



ネットワーク化制御システムにおける 適応的 QoS 保証技術

久保 亮吾

慶應義塾大学 理工学部電子工学科
〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1

Adaptive QoS Guarantee Technology for Networked Control Systems

Ryogo Kubo

Department of Electronics and Electrical Engineering, Keio University
3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 223-8522, Japan

概要

インターネット等の通信ネットワークを含む制御システムはネットワーク化制御システムと呼ばれ、IoT (Internet of Things)時代の到来とともにその重要性が認識されている。一方で、通信ネットワークのサービス品質(QoS: Quality of Services)が制御システムの性能や安定性に影響を与えることが知られており、QoSを適切に制御することが求められている。本研究では、従来のQoS指標である遅延やパケット損失等に加えて、IoTにおける新たなQoS指標として通信ネットワークの消費電力、セキュリティ、信頼性に着目し、それらの適応的保証技術の検討を行う。省電力通信方式を用いた遠隔制御技術、改ざん検知機能を有する遠隔制御技術、変動遅延を有する遠隔アクティブキュー管理(AQM: Active Queue Management)技術を提案し、シミュレーションおよび実験により提案手法の有効性を確認する。

1. はじめに

多数のセンサ、アクチュエータが通信ネットワークを介して接続され、遠隔環境において情報収集および機器制御を行うネットワーク化制御システムは、産業システムの自動化や遠隔医療など次世代のスマートシティ/コミュニティを支える基盤インフラ技術である⁽¹⁾。本研究は、低コストで多様な通信サービスを提供できる公衆ネットワークにおいて、通信サービス品質(QoS: Quality of Service)をネットワーク環境の変化に応じて適切に制御することで、低消費電力かつ高信頼、高精度なネットワーク化制御システムを実現することを目的としている。

ネットワーク化制御システムは、図1に示すように、制御器(Controller)、通信ネットワーク(Network)、制御対象(Plant)とから構成される。通信ネットワークに

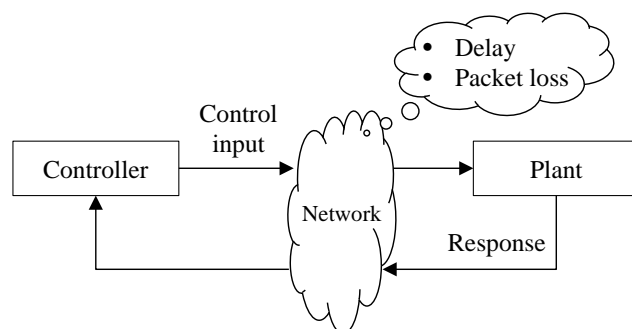


図1 ネットワーク化制御システム

は、遅延やパケット損失などが存在するため、制御性能や安定性の保証が難しい⁽²⁾⁽³⁾。特に、ネットワーク QoS の確率的な変動に対する補償が重要な課題として認識されている。さらに今後、IoT (Internet of Things) が普及し、あらゆるモノが通信ネットワークに接続されるよ

うになると、ネットワーク化制御システムにおいてこれまでほとんど検討されてこなかった、通信ネットワークの消費電力、セキュリティ、信頼性を考慮したシステム設計が重要となる。これらの3要素はQoSの一部として捉えることができ、ネットワーク環境の変動を考慮した新たなQoS保証技術が必要とされている。

本研究では、新たなQoS指標である消費電力、セキュリティ、信頼性に着目し、それらの適応的QoS保証技術について検討する。まず、通信ネットワークの消費電力を低減しつつ、高精度なネットワーク化制御を可能とする「省電力通信方式を用いた遠隔制御技術」を提案する。次に、通信ネットワーク上でのサイバー攻撃に対応するための「改ざん検知機能を有する遠隔制御技術」を提案する。最後に、柔軟かつ高信頼なTCP (Transmission Control Protocol) 通信を提供するためのアクティブキュー管理 (AQM : Active Queue Management) 技術として「変動遅延を有する遠隔AQM技術」を提案する。シミュレーションおよび実験により提案手法の有効性を確認する。

2. 省電力通信方式を用いた遠隔制御技術

ネットワーク化制御システムでは、制御器と制御対象との間で制御信号および応答信号が常時やり取りされる。リアルタイム性を要求する制御アプリケーションにおいては、通信頻度の低下や非周期通信が制御性能の劣化を引き起こす可能性があるため、これまで通信インタフェースの省電力化を目的としたスリープ機能の導入についてはほとんど検討されていない。本研究では、応答信号の変動が小さい場合に、通信インタフェースを低消費電力のスリープモードに移行させ、省電力化を図る手法を提案する。

2.1 システム構成

本研究では、DCモータの遠隔角度制御を考える。提案するシステム構成を図2に示す。図2において、 r 、 x 、 y 、 s はそれぞれ角度指令値、電圧入力値、角度応答値、ラプラス演算子を表している。 $C(s)$ は制御器、 $P(s)$ は制御対象の伝達関数である。また、 T はネットワーク遅延を表しており、ここでは制御器から制御対象への遅延と制御対象から制御器への遅延が等しいことを仮定する。制御対象側にはスリープ機能を有した送信機が、制御器側にはスリープ機能を有した受信機が実装されている。提案するスリープ機能の詳細については後述するが、角度応答値 y はすべての値が制御器側にフィードバックされるわけではなく、適切に選択された y_r のみが制御器側

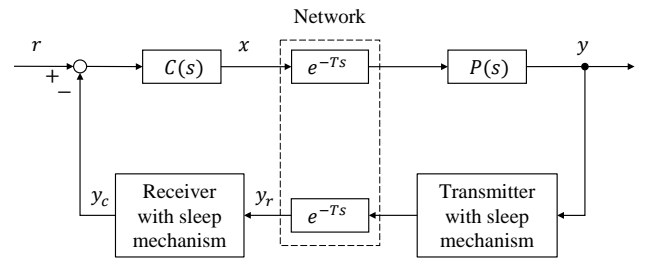


図2 省電力通信方式を用いた遠隔制御

に送信される。情報を送信しない時間帯は、送信側、受信側ともに通信インタフェースを低消費電力のスリープ状態に移行させる。制御器側では、最新の角度応答 y_c が制御器で使用される。つまり、スリープ機能により受信できない時間帯は、1つ前のサンプリング時刻で使用した角度応答値を再利用する。

2.2 提案手法

図2に示したように、制御対象から制御器へのフィードバックパスに対してスリープ機能をベースとした省電力通信方式を導入することを考える。提案するスリープ機能は以下の通りである。まず、送信側で(1)式のように、最新の角度応答値と実際に制御器側で使用された角度応答値を比較する。

$$|y_r(k) - y_c(k-1)| \leq h \quad (1)$$

ここで、 h はしきい値である。(1)式が満たされた場合には、通信インタフェースを低消費電力のスリープモードに移行させる。一度スリープモードに移行すると、一定期間 T_s はデータの送受信ができない。つまり、提案手法はデータの変動が小さい場合に、データの送受信頻度を低減して省電力化を図る手法である。

2.3 シミュレーション

提案手法の有効性を確認するため、シミュレーションを行った。シミュレーションでは、ネットワーク遅延 T を10 ms、しきい値 h を0.01 radとした。制御器はPD (Proportional-Derivative) 制御器を用い、制御対象側に外乱抑圧のための外乱オブザーバを実装した。結果を図3に示す。図中の青線は角度指令値、赤線は角度応答値を示す。

図3(a)はスリープ機能を実装しない場合の結果、図3(b)はスリープ機能を実装した場合の結果である。ただし、スリープ時間は10 msとした。図3より、スリープ機能を実装することで、応答が振動的になっていることが確認できる。一方、通信インタフェースの起動率は10%程度に低下しており、省電力化が可能であることを

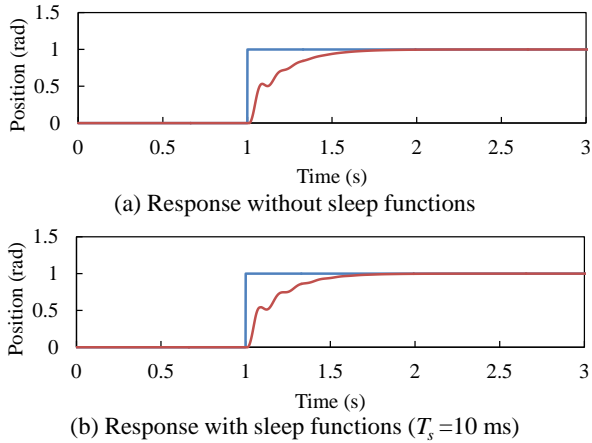


図3 シミュレーション結果
(省電力通信方式を用いた遠隔制御)

示している。しきい値やスリープ時間の設定による省電力効果と制御性能のトレードオフ関係を調整することが可能であり、要求された省電力性能、制御性能をもとにこれら設計することが今後の課題である。

3. 改ざん検知機能を有する遠隔制御技術

ネットワーク化制御システムはオープンなインターネット環境での使用が想定されているため、そのサイバーセキュリティが大きな問題となっている。盗聴、改ざん、なりすまし等、様々なサイバー攻撃が考えられるが、本研究では、改ざん（誤りデータ注入）攻撃を想定した対策について考える。ネットワーク上で伝送されるデータが改ざんされた場合、制御システムは誤った情報により制御されるため、重要インフラの停止など重大な事故につながる可能性がある。本研究では、あらかじめ複数経路で同一の情報を転送し、受信側で多数決に基づいて改ざんデータを識別する手法を提案する。

3.1 システム構成

本研究では、DC モータの遠隔角度制御を考える。提案するシステム構成を図4に示す。図2において、 x^{cmd} 、 u 、 x^{res} 、 s はそれぞれ角度指令値、電圧入力値、角度応答値、ラプラス演算子を表している。 G_c は制御器の伝達関数である。制御器から制御対象へのパス（前向きパス）を3つ用意し、それぞれの遅延を T_{f1} 、 T_{f2} 、 T_{f3} とする。また、制御対象から制御器へのパス（後向きパス）の遅延を、 T_b とする。本研究では、前向きパスに改ざん信号が加わることを想定する。前向きパス1に加わる改ざん信号を d_1 、前向きパス2に加わる改ざん信号を d_2 、前向

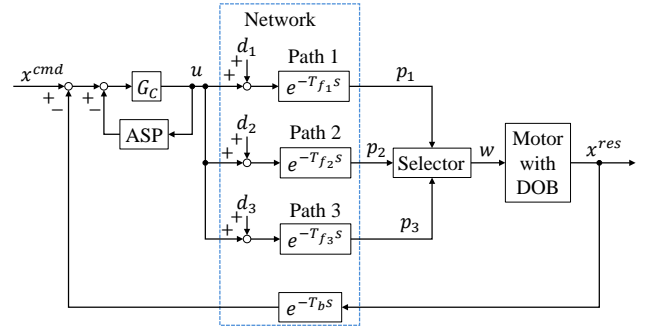


図4 改ざん検知機能を有する遠隔制御

きパス3に加わる改ざん信号を d_3 とする。ただし、同時刻には3つのパスのうちのいずれか1つに改ざん信号が加わるものとし、複数パスの信号の同時改ざんは考慮しない。パス1、パス2、パス3を通して制御対象側で受信される信号をそれぞれ p_1 、 p_2 、 p_3 とする。

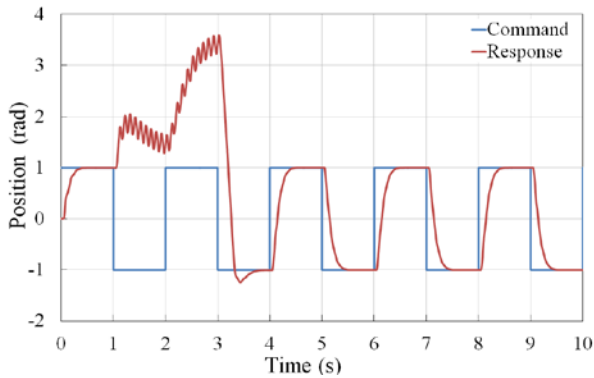
提案手法の詳細は後述するが、図中の「Selector」はこれらの3つの信号から改ざんされていない信号を各パスの遅延を考慮して適切に選択する。選択された信号は w であり、実際に制御対象に入力される。制御対象には外乱オブザーバ (DOB : Disturbance Observer) を実装している。また、制御器側には、遅延補償のための適応ミス予測器 (ASP : Adaptive Smith Predictor) を実装している。ASP内の遅延モデルは制御器と制御対象との間の往復遅延時間をリアルタイムに計測して更新する。

3.2 提案手法

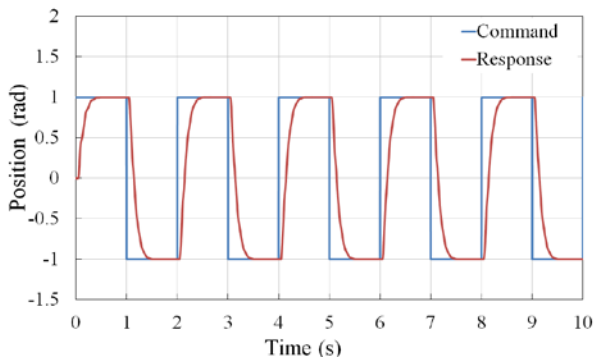
図4に示したように、Selectorにおいて多数決に基づくアルゴリズムを用いて改ざんされていない信号を識別する。前向きパスの遅延はパスにより異なるため、最大遅延のパスの信号が到着するまで他のパスの信号をバッファリングする。同一時刻に送信されたすべてのパスの信号が到着した時点で多数決をとることにより、改ざん信号を識別する。本手法を用いると、確実に改ざん信号を識別できる一方で、最大遅延パスの遅延が加わることになるため制御性能が劣化してしまう。そこで、制御器側に ASP を導入することにより、選択されたパスに応じた遅延補償を適応的に実現する。

3.3 実験

提案手法の有効性を確認するため、実験を行った。実験では、制御対象としてDCモータを用い、ネットワーク部分の遅延は仮想的に計算機内でエミュレートした。 T_{f1} 、 T_{f2} 、 T_{f3} 、 T_b をそれぞれ10ms、25ms、40ms、10msとした。また、制御器はPD制御器を用いた。改



(a) Conventional method



(b) Proposed method

図5 実験結果

(改ざん検知機能を有する遠隔制御)

ざん信号として周波数 10 Hz, 振幅 50 V の正弦波信号を加えた。従来手法では, 1 つのパスしか存在しないため, パス 1 に実験開始 1 s 後から 3 s 後まで改ざん信号を加えた。提案手法では, パス 1 には実験開始 1 s 後から 3 s 後まで, パス 2 には実験開始 4 s 後から 6 s 後まで, パス 3 には実験開始 7 s 後から 9 s 後まで, 改ざん信号を加えた。結果を図 5 に示す。図中の青線は角度指令値, 赤線は角度応答値を示す。

図 5(a) は従来手法の結果, 図 5(b) は提案手法の結果である。従来手法では, 冗長パスが存在しないため, 改ざんの影響を直接受け, 実験開始 1 s 後から応答が指令値に追従できなくなっている。一方, 提案手法では, 改ざんの影響を受けることなく応答が指令値に追従している。また, ASP の実装により, パス切り替えによる遅延変動の影響を受けていないことが確認できる。

4. 変動遅延を有する遠隔 AQM 技術

SDN/NFV (Software-Defined Network/Network Function Virtualization) の普及により, 複数のネットワーク機器を遠隔から制御することが可能となっている。本研究では, SDN/NFV の概念を利用して, リアルタイ

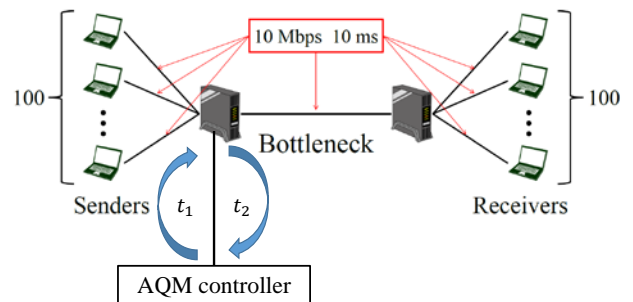


図6 変動遅延を有する遠隔AQM

ム性のあるネットワーク制御を遠隔で実現することを考える。TCP フローに対するネットワーク制御手法の 1 つである AQM は, 中継ノードにおいてパケットを積極的に廃棄することで, バッファオーバーフローなどの重度の輻輳を回避する手法である。これは, TCP がパケット損失の検知により送信ウィンドウサイズを減少させる機能を有していることを利用したものである。しかしながら, AQM を遠隔で実現する場合には, 制御遅延が存在するため, キュー長の安定化による TCP フローの輻輳回避が困難となる。本研究では, 制御遅延が時間的に変動する環境を想定し, 遠隔 AQM システムの遅延補償法を提案する。

4.1 システム構成

本研究では, AQM 制御器をルータの外部に通信ネットワークを介して配置することを考える。提案するシステム構成を図 6 に示す。図 6 は本研究のシミュレーションで用いたトポロジであり, TCP セッション数を 100, リンク遅延を 10 ms, リンク容量を 10 Mbps とする。AQM 制御器とルータは通信ネットワークを介して接続されており, AQM 制御器からルータまでの遅延を t_1 , ルータから AQM 制御器までの遅延を t_2 とする。 t_1 および t_2 は時間的に変動することを想定する。

4.2 提案手法

本研究では, t_1 および t_2 の変動遅延を補償する AQM 制御器を提案する。図 7 に提案する制御系のブロック線図を示す。図 7 において, R , M_n , s はそれぞれ TCP フローの往復遅延, TCP/AQM ネットワークのモデル, ラプラス演算子である。 d_{dp} は廃棄率次元の外乱であり, 実際の TCP/AQM ネットワークとそのモデルである M_n とのモデル化誤差である。本研究では, AQM 制御器として, PID (Proportional-Integral-Derivative) 制御器を用いる。また, 変動遅延を補償するためにバタフライ型 PDC (Perfect Delay Compensator) を実装する。バタ

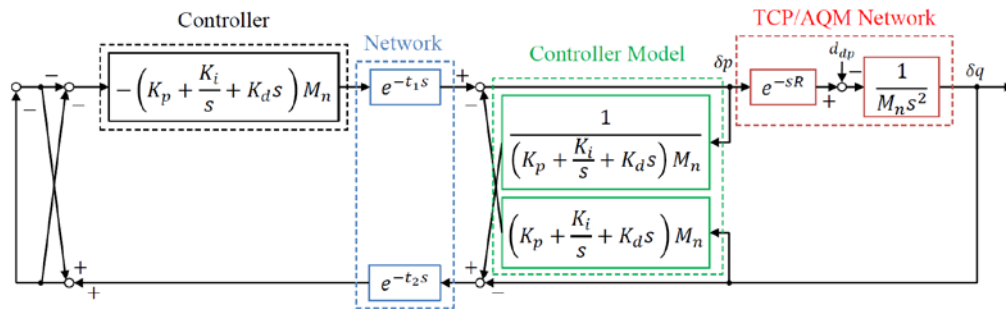


図7 バタフライ型PDCを用いた遠隔AQM

フライ型 PDC では、遠隔制御器と同じ構成の制御器を制御対象側にも実装する。このような構成をとることで、等价的に遅延要素をフィードバックループの外に追い出すことが可能となる。また、バタフライ型 PDC は変動遅延に対しても有効であることが知られている。

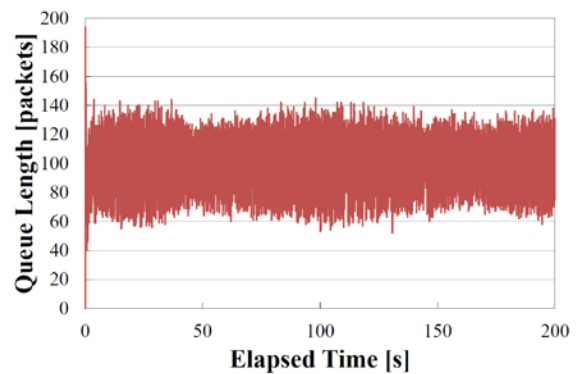
4.3 シミュレーション

提案手法の有効性を確認するためにシミュレーションを行った。図6に示したトポロジをネットワークシミュレータである ns-2 を用いて実装した。パケットサイズを 100 bytes, PID 制御の目標キュー長を 100 packets に設定した。制御遅延 t_1 および t_2 は 30 ms から 70 ms の間で変動させた。結果を図8に示す。

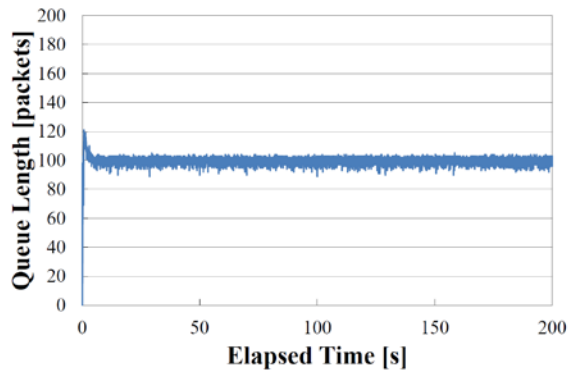
図8(a)は遅延補償を行っていない場合のキュー長応答、図8(b)はバタフライ型 PDC を用いた場合のキュー長応答である。遅延補償を行わない場合は、応答が目標値の 100 packets 付近で振動しており、キュー長が安定していないことが確認できる。一方、バタフライ型 PDC を用いた場合は、振動の振幅が減少し、目標値付近で安定し、バッファオーバーフローを起こしにくくなっていることが確認できる。バッファオーバーフローは、バースト的なパケット損失となるため、フロー間公平性の低下や複数フローのウィンドウサイズ減少周期が同期してしまうグローバル同期を引き起こす可能性がある。したがって、提案手法を用いることで、TCP 通信の信頼性向上が期待できる。また、遠隔 AQM により複数のルータを協調させた AQM が可能となるため、ネットワークフローの全体最適化が実現できると考えられる。

5. おわりに

本研究では、ネットワーク化制御システムにおける新たな QoS 指標として消費電力、セキュリティ、信頼性に着目し、省電力通信方式の導入による省電力化、サイバー攻撃耐性の付加による高セキュリティ化、QoS 変動の補償による高信頼化を実現した。シミュレーションおよ



(a) Conventional method without delay compensation



(b) Proposed method with butterfly-shaped PDC

図8 シミュレーション結果
(変動遅延を有する遠隔AQM)

び実験により提案手法の有効性を確認した。これらは、ネットワーク環境変動を考慮した適応的 QoS 保証技術として捉えることができるだけでなく、制御アプリケーションの性能および安定性を考慮した QoP (Quality of Performance) 保証技術となっている。

今後の課題として、通信ネットワーク自体の制御 (Control of Networks) システムと通信ネットワークを介したアプリケーション制御 (Control over Networks) システムの協調設計による、さらなる省電力化、高セキュリティ化、高信頼化が挙げられる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

謝辞

本研究は、公益財団法人高柳健次郎財団の助成によるものであることを記し、関係各位に謝意を表す。

参考文献

- (1) 久保亮吾, 田所将志, 鈴木謙一, 奥野通貴, 緒方祐次, “スマートコミュニティ向け情報インフラとアプリケーション,” 電子情報通信学会誌, Vol. 98, No. 2, pp. 118–123, Feb. 2015.
- (2) R. A. Gupta and M.-Y. Chow, “Networked control system: Overview and research trends,” *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 7, pp. 2527–2535, July 2010.
- (3) L. Zhang, H. Gao, and O. Kaynak, “Network-induced constraints in networked control systems—A survey,” *IEEE Trans. Industrial Informatics*, Vol. 9, No. 1, pp. 403–416, February 2013.
- (4) Z.-W. Wang and H.-T. Sun, “Control and scheduling co-design of networked control system: Overview and directions,” *Proc. 2012 Int. Conf. on Machine Learning and Cybernetics, ICMLC 2012*, pp. 816–824, July 2012.
- (5) 久保亮吾, “通信工学と制御工学の融合 —Control of Networks と Control over Networks—,” 電子情報通信学会誌, Vol. 100, No. 11, pp. 1316–1320, November 2017.

本研究に関連する成果発表

- ① T. Funakoshi and R. Kubo, “Cyclic sleep control of network interfaces in feedback path for energy-efficient networked control systems,” *Proc. 2nd IEEE Int. Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, SAMCON 2016*, V-6, pp. 1–2, March 2016.
- ② R. Imai and R. Kubo, “Experimental validation of communication disturbance observer for networked control systems with information losses,” *IEICE Communications Express*, Vol. 5, No. 4, pp. 102–107, April 2016.
- ③ J. Hoshino, H. Kojima, T. Funakoshi, R. Imai, and R. Kubo, “Secure networked motion control using tampering detection observer,” *Proc. 31st Int.*

Technical Conf. on Circuits/Systems, Computers and Communications, ITC-CSCC 2016, pp. 613–616, July 2016.

- ④ T. Funakoshi and R. Kubo, “Burst data transmission and time-delay compensation for energy-efficient networked motion control,” *Proc. 31st Int. Technical Conf. on Circuits/Systems, Computers and Communications, ITC-CSCC 2016*, pp. 617–620, July 2016.
- ⑤ R. Hotchi, H. Chibana, and R. Kubo, “Active queue management using remote congestion controller with model-free butterfly-shaped perfect delay compensator,” *Proc. 31st Int. Technical Conf. on Circuits/Systems, Computers and Communications, ITC-CSCC 2016*, pp. 755–758, July 2016.
- ⑥ R. Kubo, “Integrated communications and control technologies for smart infrastructure and applications,” *The IEEE SmartGridComm Workshop on Smart City Infrastructure and Applications, SmartcityInfra 2016*, November 2016. (keynote speech)
- ⑦ R. Hotchi and R. Kubo, “Analysis of controller mismatch in AQM with butterfly-shaped perfect delay compensator,” *Proc. 2017 Int. Symp. on Nonlinear Theory and its Applications, NOLTA 2017*, pp. 58–61, December 2017.
- ⑧ J. Hoshino, T. Funakoshi, K. Yamada, and R. Kubo, “Networked motion control with tamper detection observer and Smith predictor,” *Proc. 2017 Int. Symp. on Nonlinear Theory and its Applications, NOLTA 2017*, pp. 62–65, December 4–7, 2017.
- ⑨ K. Yamada, J. Hoshino, and R. Kubo, “A tamper detection method using redundant network paths with different delays for networked control systems,” *Proc. 2017 Int. Symp. on Nonlinear Theory and its Applications, NOLTA 2017*, pp. 66–69, December 2017.
- ⑩ R. Hotchi and R. Kubo, “Active queue management supporting TCP flows using dynamically controlled target queue length,” *Proc. IEEE Int. Conf. on Consumer Electronics - Taiwan, ICCE-TW 2018*, pp. 77–78, May 2018.