

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04070

研究課題名（和文）分散協調制御と無線分散ネットワークの技術融合に関する研究

研究課題名（英文）A Study on Technology Fusion of Distributed Cooperative Control and Wireless Distributed Networks

研究代表者

小林 健太郎（Kobayashi, Kentaro）

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号：40583878

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ロボットやドローンなどを無線分散ネットワークを介して分散協調制御を行うシステムについて、限られた無線通信リソース下での制御性能向上を目的とした研究を行った。具体的には、Wi-Fi等に採用されるCSMA/CA方式を採用したモバイルロボットの無線自律分散制御において、通信衝突等によって損なわれた制御情報を補填するデータ転送方式を提案し、高い制御性能を達成できることを明らかにした。また、オープンソースフライトコントローラとRobot Operating System(ROS)による屋内飛行ドローンについて、ARマーカークーやWi-Fi RTTを用いた屋内測位方式を検討し、測位精度を実験的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無線通信による連携が不可欠なモバイルロボットやドローンの協調制御では、限られた無線リソース下でいかに制御性能を向上させるかが最も大きな課題の一つである。本研究は、その課題に対して、通信と制御の両面からの最適解へアプローチするものであり、その理論的側面は、通信設計における制御理論の応用、制御設計における通信理論の応用といった幅広い学術的な展開が期待できる。応用面においても、オープンソースフライトコントローラとRobot Operating System(ROS)による屋内飛行ドローンについてARマーカークーやWi-Fi RTTを用いた屋内測位精度を明らかにしたことの意義は小さくない。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to improve the control performance of a system that performs distributed cooperative control of robots and drones over a wireless distributed network under limited wireless communication resources. Specifically, a data transfer method that compensates for control information lost due to communication collisions is proposed for wireless autonomous decentralized control of mobile robots using the CSMA/CA protocol used in Wi-Fi, etc., and achieves higher control performance. In addition, indoor drone positioning methods using AR markers and Wi-Fi RTT are investigated for an indoor flying drone with an open-source flight controller and robot operating system (ROS), and the positioning accuracy is experimentally clarified.

研究分野：通信・ネットワーク工学

キーワード：制御通信 無線制御 自律分散制御 ドローン Wi-Fi RTT Robot Operating System ARマーカークー 屋内測位

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

従来の汎用の無線ネットワークでは、通信レイヤの上位のアプリケーションレイヤの振る舞いと通信品質の関係性を理論的な数学モデルで記述することが困難であることが多い。そのため、システムの高性能化のために通信レイヤができることは、通信路容量やスループットなどの通信レイヤの情報のみに基づいての最適化というように、制御と通信のそれぞれのレイヤにおいて個別に設計・最適化する形で高性能化が図られてきた。

これに対し、ロボットやドローンなどの「制御」を対象とした無線ネットワークでは、通信レイヤの上位の制御レイヤの振る舞いと通信品質の関係性を制御理論的に数学モデルで記述することが可能である。つまり、通信レイヤと制御レイヤの両方の理論を統合した最適化が可能である。特に、無線通信では利用可能な電力や周波数帯域に厳しい制約があり、限られた無線通信リソースの下でいかにシステムの性能を向上させるかが最も大きな課題の一つである。

本研究は、限られた無線通信リソースの下でいかに制御システムの品質を向上させるかという問いに対して、通信と制御の両面より最適解へとアプローチするものである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、限られた無線通信リソースの下でさらなる制御性能の向上を図るため、制御における分散協調制御技術と通信における無線分散ネットワーク技術の融合を行うことである。制御と通信のクロスレイヤでの方式設計・最適化を行うことで、単なる無線通信ネットワークとしての通信レイヤの性能向上ではなく、制御レイヤも含めた無線制御ネットワーク全体としての高性能化を図ることを目的とする。

制御理論と通信理論の両面に基づいた分散協調制御と無線分散ネットワークの融合技術の提案、また、単なる最適化の議論にとどまらず、業界標準のロボット制御アプリケーションフレームワーク ROS(Robot Operating System)やドローンのオープンソースフライトコントローラを踏まえた方式設計も行うことで工学応用が容易な方式実現を目指した。

3. 研究の方法

ロボットやドローンなどを無線分散ネットワークを介して分散協調制御を行う無線制御システムについて、限られた無線通信リソースの下でさらなる制御性能の向上を図るため、制御と通信のクロスレイヤ設計・最適化の検討を行った。以下の2つのサブテーマ A,B を並行して多角的に取り組んだ。

- A. 分散協調制御と無線分散ネットワークの技術融合
- B. 制御アプリケーションフレームワークと親和性の高い方式設計

サブテーマ A では、フォーメーション制御における代表的な合意制御・被覆制御 (図 1) において、パケットの転送技術との技術融合を検討した。具体的には、Wi-Fi 等で採用される CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 方式を無線通信方式に採用した自律分散型の無線制御ネットワークの性能向上に取り組んだ。

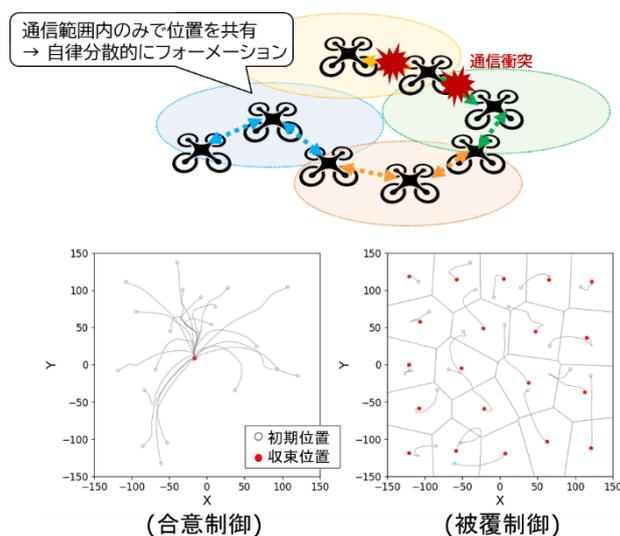


図 1

合意制御・被覆制御といった自律分散制御では、制御周期ごとに自身の位置情報を通信範囲内の他の制御対象へと送信する。そして、制御周期内に自身が受信できた周囲の制御対象の位置情報に基づき、自身の移動量を決定する。CSMA/CA 方式では、通信開始時にランダムな待ち時間待機してからパケットを送信する機構により通信衝突を低減しているが、広範に分散している際の隠れ端末問題、また、集合することによる通信衝突率の増加や制御周期内の送信機会損失が発生するため、制御周期内に受信可能な位置情報が減少し、制御品質は劣化することになる。このような制御品質の劣化を解消し、制御品質の向上を図るために、パケット転送技術との融合を検討した。

サブテーマ B では、制御アプリケーションフレームワークとして ROS を搭載した小型移動ロボット、および、オープンソースフライトコントローラを搭載したドローンの無線制御方式を検討し、実験評価を行った。具体的には、移動ロボットやドローンのフォーメーション制御において必要不可欠となる屋内での自己位置推定の方式検討と位置推定精度の実験評価に取り組んだ。

屋外を移動するロボット・ドローンの多くは GPS による測位により位置を取得可能であるが、屋内を移動する場合は別の手段により位置の取得が必要である。本研究では、主に、ドローン搭載カメラと床面に配置されたマーカー画像を用いた AR マーカー方式、Wi-Fi アクセスポイントと Round Trip Time(RTT)を利用した Wi-Fi RTT 方式によるドローンの自己位置推定方式の検討を行い、実験環境の構築、測位精度の実験評価を行った。

4. 研究成果

(1) サブテーマ A : CSMA/CA 方式を無線通信方式に採用した自律分散型の無線制御ネットワークにおいて、通信衝突によって損なわれた位置情報を補填するために、自身の位置情報を送信するだけでなく、合わせて自身が制御周期内に受信できた位置情報もパケットに付与して同時に送信する情報転送手法 (図 2) を提案し、その有効性の評価を行った。

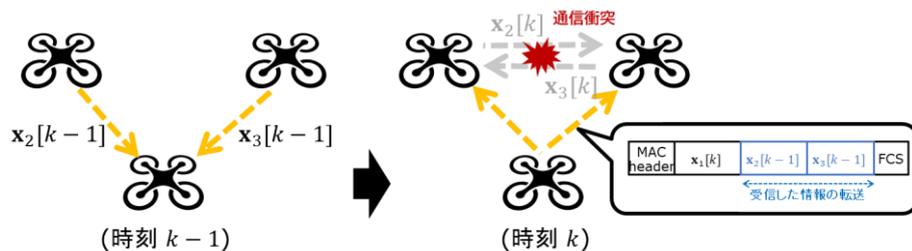


図 2

転送されてきた位置情報を単に移動量の制御計算に加えるのではなく、送受信のタイミングによっては重複してしまう端末の位置情報を省くことで合意の成功率を向上し、移動時間も短縮できることを明らかにした。また、転送することによりデータ長が増加する影響の評価も行い、比較的短いデータ長の場合においてのみ合意成功率の向上や移動時間の短縮ができることを明らかにした。

本手法を発展させ、自身が制御周期内に受信できた位置情報をパケットに付与する際に、次の制御時刻における位置を予測してからパケットに情報を付与して転送する方式を提案し、さらなる制御性能の向上が得られることを明らかにした。また、提案手法は観測時の位置情報に誤差が含まれる場合においても有効であることを明らかにした。

以上に関して、雑誌論文 1 件、国際学会発表 2 件、国内学会発表 5 件の成果を公表している。

(2) サブテーマ B : GPS に代わる屋内測位方式の 1 つとして、ドローン搭載カメラと床面に配置した AR マーカーを用いた屋内測位方式 (図 3) を検討し、実験により位置推定精度の評価を行った。

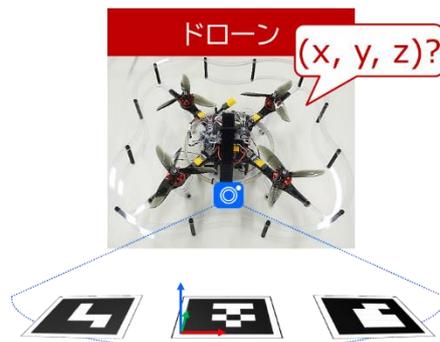


図 3

ドローンは、オープンソースフライトコントローラ PX4 と制御アプリケーションフレームワーク ROS を搭載したマイコンボードにより自律飛行制御を行い、床面に配置した座標既知の AR マーカーを撮影したドローン搭載カメラ画像からドローンの 3 次元座標を推定する。静止時、ホバリング時、移動時における自己位置推定の実験を行い、AR マーカーによる測位では移動飛行時においても数 cm の測位精度が得られることを明らかにした。

以上に関して、国際学会発表 1 件、国内学会発表 2 件の成果を公表している。

また、屋内測位方式の 1 つとして、IEEE 802.11mc 標準規格に準拠した Wi-Fi RTT を用いたドローンの屋内測位方式 (図 4) し、実験により位置推定精度の評価を行った。

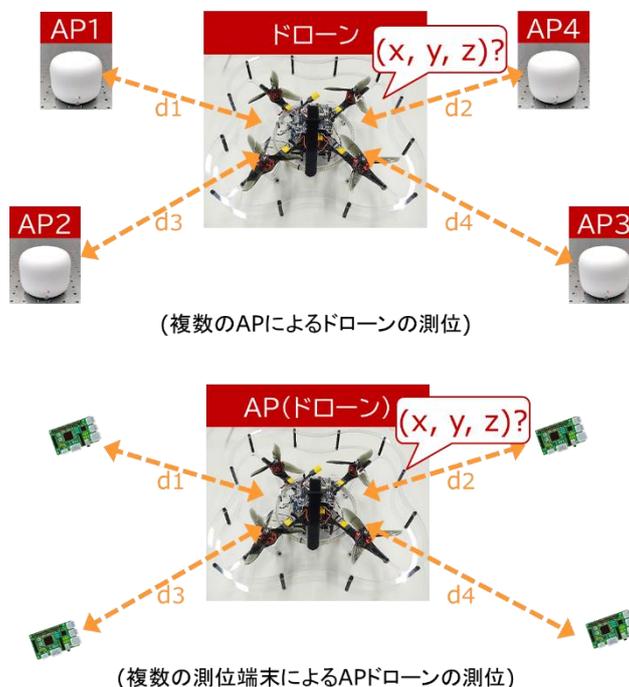


図 4

Wi-Fi RTT 対応の Wi-Fi モジュールを搭載したマイコンボードによりドローンと Wi-Fi AP (アクセスポイント) 間の距離を専用パケットの往復通信の時間差から算出するものであり、ドローン搭載のレーザー高度計の測距値と Wi-Fi アクセスポイントとの間の距離 4 つの測距値を用いてドローンの 3 次元座標を推定する。100m² の屋内において、2.4GHz 帯および 5GHz 帯を用いて静止時とホバリング時における自己位置推定の実験を行い、静止時の 1-2m 程度の測位精度に対して、ホバリング時には機体振動の影響で 2-4m 程度ばらつきが増加する傾向を明らかにした。さらに、位置推定のアルゴリズムとして、測距値のみに基づく最小平均二乗誤差位置推定に対して、事前に複数地点で測定した Wi-Fi RTT 測距値を教師データに用いた DNN (Deep Neural Network) に基づく位置推定が、より良い推定精度を示すことを明らかにした。

以上に関して、国際学会発表 3 件、国内学会発表 7 件の成果を公表している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 K. Kobayashi, R. Kimura, W. Chujo	4. 巻 Vol. 13, No. 2
2. 論文標題 Effectiveness of information transfer on control quality of CSMA/CA-based autonomous decentralized control	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 pp. 18-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/comex.2023XBL0137	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 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 木村玲太, 小林健太郎, 中條渉
2. 発表標題 CSMA/CAを用いた自律分散制御における情報転送が合意制御品質に与える影響
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 122, No. 73, RCS2022-41, pp. 102-107
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村玲太, 小林健太郎, 中條渉
2. 発表標題 CSMA/CAを用いた自律分散制御における情報転送のデータ長が合意制御品質に与える影響
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 122, No. 309, RCC2022-51, pp. 93-98
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡屋知希, 小林健太郎, 中條渉
2. 発表標題 ドローン搭載カメラとARマーカを用いたドローン屋内測位における飛行時の測位精度評価
3. 学会等名 電子情報通信学会東海支部卒業研究発表会, 2-6
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉山悠一朗, 小林健太郎, 中條涉
2. 発表標題 Wi-Fi RTTを用いたドローン屋内測位における2.4GHz/5GHz帯の測位精度比較
3. 学会等名 電子情報通信学会東海支部卒業研究発表会, 2-7
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木村玲太, 小林健太郎, 中條涉
2. 発表標題 CSMA/CAを用いた自律分散制御における通信バックオフと制御周期が合意制御品質に与える影響
3. 学会等名 電子情報通信学会東海支部卒業研究発表会, 2-3, p. 19
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Okaya, K. Kobayashi, W. Chujo
2. 発表標題 A study on indoor positioning of an open-source drone using AR markers
3. 学会等名 2023 IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Sugiyama, K. Kobayashi, W. Chujo
2. 発表標題 A study on indoor drone positioning using Wi-Fi RTT ranging
3. 学会等名 2023 IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Kimura, K. Kobayashi, W. Chujo
2. 発表標題 A study on predictive information transfer for CSMA/CA-based autonomous decentralized control
3. 学会等名 2023 IEEE 12th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡屋知希, 小林健太郎, 中條渉
2. 発表標題 ArUcoマーカーを用いたオープンソースドローンの屋内測位に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 123, no. 48, RCC2023-9, pp. 47-52
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉山悠一朗, 小林健太郎, 中條渉
2. 発表標題 Wi-Fi RTTを用いたドローン屋内測位に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 123, no. 48, RCC2023-10, pp. 53-58
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木村玲太, 小林健太郎, 中條渉
2. 発表標題 CSMA/CAを用いた自律分散制御における予測位置情報を含む情報転送が合意制御品質に与える影響
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会, A-16-2, p. 119
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Sugiyama, K. Kobayashi, W. Chujo
2. 発表標題 Accuracy comparison of indoor drone position estimation using 2.4GHz/5GHz Wi-Fi RTT
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability (ICMaSS) 2023, A6-I-4(0154) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Okaya, K. Kobayashi, W. Chujo
2. 発表標題 A study on indoor positioning of a drone base station using Wi-Fi RTT
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability (ICMaSS) 2023, A6-I-4(0154) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Kimura, K. Kobayashi, W. Chujo
2. 発表標題 A study on predictive information transfer for CSMA/CA-based consensus control
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability (ICMaSS) 2023, A6-I-4(0154) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡屋知希, 小林健太郎, 中條涉
2. 発表標題 複数Wi-Fi端末とのWi-Fi RTTを用いたドローン基地局の屋内測位に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 123, no. 316, RCC2023-31, pp. 48-52
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉山悠一朗, 小林健太郎, 中條渉
2. 発表標題 複数Wi-FiアクセスポイントとのWi-Fi RTTを用いたドローンの屋内測位に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 123, no. 316, RCC2023-32, pp. 53-58
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木村玲太, 小林健太郎, 中條渉
2. 発表標題 CSMA/CAを用いた自律分散制御における合意品質向上のための情報転送方式に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 123, no. 316, RCC2023-43, pp. 105-110
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉山悠一朗, 小林健太郎, 中條渉
2. 発表標題 Wi-Fi RTTを用いたドローン屋内測位の位置推定方式による性能比較
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会, A-16-02
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 杉山悠一朗, 小林健太郎
2. 発表標題 Wi-Fi RTTと機械学習を用いたドローン屋内測位に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 124, no. 25, RCC2024-13, pp. 60-65
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 岡屋知希, 小林健太郎
2. 発表標題 2.4GHz/5GHz帯Wi-Fi RTTを用いたドローン基地局の屋内測位の精度比較
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 124, no. 25, RCC2024-14, pp. 66-71
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

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