

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K16049

研究課題名(和文)光アクセス技術による広域センサ・アクチュエータネットワーク基盤の構築

研究課題名(英文)Building Large-Scale Sensor-Actuator Network Platform Based on Optical Access Technology

研究代表者

久保 亮吾 (KUBO, RYOGO)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・准教授

研究者番号：00582199

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)：光通信を利用した広域センサ・アクチュエータネットワークは、スマートコミュニティを構築するための基盤技術である。本研究では、低消費電力かつ低遅延な光アクセスネットワークを介した高精度の計測制御技術の確立を目指し、省電力ネットワーク化制御システムおよび低遅延ネットワーク化制御システムの提案を行った。また、提案時には挙げていなかった新たな課題としてネットワーク化制御システムのサイバーセキュリティ対策にも取り組んだ。

研究成果の概要(英文)：A large-scale sensor-actuator network using optical communication is the fundamental technology to build smarter communities. In this research, we proposed energy-efficient and low-latency networked control systems to achieve high-precision measurement and control technologies over energy-efficient and low-latency optical access networks. In addition, we discussed about emerging cybersecurity issues in networked control systems.

研究分野：システムエレクトロニクス

キーワード：ネットワーク化制御 スマートコミュニティ 光アクセス IoT サイバーフィジカルシステム 通信品質

1. 研究開始当初の背景

近年、民生分野において LAN (Local Area Network) の普及が進んでいる。LAN 通信には低コストの Ethernet 技術が用いられており、トラヒックの増加に対応するため、Ethernet 規格は高速化の一途をたどっている。一方で、情報通信機器の消費電力量は 2025 年には 2006 年比で 9 倍となることが予想されており、ネットワーク装置の省電力化が求められている。このような背景から、ネットワーク装置のスリープ機能が議論され、EEE (Energy-Efficient Ethernet) などが標準化されている。産業分野においても民生用の Ethernet 技術をベースとした産業用 Ethernet が工場内 LAN などに用いられている。

産業用 Ethernet では、高精度の計測・制御を実現するために、決められた時間内に必ず処理を完了しなければならないという「ハードリアルタイム性」が要求される。通信ネットワークを介して複数の機器をリアルタイムに連携させ、統合的に制御するスマートセンサ・アクチュエータネットワークが実現できれば、各機器に分散していた制御機能を集約させてシステム全体の省電力化を図ることが可能となる。

センサ・アクチュエータネットワークの一例として、ネットワーク化制御システムの構成を図 1 に示す。ネットワーク化制御システムは制御器、制御対象 (センサ、アクチュエータを含む) とそれらの間で情報交換を行うための通信ネットワークとから構成されている。通信ネットワークで生じる遅延やパケットロスが制御システムの安定性や性能に悪影響を及ぼすことが知られている。

2. 研究の目的

従来の産業用 Ethernet は工場内などの比較的近距離の通信を対象としており、コミュニティあるいは都市規模 (半径 20 km 程度) の広域センサ・アクチュエータネットワークを低消費電力かつ低遅延で形成することができないという課題がある。本研究の目的は、低消費電力かつ低遅延な光アクセス技術および光アクセス装置を介した高精度の計測制御技術を確立し、産業システムへの応用が可能な広域センサ・アクチュエータネットワーク基盤を構築することである。

3. 研究の方法

本研究では、低消費電力かつ低遅延な光アクセスネットワークを介した高精度の計測制御技術の確立を目指し、省電力ネットワーク化制御システムおよび低遅延ネットワーク化制御システムの提案を行った。また、提案時には挙げていなかった新たな課題としてネットワーク化制御システムのサイバセキリティ対策にも取り組んだ。以下に各提案の内容を示す。

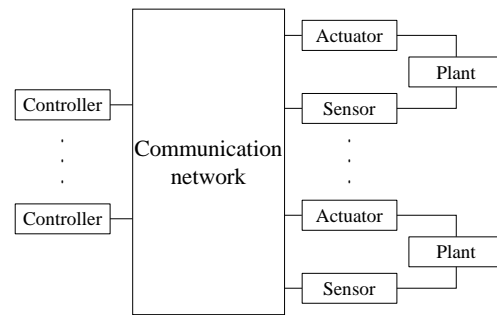


図1: ネットワーク化制御システム

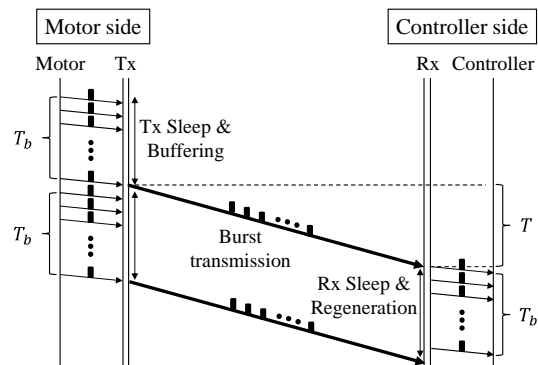


図2: バースト送信による省電力化

(1) 省電力ネットワーク化制御システム

通信インタフェースの省電力化手法としてスリープ機能が提案されているが、スリープ期間においてはパケット転送が不可となるため、遅延やパケット損失率が増加してしまう。ネットワーク化制御システムにおいて、このようなスリープ機能を有する通信インタフェースを用いることには、システム安定性の観点から大きな課題がある。そこで本研究では、バースト通信を用いてパケット損失を低減する手法、イベント駆動型のスリープ制御手法、カルマンフィルタを用いたパケット損失補償手法を提案した。

バースト送信による省電力化手法の概要を図 2 に示す。送信側でスリープ期間中に送信できないパケットを保持し、スリープ期間が終了した直後にまとめて送信する。受信側では、スリープ期間中のデータをまとめて受信し、サンプリング周期毎に再生する。本手法を用いることで、一定時間 (バッファリング時間に相当する時間) の遅延がネットワーク部分に生じたのと同じ影響となり、既存の遅延補償手法を用いることができるようになる。本研究では、通信遅延を外乱として捉えて補償を行う通信外乱オブザーバを用いることで、遅延による性能劣化を回避した。

(2) 低遅延ネットワーク化制御システム

ネットワーク化制御システムでは、通信ネットワークにおいて生じる遅延、遅延ゆらぎ、パケット損失などが性能劣化要因となる。根本的に制御性能の向上を目指すためには、通

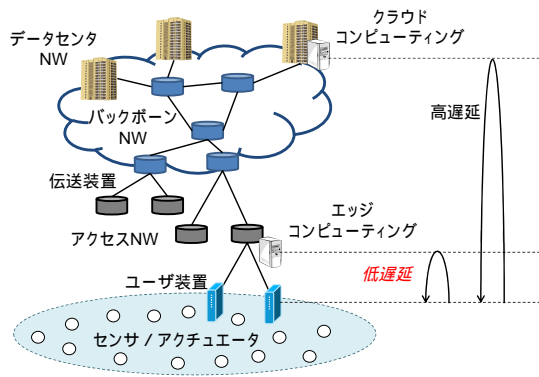


図3：光アクセスネットワークを活用した低遅延ネットワーク化制御アーキテクチャ

信ネットワークのアーキテクチャ変更が重要である。エッジコンピューティングは、リアルタイムアプリケーションを対象とした低遅延化技術であり、特にモバイル通信などへの適用が期待されている。一方で、数十 km 程度の範囲で数ミリ秒以下の遅延を要求するアプリケーションに対しては、光アクセス技術を用いることが考えられる。そこで本研究では、次世代光アクセスネットワークとして有望な 10G-EPON (10 Gbit/s Ethernet Passive Optical Network) システムを用いた低遅延ネットワーク化制御システムアーキテクチャを提案した。

提案するアーキテクチャの概念を図3に示す。光アクセスネットワークの通信事業者側終端装置である OLT (Optical Line Terminal) に少量の計算資源を搭載し制御アルゴリズムを動作させることを想定した。この場合、ユーザ側装置の ONU (Optical Network Unit) と OLT との間の往復遅延のみが通信ネットワーク遅延となるため、従来のクラウド型の制御アーキテクチャと比較して大幅な低遅延化が可能となる。

(3) サイバーセキュリティ対策

近年、ネットワーク化制御システムに対するサイバー攻撃の危険性が指摘されている。これまで、プライベートなネットワークでのみ動作していた制御システムがオープンなインターネットに接続されることになり、その機密性、完全性、可用性が脅かされる可能性があるためである。そこで本研究では、制御器と制御対象との間でやり取りされる情報の改ざんに着目し、制御的に改ざんを検知して影響を緩和する手法を提案した。

提案する改ざん検知オブザーバ (TDO: Tamper Detection Observer) を実装した制御システムを図4に示す。本研究では、制御対象から制御器へ送信されるフィードバック信号がネットワーク経路において改ざんされることを想定した。提案手法では、フィードバック経路を冗長化し、最低2つの経路を準備する。制御器側で2つの経路で受信した信号のうち、改ざんされていない正常信号

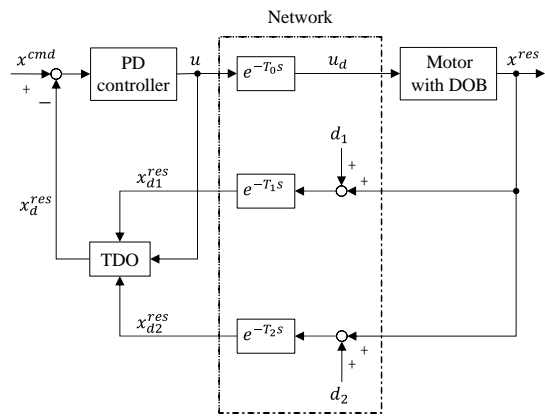


図4：制御システムへの改ざん攻撃

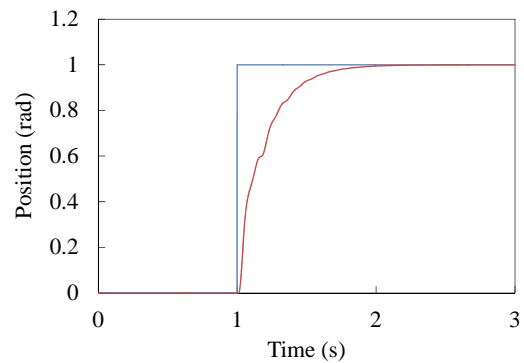


図5：パースト送信のシミュレーション結果

を判別し、正常信号を使用して制御アルゴリズムを動作させる。改ざん検知オブザーバ内部では、制御対象およびネットワーク遅延のモデルをもとに理想的なフィードバック信号を生成する。理想的なフィードバック信号と実際のフィードバック信号を比較し、誤差の小さい信号を正常信号として選択する。

4. 研究成果

本研究では、光アクセスネットワークを活用したネットワーク化制御システムの省電力化、低遅延化、サイバーセキュリティ対策に関して、以下のような研究成果を得た。

(1) 省電力ネットワーク化制御システム

DC モータの遠隔位置制御を想定したシミュレーションを行った。図5にパースト送信による省電力化手法を適用した場合の制御応答を示す。バッファリング時間は 100 ms とした。通信インタフェースの起動率は 1% であった。通信ネットワークにおいて、100 ms の遅延が生じているのと同様の結果であり、通信外乱オブザーバによる遅延補償が有効に動作していることが確認できる。バッファリング遅延を変更した検証も実施し、提案手法を用いることにより、通信インタフェースの起動時間を削減しつつ、制御性能を担保することが可能であることが確認できた。

通信インタフェースの省電力化アルゴリズムについては様々なものがこれまでに提案されており、制御側と通信側の協調動作が

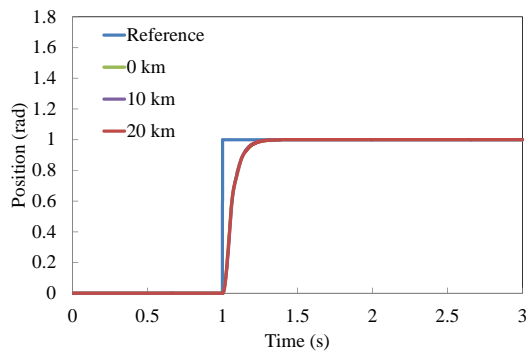


図6：10G-EPONを介したネットワーク化制御の実験結果

課題である。今後は、制御と通信の融合の観点から通信インターフェースのスリーブ動作を考慮した制御アルゴリズムおよび制御性能を考慮したスリーブアルゴリズムを検討していく必要がある。

(2) 低遅延ネットワーク化制御システム

10G-EPON システムを介して低遅延ネットワーク化制御システムを構成して実験を行った。図6にDCモータの位置制御の結果を示す。光ファイバ長を0 km、10 km、20 km と変更した。いずれの光ファイバ長においてもOLT ONU間の往復遅延は3 ms以下程度であったため制御側での遅延補償は行わなかった。図6より、光ファイバ長が20 kmの場合であっても遅延補償なしで安定した位置応答が得られていることが分かる。このように、光アクセスネットワークを利用したエッジコンピューティングにより、低遅延で高精度なネットワーク化制御が実現できることが確認できた。

将来的に光アクセスネットワークは無線ネットワークのフロントホール/バックホールとしての役割を果たすことが期待されているため、光・無線融合ネットワークを用いたエッジコンピューティング技術の検討が必要になると考えられる。

(3) サイバーセキュリティ対策

提案する改ざん検知オブザーバを用いない場合と用いた場合で改ざん信号の影響をシミュレーションにより比較した。図7および図8にシミュレーション結果を示す。シミュレーションでは、開始から5秒経過後に冗長化経路の一方に800 Hzの正弦波をネットワーク上で付加した。ネットワーク遅延は、制御器から制御対象、制御対象から制御器のいずれも10 msとした。改ざん検知オブザーバを用いない場合は、改ざん信号の影響により、応答値が目標値に追従できなくなっていることが確認できる。一方、改ざん検知オブザーバを用いた場合には、改ざんの影響を受けることなく、応答値が目標値に追従していることが確認できる。これは、改ざん検知オブザーバが、高周波の改ざん信号を検知し、

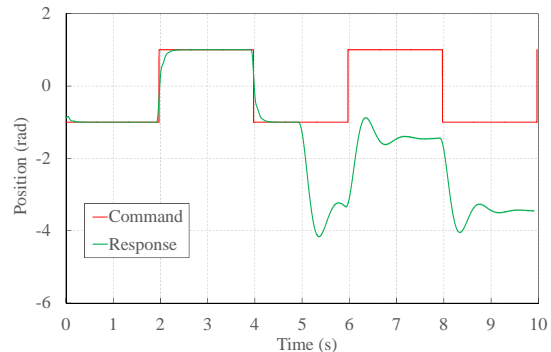


図7：改ざん検知オブザーバなしの場合のシミュレーション結果

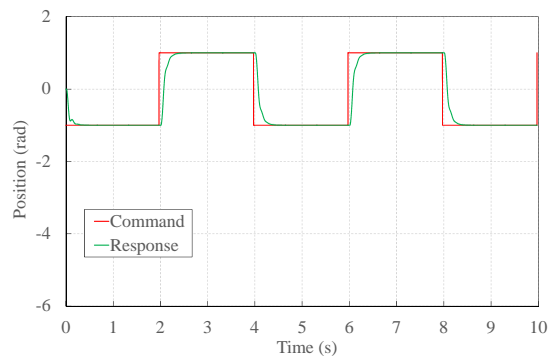


図8：改ざん検知オブザーバありの場合のシミュレーション結果

冗長化された経路のうち、改ざんを受けていないと考えられる経路を適切に選択していることによる。

本研究のシミュレーションでは、改ざん信号を高周波の正弦波としたが、悪意を持ったユーザが発生させる信号としては、システムモデルを利用したものなど様々な攻撃が考えられるため、さらなる検証が必要である。また、経路による遅延差を考慮した遅延補償手法の検討が必要である。

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1件)

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, 2017年11月(解説)(査読無し)

〔学会発表〕(計24件)

R. Hotchi and R. Kubo, “Active queue management supporting TCP flows using dynamically controlled target queue length,” The IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-TW 2018), 2018年5月
N. Hanaya, Y. Nakayama, M. Yoshino, K.

Suzuki, and R. Kubo, "Remotely controlled XG-PON DBA with linear prediction for flexible access system architecture," The Optical Networking and Communication Conference & Exhibition (OFC 2018), 2018年3月

K. Yamada, J. Hoshino, and R. Kubo, "A tamper detection method using redundant network paths with different delays for networked control systems," The 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2017), 2017年12月

J. Hoshino, T. Funakoshi, K. Yamada, and R. Kubo, "Networked motion control with tamper detection observer and Smith predictor," The 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2017), 2017年12月

R. Hotchi and R. Kubo, "Analysis of controller mismatch in AQM with butterfly-shaped perfect delay compensator," The 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2017), 2017年12月

久保亮吾, "情報通信と制御の融合によるサイバーフィジカルICTの実現," 計測自動制御学会産業応用部門大会, 2017年11月(招待講演)

R. Kubo, "Integrated communications and control technologies for smart infrastructure and applications," The IEEE SmartGridComm Workshop on Smart City Infrastructure and Applications, (SmartcityInfra 2016), 2016年11月(基調講演)

R. Hotchi, H. Chibana, and R. Kubo, "Active queue management using remote congestion controller with model-free butterfly-shaped perfect delay compensator," The 31st International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2016), 2016年7月

T. Funakoshi, and R. Kubo, "Burst data transmission and time-delay compensation for energy-efficient networked motion control," The 31st International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2016), 2016年7月

J. Hoshino, H. Kojima, T. Funakoshi, R. Imai, and R. Kubo, "Secure networked motion control using tampering

detection observer," The 31st International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2016), 2016年7月

[その他]

ホームページ

<http://www.kbl.elec.keio.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久保 亮吾 (KUBO RYOGO)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号: 00582199