

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 5 月 22 日現在

機関番号：14101

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05529

研究課題名(和文)STDMA型メッシュネットワークによる高信頼バイラテラル制御系の構築

研究課題名(英文)Design of Reliable Bilateral Control System over STDMA Based Network

研究代表者

矢代 大祐 (Yashiro, Daisuke)

三重大学・工学研究科・助教

研究者番号：60607323

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：STDMA(Synchronous Time Division Multiple Access)スイッチ群を介したバイラテラル制御系に関して以下の知見が得られた：1) バイラテラル制御系の動力学は接触物体の剛性に依存するため、その剛性推定値を用いた適応制御器が有効である。2) ロボットが2つ以上の能動関節を持つ場合、制御器を設計する座標系を適切に設定することで設計変数を減らすことができる。3) STDMAスイッチ群を介したフィードバック制御系の制御性能は設計者が決めるスイッチングパターンに依存するため、目的関数とネットワークトポロジに応じてスイッチングパターンを最適化する必要がある。

研究成果の概要(英文)：Following knowledge related to bilateral control system over STDMA (Synchronous Time Division Multiple Access) switches is obtained: 1) Because dynamics of a bilateral control system depends on a stiffness of a contact object, an adaptive controller using an estimated stiffness is effective. 2) Assume that a robot has more than two active joints, then control performance depends on a coordinate system where the adaptive controller is implemented. 3) Because control performance of a feedback control system over STDMA switches depends on a switching pattern, a switching pattern should be optimized based on an objective function and a network topology.

研究分野：モーションコントロール

キーワード：ロボティクス 有線通信方式 制御理論 信号処理 運動学 動力学 人間機械システム 電気機器

## 1. 研究開始当初の背景

近年、遠隔操作の実用化事例として da Vinci Surgical System (米 Intuitive Surgical 社) や PackBot (米 iRobot 社) が注目されている。da Vinci は低侵襲性内視鏡手術用の医療用ロボットであり、日本国内においても 2012 年に前立腺ガン手術において保険が適用されるようになるなど広く普及しつつある。PackBot は 2011 年の東日本大震災の際に、福島第一原子力発電所の調査支援に用いられた。しかしながら、da Vinci も PackBot も操作対象からの環境反力を操作者が知覚する機能を持っていないため、人が直接操作しているかのような繊細な動作は実現できない。そこで従来の遠隔操作に力覚フィードバック機能を搭載する研究が行われている ("Bilateral teleoperation: An historical survey", AUTOMATICA, 2006)。以下、このような遠隔操作をバイラテラル制御と呼ぶ。バイラテラル制御は、位置制御と力制御から成る。操作者がマスタロボットを操作すると、スレーブロボットがマスタロボットに位置追従する。これが位置制御である。また、スレーブロボットが未知環境と接触した際の環境反力と同じ力を操作者が知覚できる。これが力制御である。しかしながら、バイラテラル制御系ではマスタ・スレーブ間にフィードバックループが形成されるため、マスタ・スレーブ間に通信遅延がある場合にシステムが不安定化する問題がある。

この問題を扱う先行研究は、大きく分けて安定性の十分条件を用いる方法と必要十分条件を用いる方法に分類できる。安定性の十分条件を用いる手法としては、小ゲイン定理に基づく制御器設計法 ("A Force-Reflection Algorithm for Improved Transparency in Bilateral Teleoperation With Communication Delay", IEEE Transactions on Mechatronics, 2007) や受動定理に基づく制御器設計法が有名である。しかしながら、これらの手法は安定性を重視し、位置制御性能と力制御性能を犠牲にする設計になりがちである。

## 2. 研究の目的

本研究では上記の背景を踏まえ、通信方式とモーションコントローラを統一的に設計することで、安定性の必要十分条件を用いた制御系設計を可能にすることを目的とする。

ところで、通信方式には非同期方式と同期方式がある。インターネットや無線 LAN などに一般的に使われている方式は非同期方式であるが、遅延やゆらぎが大きいという欠点がある。ゆらぎをモデル化することは難しいため、非同期方式を用いたネットワークを介したバイラテラル制御では安定性の十分条件を用いて制御器設計せざるを得ない。そこで本研究では、同期方式の一

種である STDMA (Synchronous Time Division Multiple Access) スイッチ群を介したバイラテラル制御系を構築する。STDMA はデータリンク層の通信プロトコルであり、TDMA の思想をネットワーク全体に拡張したものである。非同期方式はもちろん、同期方式の一種である TDMA と比べても遅延やゆらぎが極めて少ないという特徴を持つ。また、通信遅延時間が既知である。これらのことから STDMA スイッチ群を用いることで安定性の必要十分条件に極めて近い制御器が設計できる。

## 3. 研究の方法

STDMA スイッチ群で構成したメッシュネットワークを介してロボット同士が双方向に実時間通信するバイラテラル制御系を開発する。具体的には、3 班体制で下記の課題に並列的に取り組む：

課題 A アクセス制御方式に STDMA を用いる通信端末 (STDMA スイッチ) を開発する。実装には FPGA ボードを用いる。また、STDMA スイッチを 10 台用いたメッシュネットワークを構成する。

課題 B STDMA テーブルから得られる制御信号の離散化・伝送遅延の情報に基づき制御ゲインを自動調整するモーションコントローラを開発し、FPGA 上に実装する。また、マスタ・スレーブロボットを 3 組開発し、モーションコントローラに接続することで、バイラテラル制御を行う。

課題 C 制御信号や画像信号を実時間通信するための仕組みを開発する。また、STDMA テーブルを動的に調整し、重要度の高いデータを優先的に伝送するアルゴリズムを開発する。

## 4. 研究成果

### (1) 1 自由度システムの制御器設計

バイラテラル制御系の動力学は接触物体の剛性に依存するため、その剛性推定値を用いた適応制御器が有効であることを示した。バイラテラル制御系は、マスタロボットとスレーブロボットがそれぞれ位置制御器と力制御器を 1 つずつ持つ。マスタロボットの位置制御器のゲインに、小さめの一定値を用いる 3 チャネル制御器、大きめの一定値を用いる 4 チャネル制御器、接触物体の剛性推定値を用いる適応制御器、を比較した。一定通信遅延の下で安定性と制御性能の両面において、適応制御器が最も優れていることが分かった。

しかしながら、通信遅延による剛性推定の遅れが制御性能を劣化させることが分かった。そこで、スレーブロボットと接触物体の距離をレーザー変位計で計測することで、物体との接触をマスタロボット側で予測し、マスタロボットが用いる剛性推定値の推定速度を高める手法を提案した。この手法を用いて適応制御器を設計したところ、

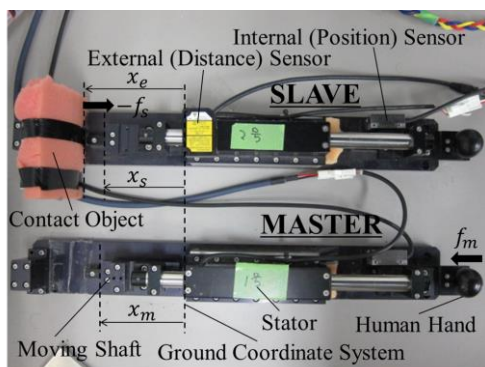


図1 1自由度システム

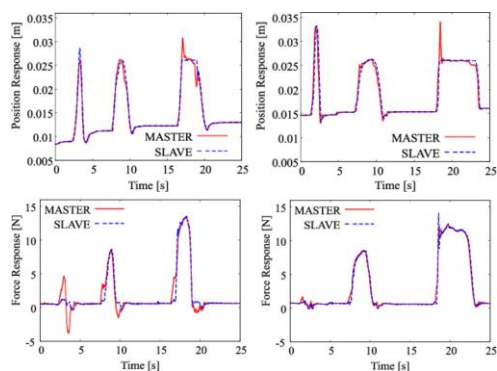


図2 位置応答と力応答

制御性能の向上を確認できた。図1に実験装置を示す。また、図2に4チャンネル制御器と提案する適応制御器を用いた場合の位置応答と力応答を示す。力応答が大幅に改善されることを示している。

## (2) 多自由度システムの制御器設計

複数台のロボットを用いて物体の把持・操りを行うことができるバイラテラル制御系の設計問題を考えた。2台の1自由度ロボットを用いて把持・操りを行う場合、マスタの位置制御器は2行2列の行列になる。研究代表者らは、2次元ベクトルで与えられる位置・力の計測値に対して2次のアダマール行列を用いて変換した座標系(タスク座標系)で適応制御器を設計することで、スカラー量の位置制御器に2次の単位行列を掛けた制御器であっても十分高い制御性能が得られることを示した(図3)。

2つ以上の能動関節を持つ多自由度ロボットを用いたバイラテラル制御系の設計問題を考えた。1自由度ロボットの場合、マスタの位置制御器はスカラーなのに対して、2自由度ロボットの場合、2行2列の行列になるため、設計変数が4倍に増える。そこで、研究代表者らは、接触物体の接線方向を $x$ 軸、垂線方向を $y$ 軸とする座標系(物体座標系)で適応制御器を設計することで、スカラー量の位置制御器に2次の単位行列を掛けた制御器であっても十分高い制御性能が得られることを示した(図4)。

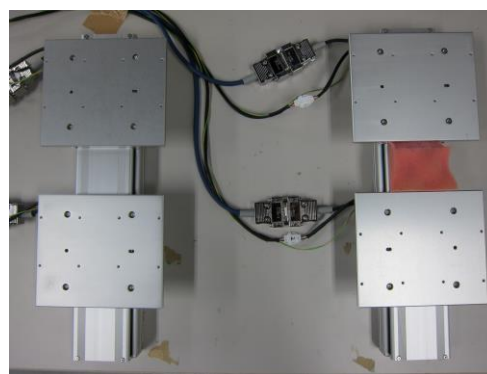


図3 2自由度把持・操りシステム

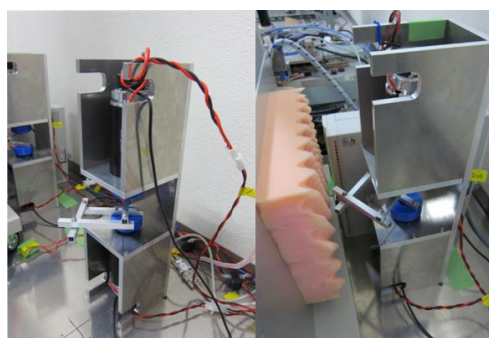


図4 2自由度システム

## (3) スイッチングパターンの最適化

6つの端末(3つのサーボモータと3つの制御器から成る)、9つのSTDMAスイッチから構成されるモータ制御系を設計した。6つの端末はすべて異なるSTDMAスイッチに接続されており、STDMAスイッチ群でマルチホップネットワークを構成した。目的関数によらず全ての端末が情報共有する静的ルーティングと目的関数に応じて情報共有する端末を選択する動的ルーティングの比較を行った。ただし、実験ではLinux上でSTDMAスイッチ群の模擬動作を行った。静的ルーティングでは、1つの端末をマスタ、他5つの端末をスレーブとして、マスタ・スレーブ間で双方向通信を行うことで情報共有する方法であり、産業用LANとして普及が進んでいるEtherCATに近い。目的関数によらず周期的なスイッチングパターンを生成する。一方で動的ルーティングでは目的関数の変化に応じて情報共有する端末を動的に選択する新しい通信方式である。スイッチングパターンが目的関数に依存する。例えば、6つの端末の内、1つのサーボモータと1つの制御器のみがフィードバック制御系を構成する場合には、これら2つの端末間の通信品質が最大化するスイッチングパターンが生成される。解析と実験を行ったところ、動的ルーティングの方が双方向通信する制御信号の遅延と離散化レベルが小さくなる結果、制御性能が高くなることが解析と実験により示された。

## 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)

1. Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, "Fast Estimation of Environment's Stiffness for Bilateral Control Systems with Communication Delay", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 5, No. 6, pp. 422-428, Nov. 2016, 査読有

[学会発表] (計 11 件)

1. Mingxuan Su, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, Satoshi Komada, "Design of Adaptive Controller on Task Coordinate System for Bilateral Control System with Communication Delay", Proceedings of the 15th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, Mar. 9th-11th, 2018
2. Yutaka Yamamoto, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, Satoshi Komada, "Analysis of Adaptive Controller on Object Coordination System for Bilateral Control System with Time Delay", Proceedings of 4th IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, Tokyo, Mar. 6th-8th, 2018
3. Daisuke Yashiro, "Fast Stiffness Estimation using Acceleration-based Impedance Control and its Application to Bilateral Control", Proceedings of 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control, Toulouse, Jul. 9th-14th, 2017
4. Yu Imai, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, "A Performance Evaluation of Distributed Control with STDMA Switches", Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology, Tronto, Mar. 22nd-25th, 2017
5. Yutaka Yamamoto, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, "Adaptive Controller Designed in Work Space for Bilateral Control System with Time Delay", Proceedings of the Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Firenze, Oct. 23-26, 2016
6. Daisuke Yashiro, "Influence of Time-Varying Communication Delay in Adaptive Controller Based Bilateral Control System", Proceedings of the 14th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, Apr. 22nd-24th, 2016
7. Yu Imai, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, "A Performance Analysis of Distributed Control over Multi-hop Network using STDMA Routers", Proceedings of 2nd IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, Tokyo, Mar. 7th-8th, 2016

8. 山本優, 矢代大祐, 弓場井一裕, 駒田諭, "作業空間における適応制御を用いたむだ時間のあるバイラテラル制御系の設計", 機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会演論文集, 横浜, Jun. 10th, 2016

9. 矢代大祐, "信頼性の高いバイラテラル遠隔操作の実現に向けて," 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 名古屋, Sep. 28th-29th, 2015

10. 矢代大祐, "むだ時間を有するバイラテラル制御系のための環境剛性推定法", 電気学会メカトロニクス制御研究会資料, Aug. 5th, 2015

11. 今井優, 矢代大祐, 弓場井一裕, 駒田諭, "マルチホップネットワークを介したフィードバック制御系の性能解析", 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会資料, May 29th, 2015

[図書] (計 0 件)

なし

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

なし

○取得状況 (計 0 件)

なし

[その他]

<http://www.cc.mie-u.ac.jp/~yashiro/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

矢代 大祐 (YASHIRO, Daisuke)  
三重大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 60607323

(2)研究協力者

駒田 諭 (KOMADA, Satoshi)  
三重大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 10215387

弓場井 一裕 (YUBAI, Kazuhiro)  
三重大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 10324542

矢向 高弘 (YAKOH, Takahiro)  
慶應義塾大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 20286652