

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 19 日現在

機関番号：14101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760239

研究課題名(和文)複合知覚支援を伴うバイラテラル遠隔操作システムの開発

研究課題名(英文)Development of Bilateral Teleoperation System with Composite Sensory Assist

研究代表者

矢代 大祐 (Yashiro, Daisuke)

三重大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60607323

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、マスタ・スレーブ型ロボットを用いた力覚フィードバック機能を有する遠隔操作システム(バイラテラル遠隔操作システム)の性能向上に成功した。具体的にはA～Cに挙げる3つの機能をバイラテラル遠隔操作システムに付加した。A) バイラテラル遠隔操作のための符号化/復号化器、遅延補償器、通信プロトコルを開発し、鮮明な触覚情報と高精細な視覚情報の伝達を可能にした。B) 視覚情報と触覚情報に基づき、操作者や操作対象の状態を推定する手法を開発した。C) 状態推定値に基づき操作者の動作を機械的に補助する手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：This research succeeds in improving the performance of bilateral teleoperation system which consists of a master robot and a slave robot. Specifically, three novel functions A, B, C are added to bilateral control system. A) a coding/encoding algorithm, a delay compensator, a communication protocol for bilateral teleoperation are developed, and the performance of the system is improved. B) An algorithm which estimates states of operators and manipulated objects based on visual information and haptic information is developed. C) A method to assist an operator automatically based on estimated states is developed.

研究分野：工学

キーワード：モーションコントロール ハプティクス バイラテラル遠隔操作 ロボティクス

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。

この問題に対して、マスタ・スレーブ型ロボットを用いた触覚フィードバック機能を有する遠隔操作 (バイラテラル遠隔操作) の研究が盛んに行われており、危険領域での活動や内視鏡下手術の支援技術として注目されている。

申請者は近年、通信制約 (通信遅延、通信帯域制限など) を有するバイラテラル遠隔操作システムの研究開発をおこなった。この過程で、マスタ・スレーブ間で伝送される触覚データと視覚データの送信周期、サイズ、通信遅延の間に無視できない依存関係があることを発見した。また、この特性に基づき、触覚データを用いてネットワーク上のトラフィック状況を推定し、触覚データの伝送レートを調整する端末間フロー制御器を開発した。これらの活動を通じて申請者は、触覚情報と視覚情報を独立してスレーブからマスタに伝送するだけでは操作支援として不十分であるという知見を得たため、本研究課題を計画するに至った。

2. 研究の目的

上記の背景及びこれまでの研究成果をもとに、本研究では課題 A～課題 C に挙げる複合知覚支援機能をバイラテラル遠隔操作システムに付加することを目的とした (図 1)。ここで複合知覚とは、計測した触覚情報と視覚情報を別々に伝送・再現して操作者に呈示するだけでなく、互いの情報を補完しあうことで生み出される知覚を意味する。

(1) 通信制約下で鮮明な触覚情報と高精細な視覚情報を伝送するために、触覚通信の特性を考慮した符号化器、通信プロトコル、遅延補償器を開発する (課題 A)。符号化器と通信プロトコルを開発することで、通信帯域制限下であっても通信遅延を増大させることなく視覚情報と触覚情報を伝送できるようになる。また、遅延補償器を開発することで通信遅延による不安定化や性能劣化を抑制する。

(2) 視覚情報と触覚情報に基づき、操作者や操作対象の状態を推定する (課題 B)。ロ

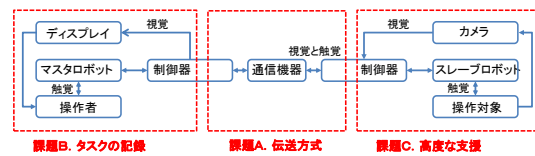


図 1. 本研究課題の概念図

ット単体では触覚情報を抽出することはできても操作対象の位置、姿勢、色などの情報を計測することはできない。そこで高速度カメラをロボットと併用して用いることで、操作対象の弾性、粘性、慣性などの状態を高精度に推定できるようになる。

(3) 課題 B で得られた操作者と操作対象の状態推定値に基づき、操作者を機械的に補助する (課題 C)。1 つ目に、スレーブロボットの速度を操作対象に同期させることで、あたかも静止物体を扱うような操作感覚を実現する。2 つ目に、熟練技術者の状態推定値を活用することで、単純作業を自動化する。

3. 研究の方法

バイラテラル遠隔操作システムに複合知覚支援の機能を付加するために、以下の流れで本研究課題に取り組んだ。

(1) 視触覚通信のための符号化器、遅延補償器、通信プロトコルを開発することで、高精度な視触覚の伝送を目指す (平成 24 年度実施)。

①符号化器の開発

触覚情報の標本化と量子化の影響を低減化する補償器を開発する。また、位置センサ、モータ、制御器からなるマスタ・スレーブロボットを試作し、各ロボットをネットワークエミュレータを介して接続する『触覚通信システム』を構成し、このシステムに補償器を実装することで検証をおこなう。

②遅延補償器の開発

通信遅延が大きいほど触覚通信の性能は劣化する。そこで、申請者がこれまでに開発した位置制御のための遅延補償器を触覚通信に適用することで性能の改善を図る。また、『触覚通信システム』にこの遅延補償器を実装することで実験的に有用性を検証する。

③通信プロトコルの開発

触覚データを用いてトラフィック状況を推定し、視触覚データの伝送レートを調整する。1 フレーム分の画像データを複数のブロックに分割した上で優先度をつけ、トラフィック状況に応じて各ブロックを伝送する。また、『触覚通信システム』に高速度カメラとディスプレイを追加することで構成される『バイラテラル遠隔操作システム試作機』を用いた実験もおこなう。

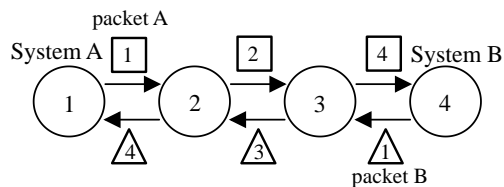


図 2. 全 2 重通信時のリンクスケジューリング

(2) 視覚情報と触覚情報に基づき操作者と操作対象を状態推定する(平成 25 年度実施)。

①操作対象の状態推定

バイラテラル遠隔操作の利点の 1 つとして、操作者と操作対象の触覚情報を抽出できることが挙げられる。そこで、『バイラテラル遠隔操作システム試作機』を用いて操作対象の状態推定をおこなう。

②操作者の状態推定

上記の B1 と類似した方法で操作者の技能を状態推定する。まず、技能が必要になる具体的な動作を『バイラテラル遠隔操作システム試作機』を用いておこなう。次に、動作の名称と状態推定値を対応づけたテーブルを作成する。このテーブルを『バイラテラル遠隔操作システム試作機』に実装することで、動作の判別をおこなう。

(3) 課題 B で扱う操作者と操作対象の状態推定値に基づき、操作者の動作を機械的に補助する(平成 26 年度実施)。

①単純動作の自動化

課題 B で作成したテーブルに基づき、単純な繰り返し動作をバイラテラル遠隔操作システムで自動的に実行させる。

②ロボットと操作対象の同期

操作対象が速度を持つ場合、スレーブロボットの速度を操作対象に同期させることで、操作者はあたかも静止物体を扱うように操作することが可能になる。ロボットと操作対象の相対距離をオンライン計測することで、ロボットと操作対象の運動を同期させる。

4. 研究成果

(1) STDMA ネットワークを介したフィードバック制御のためのリンクスケジューリング

STDMA (Synchronous Time Division Multiple Access) ネットワークを介した分散制御系のための STDMA テーブルを設計し、制御系の制御帯域・ゲイン余裕・位相余裕を解析し(図 2)、下記の知見を得た。

- ・ホップ数が増加すると、ゲイン余裕と位相余裕は減少する。
- ・制御帯域は、ホップ数に依存しない。
- ・全 2 重通信時の遅延は半 2 重通信時の遅延よりも長い。
- ・全 2 重通信時のパケット送信周期は半 2 重通信時のパケット送信周期よりも短い。
- ・ホップ数が多い場合には、半 2 重通信より

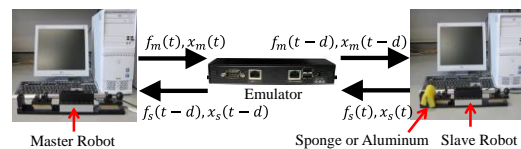


図 3. ネットワークエミュレータを介したバイラテラル遠隔操作

も全 2 重通信を用いた方がゲイン余裕と位相余裕が大きい。

(2) むだ時間を有するバイラテラル制御系のマスタ位置制御器設計法

マスタロボットとスレーブロボットの間の通信遅延によりバイラテラル制御系の安定が著しく劣化することが知られている。そこで、4 チャンネル制御器を用いたバイラテラル制御系のマスタの位置制御ゲイン・性能・安定性の関係を解析した。その結果、マスタロボットの位置制御ゲインと接触物体の剛性を一致させることで、安定性を確保しつつ、自由動作時に良好な力応答を得られる傾向が見られた。そこで、マスタの位置制御ゲインを接触物体の剛性に応じて動的に調整する適応制御器を設計した。さらに、シミュレーションと実験により固定制御器と適応制御器を比較し、解析結果の妥当性と適応制御器の有用性を示した(図 3)。

(3) マルチホップネットワークを介した分散リアルタイム制御系の解析

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制御帯域・ゲイン余裕・位相余裕を解析した。STDMA を用いたリンクスケジューリング手法として、SAS(Sequential Activation Scheduling)、NAS(Non Sequential Activation Scheduling)の比較を行うとともに、パケット転送方法の代表的手法である FIFO(First In First Out)との比較も行った。解析とネットワークエミュレータを用いた実験より FIFO<NAS<SAS の順に制御性能が高いことを確認した。

(4) ボトルネックリンク帯域推定手法の視覚通信への適用

視覚通信において、高い制御性能を得るためには、低通信遅延と高パケット送信レートの両立が必要となるが、通信機器の通信帯域より高いパケット送信レートで視覚データを伝送すると大遅延が発生し、制御性能が著しく劣化する。制御性能の劣化を回避するためには、ネットワークパスのボトルネックリンク帯域を知ることが重要となる。そこで、視覚データを用いた Packet-Pair 法を提案し、ボトルネックリンクの帯域推定をおこなった(図 4)。また、バイラテラル制御の実験により推定値の妥当性を示した。

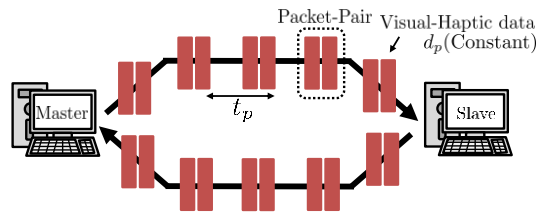


図 4. Packet-Pair 法を用いたボトルネック帯域推定

(5) 視触覚同期通信のための低遅延ライブストリーミング手法

視触覚通信システムでは一般的に、視覚情報のデータサイズが大きく、触覚情報のパケット送信周期および許容遅延は小さい。このため、視触覚情報を同一回線で通信する場合、触覚情報に対して視覚情報の処理待ちに起因した遅延が発生する、すなわち視触覚情報の干渉が発生する。そこで、送信するパケットサイズに MTU 制約を設けることで、所望の触覚通信性能を満たしつつ視覚情報を送信可能な低遅延ライブストリーミング手法を提案した。また、取得した画像 1 フレームをブロック分割し、前フレームと現在のフレームの間の変化量に応じて各ブロックに優先度を付加することで、フレーム内の重要な部分を優先的に送信することが可能となった。加えて、フレーム間の変化量に応じてブロック分割数および量子化ビット数を調整することで、送信するパケットサイズを一定とし、通信遅延の揺らぎを抑制した。従来手法と比較して、提案手法では通信帯域制約下においても視触覚情報の干渉および通信遅延の揺らぎを抑制し、高性能な視触覚通信をおこなうことが可能であることを、実験により確認した。

(6) 音声通信を伴う遠隔操作システムへのフィードバック型ジッタバッファの適用

音声通信を伴う遠隔操作システムに対してフィードバック型ジッタバッファを適用した。マスタ・スレーブ間でパケットを伝送した際の通信遅延が動的に変動すると、音声信号の波形が乱れ、品質が劣化する問題があることが知られている。変動遅延の影響をジッタバッファである程度補償することはできたが、音声通信の遅延が増加する問題やパケットロスが発生してしまう。そこで、ジッタバッファ内のキューイング遅を調節するフィードバック制御器を利用するフィードバック型ジッタバッファを音声通信に適用することで、低遅延・高品質の音声通信をおこなうアルゴリズムを提案した。提案手法の有効性は、音声通信を伴う遠隔操作システムの実験によって確認した。

(7) 脳卒中麻痺側下肢の痙縮評価装置の開発

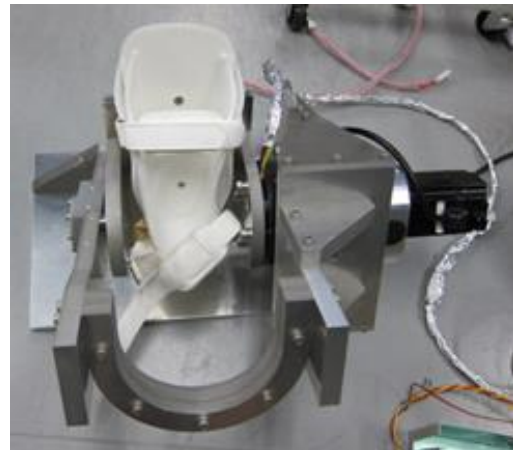


図 5. 脳卒中麻痺側下肢の痙縮評価装置

脳卒中片麻痺患者に認められる痙縮（伸張反射が過度に働く筋異常などが原因で関節が固くなる症状）は、日常生活上での自発的な運動を難しくする要因となっている。しかしながら、痙縮の度合いを定量的に評価する手法や痙縮の度合いを陽に考慮したリハビリテーション装置はまだない。そこで非麻痺側足関節にロボットを装着し、足関節角度、足関節で発生する底屈トルク、筋電位など計測することで痙縮の度合いを推定するアルゴリズムを開発した（図 5）。

(8) 3次元作業空間における用紙の位置変化にロバストな筆記動作の保存と再現

3次元作業空間での筆記動作の保存・再現をおこなうシステムを提案した（図 6）。本システムはパラレルメカニズム、カセンサ、変位センサ、角度センサ、ダイレクトドライブ回転モータから構成される。コントローラには位置・力ハイブリッドコントローラを用いた。また、変位センサによりエンドエフェクタと用紙との相対距離を計測することで、用紙の位置が保存時と再現時で異なる場合における動作の再現を可能にした。

(9) 移動物体に対する熟練動作の保存・再現のためのむだ時間補償器の設計

3次元作業空間上の移動物体に対して熟練動作を保存・再現するためには、ロボットアームと操作対象の位置関係をオンライン計測する必要がある。しかしながら、位置計測のためにカメラを用いると、計測遅延が無視できないことが多い。そこで、位置・力ハイブリッド制御系に計測遅延が含まれている場合にシステムを安定化する手法を提案した。

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）

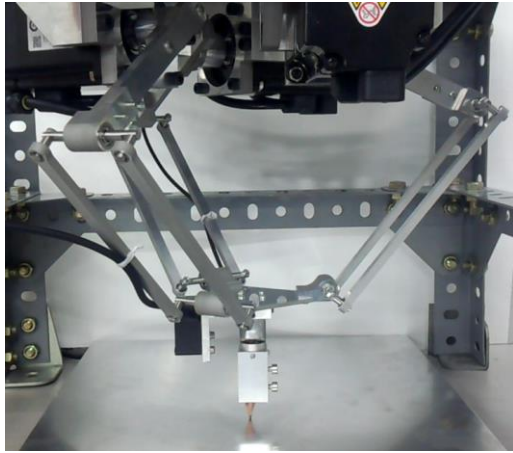


図 6. 筆記動作の保存・再現に用いるパラレルメカニズム

[査読付き雑誌論文] (計 12 件)

(1) 矢代大祐, 日恵野直, 弓場井一裕, 駒田諭, "むだ時間を有するバイラテラル制御系のマスタ位置制御器設計法", 電気学会論文誌産業応用部門誌, Vol. 135-D, No. 3, pp. 268-275, Mar. 2015

(2) 遠山大輔, 矢代大祐, 弓場井一裕, 駒田諭, "3次元作業空間における用紙の位置変化にロバストな筆記動作の保存と再現", 電気学会論文誌産業応用部門誌, Vol. 134-D, No. 3, pp. 308-316, Mar. 2014

(3) Daisuke Yashiro and Takahiro Yakoh, "Feedback Controller with Low-Pass Filter based Delay Regulation for Networked Control System", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 7, pp. 3744-3752, July 2014

(4) Daisuke Yashiro, Dapeng Tian, and Takahiro Yakoh, "End-to-End Flow Controller for Visual-Haptic Communication Under Bandwidth Change", Electronics and Communications in Japan, Vol. 96, No. 11, pp. 26-34, Nov. 2013

[学会発表] (計 29 件)

(1) Shingo Yamamoto, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, "Bottleneck Link Bandwidth Estimation Method for Visual-Haptic Communication", Proceedings of 1st International Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control, Nagoya Institute of Technology, Nagoya, Japan, Mar. 9-10, 2015

(2) Takeru Aoyama, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, "Design of Position Controller for Two-mass System Including Non-linear Actuator and Linear Spring", Proceedings of 1st International Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control, Nagoya Institute of Technology, Nagoya, Japan, Mar. 9-10, 2015

(3) Shingo Yamamoto, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, "Rate Control based on Queuing State Observer for Visual-Haptic Communication", Proceedings of the 13th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 569-574, Keio University, Yokohama, Japan, Mar. 14th-16th, 2014

(4) Daisuke Yashiro, "Link Scheduling for Distributed Control over Synchronous TDMA Network", Proceedings of the 13th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 758-763, Keio University, Yokohama, Japan, Mar. 14th-16th, 2014

(5) Tadashi Hieno, Satoshi Komada, Daisuke Yashiro, and Junji Hirai, "Stability and Transparency of Adaptive Controller Based Four-Channel Bilateral Control System with Communication Delay", Proceedings of the 13th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 314-319, Keio University, Yokohama, Japan, Mar. 14th-16th, 2014

(6) 矢代大祐, "生活空間での外乱オブザーバの活用を目指して," 電気学会東海支部若手セミナー, 名古屋工業大学, 名古屋, Dec. 17th, 2013

(7) 矢代大祐, "テレハプティクスのための通信技術," 電気学会全国大会講演論文集, Vol. 2014, p. ROMBUNNO. 4-S22-6, 愛媛大学, 松山, Mar. 20th, 2014

(8) 矢代大祐, "テレハプティクスのための通信技術," 電気学会実世界ハプティクス協同研究委員会, 愛媛大学, 松山, Mar. 21st, 2014

(9) 矢代大祐, "低侵襲手術のための触覚鉗子," 電気学会知覚情報技術委員会『触覚提示デバイスの高度化』調査専門委員会, アクトシティ浜松, 浜松, May 23rd, 2012

[その他]

(1) 受賞

Best Presentation in Session, Institute of Electrical Engineers of Japan SAMCON2015, Mar. 9th, 2015

(2) ホームページ

<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・工学部・助教

研究者番号: 60607323

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし