

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：13904

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630078

研究課題名(和文)非受動で非線形な操作対象に対するマルチラテラル遠隔制御の安定化と遠隔手術への応用

研究課題名(英文)Stabilization for non-linear and non-passive multi-lateral tele-control system and its application to surgical robot

研究代表者

三好 孝典(Miyoshi, Takanori)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10345952

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):本プロジェクトでは、非線形・非受動・マルチラテラル(多対多)な制御対象に対する遠隔制御の安定化が研究された。

理論面の研究に対しては、非線形・非受動・バイラテラル(1対1)なシステムを安定化させる理論を構築することに成功した。

応用面の研究に対しては、提案した安定化理論を手術支援ロボットの遠隔制御に適用し、通信遅延やパケットロスの影響を受けずに、安定でマスター・スレーブ間の位置誤差を生じさせない制御を実現した。

研究成果の概要(英文):In this project, the stabilization method for tele-control system, which is non-linear, non-passive, and multi-lateral(multipoint-to-multipoint), was studied.

For the point of view of theoretical research, the stabilization theory for non-linear, non-passive, and bi-lateral(one-to-one) system was proved.

For the point of view of applications, the proposed control algorithm was applied to the surgical robot, and it stabilized the system and did not make the position error in spite of any communication delay and the packet loss.

研究分野：制御工学

キーワード：遠隔制御 マルチラテラル制御 手術支援ロボット

1. 研究開始当初の背景

これまで、操作者が力覚を感じながら遠隔地に存在するロボットの位置/速度・姿勢/角速度を操作するバイラテラル/マルチラテラル遠隔制御には、世界中の研究者が取組んできた。しかしながら、最も典型的な応用例とされる「レスキューロボット」や「手術支援ロボット」に対しても、未だに実用化された例はない。この理由の一つは、これまでに提案された理論・手法が現実の現象に対して十分ではないためである。

力覚を伴った遠隔制御研究のフレームワークは、操作対象が線形か非線形か、受動的か非受動的か、制御構造が1対1のバイラテラルか多対多のマルチラテラル(多方向)であるか、で分類できる。いずれの分類においても前者より後者の難易度が高いが、現実のレスキュー作業や手術は、後者の高難易度な非線形かつ非受動的な対象物に対してマルチラテラルの遠隔制御を行うことによって成立する。これまでこの3条件(非線形・非受動・マルチラテラル)を全て満たした遠隔制御を実現した例は無く、よって現実の現象に対して容易に不安定化してしまう問題があった。本プロジェクトはこの未踏の問題を克服した上で、手術支援ロボットの遠隔操作に対する有用性を実証しようとするものである。

2. 研究の目的

本研究目的は、

(1) 通信遅延を有する位置・力帰還型遠隔制御において、非線形で非受動的な制御対象に対するマルチラテラル遠隔制御の安定化理論を確立する。(理論面)

(2) 上記理論に基づいて遠隔地から手術支援ロボットを操作し、非線形・非受動的な環境下で安定的な手術を実現すること(実験面)、である。

3. 研究の方法

(1) 非線形で非受動的な制御対象に対するマルチラテラル遠隔制御の安定化理論を確立する：

本研究グループの知見を集約し、IQCにより安定な制御系を設計することを試みる。従来、安定性の証明に関しては、スモールゲイン定理や受動定理に基づくものが多い。このイメージを複素平面で表すと半径1の円、または右半平面の領域が安定となるが、これではゲインの大きな非受動領域を取り扱うことはできない。三好はIQCを用いることで-1より右側の非受動領域まで安定性が確保できることを示したが(2013)、これに川嶋の知見を加え非線形で非受動的な制御対象に対しての安定性の証明をめざす。

(2) 遠隔手術支援ロボットの動力学特性を明らかにする：

手術支援ロボット本体の開発は、川嶋を中

心として東京医科歯科大・東工大で別途行われているが、現状でその動力学は不明である。これは腹腔鏡手術に最適な運動形態をとるために、拘束の多いパラレルリンク機構とシリアルリンク機構が複雑に組み合わさった多自由度の空気圧機構となっているためである(図1)。そこで医師が操作するphantom(以下マスタと呼称)と、手術支援ロボットIBIS(以下スレーブと呼称)の動力学特性を計測する。



図1 シリアル・パラレル混在機構

(3) 安定化理論を制御プログラムとして遠隔手術支援ロボットに実装する：

遠隔手術支援ロボットに提案の制御プログラムを実装する。制御OSはリアルタイムLinuxの一種であるRTAIを使用し、制御サンプリングは1ms、Matlabのリアルタイムワークショップを用いて実時間制御を行う。

(4) 豊橋技科大ー東京医科歯科大間で力覚を伴った遠隔制御を実現する：

豊橋側に設置した3次元力覚提示デバイスを用いて東京医科歯科大の手術支援ロボットを操作する。医科歯科大ではステレオカメラを用いて操作の状況を撮影し豊橋技科大に転送する。豊橋技科大ではステレオプロジェクタにより立体的に映像を投影し、操作性の良い施術を実現する。図2に遠隔手術支援ロボット制御システムの操作イメージを示す。本実験では、操作の際の反力が正常に医科歯科大から豊橋技科大に伝達されること、提案手法が理論通りに安定であることを確認する。

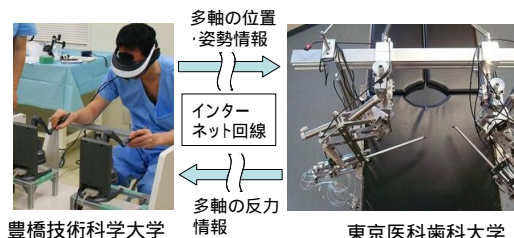


図2 遠隔手術支援ロボットの操作イメージ

4. 研究成果

(1) 安定化理論の構築：

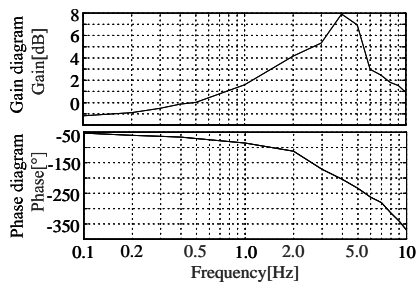
安定化理論の構築に関しては、残念ながら当初の目論み通りに非線形・非受動的なマルチラテラルシステムに対する安定性が証明されたところまでは到達していない。しかしな

がら、スキャタリングマトリクス・位相制御フィルタ・位相補償フィルタで構成される安定化コントローラを用いることで、非線形システムにおける非受動的1対1のバイラテラル制御において、マスター・スレーブのパスシビリティの超過分（非受動性）を提案制御アルゴリズムのパスシビリティの充足分で相殺して安定化できることを示すことができた。このため、後述する研究成果(3),(4)では、非線形で非受動的バイラテラルシステムを対象に安定化実証実験を行う。

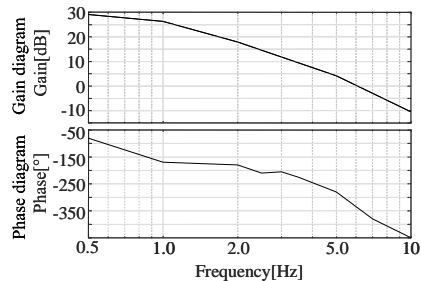
今後の課題は、システム間でクロストークの起きるマルチラテラルシステムにおいて、エネルギーのクロストークによるパスシビリティの破れ（ある入出力対からのエネルギーが異なる入出力対から出て行く現象）をどのように取り扱って安定性を証明するかである。バイラテラルの場合は入出力対は一つしか存在しないため、このような問題が生じずに証明が可能であった。

(2) 遠隔手術支援ロボットの動力学特性：

動力学特性をそのまま非線形で定式化することは困難であるため、線形なものとして周波数特性を計測した。計測結果を図3に示す。図3(a)がスレーブの力出力/位置入力関係の周波数特性であり、スレーブを5mm動かしたときに0.1Nの反力が得られる状態を0dBと定義している。(b)がマスタの位置出力/力入力関係の周波数特性であり、マスタ装置に1Nの反力を与えたときに1mm移動する状態を0dBと定義している。位相は共に力・位置が同位相で入出力される状態を 0° としている。



(a) スレーブ装置の周波数特性



(b) マスタ装置の周波数特性

図3 マスタ・スレーブの周波数特性

図3の両位相線図により、マスタでは0.6Hzから -90° 以上の位相遅れ、スレーブでは1.2Hzから -90° 以上の位相遅れが生じていることが明らかとなった。このことから両装置とも非受動であり、従来用いられている受

動性に基づいた安定化理論では対応が不可能であることが証明された。パスシビリティオプザバにより非受動的な信号を破棄して受動的な信号のみを選択する方法も提案されているが、本機構では1.2Hz以上の信号は全て非受動であるため適用は困難であると考えられる。

(3) 安定化制御プログラムの遠隔手術支援ロボットシステムへの実装：

(1)で構築した安定化制御理論に基づく安定化コントローラを遠隔手術支援ロボットシステムに組み込んだ。ブロックダイアグラムを図4に示す。マスタからは操作による位置指令が出力されると共に、マスタへは操作者への力覚情報（反力）が入力される。スレーブへは移動の位置指令が入力されると共に、スレーブからはロボットが検知した力覚が出力される。その内側に、スキャタリングマトリクス・位相制御フィルタ・位相補償フィルタで構成される(1)で提案した安定化コントローラを配置し、さらに中心が通信遅れとパケットロスを含むインターネット回線を表す。位相制御フィルタ・位相補償フィルタとも4次の伝達関数を持つフィルタである。

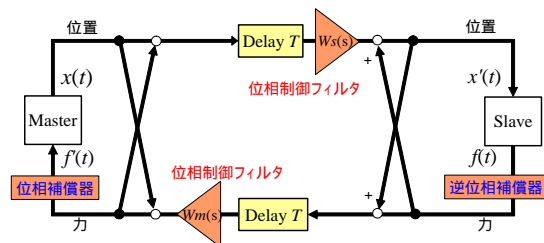


図4 安定化コントローラのブロック図

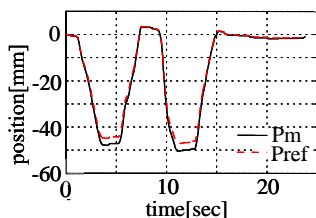
(4) 遠隔制御の実現：

本提案の遠隔制御アルゴリズムが従来の受動性に立脚した制御アルゴリズムより優位であることを図5に示す。(a)が従来の速度・力帰還型アルゴリズムによる実験結果、(b)が本提案の非受動性に対応した位置・力帰還型制御アルゴリズムの実験結果で、グラフはマスタを操作者が運動させたときのマスタの位置とスレーブの位置を示す。実験では通信回線中に5%のパケットロスを与えている。(a)は速度指令を用いているため、パケットロスに伴い速度情報が喪失し、その結果マスタとスレーブの位置に誤差が生じていることが観測できる。一方(b)では、位置情報で情報をやり取りをしているため、パケットロスによる情報の損失を軽減できていることが観測される。非受動の関係である位置情報と力情報を双方向通信出来る点が、本提案制御アルゴリズムの特徴である。

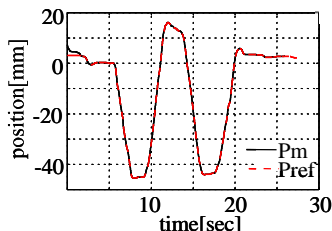
さらに、通信遅延を様々に変化させても本システムは安定で、かつ操作者に反力が正常に伝達されることを実験的に確認した。

以上(1)~(4)から、本研究課題の研究成果として、非線形・非受動的のバイラテラ

ル遠隔制御システムにおいて、理論的にも実



(a)速度・力帰還型アルゴリズムによる位置精度



(b)位置・力帰還型アルゴリズムによる位置精度

図5 提案手法の有効性

験的にも安定なシステムを構築できた。

最後に豊橋技術科学大学と東京医科歯科大をインターネット回線で結んで実験を行っているときの写真を示す(図6)。速度・力帰還制御ではあるが、豊橋においてマスタを操作し、東京の手術支援ロボット IBIS でブロックを操作している模様である。この時、豊橋-医科歯科大学間の通信遅延は 20ms, ステレオカメラによる複眼の映像伝送を行ったが、良好な力覚でブロックの把持・移動・再配置が実現できる事を確認した。

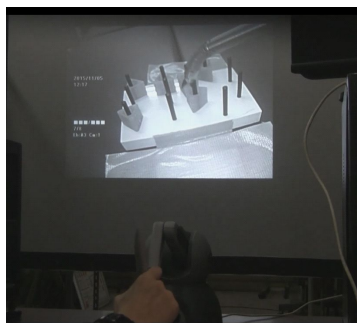


図6 豊橋 - 医科歯科大間の遠隔操作実験

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4件)

Takanori Miyoshi, Yuki Ueno, Kouki Kawase, Yusaku Matsuda, Yuya Ogawa, Kento Takemori and Kazuhiko Terashim, Development of Handshake Gadget and Exhibition in Niconico Chokaigi, Haptic Interaction Perception, Devices and Applications, Volume 277, 267-272, 2015【査読有】

三好孝典, 前田慶博, 森田陽介, 石橋豊, 寺嶋一彦, マルチラテラル遠隔制御理論に基づ

くハプティックネットワークゲームの作成と通信遅延が QoE に及ぼす影響の調査, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, VOL19, NO.4, pp.559-569, 2014【査読有】

Hongbing Li, Kenji Kawashima, Experimental Comparison of Backdrivability for Time-delayed Telerobotics, Control Engineering Practice, Vol.28 July, pp.90-96, (2014)【査読有】

Hongbing Li, Kenji Kawashima, Achieving Stable Tracking in Wave-Variable-Based Teleoperation, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics (TMECH), Vol.19, No.5, pp.1574-1582, (2014)【査読有】

〔学会発表〕(計15件)

Hongbing Li, Kotaro Tadano, Kenji Kawashima, Experimental Validation of Stability and Performance for Position-Error-Based Tele-surgery, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.848-852, 2015【査読有】

Takahiro Kanno, Daisuke Haraguchi, Kotaro Tadano, Kenji Kawashima, Force Projection Type Bilateral Control of a Pneumatic Surgical Robot, The 9th JFPS International Symposium on Fluid Power, Shimane, JAPAN, 1C2-4, 2014【査読有】

Kaneshige, A., Kawasaki, Y., Ueki, S., Miyoshi, T. and Terashima, K., A Design of the Tele-operation Control System for Liquid Container Transfer by an Overhead Traveling Crane 11th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation, REV2014, pp.29-30, 2014【査読有】

Y. Morita, Y. Ogawa, T. Imamura, A. Kawaguchi, T. Miyoshi, K. Terashima, Design Method for Multilateral Tele-Control to Realize Shared Haptic Mouse and Its Application to Intercontinental Game, ISPJ Interaction 2014, pp.346-353, 2014【査読有】

Yasunori Kawai, Tokio Yoshino, Takanori

Miyoshi, An Experiments on Improving Tracking Performance in Multilateral Teleoperation Using Wave Filter, SICE Annual Conference 2014 , FrCT2.3, 2014【査読有】

T. Miyoshi, T. Imamura, S. Oyama, Y. Ohba, T. Ichimura, Y. Sawaguchi, H. Kitagawa, Y. Aoki, A. Kaneshige, S. Ueki, Y. Kawai, T. Saitoh, Y. Takaku, Y. Kami, M. Kawata, A. Uchibori, K. Terashima, Experiment of Virtual Tug-of-war via Internet with Multilateral Telecontrol NetGames 2014 , pp.1-3, 2014【査読有】

Takanori Miyoshi, Takashi Imamura, Kazuhiko Terashima, Stability Analysis via IQC for Multilateral Tele-control and Application to Multi-client/Multi-Coupling Physical Model System, 41st Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society IECON2015 , pp.3388-3392, 2015【査読有】

他 8 件

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕

研究室ホームページ
<http://www.syscon.me.tut.ac.jp>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

三好 孝典 (Miyoshi, Takanori)
豊橋技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号 : 10345952

(2)研究分担者

川嶋 健嗣 (Kawashima, Kenji)
東京医科歯科大学・生体材料工学研究所・教授
研究者番号 : 40300553

(3) 研究分担者

寺嶋 一彦 (Terashima, Kazuhiko)
豊橋技術科学大学・工学研究科・教授
研究者番号 : 60159043