, a collision avoidance algorithm, which is essential for autonomous flight of quadrotor swarms, was studied, and a mutual collision avoidance algorithm based on buffered Voronoi cells was implemented. The results of the implementation were verified by simulations, and improvements were made to address new problems that arose. In particular, we proposed methods for dealing with deadlock, moving using only local information obtained by LiDAR, and collision avoidance in 3D space including the height direction based on 3D Voronoi division. In addition, we have set up a facility for actual experiments, and conducted group flight experiments with four quadrotors.

研究分野：制御工学

キーワード：群飛行 障害物回避 動作計画

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

KL 制御は制御工学と情報理論の学際領域で開発された確率的最適制御手法であり、注目を集めている。その特徴は制御工学における最適化問題を KL 距離最小化などの情報理論の問題に帰着させて解く点にある。KL 制御においては複数の最適制御則による線形近似により高速に全体の最適化を行うことができるため、制御対象の高次元化に対しても頑健な性質を有する。そのため、小型クワッドロータのリアルタイムな群飛行制御のような高次元で高速性を要する問題に適用した場合にきわめて大きな効果が期待できると考えた。本研究では、このような実問題に KL 制御を適用し、シミュレーションおよび実機による検証実験を行う。

### 2. 研究の目的

本研究では新しい確率最適制御手法である KL 制御をクワッドロータの群飛行問題に適用する方法を開発し、超小型クワッドロータのリアルタイムで環境の変化にロバストな群飛行制御を KL 制御により実現することを目的とする。KL 制御は情報理論の分野でよく研究されてきた手法を用いることで、高次元な制御対象に対しても高速で精度の良い制御を実現できる。実際に多関節ロボットや空気圧人工筋ハンドの制御といった非常に複雑なロボティクスのリアルタイムな制御問題に応用できることが実機実験で確認されている。しかし、まだ新しい手法であるためその実応用の例は少なく、現時点では群飛行の最適化に適用された例もない。一般的な最適制御が群飛行によく適用されていることを考えると、最適制御の一種である KL 制御と群飛行はもともと非常に相性が良く、群全体のリアルタイムな最適制御や動的環境への適応能力の搭載といった非常に魅力的な成果が期待できる。

### 3. 研究の方法

本研究は KL 制御の群飛行への適用により、具体的には複数のクワッドロータが動的な障害物の存在する環境において指定された位置まで編隊を柔軟に変化させながら完全自律移動することを目指す。この目標を達成するため、期間内に【1】1 台のクワッドロータの自律飛行、【2】2 台のクワッドロータの協調自律飛行、【3】8 台のクワッドロータの編隊移動という段階を踏む計画であった。

### 4. 研究成果

本研究を通してクワッドロータ群の自律飛行に関する 4 つの成果が得られた。以下に各成果の詳細について述べる。

(1) 複数のクワッドロータが個別に自律飛行する環境を想定し、相互衝突回避のためのアルゴリズムについて検討した。その結果、4 台のクワッドロータが格子状の静止障害物が存在する環境において、機体に搭載した LiDAR による局所情報しか使えない状況においても相互衝突することなく、各機体に与えられた目標位置まで移動可能であることを、CoppeliaSim を用いた動力学シミュレーションにより確認した。まず、バッファを持つボロノイ分割 (buffered Voronoi cell: BVC) に基づいた相互衝突回避のためのアルゴリズムをシミュレーション上で複数台のクワッドロータに対して適用し、その有用性を検証した。検証の結果、BVC に基づく相互衝突回避アルゴリズムは、理論的には相互衝突回避が可能であることが確認されたが、動力学を考慮したより実際に近いシミュレーションにおいては、条件によっては相互衝突が生じることを確認した。次に、この相互衝突を防ぐため、BVC のバッファを可変とする拡張手法を提案し、同様にシミュレーションにおいて検証した。その結果、バッファを可変とした場合には、相互衝突の可能性が低減されることが確認できた。一方で、複数台のクワッドロータに対して適用した結果、動力学を考慮したシミュレーションにおいては、条件によっては相互衝突が生じることを確認した。そこで、機体のオーバーシュートを防ぐための速度調整手法を提案した。また、相互衝突だけでなく、環境中に静止している障害物にも対応できるようアルゴリズムを拡張した。このとき、デッドロックが生じることも確認されたため、従来手法の単純な拡張による回避手法についても提案した。ここで、従来手法では環境全体が既知である状態を想定していたが、各クワッドロータの視野に制限を設け、周囲の情報のみを用いて移動する手法について提案し、検証を行った。ここまでの研究成果においては、実際に使用するセンサ等については触れておらず、あくまで情報を取得できる範囲を制限してシミュレーションを行ったのみであった。これに対して、実際のレーザーセンサを想定したシミュレータを用いて検証を行った。具体的には、シミュレータ上で得られたレーザーセンサの情報を BVC のアルゴリズム内で使用可能な母点に落とし込む手法について提案し、動力学シミュレータ内で検証を行った。その結果、クワッドロータに搭載したレーザーセンサと現在の位置情報のみを用いることで、限られた視野範囲しか持たない場合でも他の機体や環境内に静止した障害物との衝突を避け、事前に指定された目標位置に到達可能であることが確認された。ここまでの成果においては、BVC による衝突回避を 2 次元平面での回避に用いていた。そこで、3 次元ボロノイ分割を取り入れた制御器設計を行い、高さ方向も考慮した回避を実現した。実装結果の検証では、3 次元 LiDAR を搭載したクワッドロータを想定し、複

数の機体が静止した格子状の障害物の存在する環境においてセンサデータをもとに移動可能であることを確認した。また、従来手法では壁状の障害物が存在する場合に、ボロノイ分割に必要な母点をセンサデータから生成できなかった。そこで、センサデータを加工し、壁状の障害物を避けることが可能な母点の配置手法について検討・実装を行った。更に、センサで得られた点群の全てを母点としてボロノイ分割を行う方法についても検討し、シミュレーションにより動作確認を行った。以上の結果より、4台のクワッドロータが格子状の静止障害物が存在する環境において、機体に搭載した LiDAR による局所情報しか使えない状況においても相互衝突することなく、各機体に与えられた目標位置まで移動可能であることを、CoppeliaSim を用いた動力学シミュレーションにより確認した。以上の成果について、論文誌および国内会議を通して広く公表した。

(2) 実機実験の環境を整備し、4台のクワッドロータの同時飛行と、そのリアルタイム位置計測を行った。まず、Kinect を用いてクワッドロータのリアルタイム位置計測環境を構築した。その後、商用の小型クワッドロータである Tello を制御対象とし、ルーターを介して群飛行実験が可能な環境を整え、モーションキャプチャシステムにより複数台のクワッドロータのリアルタイム位置計測が可能であることを確認した。更に、整備したシステムを用いて、スパース合意制御を実装し、4台のクワッドロータに限られた機体の高度情報しか得られない状況において自機の高度を調整することで、群全体が同じ高度に収束可能であることを実機実験により確認した。以上の成果について、論文誌を通して広く公表した。また、本成果を公表した国際会議 ICMA2021 において、成果が評価され、Best paper Award in Automation を受賞した。

(3) 小型クワッドロータに搭載されたカメラ情報を用いた制御について検討し、指定された追跡対象への追従制御と、環境内の物体の位置マップ作成システムを実装した。まず、カメラ画像を想定し、外部カメラで取得した画像に対して YOLO による物体認識を行う基礎実験を行った。また、実際に小型クワッドロータに搭載されたカメラを用いて YOLO による物体検出が可能であることを確認した。更に、検出結果に基づいて物体を追従するための制御器設計を行った。具体的には、画像内で検出された指定物体の領域がクワッドロータのカメラ画像の中心座標と一致するよう機体の位置を制御するシステムを構築した。その結果、指定した物体が移動した場合にも追従可能であることを実機実験により確認した。加えて、飛行中のクワッドロータのカメラ画像をリアルタイムに YOLO で処理し、映った物体の 3次元位置座標を推定し地図上にプロットするシステムを開発した。このシステムは Depth カメラを用いず、クワッドロータに標準搭載されている単眼カメラのみを用いることを想定しており、自己位置と検出された対象物体のカメラ座標から高さ・水平方向の位置を、自己位置と YOLO で検出した物体の領域サイズによって奥行情報を推定する。実機実験の結果、奥行座標に対して精度は出なかったが、複数回の推定結果の平均をとることにより、誤差数十センチ程度まで推定精度が向上することが確認された。

(4) KL-Divergence 最小化を利用したモデル予測経路積分(MPPI)制御によるクワッドロータの風外乱への対応について検討し、風外乱下での挙動をシミュレーションにより確認した。様々な環境におけるロバストな制御を目指し、突風外乱の存在する環境においても問題なく飛行できるよう、MPPI 制御を用いた制御入力生成手法の導入について検討した。その結果、ドライデンモデルによりモデル化した突風外乱の存在する環境下においても、MPPI 制御を適用することで、クワッドロータが静止障害物を避け、目標状態に到達可能であることを、MATLAB を用いたシミュレーションにより確認した。以上の成果について、国内会議を通して広く公表した。

#### <引用文献>

- 中川健人，権裕煥，本仲君子，三好誠司，ボロノイ分割を用いた複数のクワッドロータの相互衝突回避に関する数値的検証，計測自動制御学会論文集，Vol.56，No.1，pp.31-36，2020
- 本仲君子，三好誠司，BVC を用いたクワッドロータの障害物回避手法の検討，日本ロボット学会誌，Vol.39，No.5，pp.459-462，2021
- Obstacle avoidance using buffered Voronoi cells based on local information from a laser range scanner, Advanced Robotics, Vol. 37, No. 1, pp. 73-86, Jan. 2023
- Kimiko Motonaka, Takuya Watanabe, Yuhwan Kwon, Masaaki Nagahara, and Seiji Miyoshi, Control of a quadrotor group based on maximum hands-off distributed control, Int. J. of Mechatronics and Automation, Vol.8, No.4, pp.200-207, 2022.
- Kimiko Motonaka, Takuya Watanabe, Yuhwan Kwon, Masaaki Nagahara, and Seiji Miyoshi, Application of maximum hands-off distributed control to a quadrotor group, IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation, pp.657-662, Japan, 2021.
- 塩見将貴，本仲君子，三好誠司，ドライデンモデルによる風外乱環境下におけるクワッドロータのモデル予測経路積分制御，第 22 回計測自動制御学会 SI 部門講演会，2021。
- 塩見将貴，久保田景，本仲君子，三好誠司，風外乱環境下におけるクワッドロータのモデル予測経路積分制御に関する検証，第 23 回計測自動制御学会 SI 部門講演会，2022。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Motonaka Kimiko, Watanabe Takuya, Kwon Yuhwan, Nagahara Masaaki, Miyoshi Seiji	4. 巻 8
2. 論文標題 Control of a quadrotor group based on maximum hands-off distributed control	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Mechatronics and Automation	6. 最初と最後の頁 200 ~ 200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1504/IJMA.2021.120377	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 MOTONAKA Kimiko, KOSEKI Tomoya, KAJIKAWA Yoshinobu, MIYOSHI Seiji	4. 巻 E104.A
2. 論文標題 Statistical-Mechanical Analysis of Adaptive Volterra Filter with the LMS Algorithm	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 1665 ~ 1674
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2021EAP1013	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 本仲君子, 三好誠司	4. 巻 39
2. 論文標題 BVCを用いたクワッドロータの障害物回避手法の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 459 ~ 462
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.39.459	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 NAKAGAWA Kento, KWON Yuhwan, MOTONAKA Kimiko, MIYOSHI Seiji	4. 巻 56
2. 論文標題 Numerical Verification on Collision Avoidance of Multiple Quadrotors Using Voronoi Division	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers	6. 最初と最後の頁 31 ~ 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.56.31	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 K. Motonaka, and S. Miyoshi	4. 巻 118
2. 論文標題 Connecting PM and MAP in Bayesian spectral deconvolution by extending exchange Monte Carlo method and using multiple data sets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Newral Networks	6. 最初と最後の頁 159-166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2019.05.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 中川健人, 権裕煥, 本仲君子, 三好誠司	4. 巻 56-1
2. 論文標題 ポロノイ分割を用いた複数のクワッドロータの相互衝突回避に関する数値的検証	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 31-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.56.31	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 本仲君子, 渡辺桂吾, 前山祥一	4. 巻 31
2. 論文標題 ハーモニックポテンシャルフィールドに基づく機体周囲の情報を用いたクワッドロータの誘導制御	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 システム制御情報学会論文誌	6. 最初と最後の頁 202-208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5687/iscie.31.202	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 寺内清訓, 本仲君子, 梶川嘉延, 三好誠司	4. 巻 138
2. 論文標題 能動騒音制御の適応速度と評価尺度に関する統計力学的解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電気学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.138.1	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21件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Koyo Kugiyama, Kimiko Motonaka, Yoshinobu Kajikawa, and Seiji Miyoshi,
2. 発表標題 Statistical-Mechanical Analysis of Adaptive Volterra Filter for Time-Varying Unknown System
3. 学会等名 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference 2021 (APSIPA ASC 2021) , (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kimiko Motonaka, Takuya Watanabe, Yufwan Kwon, Masaski Nagahara, and Seiji Miyoshi,
2. 発表標題 Application of maximum hands-off distributed control to a quadrotor group
3. 学会等名 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (IEEE ICMA 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuaki Kuroe, Seiji Miyoshi, Hiroomi Hikawa, Hidetaka Ito, Kimiko Motonaka, and Yutaka Maeda,
2. 発表標題 A Synthesis Method of Spiking Neural Oscillators with Considering Asymptotic Stability
3. 学会等名 2021 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 塩見将貴, 本仲君子, 三好誠司,
2. 発表標題 ドライデンモデルによる風外乱環境下におけるクワッドロータのモデル予測経路積分制御,
3. 学会等名 第22回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久木山航洋, 本仲君子, 梶川嘉延, 三好誠司,
2. 発表標題 時変な未知システムに対する適応ボルテラフィルタの統計力学的解析,
3. 学会等名 信号処理シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本仲君子, 三好誠司
2. 発表標題 周辺情報のみを用いたBVCによるクワッドロータの障害物回避,
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuhwan Kwon, Takumi Kaneko, Yoshihisa Tsurumine, Hikaru Sasaki, Kimiko Motonaka, Seiji Miyoshi, Takamitsu Matsubara
2. 発表標題 Combining Model Predictive Path Integral with Kalman Variational Auto-encoder for Robot Control from Raw Images
3. 学会等名 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本仲君子, 三好誠司
2. 発表標題 BVCを用いたクワッドロータの障害物回避手法の検討
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuhwan Kwon, Takumi Kaneko, Yoshihisa Tsurumine, Hikaru Sasaki, Kimiko Motonaka, Seiji Miyoshi, Takamitsu Matsubara
2. 発表標題 Combining Model Predictive Path Integral with Kalman Variational Auto-encoder for Robot Control from Raw Images
3. 学会等名 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中川健人, 権裕煥, 本仲君子, 三好誠司
2. 発表標題 BVCに基づく複数クワッドロータの相互衝突回避手法の検証
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 権裕煥, 鶴峯義久, 本仲君子, 三好誠司, 松原崇充
2. 発表標題 モデル予測経路積分制御と深層経路コスト予測器による高次元観測モデルベース強化学習
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本仲君子, 志水勇仁, 野坂昂宏, 永原正章, 三好誠司
2. 発表標題 スパース合意制御のクワッドロータ群への適用
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 藤田宙, 本仲君子, 四方博之, 三好誠司
2. 発表標題 ガウス過程回帰を用いた大量運動者の心拍データ送信制御法
3. 学会等名 信号処理シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本仲君子, 小関智也, 梶川嘉延, 三好誠司
2. 発表標題 高次適応ボルテラフィルタに関する統計力学的解析
3. 学会等名 信号処理シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本仲君子, 小関智也, 梶川嘉延, 三好誠司
2. 発表標題 適応ボルテラフィルタの動的なふるまいに関する統計力学的解析
3. 学会等名 電子情報通信学会 ニューロコンピューティング研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuhwan Kwon, Kimiko Motonaka, Takamitsu Matsubara, and Seiji Miyoshi
2. 発表標題 Empirical verification of information theoretic model predictive control
3. 学会等名 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kiniko Motonaka, Takashi Katsube, Yoshinobu Kajikawa, and Seiji Miyoshi
2. 発表標題 Statistical-Mechanical Analysis of the Second-Order Adaptive Volterra Filter
3. 学会等名 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 権裕煥, 本仲君子, 松原崇充, 三好誠司
2. 発表標題 数値実験による情報論的モデル予測制御の性能検証
3. 学会等名 システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本仲君子, 三好誠司
2. 発表標題 複数のデータセットを用いたスペクトル分解( )
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 権裕煥, 金子拓光, 鶴峰義久, 佐々木光, 本仲君子, 松原崇充, 三好誠司
2. 発表標題 変分オートエンコーデッドモデル予測経路積分制御と画像入力に基づくロボット制御への応用
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中川健人, 本仲君子, 三好誠司
2. 発表標題 ポロノイ分割を用いた複数のクワッドロータの相互衝突回避に関する数値的検証
3. 学会等名 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2018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

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