

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K21071

研究課題名(和文) 高信頼遠隔制御のための制御と通信のクロスレイヤ設計・最適化に関する研究

研究課題名(英文) Cross-layer design and optimization of control and communication for reliable remote control systems

研究代表者

小林 健太郎 (Kobayashi, Kentaro)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・助教

研究者番号：40583878

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：高信頼な遠隔制御を実現するための通信技術の構築を目的とし、制御と通信の両方の理論に基づいたクロスレイヤ設計・最適化に取り組んできた。特に、制御データの情報圧縮と通信路誤り訂正の視点より、遠隔制御システムの性能向上に取り組んだ。制御情報の重要度を指標にした情報圧縮手法、制御情報の重要度を指標にした誤り訂正手法、これら情報圧縮と誤り訂正の統合手法、さらに、制御情報を事前情報に利用した誤り訂正復号手法を提案し、従来の通信レイヤのみに基づく手法よりも、高い制御品質を達成できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To provide communication techniques for reliable remote control systems, we have tackled cross-layer design and optimization problem based on control and communication theory. From a view point of data compression and error correction of control data, performance improvement techniques have been investigated. Proposed cross-layer techniques (data compression techniques based on the importance of control data, error correcting coding techniques based on the importance of control data, joint data compression and error correcting coding techniques, and error correcting decoding techniques based on a priori information of control data) can achieve higher control quality than the conventional techniques based only on the communication layer.

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 情報圧縮 誤り訂正 クロスレイヤ設計 統合最適化

1. 研究開始当初の背景

システム制御における通信（制御通信）は、製造、エネルギー管理、交通、医療・ヘルスケア、防災等、産業の高度化に欠かせない基幹技術である。高信頼な遠隔制御に向けた研究は、制御分野と通信分野のアプローチに大別される。前者は、通信に制約（帯域制限や通信誤り等）がある下で高信頼な制御技術を提供するというアプローチである。後者は、制御を支えるために高信頼な通信技術を提供するというアプローチである。

制御通信では、無線 LAN 等の通信一般と異なり、通信レイヤよりも上位にある制御レイヤの振る舞いを制御理論を用いて数学的に記述できる。この点に着目し、遠隔制御システムの高信頼化を目指し、これまでに、遠隔制御のための誤り訂正技術について最適受信機や適応符号化の理論検討を進めてきた。これまでの検討結果から、平均的な通信品質の向上だけでは制御品質の向上には直接繋がらないことを明らかにしており、制御レイヤの情報を利用して通信レイヤを設計することで、通信と制御の品質を同時に向上させることが分かってきた。

広く用いられている通信レイヤのみ（情報理論）に基づく情報圧縮では、出現頻度が多い要素から順に短い符号語に割り当てられ、情報量的に最適な圧縮となるよう設計されている。また、誤り訂正符号では、平均の誤り率性能やスループット性能等を最適化するよう設計されている。しかし、従来の通信レイヤのみに基づく設計では、上位の制御レイヤでやり取りされる情報の意味や重要度を考慮できていない。例えば、情報圧縮により長い符号語に割り当てた制御情報は長い遅延と多くの誤りを生じ、誤り訂正符号により長い冗長を付けた制御情報は多くの誤りを抑制できるが長い遅延を生じてしまう。これらは制御性能の劣化に繋がる。ゆえに、遠隔制御の更なる高信頼化のためには、制御の重要度を指標とする新たな通信レイヤの設計を進める必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、機械・プラント等の制御システム内の通信について、高信頼な遠隔制御を実現するための通信技術を実現することである。その実現のため、制御と通信の両方の理論に基づき、制御と通信のクロスレイヤ設計・最適化を行う。従来のネットワーク制御研究と異なり、通信レイヤよりも上位の制御レイヤの振る舞いが制御理論で記述できることを活用し、制御レイヤの情報に基づいて下位の通信レイヤの性能向上を図る。本研究では、予測制御等の制御の知識を応用し、制御システム内で送受信される制御情報（制御対象への操作量および制御対象の状態情報）の重要度を指標とする新たな視点に基づく情報圧縮・誤り訂正の実現に取り組む。

3. 研究の方法

情報圧縮と誤り訂正のサブテーマ A, B に分け、並行して検討を進める。

A. 制御情報の重要度を指標にした情報圧縮

B. 制御情報の重要度を指標にした誤り訂正

サブテーマ A では情報圧縮の観点より、まず、従来の情報圧縮を行った場合について、制御情報の符号長や量子化精度が圧縮率や制御品質に与える影響の差を明らかにする。次に、それらが圧縮率や制御品質に与える影響を制御理論を用いて解析し、制御情報の重要度の指標を検討する。そして、制御情報の重要度に基づくアルゴリズム構築を行い、従来の情報圧縮に対して制御品質および情報圧縮率を比較し、提案の有効性を明らかにする。

サブテーマ B では誤り訂正の観点より、まず、従来の誤り訂正を行った場合について、制御情報を事前情報に利用した誤り訂正復号アルゴリズムを構築する。制御精度が復号誤り率に及ぼす効果を明らかにし、有効性を明らかにする。次に、誤り訂正の冗長が誤り率や制御品質に与える影響を制御理論を用いて解析し、制御情報の重要度の指標を検討する。そして、制御情報の重要度に基づくアルゴリズム構築を行い、従来の誤り訂正に対して制御品質および誤り率性能を比較し、提案の有効性を明らかにする。

最終的に両サブテーマの検討結果を統合した制御通信方式の設計・最適化を行う。制御と通信のクロスレイヤ設計・最適化による遠隔制御システムの高信頼化実現を目指す。

4. 研究成果

(1) 制御情報の重要度を指標にした情報圧縮手法

まず、従来の情報圧縮（情報の出現頻度のみに基づいて平均データ長を短くする符号化）を用いた制御システムの評価を行った。その結果、従来の情報圧縮では、制御に重要な情報であっても出現頻度が少なければ長い符号語に割り当てられてしまい、これが原因となって、制御遅延と通信路誤りが増大し、制御品質が大きく劣化してしまうことを明らかにした。

これに基づき、割り当てられる符号長を制御情報の重要度の一つの指標として考え、より効率的な情報圧縮手法を提案した。最大符号長に制限を付けた符号化方法、また、符号を制御の重要度の低い情報と高い情報に分割して符号を再構成する方法を構築し、制御品質の劣化を抑えつつ、高い圧縮率も得られることを示した。

(2) 制御情報の重要度を指標にした誤り訂正符号化手法

従来の誤り訂正（通信路の情報のみに基づいて平均誤り率を小さくする符号化）を制御システムに適用すると、強い誤り訂正符号を用いれば通信誤りを大きく減せることで制

御の誤差が小さくなるが、一方、その分冗長によるデータ量の増加に伴う遅延によって制御の誤差が大きくなるというトレードオフがあることを明らかにした。

これに基づき、制御情報の重要度の指標として制御の目標値との誤差を考え、より効率的な誤り訂正手法を提案した。制御理論に基づいて制御の誤差を予測し、制御の誤差が最小になるように誤り訂正符号の強さを切り替えることで、通信路誤りを低減しつつ、高い制御品質も得られることを示した。

(3) 制御情報の重要度を指標にした情報圧縮と誤り訂正の統合手法

上記(1)(2)の検討を踏まえ、情報の圧縮と誤り訂正符号化を組み合わせることで、送信するデータ量を増やさない新たな方式を構築した。送信するデータ量を増やさないことで制御レイヤの最適化が容易になる利点がある。

制御の予測理論を利用して制御誤差が最も小さくなるようにどの制御情報をどの圧縮率と誤り訂正符号化率で送るのかを通信の状況に応じて適応的に切り替えることで、送信するデータ量を増やすことなく通信路誤りを大きく低減でき、高い制御品質も得られることを示した。

(4) 制御情報を事前情報に利用した誤り訂正復号手法

上記(1)-(3)はどのように制御データの符号化を行うのが良いのかといった視点に基づくものである。これらに対して、どのように制御データの復号を行うのがよいのかという観点より、制御情報を事前情報に利用した誤り訂正復号手法を構築した。

制御レイヤにおいて予測した制御誤差を利用して、最適信号判定（通信路誤りを含んだ受信信号から最も確からしい制御信号を判定）することで通信路誤りを大きく低減でき、さらに、信号判定後に含まれる通信路誤りの影響を制御誤差の予測にも反映させることで高い制御品質が得られることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計3件）

- ① K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama, "A Cross-layer Optimized Receiver Design for Wireless Feedback Control Systems," *IEEE Transactions on Communications*, 査読有, vol.66, no.1, pp.320-329, 2017年9月, DOI:10.1109/TCOMM.2017.2751472, <http://hdl.handle.net/2237/27527>
- ② 三輪洋祐, 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制御情報の取捨選択に基づく適応誤り訂正符号化手法," *電子情報通信学会論文誌*, 査読有, vol. J100-A, no.7, pp.259-267,

2017年7月, <http://hdl.handle.net/2237/26839>

- ③ S. Hattori, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama, "ON-OFF Error Control Coding Scheme for Minimizing Tracking Error in Wireless Feedback Control Systems," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 査読有, vol.11, no.6, pp.1411-1421, 2015年10月, DOI:10.1109/TII.2015.2489185

〔学会発表〕（計14件）

- ① 三輪洋祐, 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制御におけるセンシング情報の重要度に基づく不均一誤り保護手法," *電子情報通信学会技術研究報告*, RCC2017-62, pp.61-66, 2017年12月.
- ② Y. Miwa, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama, "Adaptive Channel Coding Scheme Based on State Estimation Error for Wireless Feedback Control Systems," *International Conference on Materials and Systems for Sustainability (ICMaSS)*, 2017年9月
- ③ 三輪洋祐, 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状態オブザーバの誤差共分散に基づいた適応誤り訂正符号化手法," *電子情報通信学会技術研究報告*, RCC2017-44, pp.167-172, 2017年7月
- ④ K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama, "A Cross-layer Design of Optimized Receiver for Wireless State Feedback Control," *IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, S13.2, pp.750-754, 2017年7月
- ⑤ Y. Miwa, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama, "A Study on Variable Length Channel Coding for State Feedback in Wireless Control Systems," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2017年3月
- ⑥ A. Nagata, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama, "A study on a source coding scheme considering the importance of control data for wireless feedback control systems," *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp.6007-6012, 2016年10月
- ⑦ 永田篤史, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭, "最大符号長を制限した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," *電子情報通信学会技術研究報告*, RCC2016-17, pp.29-34, 2016年7月
- ⑧ 三輪洋祐, 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状

- 態オブザーバの誤差共分散に基づいた誤り訂正符号化に関する一検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, RCC2016-16, pp. 23-28, 2016年7月
- ⑨ 三輪洋祐, 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状態量の推定誤差を最小とする通信路誤り訂正方式に関する一検討,” 電子情報通信学会 総合大会, A-17-1, p. 234, 2016年3月
- ⑩ 永田篤史, 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制御システムにおける制御情報の重要度を考慮したハフマン符号化手法の一検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, RCC2015-50, pp. 55-60, 2015年12月
- 11 A. Nagata, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama, “A note on the performance evaluation of wireless feedback control systems with Huffman coding under data-rate constraints,” International Symposium on EcoTopia Science (ISETS), no. 28-6-3, 2015年11月
- 12 三輪洋祐, 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状態情報の可変長誤り訂正符号化に関する一検討,” 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, K1-1, 2015年9月
- 13 小林健太郎, “ [招待講演] 高信頼遠隔制御のための制御と通信のクロスレイヤ設計に関する研究動向” 電子情報通信学会技術研究報告, RCC2015-37, pp. 111-118, 2015年7月
- 14 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のデータレート制限下における性能評価,” 電子情報通信学会技術研究報告, RCC2015-18, pp. 7-11, 2015年7月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 健太郎 (KOBAYASHI, Kentaro)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・助教

研究者番号: 40583878

(2) 研究協力者

岡田 啓 (OKADA, Hiraku)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

研究者番号: 50324463

片山 正昭 (KATAYAMA, Masaaki)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

研究者番号: 60185816