

伝送遅延を有するマスタ・スレーブロボットハンドの自律階層制御法*

今関一飛^{*1}, 前野隆司^{*2}

A Layered Autonomous Control Method for Master Slave Robot Hand with Communication Delay

Kazuto IMAZEKI and Takashi MAENO

A novel control method for master slave system with communication delay is proposed. This control method consists of an improved unilateral controller and autonomous controllers and suppressors. The improved unilateral controller switches a control method according to a contact state. When the slave is not in contact with an object, the improved unilateral controller is a position controller. When the slave is in contact with an object, the improved unilateral controller is a force controller. And a controller sends a information of contact to the master. Autonomous controllers and suppressors are placed in a master side and a slave side. A slave autonomous controller controls a fingertip force to avoid a slipping. A master autonomous controller predicts and controls a reaction force. A slave suppressor coordinates outputs of a slave autonomic controller and unilateral controller. A master suppressor coordinates a predict contact position and a real contact position. To validate this control method, we constructed a master slave system. And validity of this control method is confirmed by some master slave experiments.

Key Words: Master Slave System, Layered Control Method, Communication Delay, Grasping, Manipulation, Unilateral Control

1. 序 論

マスタ・スレーブシステム (MSS) はヒトの動作をロボットがそのまま再現するシステムである。したがって、ロボットハンドに MSS を適用することで、ロボットに器用な把持・操り動作を行わせることが可能となる。このことにより、遠隔作業や極限作業などの効率化や、人間が直接行ってきた作業へのロボットの適用ができるようになる。

MSS では、ローカルサイトとリモートサイトの物理的・論理的距離に伴い、ローカルサイトからの情報がリモートサイトへ到達するまで、およびリモートサイトからの情報がローカルサイトに到達するまでに伝送遅延が発生する。伝送遅延は MSS に悪影響を与える。特に、力覚情報は視覚・聴覚情報と異なり、情報の流れが双方向なため、伝送遅延がタスク遂行に重大な影響を与える。そのため、盛んに研究がなされている。

伝送遅延は、MSS に対し 2 つの影響を及ぼすことが知られている。ひとつは、マスタからの情報がスレーブへ到達しマスタへ帰還するというフィードバックループが不安定になること、もうひとつは、操作性が劣

化することである⁽¹⁾。

フィードバックループが不安定になる問題に関しては、多くの研究がなされている。Spong らは散乱変換を用いて制御系を安定化する手法を提案した⁽²⁾。また、Niemeyer らは、波変数の概念を拡張し、変動する伝送遅延に対しても安定な制御系を構築できることを示した⁽³⁾。横小路らは単純な PD 制御則でも制御系の安定化が可能であることを示した⁽⁴⁾。しかし、これらの制御系では、マスタ装置へ帰還する反力が小さくなってしまふ、操作者が大きな粘性力を受けてしまふ等、操作性への影響が大きい。したがって限定された状況を除いては実用化に至っていない。

MSS の操作性に関して直接議論した研究は少ない。Ferrell は、ヒトの Move and Wait 動作に着目し、伝送遅延が大きくなると操作性が劣化することを示した⁽⁵⁾。Kim らは操作性の劣化を軽減する目的で、視覚情報に関してスレーブ装置の動作予測を実際の動作に重

Table 1 Example of communication delay

	Distance (km)	Delay (s)
Mars	55,000,000	180
Moon	380,000	1.3
Satellite (max.)	120,000	0.4
Satellite (min.)	36,000	0.12

*原稿受付 2005年5月19日。

*¹非会員、慶應義塾大学大学院 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1)。*²正員、慶應義塾大学。

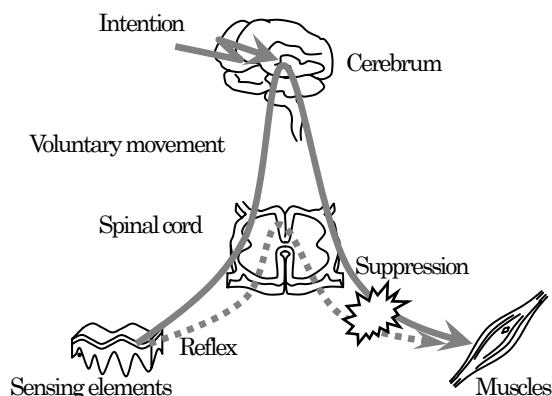


Fig. 1 Humans' motion control

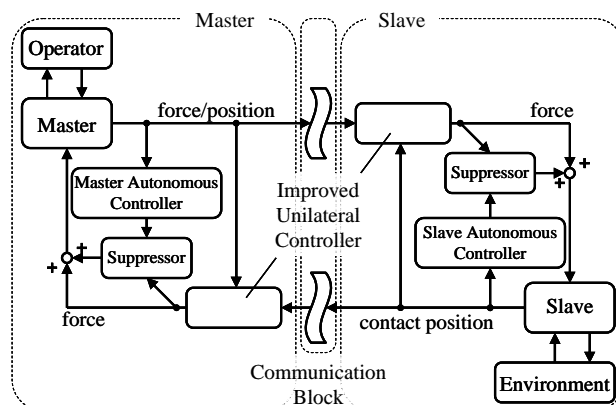


Fig. 2 Diagram of proposed control method

畳して表示するという予測提示法を提案した(6)。予測提示法は、伝送遅延による操作性の劣化に対し、有効な方法である。しかし、力覚情報に関しては予測提示されないため、物体把持などの接触を伴う動作に対しては操作性の劣化を防ぐことが出来ない。一方、伝送遅延は考慮されていないものの、操作性の向上を目的としてスレーブ装置をある程度自律的に動作させる研究がなされている。嶋田らは作業空間をマスタ空間とスレーブ空間に分割し、スレーブ空間でのみスレーブを自律的に動作させることで、作業を支援する制御法を提案した(7)。このように、操作性に関する研究では、予測提示やスレーブの自律動作が有効であることが示されている。しかし、適用できるタスクが限定されているという欠点を有し、ロボットハンドに対しそのまま適用することは困難である。

以上述べてきたように、現在なされている研究では、安定な制御系を構築できているものの、操作性の劣化に対応できていない。また、操作性を向上させる研究は存在するものの、ロボットハンドへ直接適用することは困難であるといえる。

そこで本研究では、ヒトの運動制御法を MSS に適用し、伝送遅延の存在下でも安定且つ操作性を向上させる制御法を提案する。まず、改良型ユニラテラル制御系および自律制御系、抑制器から成る制御系を提案する。次に実際に MSS へ提案手法を実装する。最後に評価実験を行い、提案手法の有効性を示す。

2. 提案する制御法

2.1 対象とするマスタ・スレーブシステム

1 章で述べたように、本研究では、ロボットハンドに対し、MSS を適用する。

まず、本研究で対象とする伝送遅延について述べる。伝送遅延は、伝送遅延の平均と平均値からの揺らぎで表すことができる。伝送遅延の平均値は、ローカルサ

イトとリモートサイトの物理的・論理的距離によって決まる。一方、伝送遅延の揺らぎは通信経路の輻輳によって生じる。現状のインターネットは、公衆回線であり、また通信品質が保証されていないため、伝送遅延の揺らぎが大きい。しかし、電話回線・専用回線などでは通信品質が保証されているため、伝送遅延の揺らぎは非常に小さい。また、次世代インターネットでは通信品質を保証する仕組みが取り入れられるため、伝送遅延の揺らぎは小さくなるといわれている。したがって、本研究では、揺らぎのない伝送遅延について扱うこととする。以下では、伝送遅延の平均値のことを単に伝送遅延と呼ぶこととする。

次に、伝送遅延の程度について述べる。遠隔操作技術の応用が期待されている代表的なアプリケーションの伝送遅延を表 1 に示す。伝送遅延が一定以上大きくなると、マスタ・スレーブ方式より、スーパーバイザリ制御(8)等を用いたほうが有効であるといわれている。つまり、地球・火星間ではマスタ・スレーブ方式は実用的でないといえる。本研究では地球・月間に相当する、最大で約 1s 程度の伝送遅延を扱うこととする。

2.2 ヒトの運動制御法

本研究では、1 章で述べたような問題点を解決するため、ヒトの運動制御法(9)に着目する。

ヒトの運動は、随意運動と反射運動に大別できる。随意運動と反射運動の区別は明確でなく、また分類も何例か存在する。しかし本研究では、刺激と反応の関係から次のように分類する。随意運動は、ある刺激に対しいくつかの反応候補が存在するものの、候補からひとつが選択的に実行される運動である。随意運動は、一般的に大脳を経由するため、多様な運動が可能であるものの、フィードバックに時間を要するという特徴を持つ。一方、反射運動は、ある刺激に対し反応が決まっている運動である。反射運動は、運動が限定されるもののフィードバックが非常に早いという特

徴を持つ。ヒトは特徴の相反するこれらの運動を、抑制という仕組みを用いて巧みに協調させていることが知られている。すなわち、随意運動の指令と反射運動の指令が相反する場合、反射運動指令は抑制され、随意運動が行われる。以上のように、ヒトは異なる特性を持つ随意運動と反射運動を、抑制により巧みに協調させ、器用な把持・操り動作を実現しているといえる。

2.3 提案する制御系

前節で述べたヒトの運動制御法は、フィードバックが遅い随意運動を反射運動が補償していると捉えることができる。したがって、ヒトの運動制御法は MSS の伝送遅延の補償に有効であると考えられる。本研究ではヒトの運動制御法を MSS に適用する。本研究で提案する制御法は、筆者らが提案した制御法⁽¹⁰⁾を MSS に適用したものである。提案する制御法は、改良型ユニラテラル制御系と自律制御系、抑制器から構成される。提案する制御法のブロック図を図 2 に示す。

まず、改良型ユニラテラル制御系について述べる。改良型ユニラテラル制御系は、Yamano らによって提案された制御則⁽¹¹⁾に基づくものである。簡単のため、関節に角度センサおよび DC モータが配置された 1 自由度リンク機構を例に説明する。改良型ユニラテラル制御系は、非接触時と接触時で制御則を切替える。非接触時にはマスタ装置からスレーブ装置へ関節角度情報を送信し、スレーブ装置ではマスタ装置からの情報に基づき角度制御を行う。一方、接触開始時にはスレーブ装置からマスタ装置へ、接触角度の情報がフィードバックされる。マスタ装置は接触角度 θ_c と現在のマスタ装置の角度 θ に応じて、

$$\tau = K(\theta_c - \theta) \quad (1)$$

により反力に相当するトルク τ を発生する。ただし、 K はマスタ装置・接触物体間の剛性にあたる比例ゲインである。また、マスタ装置からスレーブ装置へ現在のトルク情報を送信し、スレーブ装置ではマスタ装置からの情報に基づきトルク制御を行う。以上の制御則により、非接触時にはマスタ角度とスレーブ角度が一致し、接触時にはマスタの出力トルクとスレーブの出力トルクが一致する。本研究で用いる改良型ユニラテラル制御系は同様の制御系を指先の並進運動に適用したものである。反力を陽にマスタ装置に帰還させないため安定である。また、通常のバイラテラル制御系では、伝送遅延により力覚情報は遅れるものの、本制御系ではトルク指令をスレーブ装置へ送信するため、力覚情報が遅れない。ただし、接触点が反力提示方向に移動してしまう場合、接触開始時と接触点が変わってしまうため、反力を提示することができない。しかし、把

持・操り動作では、物体は通常、母指により一方向を拘束されているので、本制御則を用いても、問題なく制御することが可能である。また、非接触時はスレーブ装置の位置制御のみを行っており、マスタ装置では反力は提示されない。したがってスレーブ装置自身や把持物体の慣性力を提示することができない。しかし、ロボットハンドでは装置の慣性が小さく、接触による反力に比べて無視できる程度である。したがって、慣性力を提示する必要性は低いといえる。

次にスレーブ側自律制御系について述べる。スレーブ側自律制御系は把持時に、把持物体と指との間にすべりが起こらないように指先力を調整する。改良型ユニラテラル制御系では、接触点がマスタへ帰還するため、把持物体などに加わった外乱を操作者へ伝えることができない。しかし、スレーブ側自律制御系の働きにより、操作者が外乱に反応しなくても、外乱に対処し物体を把持し続けることができる。また、操作者が多少誤った操作を行っても、自律制御系が物体を把持し続けるため、操作者への負担を軽減することができる。スレーブ側抑制器はマスタからの指令と自律制御系の動作を協調させる働きを持つ。

次にマスタ側自律制御系について述べる。マスタ側自律制御系は把持物体と指の接触を予測して、操作者に反力を予測的に提示する。改良型ユニラテラル制御系では、力覚情報は遅れないものの、接触情報はスレーブからの情報のフィードバックが必要なため遅れてマスタに到達する。しかし、マスタ側自律制御系の働きにより、スレーブからの接触情報のフィードバックを待たずに反力を提示することができる。マスタ側抑制器は、マスタ側自律制御系の予測が間違っていた場合にスレーブ側からのフィードバックとマスタ側自律制御系の出力を協調させる働きを持つ。

以下に提案する制御系の利点をまとめる。

- a) 安定
 - b) 伝送遅延なく反力提示が可能
 - c) 把持タスクが確実に遂行可能
 - d) 操作者に違和感を与えずに反力提示が可能
- 以上のうち、a)が安定性に関する利点であり、b), c), d)が操作性に関する利点である。

また、以下に欠点をまとめる。

- a) スレーブに加わった外力を操作者へ提示できない
- b) 物体やアームの慣性力を操作者へ提示できない
- c) 接触点が反力提示方向へ動くようなタスクには適用できない

ただし、前述のように、これらの欠点は、ロボットアームなどに本制御法を適用する際には問題となるも

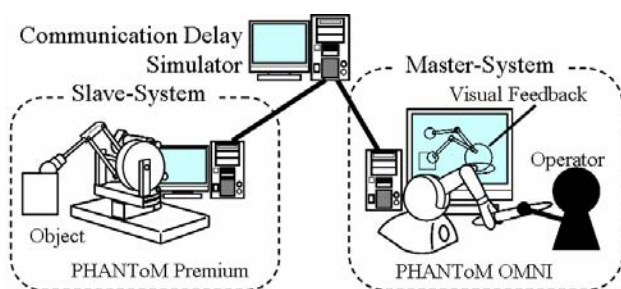


Fig. 3 Master slave system for verification

の、本研究で対象とするロボットハンドに適用する際には影響は限定的なものであると考えられる。

3. 検証用実験系の構築

前章で提案した制御法の有効性の検証に用いる MSS および実験系を構築した。本章では実験系の構築について述べる。

3.1 評価のために行うタスク

2.1 節で述べたように本研究は対ロボットハンドの MSS を対象とする。したがって、主としてロボットハンドが行う、把持・操り動作をタスクとし評価を行う。

評価項目は、スレーブ側自律制御系および抑制器の効果、マスタ側自律制御系および抑制器の効果、MSS としての性能である。スレーブ側自律制御系および抑制器の効果の確認では、外乱が加わっても物体を滑らせずに把持を続行できること、物体を滑らせずに移動させること、持ち替え動作に必要な物体から指を離せることの 3 点を確認する。これは、把持・操り動作で重要となる、対象物体に外乱として力が加わっても物体を滑らせずに把持を続行すること、対象物体を滑らせずに移動させること、持ち替え動作ができることに相当する。マスタ側自律制御系および抑制器の効果の確認では、自律制御系の働きにより、操作者に違和感なく力覚提示ができていないこと、予測に誤差があった場合にもスレーブ側からのフィードバックと適切に協調できていることの 2 点を確認する。MSS としての性能の確認では、本制御法を用いることで、タスクを円滑に且つ短時間で遂行できることを確認する。

3.2 マスタ・スレーブシステムの構築

SensAble 社製の力覚提示装置である PHANToM Premium 1 台と PHANToM OMNI 1 台を用いて、MSS を構築した。構築した MSS を図 3 に示す。図 3 に示すように、PHANToM Premium および制御用計算機をスレーブ装置とし、PHANToM OMNI および制御用計算機をマスタ装置とした。また、両制御用計

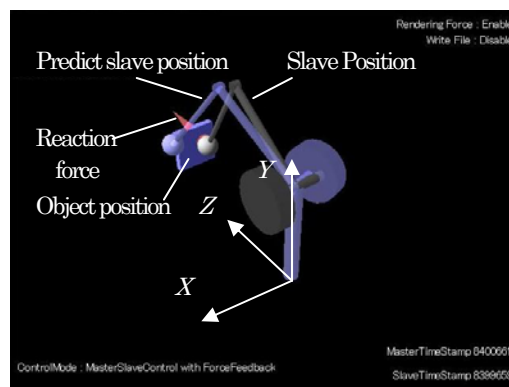


Fig. 4 Display of master

算機間に伝送遅延シミュレート用計算機を配置した。なお、各計算機は、100BASE-TX の Ethernet を用いて同一の Ethernet HUB に接続した。マスタ装置、スレーブ装置ともに制御周期は 1ms、通信は周期 1ms の非同期通信とした。通信プロトコルにはオーバーヘッドの少ない UDP/IP を用いた。マスタ側ディスプレイには、図 4 に示すように、現在のマスタ装置の姿勢に対応するスレーブ装置の姿勢およびスレーブ装置からフィードバックされたスレーブ装置の姿勢、および物体位置を表示させた。ただし、図 4 には座標系も表記した。なお、以降で X 方向など座標系を表す記述があった場合、図 4 の座標系を用いた記述である。

3.3 実験環境の構築

3.1 で述べたように、本研究では、ロボットハンドの把持・操り動作に MSS を適用する。したがって、検証のために最低 2 指が必要である。3.2 節で構築した MSS は 1 指しかないため、母指および対象物体に相当する装置を構築した。物体の把持・操り動作の場合、母指は他指に対し対向しているため、他指の把持力を受け止める役割を果たす。したがって、直交配置したリニアスライダに把持対象物体を取り付け、把持対象物体が X-Y 平面上を動けるようにした。また、マスタ側制御系では物体の位置予測をする。本来であれば、ビジョンセンサなどを用いてスレーブ側情報をマスタ側に伝えるなどの必要がある。しかし本研究では、簡単のため物体位置をエンコーダおよびワイヤを用いてセンシングすることとした。

3.4 制御系の構築

2 章で述べた提案手法を、前述した MSS に実装した。改良型ユニラテラル制御系は、把持物体と指の接触面の法線方向のみ位置制御・力制御の切り替えを行い、接線方向は位置制御のみを行うように実装した。

スレーブ側制御則を以下に示す。物体を把持する制御則は様々なものが提案されているものの、本研究では簡単のため、指・物体間の静止摩擦係数を既知とす

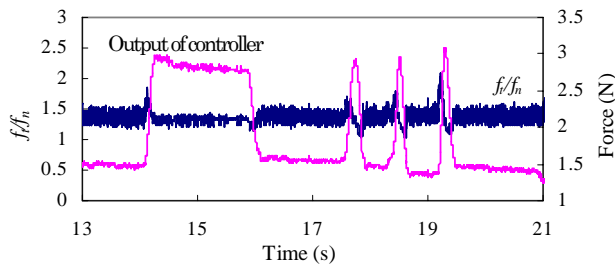


Fig. 5 Result of grasping task (disturbance)

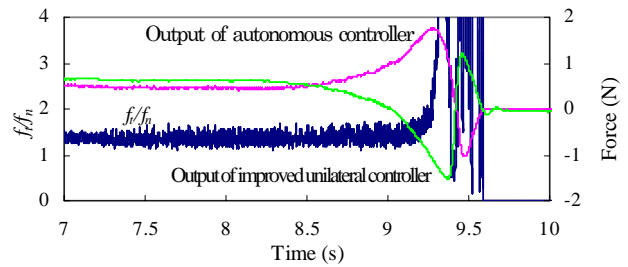


Fig. 7 Result of separation task (with suppressor)

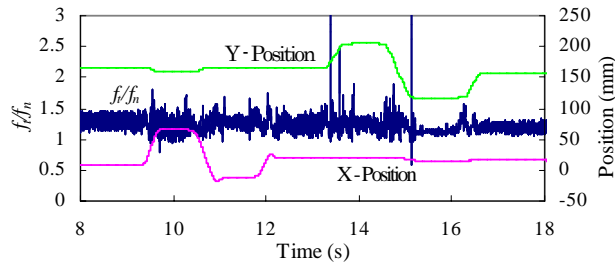


Fig. 6 Result of grasping task (moving)

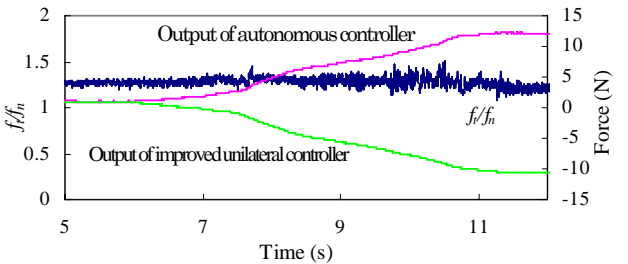


Fig. 8 Result of separation task (without suppressor)

る制御則を用いることとした。まず、指先に取り付けられた力覚センサから力覚情報を得る。次に、指先力を把持物体の把持している面に対して接線方向成分 f_t と法線方向成分 f_n に分解する。そして、その比 f_t/f_n を静止摩擦係数以下にするように f_n を制御する。以上のアルゴリズムによって算出されたスレーブ側自律制御系の出力は、抑制器を通して、改良型ユニラテラル制御系出力と重畳されて PHANToM Premium に入力される。抑制器は、改良型ユニラテラル制御系の出力に応じて、スレーブ側出力を抑制できるように、

$$f_{out} = f_a \cdot [1 - \text{sigmoid}((T - f_u) / \alpha)] \quad (2)$$

により、出力を決定することとした。ただし、 f_{out} は抑制器の出力、 f_a は自律制御系の出力、 f_u は改良型ユニラテラル制御系の出力、 T および α は抑制の度合を調整するパラメータである。

マスタ側制御則を以下に示す。ただし、マスタ側では、対象物体の画像情報などから対象物体の位置情報がある程度の誤差を持ってセンシングできているものとした。基本的な制御則は改良型ユニラテラル制御系と同様で、予測接触位置とマスタの現在位置の差に応じた反力を発生させる。マスタ側抑制器は、接触情報がスレーブ装置からフィードバックされた時刻から時刻によってマスタ側自律制御系の出力を抑制するようにした。

4. 制御法の検証

提案した制御法を検証するため、検証実験を行った。本章では、行った実験を順に示す。

4.1 スレーブ自律制御系の検証

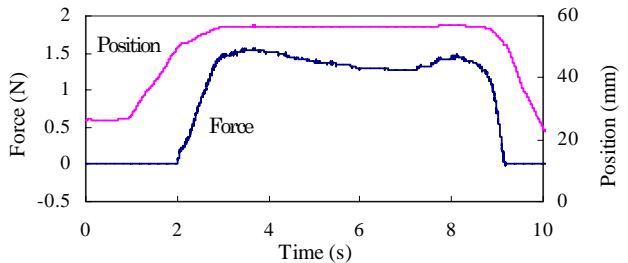


Fig. 9 Result of contact task (with autonomous controller)

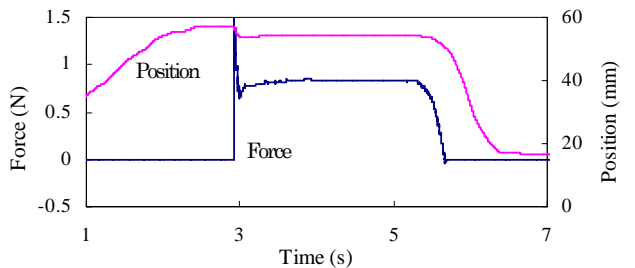


Fig. 10 Result of contact task (without autonomous controller)

スレーブ側自律制御系および抑制器の有効性を検証するため、3つの実験を行った。なお、すべての実験において、伝送遅延はラウンドトリップタイム (RTT) で約 1s とした。これは、スレーブ自律系の検証では、マスタをフィードフォワード的に操作しているため、伝送遅延が実験結果に影響を及ぼさないためである。また、指・物体間の静止摩擦係数は 1.5 とした。

まず、物体を把持した状態で、物体に外乱を加える実験を行った。図 5 は指先力の法線方向成分と接線方向成分の比 f_t/f_n と指先力の法線方向成分の履歴である。なお外乱は、約 14s の時点からステップ状に約 2 秒間、約 17.5s の時点からインパルス状に 3 回印加した。図 5 より、外乱を加えた瞬間は f_t/f_n が増加しているもの

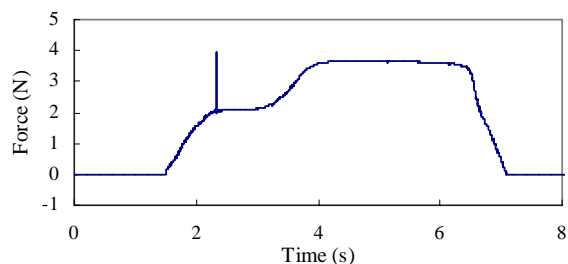


Fig. 11 Result of contact task with +5mm error (with suppressor)

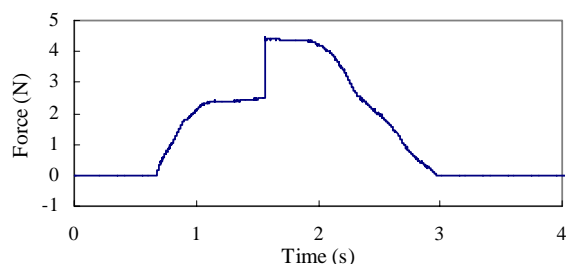


Fig. 12 Result of contact task with +5mm error (without suppressor)

の、直後に指先力の法線方向成分が増加することで f_t / f_n が目標値である静止摩擦係数以下に保たれていることが判る。以上より、スレーブ側自律制御系により、把持物体を滑らせることなく把持し続けられることが示された。

次に、物体を把持した状態で、物体を移動させる実験を行った。図6は f_t / f_n と指先位置の X 成分および Y 成分の履歴である。図6より、物体を X 方向および Y 方向に移動させても f_t / f_n が静止摩擦係数以下に保たれていることがわかる。以上より、スレーブ側自律制御系により、把持物体を滑らせることなく移動できることが示された。

さらに、物体を把持した状態で、指を物体から離す実験を行った。図7は f_t / f_n と抑制されたスレーブ自律制御系の出力、およびスレーブ側のユニラテラル制御系の出力の履歴である。比較のため、抑制器のない状態で同様の実験を行った結果を図8に示す。ただし、非接触時は $f_t / f_n = 0$ とした。図7を見ると、抑制器がある場合は、自律制御系の出力が抑制され、指が物体から離れるものの、抑制器のない場合は、図8のように自律制御系の出力が増大し、指が物体から離れないことがわかる。以上から、抑制器により、マスタからの指令と自律制御系が適切に協調できることが示された。

以上より、スレーブ側自律制御系およびスレーブ側抑制器の有効性が示された。

4.2 マスタ自律制御系の検証

マスタ側自律制御系および抑制器の有効性を確認す

Table 2 Comparison of proposed method and conventional method (operation time) unit : s

Subject	Proposed Method	Conventional Method
A	6.98	30.73 (*)
B	6.43	15.48 (*)
C	5.32	10.96
D	2.29	5.31 (*)
E	5.24	8.58

(*) shows the number of failure

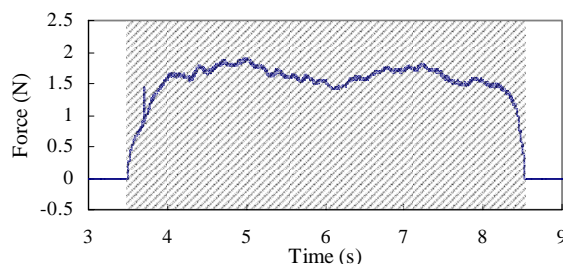


Fig. 13 Reaction force of master slave experiment (proposed method)

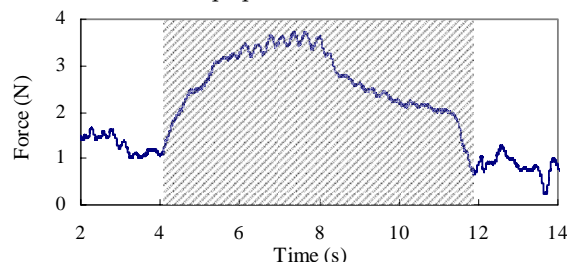


Fig. 14 Reaction force of master slave experiment (conventional method)

るため、2つの実験を行った。なお、すべての実験において、伝送遅延はRTTで約1sとした。

まず、実際の物体位置とマスタ側自律制御系での予測物体位置の間に誤差がない状態にして、指を物体に接触させる実験を行った。図9はマスタのZ方向の反力と位置の履歴である。また、自律制御系がない場合の実験結果を図10に示す。図10を見ると、自律制御系がない場合は接触情報がスレーブからマスタに帰還したときに、反力が急激に上昇していることがわかる。反力の急激な上昇により、マスタの位置がわずかではあるが急激に変化していることがわかる。この現象は、操作者が違和感を覚える原因である。一方、図9を見ると、自律制御系がある場合は、反力が滑らかに増加しており、反力の急激な上昇およびそれに起因するマスタ位置の変化がないことがわかる。以上より、マスタ側自律制御系により、接触時に違和感なく反力を提示できることが示された。

次に、実際の物体位置とマスタ側自律制御系における予測物体位置の間に $\pm 5\text{mm}$ の誤差を持たせた状態

Table 3 Comparison of operation time unit: s

Subject	Proposed method	Without autonomous controller
A	21.02	42.50 (*)
B	18.05	44.01 (**)
C	12.53	17.99
D	3.30	12.47 (*)
E	6.98	9.52

(*) shows the number of failure

Table 4 Comparison of "move and wait" time unit: s

Subject	Proposed method	Without autonomous controller
A	3.71	6.56
B	2.00	5.70
C	1.39	3.07
D	0.47	3.87
E	0.87	2.51

で、指を物体に接触させる実験を行った。図 11 はマスタ反力の履歴である。ただし、誤差+5mm の場合のみを示した。同様の実験を、抑制器がない制御系についても行った。結果を図 12 に示す。ただし、抑制器のある場合同様、誤差+5mm の場合のみを示した。図 11 および図 12 を見ると、接触直後は誤差のない場合とほぼ同様に反力を提示していることがわかる。しかし、スレーブからのフィードバック情報が帰還した後、図 12 の抑制器がないときには、接触点が瞬間的に正しい値に修正されるため、反力が急激に変化していることがわかる。一方、抑制器がある場合は、抑制器の働きにより、反力が滑らかに正しい値に変化していることがわかる。なお、図示していないものの、誤差-5mm の場合においても同様の傾向を持つ結果が得られた。

以上より、抑制器の働きにより、接触予測による反力とスレーブからのフィードバックによる反力が適切に協調できることが示された。

4.3 マスタ・スレーブシステムとしての検証

提案した手法を MSS として作業に用いた場合の有効性の検証を行った。タスクは、

- 動作 a) 指先を物体に接触させて把持する
- 動作 b) 物体を Y 方向に目標点まで持ち上げる
- 動作 c) 把持したまま物体を元の座標まで降ろす
- 動作 d) 指先を物体から離す

という一連の動作とし、同様のタスクを 3 回繰り返させた。また、被験者は 20 代の男性 5 人とした。

まず、提案した制御手法が従来手法と比較して有効か

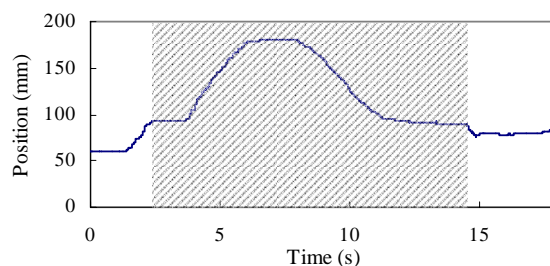


Fig. 15 History of position of slave (proposed method)

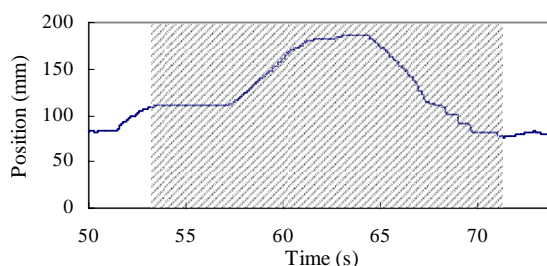


Fig. 16 History of position of slave (method without autonomous controller)

否かを検証するため、提案手法と、PD 制御則を用いた単純な対称型マスタ・スレーブ（以下、従来手法）を用いて、上述のタスクを 3 回行わせた。伝送遅延は RTT で約 200ms とした。これは従来手法では伝送遅延が大きくなると操作感が重くなってしまったためである。実際、伝送遅延 1s の場合、従来手法ではタスク遂行が困難となった。表 2 にタスク 1 回に要した時間の平均を示す。ただし、タスク遂行に要した時間とは、物体に接触する直前から物体と非接触になった直後までに要した時間である。表 2 を見ると、全被験者において、タスクに要した時間が、提案手法のほうが小さくなっていることがわかる。また、従来手法では、物体を滑らせてしまい、タスクに失敗してしまうことも多くなっている。図 13 および図 14 は被験者 E のタスク中のマスタ側反力の履歴である。ただし、図 13 は提案手法を用いた場合の結果、図 14 は従来手法を用いた場合の結果であり、図の斜線部分は接触時を表す。図 14 を見ると従来手法では、物体と非接触時も、1N 程度の反力が操作者に提示されており、操作感が重く、物体接触時の反力との区別がつきにくくなっていることがわかる。一方、図 13 を見ると、提案手法では非接触時には反力は 0 であり、指の慣性力が提示できていないものの、接触時には適切に反力提示が行われていることがわかる。なお、他の被験者の際も同様の傾向が見られた。以上より、提案手法は従来手法に対し、操作性が向上しており、さらにタスクが確実に遂行できることが示された。

次に、伝送遅延が大きい場合について検証を行った。前述のように従来手法ではタスク遂行が困難であった。したがって比較のため、提案手法から自律制御系を取り除いた制御系、すなわち改良型ユニラテラル制御系のための制御系（以下、比較用制御系）を用いて、同様の実験を行った。伝送遅延は RTT で約 2s とした。表 3 に各被験者のタスクに要した時間の平均値を示す。表 3 を見ると、提案手法では比較用制御系と比べてタスクに要する時間が減少していることがわかる。図 15 および図 16 に被験者 C のスレーブ指先の Y 軸位置の履歴を示す。ただし、図 15 は提案手法を用いたときの結果、図 16 は比較用制御系を用いたときの結果である。また、図の斜線部は接触時を表す。図 15 および図 16 を見ると、提案手法、比較用制御系ともに、動作中に一定時間移動していない部分が数箇所あることがわかる。これは、動作が失敗せずに行われているかを一定時間待って確かめている Move and Wait 動作である。しかし、提案手法では接触時の Move and Wait 動作に要する時間が軽減されていることがわかる。これは、反力が予測的に提示されることで物体を把持する力を決定しやすかったためと考えられる。表 4 に被験者別の接触時の Move and Wait 動作に要した時間を示す。被験者によって差があるものの、被験者 C 同様、全被験者について Move and Wait 動作に要する時間が減少していることがわかる。以上より、自律制御系により、伝送遅延が大きい場合についても操作感が失われにくく、良好な操作性を実現できていることが示された。

以上より、提案手法は伝送遅延の存在する MSS の制御法として有効であることが確認された。

5. 結論

ロボットハンドに対する MSS を対象として、伝送遅延が存在する場合にも、安定且つ操作性の劣化の少ない制御法を提案した。提案した制御法は改良型ユニラテラル制御器とスレーブ側自律制御系および抑制器、マスタ側自律制御系と抑制器より構成される。提案手法の検証のため、PHANToM 2 台を用いた MSS を構築した。構築した MSS を用いて、提案した制御法の有効性の検証実験を行った。検証実験により、提案した制御法の有効性を確認した。

参考文献

- (1) T. B. Sheridan : Spece Teleoperation Through Time Delay: Review and Prognosis, IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol.9, No.5, pp.592-606 (1993)
- (2) M. W. Spong : Communication Delay and Control Telerobotics, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.6, pp.803-810 (1993)
- (3) G. Niemeyer , J. E. Slotine : Towards Force-Reflecting Teleoperation Over the Internet, Proc. 1998 IEEE ICRA, pp.1909-1915 (1998)
- (4) 横小路康義, 今井田卓 他 : 通信時間遅れの変動下でも安定性が保証されるバイラテラル制御法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演論文集(C編), Vol.64, No.621, pp.1780-1785 (1998)
- (5) W. R. Ferrell : Delayed Force Feedback, HUMAN FACTORS, October, pp.449-455 (1966)
- (6) W. S. Kim, A. K. Bejczy : Demonstration of a High-Fidelity Predictive/Preview Display Technique for Telerobotic Servicing in Space, IEEE Trans. Robotics and automation, Vol.9, No.5, pp.698-702 (1993)
- (7) 嶋田宏史, 鈴木達也 他 : 仮想環境下で操作するオペレータと自律性を有するスレーブロボットとの協調作業—毛筆技能への応用—, 計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.2, pp.155-163 (2004)
- (8) W. R. Ferrell, T. B. Sheridan : Supervisory control of remote manipulation, IEEE Spectrum, October, pp.81-88 (1967)
- (9) 渡辺格, 森田弘道 他 : 神経科学講座 5 運動と制御, 理工学社, 東京, 第 1 版, pp.106-108 (1978)
- (10) K. Imazeki, T. Maeno : Hierarchical Control Method for Manipulating / Grasping Tasks using Multi-fingered Robot Hand, Proc. IEEE IROS '03, pp.3686-3691 (2003)
- (11) I. Yamano, K. Takemura, K. Endo, T. Maeno : Method for Controlling Master-Slave Robots using Switching and Elastic Elements, Proc. IEEE ICRA 2002, pp.1717-1722 (2002)