

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360090

研究課題名(和文) マルチラテラル遠隔制御の研究と力覚共有マウスへの応用

研究課題名(英文) Study on Multilateral Telecontrol and Its Application to Force Shared Mouse

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) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、最も身近で誰もが体感しうるマウス様の2軸機構をターゲットとして、世界中のPCユーザーが互いが操作する2軸機構の力覚を共有することを実現した。また、1軸機構を多数製作し、多人数でのインターネットを介しての力覚の共有が可能であることを実証した。

これは力情報を一ヶ所のサーバに集中させ、そこから位置情報を各操作者に発信するサーバ・クライアント方法の実装を実現させたことと、位置・力の関係において通信のムダ時間にもかかわらず安定なマルチラテラル(多方向)通信を可能にする理論研究の成果に基づく。

研究成果の概要(英文)：In this study, we achieved that the PC user of all over the world shared force sense each other by using 2 axis system similar to the mouse. Moreover, we proved a lot of an axis mechanism by which many operators could share sense of force via the Internet.

This was because we made force information concentrate on one server, and position information deliver to the each operational person. Furthermore, we proved the stability of the multilateral communication theory in spite of communication delay.

研究分野：制御工学

キーワード：バイラテラル遠隔制御 マルチラテラル遠隔制御 力制御 ハプティックス

1. 研究開始当初の背景

音声や映像をインターネットを介して遠隔地間の多人数で共有し、遠隔会議やソーシャルゲームなどの社会活動を行うことは、近年日常的に行われている。それらの技術はこれまでのコミュニケーションのあり方を一変させたとも言うて過言ではない。しかしながら、人間の五感の一つである触覚（力覚）を集団的に共有し、社会的な活動に反映させた事例はこれまで世界的に見られない。これは、インターネットで生じる時間遅延が力学的閉ループを不安定化させ、適切な力覚制御が困難なためである。また、映像・音声の共有は信号処理・通信工学の分野で問題が解決できるのに対し、力覚は機械工学の部分が大きなウェイトを占めることにもよる。本研究はこれらの問題を克服し、世界中で操作者間の力覚を共有させ、音声・映像に続く第3の感覚共有によるコミュニケーションツールの構築を目指すものである。図1にそのイメージを示す。



図1 研究完了後の最終的なイメージ

操作者と遠隔地に存在するロボットの間で力覚と位置・速度をやり取りする制御（バイラテラル遠隔制御）は、これまで世界中の研究者が取り組んできた。中でもエポックメイキングは Spong らの力と速度を遠隔地間でやり取りするスキヤタリングマトリクス手法の提案であり(1989年)、その後、Niemayer や Schmidt,Buss らにより、臨場感のある制御法や応用例が提案され、当該技術の有用性を証明した。しかしながら、いずれも力と速度の関係を用いるため、インターネット上のパケットロスにより操作者側とロボット側で位置ずれを起こしてしまう問題を有していた。それに対して我々は、安定化位相補償フィルタを導入することで、インターネットによるいかなる時間遅延や、いかなるパケットロスにも安定で、位置ずれを起こさないバイラテラル制御系の構築に成功した(2006年)。この成果を生かして、既に日本各地の高専等と豊橋技術科学大学を結んで、図2の遠隔制御実験を2006年以来延べ

1000人以上に実施してきた。



図2 全国規模で実施された力覚共有実験

一方、これまでほとんどの遠隔制御の研究はマスター・スレーブ間の1対1対応であった。多数の操作者間で力と速度をやり取りする手法の検討は少なく、桂や Angelika らのものに見られるが、これらの技術は図3(a)の様に、力覚をリレー方式でつなぐものであった。この方法は従来のマスター・スレーブ理論を拡張したものであるが、どこか1ヶ所で情報が切断された場合、その先の操作者には伝わらないという欠点を有しているため、世界的な力覚共有は不可能であった。

2. 研究の目的

本研究は、具体的な力覚知覚の実現方法として、最も身近で誰もが体感しうるマウス様の2軸機構をターゲットとし、世界中のPCユーザーが、互いが操作する2軸機構の力覚を共有することを目標とする。

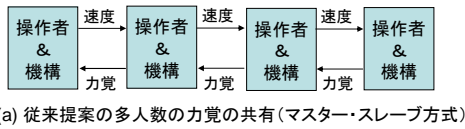
また、その前段階として1軸機構を多数製作し、多人数での力覚の共有が可能であることを実証する。

そこで本研究では、図3(b)のように、力情報を一ヶ所のサーバに集中させると共に、そこから位置情報を各操作者に発信するサーバ・クライアント方法の実現を達成する。これにより、インターネット上のどこかで情報が切断されても全体の力覚共有にはほとんど影響を及ぼさない。

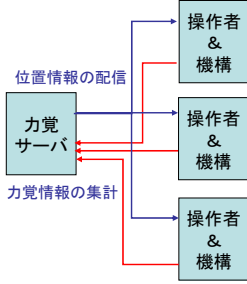
さらに、位置・力の関係においても受動性が成立するように前述の安定化位相補償フィルタを設計することにより、国際間でも安定に動作することを保証し得る新しい安定化理論の構築を目指す。

加えて社会工学的には、遠隔地間で力覚を共有するマウスという、これまでに存在しなかったデバイスがどのように社会的影響をもたらすのかの基礎的な知見を得ることを目的とする。具体的には、集団意思決定に力覚を用いる試みである。有史来、遠隔地間で力覚を共有するという社会環境はこれまでに無かったことであるので、本システムの学術的意義は極めて高い。

以上5点が本研究の目的である。



(a) 従来提案の多人数の力覚の共有(マスター・スレーブ方式)



(b) 本提案の多人数の力覚の共有(サーバ・クライアント方式)

図3 力覚共有システムのブロック線図

3. 研究の方法

①クライアント部分

本研究ではまず、図4の2軸移動機構、およびその準備段階として1軸移動機構を製作した。この機構は、サーバからの位置決め指令を受けてXY軸平面上を自在に移動できるものである。機構上部には二軸力覚センサが取り付けられており、プレイヤーがXY方向に指で何N加えたかの二軸力情報がリアルタイムで計測される。この力情報がサーバへ送られ、マルチラテラル制御演算アルゴリズムに基づいて2軸機構をどのように移動させるかの演算がサーバ内で行われ、その位置情報が本機構に戻される。このときのクライアント側の制御ブロックを図5に示す。

これらの機構は各地に配備される。



図4 2軸移動機構

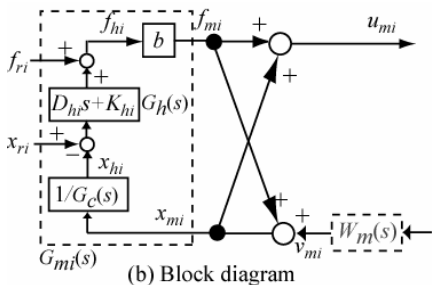


図5 クライアント部分の制御ブロック

②ネットワーク部分

本研究では、図6のサーバ・クライアント方式を実装した。世界各地からの力情報が図のトポロジーによって豊橋技術科学大学のサーバに集められ、演算された位置情報が再び各クライアントに戻される。

③サーバ部分

サーバ部分に実装した演算モデル及び状態方程式を図7に示す。

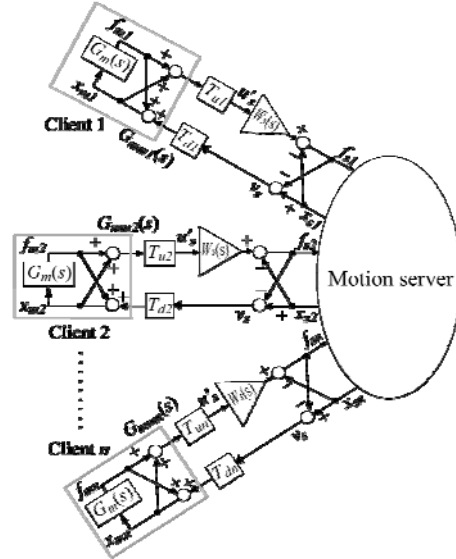


図6 力覚共有システムのネットワークトポロジー

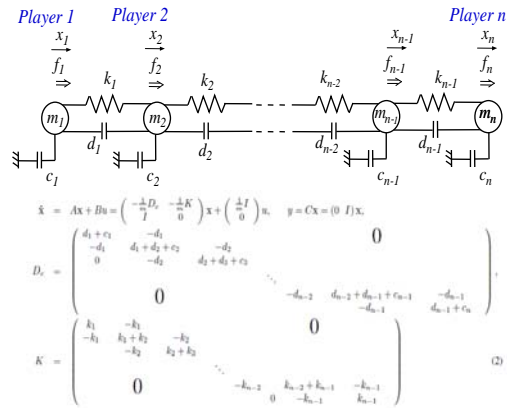


図7 サーバ内の演算モデルおよび状態方程式

今回の研究では最大10人がネットワークを経由してサーバに接続する。したがって、図7において質点の個数 $n=10$ のモデルがサーバ内に構築される。このとき位相遅れは最大 $180[\text{deg}] \times 10 = 1800[\text{deg}]$ となり、このような状態でも安定して臨場感の高いマルチラテラル遠隔制御が実現できるか、が本研究の最大の課題である。

初年度においてこれらの実装の準備を行った上で、2年目、3年目と理論構築、実証実験を行い、以下の研究成果を上げた。

4. 研究成果

①安定化理論の構築

多人数による通信遅延を伴ったマルチラテラル遠隔制御を安定して実現できることを示すために、(1)位相補償により受動性を確保する方法、(2) IQC (Integral Quadratic Constraints) により非受動システムにおいても安定性を保証する方法、の2種により証明を行った。数学的詳細は学会発表を参照されたい。

この証明により、本研究のように線形な非受動システムであれば不特定多数の参加者に対して安定した力覚共有が実現できることが明らかとなった。

②国際間のマルチラテラル遠隔制御実験

作成した1軸移動機構を用いて、国際間でマルチラテラル遠隔制御実験を行った。図8はアメリカのフロリダ・韓国のソウル・豊橋を結んで落下物の挟みこみゲームを行っている模様である。



図8 日米韓を結んだマルチラテラル遠隔実験

同種の実験をアメリカのニューヨーク、ドイツのシュツツガルト、豊橋を結んで行った結果を図9に示す。

図9において、青・緑・赤がそれぞれの国で移動した1軸デバイスの位置である。黒は、

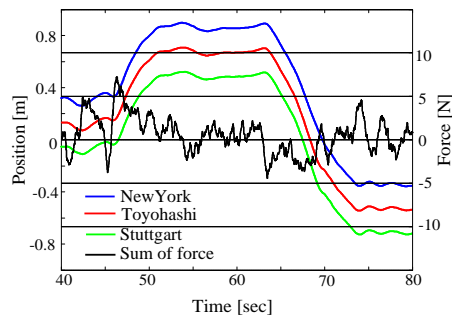


図9 日独米を結んだマルチラテラル遠隔実験

3国の操作力の合計の値である。3国の合力が正の間は正方向に移動し、つりあっている状態では静止、合力が負の時間では負方向に移動していることがわかる。このように、遠く離れた3国間での操作力の合力によって、安定的にデバイスが移動できることが確認できた。

本システムは、各クライアントの操作者の加えた操作力に応じて手元のデバイスが移動するわけではない。各クライアントの操作力は全てサーバに集められ、その上でデバイ

スの移動方向が物理演算により決定され、その情報が各クライアントに通知されて初めてデバイスが運動する。もし各クライアントの操作力が拮抗して相殺され、物理演算の結果デバイスが動かない状況になれば、手元のデバイスは運動しない。この現象により、操作者は自分の運動に他者が対抗していると知ることができる。

本研究で言う「力の共有」とは、あたかも一つの物体を遠隔地で操作しあっているような状態を言う。

③多人数のマルチラテラル遠隔制御実験

さらに多人数での力の共有が実現可能であることを実証するために、全国各地の高等専門学校を結んで「綱引き実験」を行った。図10にそのときの状況を示す。参加高専は函館、仙台、石川、福井、舞鶴、小山、木更津、沼津、豊田、岐阜、明石と新潟大学、豊橋技術科学大学の延べ14高専・大学である。



図10 8クライアント同時力覚共有実験

実験は8組織を2チームに分け、サーバに届けられた仮想綱を1軸デバイスを用いて引き合うことで行った。実験データを図11に示す。

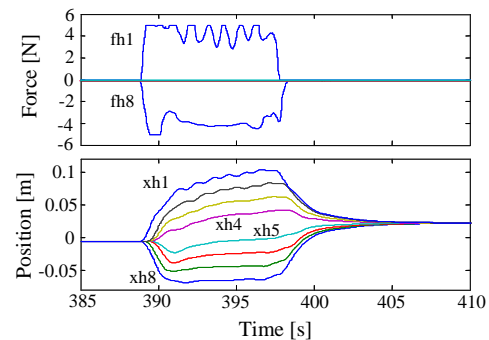


図11 綱引き実験における安定性の実証

図11は、函館と宇部から、仮想綱の両端を引っ張り合った状態のデータである。上図においてfh1が函館の力、fh8が宇部の力で、下図は各地のデバイスの位置である。若干振動的ではあるが、遠く離れた函館と宇部において綱引きが実現できていることが確認できる。

④2 軸機構によるコミュニケーション実験

力覚により遠隔地でのコミュニケーションが実現可能であることを確認するために、図4の2軸移動デバイスを用いて遠隔地間で筆談コミュニケーションを行った。

これは、誰か一人が力覚センサに文字を書くように力を加えると、世界中のデバイスが同一の文字書き運動を行うものである。あたかも一つの鉛筆を全員が共有しているかのように運動することを目指した。被験者は3人で、全員イヤーマフとアイマスクをつけ、デバイスの運動のみでコミュニケーションをとる状態にした。描く文字はカタカナに限定し、「シリトリ」という文字から書き始め、以下、しりとりでの答えを思いついた任意の人間が次の文字を描くようにした。

実験結果は、デバイスの運動のみ、すなわち力触覚によって文字を認識でき、コミュニケーションが可能であることが実証された。例えば「シリトリ」→「リトマスシ」→「シンゴウキ」→「キンモクセイ」のように筆談を続けることができ、1回目の実験では20分間、2回目の実験では30分間シリトリを継続できることが確認された。

⑤社会的集団意思決定への応用

仮想綱引き実験に代表されるように、本技術は社会的な集団意思決定に応用できる可能性がある。すなわち現状のような「一度きりの投票」ではなく、リアルタイムに個々の意思の強さを集団の意思決定に反映させ得る可能性がある。例えば、あるAという選択肢を強く希望する人とBという選択肢を弱く選択する人がいた場合、従来から行われている投票行動では1対1になるが、本来はAの選択肢の側に決定されることが妥当である。そこでその様な意思決定に本デバイスが使用可能か否かの実験を行った。

7人の被験者を対象に、0%から100%までの連続的な選択肢のある決定事項に関して「あなたは何%を希望するか。それはどのくらいの強さで希望するか」の意思を問い、投票による結果と本デバイスによる力を用いた意思決定の結果の比較実験を行った。

結果は、投票行動によって集団の総意とみなされた結果、すなわち投票結果の平均と、力による集団意思決定で大きな差は見受けられず、本デバイスが今後社会的な意思決定としても展開し得る可能性が示唆された。

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11件)【全査読あり】
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, 2014

K. Terashima, S. Takenoshita, J. Miura, R. Tasaki, M. Kitazaki, R. Saegusa, T. Miyoshi, N. Uchiyama, S. Sano, J. Satake, R. Ohmura, T. Fukushima, K. Kakiyama, H. Kawamura and M. Takahashi, Medical Round Robot—Terapio—, Journal of Robotics and Mechatronics, 26 (1) pp.112-114, 2014

Takanori Miyoshi, Ryosuke Imai, Kazuhiko Terashima, and Kanemitsu Ochiai, Development of Sensor-less Power-assisted System with Disturbance Observer considering High Friction, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.25, No.6, pp.1020-1028, 2013,

Yasunori Kawai and Toru Namerikawa, Improving Tracking Performance of Passivity Based PID-Type Teleoperation Systems with Communication Delay, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, vol.5, no.6, pp.335-341, 2012

Yasunori Kawai and Toru Namerikawa
“Improving Tracking Performance of Passivity Based PID-Type Teleoperation Systems with Communication Delay,” SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, vol. 5, no. 6, p. 335-341, 2012

他6件

〔学会発表〕(計69件)

Yasunori Kawai, Tokio Yoshino, and Takanori Miyoshi, “An Experiments on Improving Tracking Performance in Multilateral Teleoperation using Wave Filter,” Proc. of SICE Annual Conference 2014, pp. 1859-1862, (2013). 【査読有】

Takanori Miyoshi, Yasunori Kawai (他4名) “Design Method for Multilateral Tele-Control to Realize Shared Haptic Mouse,” Proc. of SICE Annual Conference 2013, pp. 2220-2226, (2013) 【査読有】

Takanori Miyoshi and Yasunori Kawai (他4名), “Educational Joint Project between TUT and NCTs Using Haptic Bilateral Tele-Control System,” Proc. of IGNITE 2013, pp. -, (2013). 【査読有】

Yasunori Kawai, Hiroyuki Kawai, and Masayuki Fujita, “Comparison between Passivity and RISE based Control for 2DOF Human Lower Limb Tracking”, Proc. of the Life Engineering Symposium (LE2013), pp. 2A2-5, (2013). 【査読無】

Yosuke Morita, Yuya Ogawa, Takashi Imamura, Akira Kawaguchi, Takanori Miyoshi, Kazuhiko 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年2月, Tokyo, Japan, 【査読有】

Yasunori Kawai, Tokio Yoshino, Takanori Miyoshi, An Experiments on Improving T racking Performance in Multilateral Tel eoperation Using Wave Filter, SICE Annul Conference 2014, FrCT2.3, 2014年9月, Sapporo, Japan, 【査読有】

Takanori Miyoshi, Yuki Ueno, Kouki Kawa se, Yusaku Matsuda, Yuya Ogawa, Kento T akemori, Kazuhiko Terashima, Developmen t of Handshake Gadget and Exhibition in Niconico Chokaigi, Asia Haptics 2014, Live Presentation/Demonstration A12(pp. 1-6), 2014年11月, Tsukuba, Japan, 【査読有】

Hiroto KATO, Satoshi UEKI, Akihiro KANE SHIGE, Takanori MIYOSHI and Kazuhiko TE RASHIMA, A Design of an Overhead Crane Tele-operation Control System, IEEE Int ernational Conference on Mechatronics (ICM2013), pp.868-873, 2013年2月, Vicenz a, Italy, 【査読有】

Honda Makoto, Miyoshi Takanori, Imamura Takashi, Mima Kohei, Okabe Masayuki, T erashima Kazuhiko, Tele-Manipulation wi th Humanoid Robot Hand/Arm Via Internet , 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2013), pp.3618-3624, 2013年5月, Karlsruhe, Germ any, 【査読有】

Yosuke Morita, Yuya Ogawa, Yasunori Kaw ai, Takashi Imamura, Takanori Miyoshi, Kazuhiko Terashima, Design Method for M ultilateral Tele-Control to Realize Sha red Haptic Mouse, SICE Annual Conferenc e 2013, pp.2220-2226 (TuBT8.3), 2013年9 月, Nagoya, Japan, 【査読有】

Takanori Miyoshi, Kazuhiko Terashima, T akashi Imamura, Design Method of Multil ateral Tele-Control for Multi-Client an d Multi-Coupled Physical Model Server, 2013 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO2013) , pp. 206-211, 2013年11月, Tokyo, Japan, 【査読有】

他58件

〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

名称：制御装置および制御方法

発明者：三好孝典, 今村孝

権利者：豊橋技術科学大学

種類：特許

番号：特願 2013-049476

出願年月日：2013年3月

国内外の別：国内

○取得状況 (計1件)

名称：搬送方法およびこの方法を実施する搬送手段の制御システム

発明者：三好孝典, 寺嶋一彦, 牧野泰育, 他

2名

権利者：豊橋技術科学大学, 新東工業(株)

種類：特許

番号：第4999080号

出願年月日：2007年4月

取得年月日：2012年5月

国内外の別：国内

〔その他〕

<http://www.syscon.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

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

(3) 研究分担者

今村 孝 (Imamura, Takashi)

新潟大学・大学工学研究科・准教授

研究者番号：10422809

(4) 研究分担者

兼重 明宏 (Kaneshige, Akihiro)

豊田工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：70224615

(5) 研究分担者

川田 昌克 (Kawata, Masakatsu)

舞鶴工業高等専門学校・電子制御工学科・教授

研究者番号：90311042

(6) 研究分担者

河合 康典 (Kawai, Yasunori)

石川工業高等専門学校・電気工学科・准教授

研究者番号：90413765

(7) 研究分担者

沢口 義人 (Sawaguchi, Yoshito)

木更津工業高等専門学校・電子制御工学科・助教

研究者番号：50455119

(8) 研究分担者

小山 慎哉 (Oyama, Shinya)

函館工業高等専門学校・情報工学科・助教

研究者番号：50435385

(9) 研究分担者

内堀 晃彦 (Uchibori, Akihiko)

宇部工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：60304490

(10) 連携研究者

岡田 美智男 (Okada, Michio)

豊橋技術科学・大学工学研究科・教授

研究者番号：50374096