

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 6 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870313

研究課題名(和文)無線機器制御のための制御レイヤと通信レイヤの統合最適化に関する研究

研究課題名(英文)A study on joint optimization of control and communication layers for wireless control systems

研究代表者

小林 健太郎(Kobayashi, Kentaro)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・助教

研究者番号：40583878

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000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フィードバック制御システムについて、制御レイヤの情報に基づいて無線通信レイヤの性能向上を図るという新たな取り組みにより、無線制御システムの性能向上を図った。サブテーマ(1)では、制御対象の動きを予測して制御信号を受信する際の判定誤りを最小化する受信機を構築し、制御品質の向上を実現した。サブテーマ(2)では、制御の誤差を最小化するように予測して誤り訂正符号を適応的に切り替える方式を構築し、制御品質の向上を実現した。これらに加え、制御機器の数学モデルの不確かさを考慮したロバスト制御設計における無線フィードバック制御の性能を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：From a new perspective of improving the wireless communication layer based on information of the control layer, performance improvement of wireless control systems has been investigated. In sub-theme (1), an optimum receiver for suppressing channel error is proposed. The proposed receiver predicts a future state of the controlled plant and uses the predicted information as an a priori knowledge to detect control signals. By using the proposed receiver, the channel error is minimized and an improvement of control quality is achieved. In sub-theme (2), an adaptive channel error correction is proposed. The proposed predicts future control error in the controlled plant and utilizes the predicted information to switch error correction codes for minimizing the control error. By using the proposed method, an improvement of control quality is achieved. In addition, performance of wireless feedback control systems with a robust control design is demonstrated.

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 統合最適化 最適受信機 適応誤り訂正符号化 状態推定 最適制御 ロバスト制御

1. 研究開始当初の背景

システム制御における通信は、製造、ロボット、交通システム、エネルギーシステム、医療、防災等、今後の産業に欠かせない分野の基幹技術であり、特に、無線による遠隔制御(無線制御)の重要性はますます高まっている。電子情報通信学会に高信頼制御通信時研究専門委員会が平成22年5月に設立され、計測・制御関連学会との合同研究会が平成24年11月に開催されるなど、制御のための通信(制御通信)は制御と通信の両面より急速に注目を集めている。

従来の人間を対象とした音声・データ通信のような通信システムでは、利用者の満足度を数学的に記述することは困難であった。そのため、システムの高信頼化のために通信レイヤでできることは通信レイヤのみに基づいた通信品質の向上でしかなかった。これに対し、産業機器やロボットを対象とした制御通信では、制御レイヤの状況・品質を数学モデルで記述することが可能であり、制御レイヤと通信レイヤの相互の最適化が可能となる。特に、無線制御では、制御命令や制御状況を実無線伝送する際に生じるデータの誤り、パケットの消失が制御の品質を大きく左右する。ゆえに、制御に重要な情報をいかに誤りなく伝送するかが最も大きな課題の一つである。

申請者はこれまでに、無線フィードバック制御システムの高信頼化について、理論解析を踏まえて基礎検討を進めてきた。無線フィードバック制御システムは、制御分野における代表的なフィードバック制御において、制御対象へ入力する操作量と制御対象の状態量の伝送を実無線通信で行う遠隔制御システムである。操作量や状態量の無線伝送にデータの誤りやパケットの消失がある状況について、制御レイヤの状態予測[1]や通信レイヤの前方誤り訂正[2]の効果の評価を行ってきた。これまでの検討結果から、通信レイヤのみに基づいた平均的な無線通信の品質向上だけでは制御レイヤの品質向上には繋がらないことを明らかにしており、無線制御システムの高信頼化のためには制御レイヤの状況に応じた通信品質の向上が必要であることが分かってきた。

2. 研究の目的

本研究は、システム制御の理論に基づいて無線通信レイヤの品質向上を図るという新たな取り組みにより、無線制御システムの高信頼化を目指すものである。これに関して、以下の二つのサブテーマに取り組む。

(1) 制御の理論を応用した最適受信機

フィードバック制御システムでは、コントローラは先の時刻の制御対象の状態を予測しながら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コントローラの動作に基づいて通信レイヤの受信機の性能向上を図る。具体的には、制御対象

からフィードバックされる状態量を受信する際に、予測した状態量を利用した信号判定を行うことで無線通信路誤りの低減を図る。

(2) 制御の理論を応用した適応誤り訂正

制御システムでは、制御対象の状態によって、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は、時間的にその重要度が異なってくる。このような制御レイヤの情報の重要度に基づいて通信レイヤの適応的なリソース割り当てを行うことにより制御品質の向上を図る。具体的には、コントローラにおいて制御対象の先の動作を予測し、制御の誤差がより小さくなる誤り訂正能力・通信レートへと切り替えることで、制御品質の向上を図る。

3. 研究の方法

システム制御の理論を応用した最適受信機、及び、システム制御の理論を応用した適応誤り訂正のサブテーマを並行して検討を進める。平成25年度に、制御機器の数学モデルをベースとした予測制御の理論に基づいて理論解析を行い、方式設計を行う。理論解析・計算シミュレーションにより提案方式の通信レイヤの性能と制御レイヤの品質との関係を明らかにする。平成26年度に、前年度の検討結果を踏まえつつ、制御機器の数学モデルの不確かさを考慮したロバストな制御システムへと議論を展開し、より現実的な制御系における無線制御システムの性能を明らかにする。理論解析・計算シミュレーションだけでなく、実機実験による性能解析も行う。具体的には下記の通り検討を行う。(平成25年度)

サブテーマ(1)、(2)の2つの研究課題に対し、制御機器の数学モデルをベースとした予測制御の理論に基づき理論検討を行い、提案方式の実装・性能評価を行う。サブテーマ(1)では最適受信機の観点より、サブテーマ(2)では適応誤り訂正符号化の観点より、通信レイヤならびに制御レイヤの品質改善を目指す。

(1) 制御レイヤの予測制御・ロバスト制御の理論を通信レイヤの最適信号判定の理論へと応用する。予測に基づき、受信した制御信号の誤りを最小化するような最適受信機を設計する。理論解析・計算シミュレーションにより、制御レイヤの品質(予測精度)が提案方式の通信レイヤの性能(誤り率)に及ぼす効果を明らかにし、提案方式の有効性を明らかにする。

(2) 制御レイヤの予測制御・ロバスト制御の理論を通信レイヤの誤り訂正符号化へと応用する。制御の誤差を最小化するように誤り訂正能力・通信レートの割り当てを行う適応誤り訂正方式を設計する。計算シミュレーションにより、提案方式の通信レイヤの性能(誤

り率・通信レート)が制御レイヤの品質(安定性, 応答性)に及ぼす効果を明らかにし, 提案方式の有効性を明らかにする.

(平成 26 年度)

制御機器の数学モデルの不確かさを考慮した制御システムへと議論を展開する. 計算機シミュレーションにより, 制御機器の数学モデルの不確かさを考慮したロバスト制御設計とそれを考慮しない最適制御設計について, 通信レイヤの性能(誤り率)が制御レイヤの品質(安定性, 応答性)に及ぼす効果を比較し, 性能差の要因を明らかにする.

また, 無線フィードバック制御システムを評価するための実験機器として, リアルテック社製回転型倒立振子を利用する. 倒立振子は様々なロボットに応用できる代表的な実験機材であり, 制御理論の有効性の検証に広く使われている. システム同定により倒立振子実機の動的振る舞いの数学モデル化を行い, 計算機シミュレーションによる性能評価に活用する. 実機実験と計算機シミュレーションにより, 通信レイヤの性能(誤り率・バースト誤り長)が制御レイヤの品質(安定性, 応答性)に及ぼす影響を明らかにする.

4. 研究成果

(1) 制御レイヤの情報として状態予測器の予測結果を受信した制御信号の判定の事前情報として用いる受信機を構築した. 具体的には, 図 1 のように, コントローラが常に制御対象の状態を予測していることに着目し, 状態予測器の結果を事前情報に用いて受信信号判定を行った. 制御信号を受信する際の判定誤りを最小化するように理論設計を行うことで, 誤り率性能の向上, さらに, 制御品質の向上を実現した.

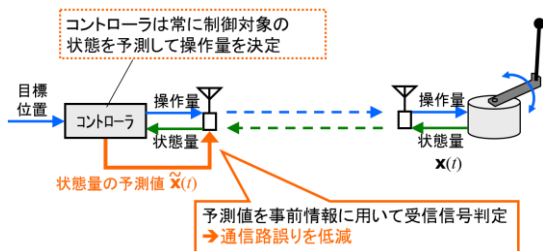


図 1. 状態予測を利用した最適受信機

(2) 制御レイヤの情報として状態予測器の予測結果を符号化率の選択基準として用いる適応誤り訂正符号化を構築した. 具体的には, 図 2 のように, 誤り訂正符号を常に用いると誤り率特性は向上するものの冗長により制御情報の送信レートが減少してしまうことに着目し, 制御機器の状態を予測して不安定になりそうなときに誤り訂正符号を適用した. 目標軌道との誤差を予測し, 誤差が最小になるように符号化を切り替えることで誤り訂正能力と送信レートのトレードオフ要求を満たし, 制御品質の向上を実現した.

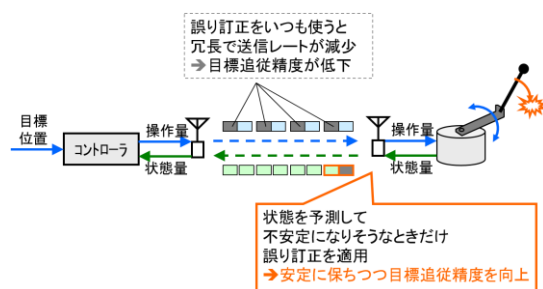


図 2. 状態予測を利用した適応誤り訂正

(3) 制御機器の数学モデルの不確かさを考慮した制御システムへと議論を展開した. 制御機器の数学モデルの不確かさを考慮したロバスト制御設計とそれを考慮しない最適制御設計について, パケットロス環境下での制御品質の比較評価を行った. これにより, 制御一般にて外乱に強いとされるロバスト制御設計を単純に適用するだけでは, 最適制御設計よりも制御性能が劣る場合があることを明らかにした. その原因は, コントローラの内部状態がパケットロスを完全には再現できないことに起因することを明らかにした. また, 回転型倒立振子を用いた実機実験では, 装置に発生する振動現象をより正確に表した数学モデルによる軌道予測と線形近似した単純な数学モデルによる軌道予測の予測精度の比較評価を行った. これにより, 軌道予測の数学モデルを正確なものに置き換えるだけでは, 制御品質の向上はわずかであることを明らかにした. その原因は, パケットロスの発生パターンにより予測制御の精度に差が生じており, 最も影響の大きいパケットロスの発生パターンに制御性能が左右されることを明らかにした.

<引用文献>

[1] 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭, "状態オブザーバを用いた無線フィードバック制御システムにおける伝送誤りの影響に関する一検討," 電子情報通信学会技術研究報告, RRR2011-11, pp.7-12 (2011)

[2] 服部晋悟, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭, "無線フィードバック制御のためのパケットロス検出と状態予測に基づく前方誤り訂正手法," 電子情報通信学会技術研究報告, RRR2012-2, pp.3-10 (2012)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

(1) C. Carrizo, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama, "Predictive Control for Performance Improvement of a Feedback Control System using Cyclostationary Channels," IEICE Transactions on Fundamentals, vol.E98-A, no.4,

pp.1000-1005, 2015 年 4 月, 査読有,
DOI:10.1587/transfun.E98.A.1000.

(2) 小林健太郎, "無線制御システムにおける制御レイヤの情報を利用した通信路誤り訂正技術," 計測と制御, vol.53, no.12, pp.1117-1122, 2014 年 12 月, 査読有.

(3) 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭, "無線フィードバック制御におけるオブザーバの状態予測を利用した最尤判定受信機," 電子情報通信学会論文誌, vol.J96-A, no.11, pp.745-755, 2013 年 11 月, 査読有,
http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j96-a_11_745.

(4) R. Mizutani, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama, "Impact of the reduction of transmitted information on the control quality in a wireless feedback control system," IEICE Transactions on Fundamentals, vol.E96-A, no.5, pp.869-877, 2013 年 5 月, 査読有,
DOI:10.1587/transfun.E96.A.869.

[学会発表] (計 16 件)

(1) 中島明紀, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭, "リミットサイクルをもつシステムにおける予測制御の品質にパケットロスが与える影響," 電子情報通信学会 総合大会, A-22-2, p.298, 立命館大学 (滋賀県・草津市), 2015 年 3 月 10 日.

(2) 永田篤史, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭, "ハフマン符号を適用した無線フィードバック制御システムへの制御品質評価," 電子情報通信学会 総合大会, A-22-1, p.297, 立命館大学 (滋賀県・草津市), 2015 年 3 月 10 日.

(3) 小倉貴志, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭, "パケットロスを設計に取り入れた H_{∞} 制御システムの特性評価," 電子情報通信学会技術研究報告, RCC2014-65, pp.1-6, 名古屋大学 ES 総合館 (愛知県・名古屋市), 2015 年 1 月 15 日.

(4) 中島明紀, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭, "無線フィードバック制御システムにおける回転型倒立振子のモデル化誤差が制御品質に与える影響," 電子情報通信学会技術研究報告, RCC2014-63, pp.33-38, JAIST 東京サテライト (東京都), 2014 年 11 月 20 日.

(5) C. Carrizo, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama, "A Study of Time Division Multiple Access Schemes for the Control of Machines using Narrowband Power Line Communication," IEICE Technical Report,

RCC2014-24, pp.13-18, 京都テルサ (京都府・京都市), 2014 年 7 月 30 日.

(6) 小倉貴志, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭, "パケットロスがロバスト制御系と最適制御系に与える影響," 電子情報通信学会技術研究報告, RCC2014-8, pp.33-38, 機械振興会館 (東京都), 2014 年 5 月 29 日.

(7) A. Tanaka, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama, "A Study on the Reduction of Synchronization Error using a Relay of Predictive Control Information in Wireless Control of Multiple Plants," 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, SP1-I.4, pp.150-154, Kobe International Conference Center (兵庫県・神戸市), 2013 年 12 月 15 日,
DOI:10.1109/SII.2013.6776662.

(8) S. Hattori, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama, "A Note on Adaptive Coding Scheme for Minimizing Tracking Error in Wireless Feedback Control Systems," 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, TP1-I.4, pp.867-872, Kobe, Japan, Kobe International Conference Center (兵庫県・神戸市), 2013 年 12 月 15 日, 10.1109/SII.2013.6776661.

(9) 小林健太郎, "[招待講演] 無線フィードバック制御における制御レイヤの情報を利用した通信レイヤの最適化," 電子情報通信学会技術研究報告, RRRC2013-25, pp.19-25, 大阪市立大学文化交流センター (大阪府・大阪市), 2013 年 11 月 22 日.

(10) 服部晋悟, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭, "無線フィードバック制御における追従誤差の予測を利用した適応符号化," 電子情報通信学会技術研究報告, RRRC2013-27, pp.33-39, 大阪市立大学文化交流センター (大阪府・大阪市), 2013 年 11 月 21 日.

(11) S. Hattori, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama, "A Note on Adaptive Coding Scheme for Improvement of Reference Tracking in Wireless Feedback Control systems," 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp.4438-4443, Vienna (Austria), 2013 年 11 月 12 日,
DOI:10.1109/IECON.2013.6699850.

(12) C. Carrizo, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama, "Feedback Control Scheme with Prediction for Power Line Communication Channels," IEEE International Conference on Smart Grid Communications, pp.289-293, Vancouver

(Canada), 2013 年 10 月 22 日 ,
DOI:10.1109/SmartGridComm.2013.66879
72.

(13) S. Hattori, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama, "A Note on Adaptive Coding Scheme Based on Control Quality for Wireless Feedback Control Systems," 18th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Cagliari (Italy), 2013年9月12日, DOI:10.1109/ETFA.2013.6648041.

(14) 田中篤史, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭, "[ポスター講演] 複数機器無線制御における予測制御情報の中継を用いた同期誤差の低減 ~バースト誤りに対する性能評価~, " 電子情報通信学会技術研究報告, RRR2013-17, pp.35-42, アクトシティ浜松 (静岡県・浜松市), 2013 年 7 月 18 日.

(15) 服部晋悟, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭, "[ポスター講演] 無線フィードバックシステムにおける制御レイヤの品質に基づいた適応誤り訂正手法," 電子情報通信学会技術研究報告, RRR2013-16, pp.27-34, アクトシティ浜松 (静岡県・浜松市), 2013 年 7 月 18 日.

(16) 田中篤史, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭, "複数機器無線制御における予測制御情報の中継を用いた同期誤差の低減に関する一検討," 電子情報通信学会技術研究報告, RRR2013-02, pp.7-11, 京都大学百周年時計台記念館 (京都府・京都市), 2013 年 5 月 16 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 健太郎 (KOBAYASHI, Kentaro)
名古屋大学エコトピア科学研究所・助教
研究者番号: 40583878

(2) 研究協力者

片山 正昭 (KATAYAMA, Masaaki)
名古屋大学エコトピア科学研究所・教授
研究者番号: 60185816

岡田 啓 (OKADA, Hiraku)
名古屋大学エコトピア科学研究所・准教授
研究者番号: 50324463