

令和 4 年 5 月 17 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04134

研究課題名(和文) 通信と制御のクロスレイヤ設計による無線制御方式の最適化

研究課題名(英文) Cross-Layer Optimization of Wireless Communication Schemes Based on Communication and Control Co-design

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：産業機器やロボットを無線により遠隔制御を行う無線制御システムについて、通信と制御のクロスレイヤ最適化によるシステムの高性能化を目的とした研究を行った。具体的には、制御レイヤの制御則に基づいて、無線フィードバック制御における誤り訂正符号の割当を最適化する方式、IEEE802.15.4規格における多元接続を最適化する方式、自律分散制御における制御情報の送信頻度を最適化する方式を提案し、高い制御性能を達成できることを明らかにした。また、小型移動ロボットを用いてRobot Operating System(ROS)制御フレームワークが通信衝突や通信遅延に及ぼす影響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

無線通信では利用可能な周波数帯域に厳しい制約があり、限られた無線通信資源の下でいかにシステム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、ロボット開発の業界標準の一つであるROS制御フレームワークとの親和性の高い無線通信方式を設計するための指標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)：To improve system performance of wireless control systems for remote control of industrial equipment and robots via wireless communication, I have studied cross-layer optimization of communication and control. Specifically, based on control laws in the control layer, I have proposed a method for optimizing the allocation of error correcting codes in wireless feedback control, a method for optimizing the multiple access in IEEE802.15.4 wireless network, and a method for optimizing the transmission frequency of control information in autonomous decentralized control, and have shown that the proposed methods can achieve superior control performance. In addition, the effect of the Robot Operating System(ROS) control framework on communication collisions and communication delays have been experimentally clarified using small mobile robots.

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 クロスレイヤ設計 統合最適化 誤り訂正符号 予測制御 多元接続 Robot Operating System

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。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

産業機器やロボットを無線により遠隔制御を行う無線制御システムについて、通信と制御のクロスレイヤ最適化によるシステムの高性能化を検討する。

従来の人を対象としたマルチメディア用途の通信システムでは、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品質の関係性を理論的な数学モデルで記述することは困難であった。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、スループットなどの通信レイヤの情報のみに基づいて通信の品質を向上することでしかなかった。これに対し、産業機器やロボットを対象とした通信システムでは、通信レイヤの上位の制御レイヤの振る舞いと品質の関係性を制御理論により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となる。

無線通信では利用可能な周波数帯域に厳しい制約があり、限られた無線通信資源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、限られた無線通信資源の下でいかに遠隔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、通信理論と制御理論の両方に基づいて、無線制御システムにおける通信資源割当の方式設計・最適化を行うことで、単なる通信レイヤの性能向上ではなく、その上位の制御レイヤも含めたシステム全体の高性能化を図ることである。また、単なる最適化の議論にとどまらず、ロボット開発の業界標準の1つであるアプリケーションフレームワーク ROS(Robot Operating System)の通信プロトコルを踏まえた方式設計を行うことで、工学応用が容易な方式表現を目指す。

3. 研究の方法

制御分野における代表的なフィードバック制御を無線化したシステムについて、遠隔制御の高性能化のために通信方式・制御方式のクロスレイヤ設計および最適化の検討を行う。これに関して、以下の二つのサブテーマ A, B を並行して取り組む。

A. システム制御の理論を応用した無線通信リソース割当方式

B. ROS 制御フレームワークが通信レイヤに与える影響の明確化

サブテーマ A では、制御レイヤの最適制御則・モデル予測制御則の理論を通信レイヤの無線通信リソース割当へと応用する。

遠隔制御システムでは、制御対象の状態によっては、制御信号に多少の誤差が含まれていても安定して制御できる領域があり、逆に、多少の誤差でも制御が不安定になってしまう領域がある。つまり、コントローラが送る操作量や制御対象が送る状態量といった制御信号は、時間的にその重要度が異なってくる。そこで、制御信号の重要度に基づいて通信資源の割り当てを行うことによりシステム全体としての制御性能の向上に着目する。

モデル予測制御則などでは先の時刻の制御の状況を予測することで制御対象へ入力すべき操作量を決定している。このような制御レイヤの制御則に基づいて予測される制御状況に応じて無線通信の通信タイミングや符号化率の割当を最適化する方式を設計する。シミュレーション評価により、提案方式が通信レイヤと制御レイヤの両方の性能に及ぼす効果、ひいては、システム全体としての制御性能向上を明らかにすることで、提案方式の有効性を示す。

サブテーマ B では、ROS 制御フレームワークに則った適切な通信モデルを構築するために、ROS 制御フレームワークのプロトコルが通信レイヤの性能に与える影響を明確化する。

一般的なフィードバック制御はコントローラと制御対象が同期して交互に制御情報をやり取りすることが前提となっている。しかしながら、ROS では主にトピックと呼ばれる非同期通信を備えおり、これまでの通信モデルとは通信衝突率や通信遅延が大きく異なってくる。また、ROS のバージョンによっても通信プロトコルの実装が異なっている。ROS 制御フレームワークのトピック通信やオーバーヘッドが通信衝突や通信遅延といった通信レイヤに与える影響について、マイコンボードを搭載した小型移動ロボットを利用した実験評価によりその影響を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 無線制御システムのためのクロスレイヤ冗長化による高信頼化

無線フィードバック制御システムにおいて、制御レイヤで冗長化を行うパケット化予測制御手法と、通信レイヤで冗長化を行う誤り訂正符号化手法を組み合わせたクロスレイヤ冗長化手法を考案した。

制御レイヤで冗長化を行うパケット化予測制御手法は、現時刻の制御情報に先の時刻を予測した制御情報を冗長として加えて1つのパケットとして送信する手法であり、パケットロスが発生した際に、前回受信できた予測制御情報を代用することでパケットロスの影響を低減する。一

方、通信レイヤで冗長化を行う誤り訂正符号化手法は、パケットに誤り訂正用の冗長ビットを加えて送信する手法であり、誤り訂正によりパケットロスの発生自体を低減する。いずれの手法もパケットに冗長を付与するという観点では同じものであり、両方を組み合わせることで高い信頼性が得られると着目した。

誤り訂正符号として 5G でも採用された CRC-Aided Polar 符号を導入し、同じパケット長において、制御レイヤの冗長化または通信レイヤの冗長化の単体よりも、クロスレイヤ冗長化が通信路誤りに対して高い制御品質を得られることを示した。

また、無線フィードバック制御システムにおいて、制御レイヤで重要な状態フィードバックを選択して情報圧縮を行う手法と、通信レイヤで冗長化を行う誤り訂正符号化手法を組み合わせたクロスレイヤ冗長化手法を考案した。

通信レイヤで冗長化を行う誤り訂正符号化手法はパケットに誤り訂正用の冗長ビットを加えて送信することから、同じ送信ビットレートでは、通信時間が延長してしまい、所望の制御周期を満たせないことが発生しうる。情報圧縮と組み合わせることでパケット長を変えずに通信路誤りに対して高信頼化が可能である。そこで、制御レイヤの状態フィードバックにおいて重要な状態情報を制御のコストに基づいて選択することで情報圧縮することに着目した。

誤り訂正符号として CRC-Aided Polar 符号を導入し、制御レイヤに基づく情報圧縮と通信レイヤの冗長化を組み合わせることで、パケット長を増やすことなく通信路誤りに対して高い制御品質を得られることを示した。

以上に関して、論文 2 件と学会発表 5 件の成果を公表している。

(2) 一対多型の無線制御システムのための多元接続方式の高効率化

コントローラが複数のロボットと無線フィードバック制御を行うシステムにおいて、無線 PAN の代表規格である IEEE802.15.4 規格を用いた多元接続方式の高効率化に取り組んだ。

IEEE802.15.4 ビーコンモードでは、キャリアセンス型多元接続で通信が行われる通信期間と時分割型多元接続で通信が行われる通信期間が定められている。時分割型で通信可能な台数には制限があるため、複数の制御対象の制御を行うためにはどのように通信タイミングを割り当てるかが重要となる。そこで、フィードバック制御の特長であるコントローラと制御対象の間の双方向性に着目し、コントローラから制御対象への通信に対して時分割型多元接続の通信タイミングを優先的に割り当てる方式を考案し、制御品質を改善できることを示した。

また、ブロードキャスト通信を用いてコントローラが制御対象に一括して制御情報を伝送して通信の効率化を図る方式を考案し、上述の通信タイミングの割当方式と組み合わせることで更なる制御品質の改善を示した。

以上に関して、論文 1 件と学会発表 4 件の成果を公表している。

(3) 自律分散型の無線制御システムのための多元接続方式の高効率化

自律分散的に動作する複数の移動ロボットにより構成され、制御対象同士で無線通信を行うことで協調制御(フォーメーション)を行うシステムの多元接続方式の高効率化に取り組んだ。

自律分散制御系は、より多くの周囲の制御対象らと通信を行い、連結されたネットワーク構造を持つことが制御品質の向上に繋がる。しかしながら、無線通信は基本的に送信と受信を同時には行えない半二重通信であり、通信路を共用している場合は通信衝突・干渉が発生することになり、制御品質に大きく影響を与える。

移動による通信範囲内で通信するロボット数の変化により通信衝突率が変化することに着目し、それが制御品質に与える影響について考察した。位置情報を近隣と通信し合うことで集合を行う合意制御について、集合を行うにつれて通信衝突率が増加し、制御品質が劣化することを明らかにした。さらに、ロボットが自身の位置情報の重要度を推定することで位置情報の送信率を設定する手法を考案し、通信衝突率を低減、制御品質を改善できることを示した。

以上に関して、論文 1 件の成果を公表している。

(4) ROS 制御フレームワークが通信レイヤに与える影響の明確化

Raspberry Pi マイコンボードを搭載した小型移動ロボットとカメラ、コントローラを用いて一対多型の複数移動体のフィードバック制御実験系を構築し、ROS の非同期な制御情報の通信により生じる通信の混雑が制御品質に与える影響の評価を行った。実験により、制御台数が 1 台から 5 台への増加につれ 2 倍程度の位置誤差が発生し制御品質が劣化することを明らかにした。

また、制御情報の通信にかかる実際の通信時間と ROS のオーバーヘッドの関係性について実験的評価を行った。実験により、制御対象がトピック通信によりコントローラから制御情報を取得する Subscribe のオーバーヘッドが通信時間以上の遅延となることを明らかにした。

以上に関して、学会発表 1 件)の成果を公表している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 K. Kobayashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Optimal combination of forward error correction and selective state feedback for wireless feedback control systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Communication Express	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） 10.1587/comex.2022XBL0071	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 K. Kobayashi	4. 巻 vol.10, no.9
2. 論文標題 Fundamental tradeoff between packetized model predictive control and forward error correction in wireless feedback control systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communication Express	6. 最初と最後の頁 769-774
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2021XBL012	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 K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama	4. 巻 vol.7, no.1
2. 論文標題 Guaranteed Time Slot Allocation for IEEE 802.15.4-Based Wireless Feedback Control Systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 161211-161219
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2019.2951597	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 K. Kobayashi, S. Noro, H. Okada, M. Katayama	4. 巻 vol.8, no.9
2. 論文標題 Adaptive transmission probability for CSMA/CA based consensus control of multi-agent systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 393-398
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2019XBL0092	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10件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 小林健太郎
2. 発表標題 〔依頼講演〕高信頼無線制御のための通信と制御のクロスレイヤ最適化
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 121, no. 15, CQ2021-18, pp. 76-79 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梅村康寛, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭
2. 発表標題 同報通信を用いたIEEE802.15.4複数機器無線制御の最適化に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会, A-16-4, p.128
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Kasai, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama
2. 発表標題 A Study on Cross-layer Combination of Predictive Control and Error Correction Coding for Wireless Feedback Control
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability (ICMaSS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Umemura, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama
2. 発表標題 A Study on Broadcast of Operation Information for IEEE802.15.4-Based Wireless Control of Multiple Machines
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability (ICMaSS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kasai, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama
2. 発表標題 Cross-layer combination of predictive control and error correction coding for wireless feedback control
3. 学会等名 IEEE Vehicular Technology Society Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梅村康寛, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭
2. 発表標題 IEEE802.15.4を用いた複数機器無線制御のための操作情報の同報通信に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, RCC2019-52, pp. 195-200
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 笠井康平, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭
2. 発表標題 無線フィードバック制御のための予測制御と誤り訂正符号化を用いたクロスレイヤ冗長化に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, RCC2019-51, pp. 189-193
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 笠井康平, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭
2. 発表標題 無線フィードバック制御における予測制御と誤り訂正符号化の組み合わせに関する一検討
3. 学会等名 革新的無線通信技術に関する横断型研究会(MIKA), no.4-20
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山口未来, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭
2. 発表標題 非同期情報交換が複数機器無線フィードバック制御の品質に与える影響の実験的評価
3. 学会等名 革新的無線通信技術に関する横断型研究会(MIKA), no.4-14
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林健太郎
2. 発表標題 高信頼な無線遠隔制御の実現に向けて ~ 通信と制御のクロスレイヤ最適化 ~
3. 学会等名 IEEE LMAG-Nagoya講演会(招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

http://www.katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp/~kobayasi/ncsu/workshop01.html

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
研究協力者	岡田 啓 (Okada Hi raku) (50324463)	名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授 (13901)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	片山 正昭 (Katayama Masaaki) (60185816)	名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授 (13901)	

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			
米国	North Carolina State University			