

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：62615

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26820143

研究課題名(和文)無線制御通信システムのためのプロトコル設計

研究課題名(英文)Communication Protocol Design for Wireless Control Systems

研究代表者

金子 めぐみ(Kaneko, Megumi)

国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・准教授

研究者番号：10595739

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)：本研究は、M2Mシステムやフィードバック制御システムのための貴重な無線資源・エネルギー資源の消費量を低減しつつ、高信頼かつ低遅延の無線通信を実現するプロトコル設計を目的とした。先ず、無線制御通信システムをモデル化し、フィードバック制御に適切な物理層及びMAC層を検討した。更に、現実的なフィードバック制御システムの一応用例として無線LANに基づくCommunication-Based Train Control (CBTC)システムに注目し、無線通信プロトコルを考案した。提案プロトコルはアウテージ確率・システム制御性能を向上することを本研究で明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this work, we have considered the design of wireless access and communication protocols for the future Internet of Things (IoT) and Machine-to-Machine (M2M) systems. In particular, we aimed at designing spectrum and energy-efficient access protocols while satisfying the stringent reliability and delay requirements of wireless control systems. We have first analyzed the suitable PHY and MAC layer protocols to support such requirements. Next, we have focused on the WLAN-based Communication-Based Train Control (CBTC) as one concrete scenario of a wireless feedback control system, for which we have proposed a tailored link layer protocol. Our results show that the proposed access protocol achieves large improvements in terms of communication delay outage performance as well as the overall system control performance.

研究分野：無線通信工学

キーワード：無線通信 無線資源割り当て M2M 制御通信システム 圧縮センシング

1. 研究開始当初の背景

近年、物と物が直接通信する M2M や Internet of Things (IoT) システムが世界中の研究者の注目を集めており、国際標準化も議論されている。重要な課題の一つとして、工場・発電所・人工衛星内などの制御情報のリアルタイム通信は現在有線ケーブルにより実現されているが、その無線化が挙げられる。本研究開始時から、この課題のためのセッションやパネルが本分野のフラグシップ国際会議 IEEE Globecom 等で開催されてきた。制御通信システムの無線化は、次世代移動体通信システム (5G) の重要なターゲットの一つでもあり、新しい機械等を設置する際の自由度向上、ケーブルコストの削減、メンテナンスの簡素化、人工衛星の軽量化による打ち上げコストの大幅な削減等、様々なメリットが期待されている。その一方で、フィードバック制御システムの無線化を実現するためには、多くの技術課題が残されている。

2. 研究の目的

本研究は、M2M システムやフィードバック制御システムのための、高信頼かつ低遅延の無線通信を実現するプロトコル設計を目的とした。特に、圧縮センシング等の信号処理技術を取り入れることによって、貴重な無線資源・エネルギー資源の消費量を低減しつつ、信頼性・品質が高く、最も効率よい無線資源割当て法を目的とした。更に、要求遅延以内に高い信頼性を持つ無線通信を実現し、フィードバック制御システムの要求を達成できるプロトコルの設計を目指した。

以下 4 つが主に取り組んだ課題だ。

- (1) 無線制御通信システムのモデル化と特性解析
- (2) フィードバック制御に適切な物理層及び MAC 層の検討
- (3) 制御システムのための現実的な無線通信プロトコル設計
- (4) 提案アプローチの他の無線通信システムへの汎用化

3. 研究の方法

本研究では 2. で示した課題に以下の方法で取り組んだ。協力者として、無線信号処理・物理層の専門家の京都大学の林和則准教授 (現在大阪市立大学 教授) と議論した。制御理論の専門家の京都大学の永原正章講師 (現在北九州大学 教授) にも協力いただいた。また、情報理論の専門家である米国・New Jersey Institute of Technology の Prof. Osvaldo Simeone や、通信理論の専門家であるデンマーク・Aalborg University の Prof. Petar Popovski からの助言を受けた。

また、国内外の本分野の主な国際会議・研究会に定期的に参加し、関連研究の動向調査を行った。国内外の多くの学会等で研究成果を発表したことにより多数の専門家からフィードバックをいただき、本研究を発展させてきた。提案法の実績評価は、主に計算機シミュレーションにより行った。

4. 研究成果

主な研究成果としては、まず制御通信システムを構成するコントローラと制御対象の間の通信路についてモデル化を行い、無線通信を実行するために利用可能な通信情報や、必要な量子化ビット数などを明らかにした。次に、作成したモデルにおいて、システムの誤り率や遅延など複数の評価基準の特性を明らかにした。また、無線制御通信システムのトイモデルにおいて、計算機シミュレーションを行い、提案法の妥当性を確認した。

更に、現実的なフィードバック制御システムの一応用例として、無線 LAN に基づく Communication-Based Train Control (CBTC) システムに注目し、アクセス制御法・プロトコルを考案した。中でも特に、Multiple Input Multiple Output (MIMO) アンテナ伝送技術を取り入れ、通信に必要な通信路情報等の交換法も含めた具体的な通信プロトコルを設計し、アウテージ確率・遅延時間の性能を解析した。計算機シミュレーションにより、提案プロトコルを現実的な条件の下で評価し、従来法に比べて制御性能を改善できることを明らかにした。

更に、M2M 無線センサーネットワークを対象に、本研究のアプローチの汎用化を目指した。特徴として、圧縮センシング・グラフ信号処理技術を活用したアクセス制御法を考案した。

研究成果は国内外の本分野の主な国際会議・研究会や論文誌で発表され、高い評価・注目を受けた。その一例として、本研究に取り組んでいる共著の大学院生も最優秀研究賞を受賞した。

列車と WLAN アクセスポイントの間での通信を使って列車の運行制御を行う CBTC システム (図 1) に関する研究成果の一部を以下にまとめる。

- (1) MIMO 伝送を用いた CBTC システムを対象とし、周期的な制御メッセージ通信の平均遅延最小化を考慮した新しい適応変調 Adaptive Modulation and Coding (AMC) 法を提案した。
- (2) 不完全・不完壁な通信路情報という現実的な環境で、MIMO 伝送を用いた CBTC システムのための通信プロトコルを設計した。

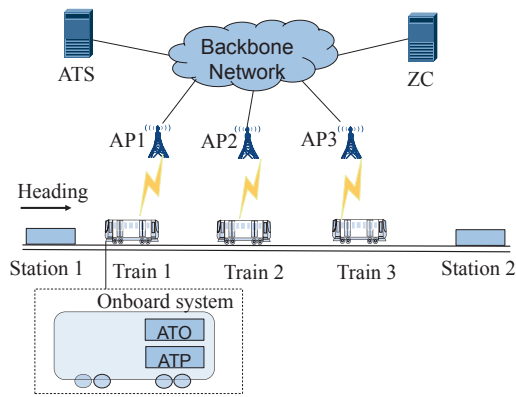


図 1: 無線 LAN に基づく Communication-Based Train Control (CBTC) システム

(3) 計算機シミュレーションを行い、提案プロトコルを現実的なシステム条件の下で評価した。その結果、従来法に比べてアウトエージ確率・遅延・制御性能を改善できることを明らかにした。

提案法では制御周期 T を超えたパケットはドロップする条件の下、無線チャンネルによるエラー及び MAC レベルのパケット衝突を考慮し、平均遅延特性の解析を行った。図 2 は考案した CBTC システムのための AMC 法の平均遅延特性を示している。図 2 から、平均遅延は変調レベルによって大きく変動することが分かる。

図 3 と 4 では提案プロトコル及び従来プロトコルの制御通信アウトエージ確率（制御メッセージが制御周期 T 内に受信されない確率）を比較している。

図 3 では時不変な無線通信路（制御周期内の瞬時的チャンネル状態は一定）を想定する。無線チャンネルによるエラー及び MAC レベルのパケット衝突を同時に考慮するため、提案法は優れた特性を達成でき、従来法の遅延を大幅に削減する。

図 4 では、制御周期内の瞬時的チャンネルは Doppler shift により変動するという、より現実的な時変の無線通信路を想定した。この場合でも提案法は従来法の特性を大幅に改善することが確認できた。

更に、時不変よりも時変のチャンネルにおいて、提案法はより優れた特性を得られる。その理由は、再送の際にチャンネル状態が変動するためダイバーシティ効果が得られ、制御通信アウトエージ確率を更に減少できるためである。複雑な無線環境においても、提案プロトコルはアウトエージ確率・システム制御性能を向上することを本研究で明らかにした。

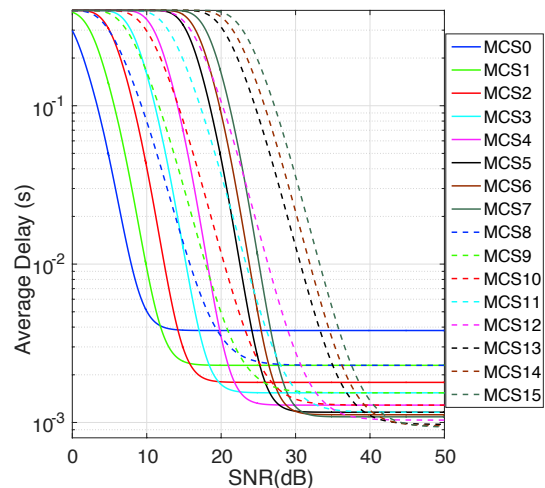


図 2: 周期的な制御メッセージ通信の平均遅延最小化を考慮した提案の適応変調法 ($T=0.4s$)

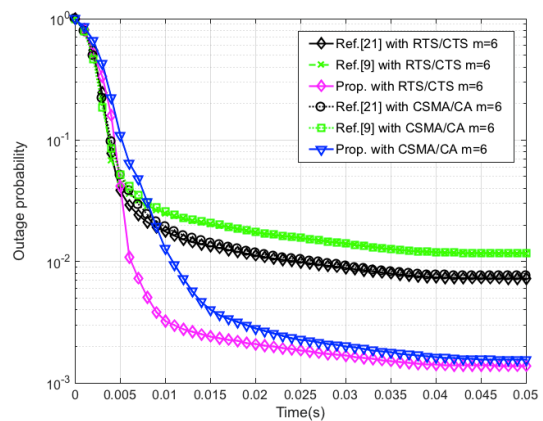


図 3: 提案プロトコル及び従来法の制御通信アウトエージ確率特性（無線通信路：時不変）

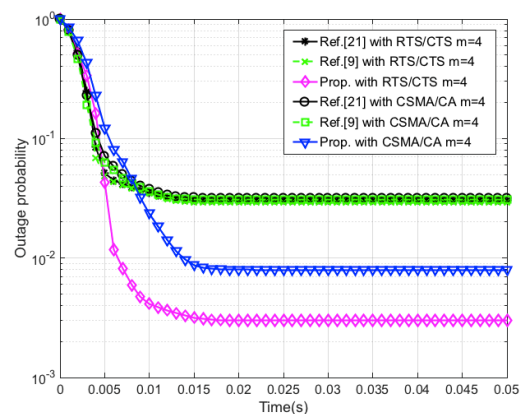


図 4: 提案プロトコル及び従来法の制御通信アウトエージ確率特性（無線通信路：時変）

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① Q. Dong, K. Hayashi and M. Kaneko, “An Optimized Link Layer Design for Communication-based Train Control Systems using WLAN”, in IEEE Access, DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2763173, Oct. 2017 査読有
- ② M. Kaneko, T. Nakano, K. Hayashi, T. Kamenosono and H. Sakai, “Local CSI Overhearing and Scheduling Prediction-based Distributed Resource Allocation for OFDMA Heterogeneous Networks”, in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.66, no.2, pp.1186-1199, Feb. 2017 査読有
- ③ T. Kamenosono, M. Kaneko, K. Hayashi and L. Boukhatem, “Self-Organized Inter-Cell Interference Coordination Based on Partial CSI Sharing in Heterogeneous Networks Employing Cell Range Expansion”, in IEICE Transactions on Communication, Special Section on Advanced Information and Communication Technologies and Services in Conjunction with Main Topics of APCC2015, April 2016 査読有
- ④ R. Hayakawa, K. Hayashi and M. Kaneko, “Lattice Reduction-Aided Detection for Overloaded MIMO using Slab Decoding”, in IEICE Transactions on Communication, Special Section on Advanced Information and Communication Technologies and Services in Conjunction with Main Topics of APCC2015, April 2016 査読有
- ⑤ K. Matsuoka, Y. Yushima, R. Hayakawa, R. Kawasaki, K. Hayashi and M. Kaneko, “An RFID Tag Identification Protocol via Boolean Compressed Sensing”, in IEICE Communications Express, February 2016 査読有
- ⑥ M. Kaneko, H. Yamaura, Y. Kajita, K. Hayashi and H. Sakai, “Fairness-Aware Non-Orthogonal Multi-User Access with Discrete Hierarchical Modulation for 5G Cellular Relay Networks”, in IEEE Access, vol.3, pp.2922-2938, Nov. 2015 査読有 DOI:10.1109/ACCESS.2015.2506261
- ⑦ M. Kaneko, W. Hu, K. Hayashi and H. Sakai, “Compressed Sensing-Based Tag Identification Protocol for a Passive RFID System”, in IEEE Communication Letters, vol.18, no. 11, pp. 2023-2026, Nov. 2014 査読有

[学会発表] (計 11 件)

- ① M. Kaneko, G. Cheung, W.T. Su and C.W. Lin, “Graph-based Joint Signal/Power Restoration for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks”, IEEE Global Communications Conference (Globecom), Singapore, Dec. 2017 査読有
- ② T.D. Ha, L. Boukhatem, M. Kaneko and S. Martin, “Performance-Cost Trade-off of Joint Beamforming and User Clustering in Cloud Radio Access Networks”, IEEE International Symposium On Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Montréal, Canada, Oct. 2017 査読有
- ③ M. Kaneko, T. Kamenosono and K. Hayashi, “Dynamic ICIC for Post-Scheduling Outage Probability Minimization in Small Cell Networks”, in IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Toronto, Canada, Sept. 2017 査読有
- ④ Q. Dong, K. Hayashi and M. Kaneko, “Adaptive Modulation and Coding Design for Communication-Based Train Control Systems Using IEEE 802.11 MAC with RTS/CTS”, in IEEE 18th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), Sapporo, Japan, July 2017 査読有
- ⑤ H. Mukumoto, K. Hayashi and M. Kaneko, “Direction-Of-Arrival Estimation via Khatri-Rao Subspace Using Compressed Sensing”, in 2016 APSIPA Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), Jeju, Korea, Dec. 2016 査読有
- ⑥ Q. Dong, K. Hayashi, M. Kaneko, “A New Adaptive Modulation and Coding Method for Communication-Based Train Control Systems Using WLAN”, in the 6th IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems, Tokyo, Japan, Sept. 2016 査読有
- ⑦ R. Kawasaki, K. Hayashi and M. Kaneko, “Pool Size Control for Adaptive Group Testing via Boolean Compressed Sensing with Solution Space Reduction”, in 2015 APSIPA Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), Hong Kong, China, Dec. 2015 査読有
- ⑧ T. Kamenosono, M. Kaneko, K. Hayashi and L. Boukhatem, “Self-Organized Resource Allocation Based on CSI Overhearing in Heterogeneous Networks Employing Cell Range Expansion”, in the 21st Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), Kyoto, Japan, Oct. 2015 査読有
- ⑨ R. Hayakawa, K. Hayashi and M. Kaneko, “An Overloaded MIMO Signal Detection Scheme with Slab Decoding and Lattice

Reduction“, in the 21st Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), Kyoto, Japan, Oct. 2015 査読有

- ⑩ T. Kamenosono, M. Kaneko, K. Hayashi and M. Sakai, “Compressed Sensing-based Channel Estimation Methods for LTE-Advanced Multi-User Downlink MIMO System”, in IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring), Glasgow, Scotland, May 2015 査読有
- ⑪ K. Hayashi, M. Sakai, T. Kamenosono and M. Kaneko, “Compressed Sensing based Channel Estimation for Uplink OFDMA Systems,” in 2014 APSIPA Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), Siem Reap, Cambodia, Dec. 2014 査読有

[その他]

・受賞：電子情報通信学会 コミュニケーションクオリティ研究専門委員会，第2回コミュニケーションクオリティ基礎講座ワークショップ 最優秀研究賞，2016年10月7日
受賞論文：“An Adaptive Modulation and Coding scheme for Communication-Based Train control systems using WLAN”，
Q. Dong, K. Hayashi, M. Kaneko

・受賞：電子情報通信学会 コミュニケーションクオリティ研究専門委員会，第1回コミュニケーションクオリティ学生ワークショップ 優秀研究賞，
2016年8月28日
受賞論文：“クラウド無線アクセスネットワークのためのフロントホール制約を考慮したビームフォーミング法の一検討”，
香月諒大，金子めぐみ，林和則

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金子めぐみ (Kaneko, Megumi)
国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・准教授
研究者番号：10595739

(2) 研究協力者

林和則 (Hayashi, Kazunori)
大阪市立大学・教授
研究者番号：50346102

永原正章 (Masaaki Nagahara)
北九州大学・教授
研究者番号：90362582

Popovski, Petar
デンマーク・オールボー大学・教授

Simeone, Osvaldo
ニュージャージー工科大学・教授