

通信時間の遅れと変動を伴う環境下での遠隔操作法の研究

課題番号: 12450103

平成 12 年度～平成 14 年度科学研究補助金 基盤研究 (B)(2) 研究成果報告書

平成 15 年 3 月

研究代表者 横小路 泰義

(京都大学大学院工学研究科 助教授)

通信時間の遅れと変動を伴う環境下での遠隔操作法の研究

課題番号: 12450103

平成12年度～平成14年度科学研究補助金 基盤研究(B)(2) 研究成果報告書

平成15年3月

研究代表者 横小路 泰義

(京都大学大学院工学研究科 助教授)

はしがき

近年ネットワークロボティクスすなわちインターネットに代表される計算機ネットワークを介してのロボットの遠隔操作技術が注目されている。今後、計算機ネットワークを介しての力覚を伴うコミュニケーション、力覚を用いての遠隔からの機器の操作・検査や遠隔医療診断などの応用が期待されている。

計算機ネットワークを介した遠隔操縦に共通の問題として、通信時間遅れとその変動が挙げられる。今後計算機ネットワークが進歩し、通信容量は増加して行くものと予想されるが、通信時間遅れとその時間的な変動は不可避であり、このような通信時間遅れと変動を伴う環境下でも適用可能な遠隔操縦法の確立が望まれているにも関わらず、現状では3次元空間において十分応用に耐える複雑な作業をこなせるシステムは皆無である。

これまでテレオペレーションの研究では、理論的な研究では簡単な1~2自由度系での実験にとどまり3次元空間での現実的な作業を遂行する際の問題点などは見過ごされてきた。一方、通産省の極限作業ロボットプロジェクトに代表される3次元空間で複雑な作業が可能な遠隔操縦システム構築の研究では、結局単一のシステム構築で終わってしまった感があり、客観的な操作性の評価等の研究の蓄積という面での寄与は少なかった。その理由として性能を評価する標準的な指標、いわゆるベンチマークテストが存在しなかったことなどが挙げられる。

時間遅れのもとでも安定に動作するバイラテラル制御としては、これまでも散乱理論に基づく手法が提案されているが、時間遅れは一定という前提があった。また遅れ時間の変動に対処した手法としてこれまでに国内外で2例ほど提案されたが、これらは共に手法が保守的であり必要以上の性能劣化を招いていた。また両者ともに3次元での複雑な作業への適用や、操作性評価のベンチマークテスト確立という発想はない。また多指ハンドとアームを組み合わせた遠隔操縦システムは、極限作業ロボットプロジェクト以来例を見ない。

以上のような背景のもと、本研究では、計算機ネットワークを介した遠隔操縦の大きな障害として良く知られている通信時間遅れと一時的通信途絶を含む通信時間の変動下においても有効な遠隔操縦法の確立およびこれを3次元空間内での現実的な作業へ適用することを目的とする。具体的な目的として、(i) 通信時間の遅れと変動を伴う環境下でも安定性の確保はもとより、最小限の性能劣化で操作が可能なバイラテラル遠隔制御法の確立すること、(ii) 多指ハンドとアームを組み合わせた3次元空間内での複雑な作業を可能とする遠隔操作システムの開発すること、(iii) 遠隔操縦システムの性能評価の標準指標となるべきベンチマークテスト法の確立すること、とする。

本研究では、時間遅れだけでなくその時間変動を伴う環境下でも性能劣化を最小限に押さえたバイラテラル制御法を確立しようとする点が独創的であり、さらにこれを単純な実験システムへの適用にとどまらず、多指ハンドとアームを組み合わせたシステムを構築して3次元空間内での実際の複雑な作業に適用することにより、従来の理論的研究と実際的な応用とのギャップを埋めさらにそこに内在する新たな問題点を発掘しようとする試みもユニークである。さらに操作性評価のベンチマークテストを確立するという発想もこれまでにない独創的なものである。

本研究により、「どの程度の時間遅れや変動までならバイラテラル制御が有効か?」、「時間遅れ無しの場合と比較しての作業性の劣化はどの程度か?」、「どの程度まで器用な操作が実現可能なのか?」といった疑問点が明らかになり、今後の新しい通信インフラ構築の際の重要な指針となる。

研究組織

- 研究代表者 横小路 泰義 (京都大学大学院工学研究科 助教授)
研究分担者 吉川 恒夫 (京都大学大学院工学研究科 教授)
山本 穰 (京都大学大学院工学研究科 助手)

研究経費

平成 12 年度	7,000 千円
平成 13 年度	6,500 千円
平成 14 年度	1,700 千円
合計	9,200 千円

研究発表

1. 学会誌等

1. Yasuyoshi Yokokohji, Takashi Imaida, Yukihiro Iida, Toshitsugu Doi, Mitsushige Oda and Tsuneo Yoshikawa: "Bilateral Teleoperation: Towards Fine Manipulation with Large Time Delay," Experimental Robotics VII (D.Rus and S.Singh Eds.), Springer-Verlag, LNCIS 271, pp.11-20, 2001.
2. 今井田 卓, 横小路 泰義, 土井 利次, 小田 光茂, 吉川 恒夫: "大きな通信時間遅れの下での直接バイラテラル制御による技術試験衛星 VII 型搭載ロボットアームの地上遠隔操作実験", 日本ロボット学会誌, vol.21, no.4, 2003. (掲載予定)
3. Yasuyoshi Yokokohji, Yukihiro Iida and Tsuneo Yoshikawa: "'Toy Problem' as the Benchmark Test for Teleoperation Systems", Advanced Robotics, vol.17, no.3, 2003. (掲載予定)

2. 口頭発表

1. 今井田 卓, 横小路 泰義, 土井 利次, 小田 光茂, 吉川 恒夫: "大きな通信時間遅れの下での地上からのバイラテラル遠隔操作の操作性評価", ETS-VII「おりひめ」「ひこぼし」実験成果報告会前刷集, (2000年3月14日, 東京都), pp.185-194, 2000.
2. Yasuyoshi Yokokohji, Takashi Imaida and Tsuneo Yoshikawa: "Bilateral Control with Energy Balance Monitoring Under Time-Varying Communication Delay", Proc. of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (San Francisco, CA, April 24-28, 2000), pp.2684-2689, 2000.
3. 横小路 泰義, 今井田 卓, 吉川 恒夫: "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, (2000年5月11日~13日, 熊本県益城郡), 2P1-35-050(CD-ROM), 2000.

4. 横小路 泰義: “テレオペレーションから機械メディアへの展開”, テクノピア 2000 東京: モノづくりワールド製造技術総合展, 先端技術フォーラム: IT 新世紀 - 製造のプロセス革新, セッション A: ネットワークロボティクス (日本機械学会・日刊工業新聞社主催) 資料集, (2000 年 6 月 1 日, 東京都), 2000.
5. 今井田 卓, 横小路 泰義, 土井 利次, 小田 光茂, 吉川 恒夫: “直接バイラテラル制御による ETS-VII 搭載ロボットアームの地上遠隔操作実験”, 第 18 回ロボット学会学術講演会予稿集, (2000 年 9 月 12 日~14 日, 草津市), pp.1371-1372, 2000.
6. Yasuyoshi Yokokohji, Takashi Imaida, Yukihiro Iida, Toshitsugu Doi, Mitsushige Oda and Tsuneo Yoshikawa: “Bilateral Teleoperation Towards Finer Manipulation in Farther Distance,” Preprints of International Symposium on Experimental Robotics (ISER 2000), (Hawaii, December 10-13, 2000), pp.11-20, 2000.
7. Yasuyoshi Yokokohji, Yukihiro Iida and Tsuneo Yoshikawa: “‘Toy Problem’ as the Benchmark Test for Teleoperation Systems”, Proc. of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000), (Takamatsu, October 31-November 5, 2000), pp.996-1001, 2000.
8. 横小路 泰義: “仮想環境への視覚/力覚インターフェイスとその応用 -テレオペレーションから機械メディアへの展開-”, 日本機械学会研修会: VR とロボメカ技術による次世代テレコミュニケーション (ロボティクス・メカトロニクス部門 企画), (2000 年 11 月 29 日, 吹田市), pp.27-39, 2000.
9. Yasuyoshi Yokokohji: “Toward Mechano-Media from Teleoperation,” Proc. of Workshop on Advances in Interactive Multimodal Telepresence Systems, (Munich, Germany, March 29-30, 2001), pp.3-20, 2001.
10. Takashi Imaida, Yasuyoshi Yokokohji, Toshitsugu Doi, Mitsushige Oda and Tsuneo Yoshikawa: “Ground-Space Bilateral Teleoperation Experiment Using ETS-VII Robot Arm with Direct Kinesthetic Coupling”, Proc. of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (Soul, Korea, May 21-26, 2001), pp.1031-1038, 2001.
11. 横小路 泰義, 辻岡 照泰, 吉川 恒夫: “時間遅れの変動下でも安定性なバイラテラル制御による遠隔操作実験”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演論文集, (2001 年 6 月 8 日~10 日, 高松市), 2P2-K2(CD-ROM), 2001.
12. Takashi Imaida, Yasuyoshi Yokokohji, Toshitsugu Doi, Mitsushige Oda and Tsuneo Yoshikawa: “Ground-Space Bilateral Teleoperation of ETS-VII Robot Arm by Direct Bilateral Coupling under 7-sec Time Delay Condition”, Proc. of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space (i-SAIRAS 2001), (Montreal, CANADA, June 18-22, 2001), CD-ROM, 2001.
13. 横小路 泰義, 飯田 行寛, 吉川 恒夫: “多指ハンド型ハプティックマスタの設計指針”, 第 19 回ロボット学会学術講演会予稿集, (2001 年 9 月 18 日~20 日, 東京都文京区), pp.183-184, 2001.
14. 横小路 泰義, 飯田 行寛, 吉川 恒夫: “遠隔操作による玩具ブロック組立実験からの身体スキルの考察”, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2001) 予稿集, (2001 年 12 月 20 日~22 日, 名古屋市), pp.325-326, 2001.

15. Yasuyoshi Yokokohji, Teruhiro Tsujioka and Tsuneo Yoshikawa: "Bilateral Control with Time-Varying Delay including Communication Blackout", Proc. of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, (Orland, FL, March 24-25, 2002), pp.285- 292, 2002.
16. 横小路 泰義, 藤原 政記, 吉川 恒夫: "動的多指可操作性への提案 -マスタ・スレーブハンド設計指標への拡張-", 第 20 回ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集, (2002 年 10 月 12 日~14 日, 豊中市), 1E24(CD-ROM), 2002.
17. 横小路 泰義, 廣瀬 良二, 吉川 恒夫: "動作範囲に制限のあるマスタアームによる遠隔操縦法", 第 20 回ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集, (2002 年 10 月 12 日~14 日, 豊中市), 3F24(CD-ROM), 2002.
18. 横小路 泰義: "複合現実感とテレロボティクスにおける視覚/力覚インタフェース", 計測自動制御学会関西支部シンポジウム講演論文集, (2002 年 10 月 25 日, 吹田市), pp.19-22, 2002.
19. Masaki Fujiwara, Yasuyoshi Yokokohji and Tsuneo Yoshikawa: "Guideline for Designing Haptic Master Hands based on Dynamic Multi-fingered Manipulability", Proc. of the 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, (Los Angeles, CA, March 22-23, 2003), 2003. (to appear)

1 多指型マスタ・スレーブハンドの設計とテレオペレーションのベンチマークテスト

本研究では、器用な作業が可能な多指型のマスタ・スレーブハンドの設計・開発を行い、さらにテレオペレーションシステムの性能を定量的に評価するベンチマークテストの提案を行っている。研究内容の詳細は本報告書巻末に添付した論文に詳しいので、本章では研究によって得られた結果を簡単にまとめるにとどめる。

1.1 多指型マスタ・スレーブハンドの設計と試作

マスタ・スレーブシステムは、人間が操縦するゆえ現時点では自律ロボットよりも複雑な作業をこなすことができる。三次元空間内での複雑な作業をこなすには、アームの自由度は6自由度以上あったほうが望ましく、エンドエフェクタも単純なグリップよりは多指ハンドの方が器用な操りが可能になる。しかしながら意外にもこれまで研究用として開発されてきたマスタ・スレーブシステムは比較的少ない自由度を有するものが多く、先端に多指ハンドをもついわゆるハンド・アーム統合型のシステムは数えるくらいしかない。本研究では、最終的には三次元空間内での作業が可能なシステムの開発を目指しているが、その前段階として既存の平面三自由度のスカラ型DDアームを用いた遠隔操縦システム（「辣腕」と命名されている）の先端に付加できるような各指2自由度の2本指ハンド（「屈指」と命名した）を設計・試作した。これは親指と人差し指の2本で操作可能なもので、親指、人差し指とも2自由度を有する。設計に際しては、操作者への安全性、コンパクト性、低慣性を重視し、タイミングベルトとベベルギヤを用いたパラレル駆動型とした。

試作したマスタ・スレーブハンドは、マスタ・スレーブアームの先端に取り付けられ、ハンド／アーム統合型マスタ・スレーブシステムとした。さらにその後ステレオカメラをパンチルト台に載せた視覚システムとも統合し、視覚面でも完全にマスタとスレーブを分離した。

1.2 ベンチマークテストとしての玩具ブロックの組立て作業の提案

マスタ・スレーブシステムの研究においても一つの問題点は、システムの操作性の評価である。現状では別々の場所で開発されたシステムの間で性能を比較することが非常に難しい。異なる場所のシステムの性能を評価するには、ある標準（ベンチマーク）作業を設定すればよい。標準作業は条件が一定になるものでなければならず、準備が簡単で誰でもが容易に遂行できる方が望ましい。そこで本研究では、世界的に流通している玩具のブロック（LEGO）の組立を操作性評価のための標準作業とすることを提案し、実際に試作したハンドアーム統合システムの操作性を評価した。組み立てるべき玩具ブロックの構造をあらかじめ指定しておき、組み立てに要した時間を計測することにより、操作性を定量的に評価できると考えている。ただし、実際の実験を通して分かった重要な点として、単に時間を計測するだけでなく、その成績に至るまでに要した練習時間（学習曲線）や被験者の手や指の大きさに対する成績の依存性（種々の被験者間の分散）も考慮する必要があることが分かった。これらの点を総合して評価することにより、異なった場所のシステムの性能を同じ基準で比較することが可能であると考えている。

1.3 多指ハンド型ハプティックマスタの設計指針

開発したマスタ・スレーブハンドは、文献 [1] の知見を基に、単純に人間の指と同じ長さとしたが、実際に操作した際にはリンク長をやや長めにしたほうが操作性が向上すると感じられた。そこでまず、文献 [1] の評価を各指にそのまま適用して、最適な指の長さを選定しようとしたが、複数の指で物体を把持し協調して操るという多指ハンド特有の特性を考慮することができず、必要以上に長いリンクを最適と評価してしまう結果となった。

そこで本研究では、マニピュレータの加速性能を評価する動的可操作度を多指ハンド系に適用できるように拡張した動的多指可操作度を提案した。この動的多指可操作度では、把持力に相当する内力を考慮に入れて評価することができるようになっている。さらに、動的操作度の考え方を拡張して単一のマスタアームの評価を行ったように動的多指可操作度の考え方をさらに拡張して多指型のマスタ・スレーブハンドの操作性の評価指標を提案した。この評価指標を用いて、幾つかの候補の中から最も評価の高い関節配置（リンク長の配分比とリンクの取り付け位置）を選び、さらに評価値が最も良くなるような最適リンク長を算出した。

これらの結果を元に、以前に製作した各指 2 自由度の 2 本指型マスタ・スレーブハンド「屈指」を改良した。また実際にレゴブロックを用いた操作性実験も行い、実際にも操作性が向上したことが確かめられた。

2 時間遅れの変動下でも安定なバイラテラル制御法

本研究では、時間遅れの変動下でも安定なバイラテラル制御法を提案し、その有効性を実験的に検証した。前章と同様に研究内容の詳細は本報告書巻末に添付した論文に詳しいので、本章では研究によって得られた結果を簡単にまとめるにとどめる。

インターネットの爆発的普及に伴い、ネットワークロボティクスすなわち計算機ネットワークを介したロボットの遠隔操縦技術が近年注目を集めている。あらゆる計算機ネットワークには通信時間遅れが存在し、インターネットでは距離やネットワークの負荷にも依るが遅れ時間は数十ミリ秒から場合によっては数秒にも達する。時間遅れのある通信環境下で従来のバイラテラル制御則を適用すると、系が不安定になることは良く知られている。Anderson と Spong[2] によって最初に提案された散乱理論を用いる手法は、理論的にはどんなに長い時間遅れであっても系の安定性を保証するものである。しかし、そこでは時間遅れは一定という前提があった。インターネットに代表される計算機ネットワークでは、通信時間は遅れるだけでなく変動する。時間遅れが変動する通信環境下で Anderson らの手法を単純に適用すると、位置ドリフトが生じるなどの問題がある。時間遅れの変動に対処するアプローチはこれまでも試みられているが [3][4]、対処法が保守的であったため必要以上の性能劣化を招いていた。

そこで本研究では、散乱理論を用いる手法をベースにしながらも時間遅れの変動下でも厳密に安定性が保証され、かつシステムの性能劣化を最低限に抑える事のできる手法を提案した。この手法は、変動遅れ時間によってゆがめられた信号を送信時に付与されたタイムスタンプを頼りに復元し、簡単なフィードバック補償によって位置ドリフトを補償するものである。またこれと同時に、補償器で余分に発生したエネルギー収支を常にモニタしておき、あらかじめ設定しておいたエネルギーマージンを超えると出力を停止することで、通信途絶などが生じてシステムが発生しうるエネルギーに上限を持たせ、厳密な受動性を保証した。さらに通信途絶からの復旧時においても、エネルギー収支を厳密に管理することで厳密な受動性を保証しながら、安全に遠隔操作を再開できるようにした。また提案手法の有効性を、インターネット接続を模擬した LAN 環境下で実験的に検証した。

3 大きな通信時間遅れの下での直接バイラテラル制御による技術 試験衛星 VII 型搭載ロボットアームの地上遠隔操作実験

本研究では、6 秒から 7 秒という大きな通信時間遅れの下で技術試験衛星 VII 型に搭載されたロボットアームを地上から直接バイラテラル制御する遠隔操作実験を行った。前章と同様に研究内容の詳細は本報告書巻末に添付した論文に詳しいので、本章では研究によって得られた結果を簡単にまとめるにとどめる。

前章で提案した散乱行列に基づく手法では、時間遅れがどんなに長くても系の安定性は保証される。しかしながら、時間遅れが増大すると操作性が劣化するのは避けようのないことである。例えば極端な例として、火星までの 20 分といった時間遅れでは系が安定であってもバイラテラル制御に意味がないことは明らかである。これまでバイラテラル制御が有効な時間遅れの上限は、0.5 秒、1 秒等々の諸説があったが、理論面で進展のあった現時点でバイラテラル制御が有効な時間遅れの上界を見極めることは興味のあるところである。ところで、上述の散乱理論に基づく方法以外でも、工夫次第では通常的位置と力の信号をやり取りする方法により時間遅れの存在下で安定性が保証できることは意外と知られていない。本研究では、Oboe ら [5] らが示した制御系に着目し、安定性の条件を厳密に示した。これはマスタ側とスレーブ側の両端に PD 制御を配した単純なものであり、このときの安定性条件は、マスタ側の PD ゲインを K_m, D_m 、スレーブ側を同様に K_s, D_s とし、マスタからスレーブへの時間遅れを T_1 、逆にスレーブからマスタへの時間遅れを T_2 、さらにマスタ、スレーブ駆動部分の粘性係数を d_m, d_s とすると、 $(D_m + d_m)(D_s + d_s) > K_m K_s (T_1 + T_2)^2 / 4$ となる。散乱行列に基づく手法では、時間遅れの増大とともに見かけの粘性項や慣性項が大きくなり操作感が重くなるため操作性は悪化するが、この PD 制御に基づく手法では時間遅れの増大に伴い安定性確保のためにダンパゲインを大きくしなければならぬものの慣性項は増大しないので数秒といった大きな時間遅れではむしろこちらのほうが操作性は良いと期待される。

本研究では、宇宙開発事業団の協力を得て「おりひめ・ひこぼし」の愛称で知られる ETS-VII(技術試験衛星 VII 型) 搭載のロボットアームを用いた遠隔制御実験を平成 11 年 11 月 22 日に行なった。衛星搭載ロボットアームの制御系の制約から、上記 PD ベースのバイラテラル制御を若干修正したものを用い、実際に往復 6 秒～7 秒といった大きな時間遅れの通信環境下でのバイラテラル制御によって壁倣いやベグ挿入などの作業に成功している。従来 6 秒といった長い時間遅れでは、予測表示の助けを借りたり、環境モデルに基づく擬似的な力フィードバックを頼りに操作するしか方法がないとされていたが、作業によっては視覚的な情報も一切無しにスレーブ側からのフィードバックのみで実行可能なことが示された。また本実験は、地上から宇宙ロボットアームを直接バイラテラル制御した初の実験となった。

本実験から、バイラテラル制御の時間遅れに明確な上限はなく、与えられたタスクの難易度に依存するという極めて自然な知見が得られた。また筆者らは本実験の経験から、既存の通信インフラでの時間遅れに対処するのではなく、ロボット遠隔操縦を考慮した新たな通信インフラを構築するという発想の転換が大事ではないかと考えている。

4 3次元空間作業用マスタ・スレーブ遠隔操縦システムの開発と動作範囲に制限のあるマスタアームによる遠隔操縦法

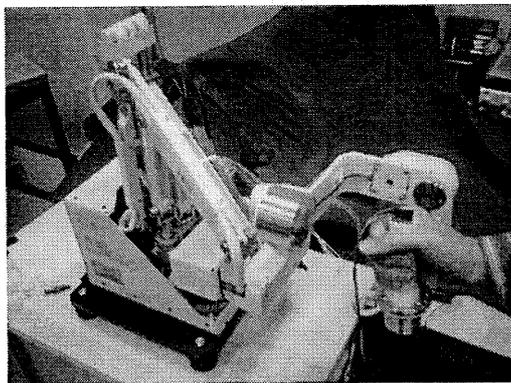
4.1 3次元空間作業用マスタ・スレーブ遠隔操縦システムの開発

本章では、1章で開発した2次元平面内で動作するマスタ・スレーブシステムの経験を基に、3次元空間作業用マスタ・スレーブ遠隔操縦システムを開発した。図1に試作したシステムを示す。マスタアームは、東京エレクトロニクス社製の6自由度マスタアーム(TZZ2001B)の手先部分を後にマスタハンドが付加できるように改良を施したものである。スレーブアームは、三菱重工業製の7自由度汎用知能アーム(PA-10)を使用した。開発したシステムは特にマスタアームの動作範囲に制限があるために、2次元システムの場合のように単純な1対1の位置の対応付けを行うと、スレーブアームの動作範囲を有効に活用することができない。そこで次節で述べる動作範囲に制限のあるマスタアームによる遠隔操縦法を提案し、試作したシステムは図2に示すように、この制御法の実験的検証に用いられた。

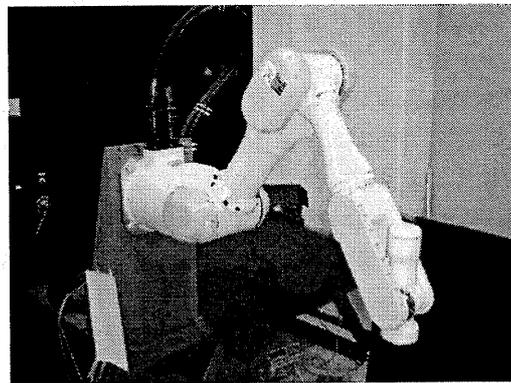
さらに、1章で述べた多指型マスタ・スレーブハンドと同じく、ここで開発した3次元空間作業用マスタ・スレーブシステムにも多指型マスタ・スレーブハンドを装着する予定である。図3に設計したマスタハンド部の3D-CAD図面を示す。3次元作業が行える最低限の構成として親指と人差し指の2本指で操作する形式とし、親指に3自由度、人差し指に2自由度を配した。また、操作性を考慮して関節軸をなるべくオペレータの指関節軸と一致するように工夫した。

4.2 動作範囲に制限のあるマスタアームによる遠隔操縦法

コンパクトなマスタ装置は、設置面積の制限のある宇宙船内などで使われている。災害現場などで遠隔操縦システムを用いる際にも搬入・設置の容易な小型のマスタアームが望ましい。このように動作範囲に制限のあるマスタアームは、スレーブアームとの単純な1対1の位置の対応付けを行うと、スレーブアームの動作範囲を有効に活用することができない。そのため従来はマスタアームを速度指令型のジョイスティックとして使用するか、スイッチを用いてマスタとスレーブの断続を繰り返すことで、スレーブアームの動作範囲を広げるいわゆるインデッキングの手法がとられて来た。しかし、速度モードでは精細な作業が困難であり、インデッキングは断続の操作が煩雑となる。さらに多指ハンド型のシステムの場合には、インデッキングでのスイッチ操作そのものが



(a) 6自由度マスタアーム



(b) 7自由度スレーブアーム

図1: 試作した3次元空間作業用マスタ・スレーブ遠隔操縦システム

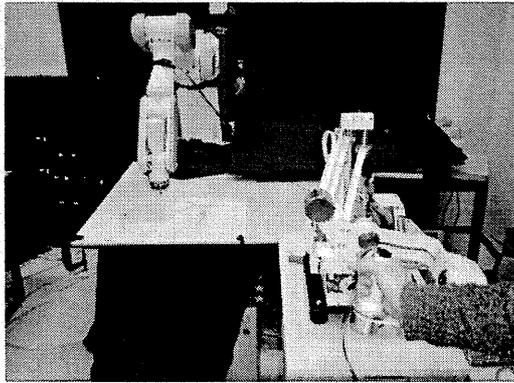
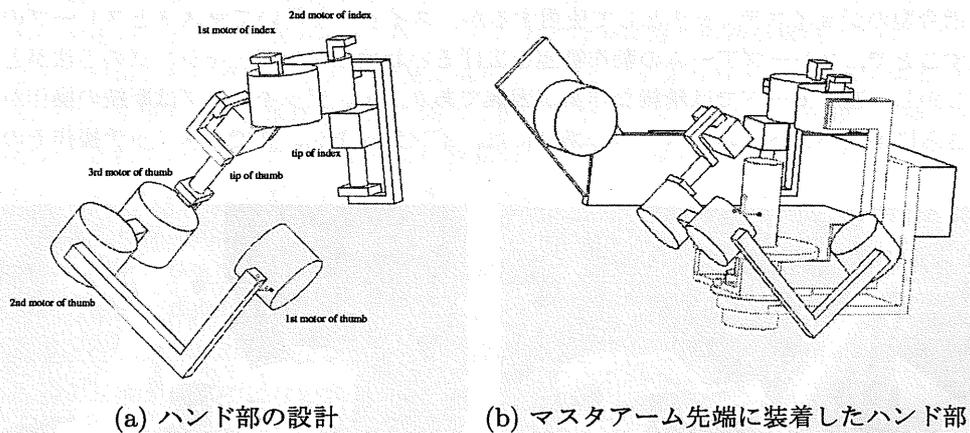


図 2: 実験の様子



(a) ハンド部の設計

(b) マスタアーム先端に装着したハンド部

図 3: 設計した 3 次元空間作業用マスタハンド

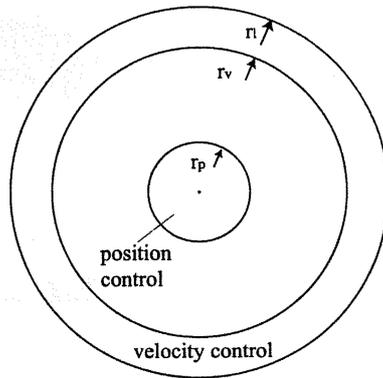


図 4: 制御モードの切り替えのための領域

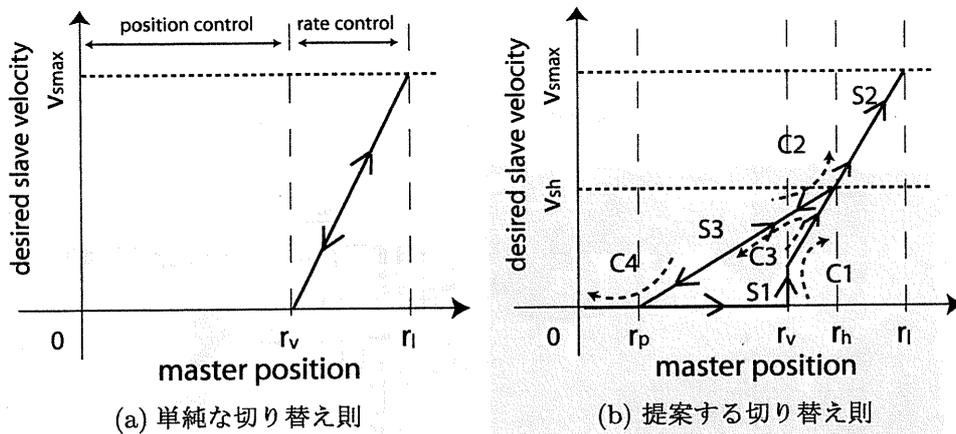


図 5: 位置モードと速度モードの切り替え則

不可能となる可能性がある。そこで本研究では、位置モードと速度モードを組み合わせた新たな制御法を提案した。

ここで図 4 に示すように、マスタアームの動作領域が半径 r_l の円形であった場合を考える。位置モードと速度モードを組み合わせる最も単純な方法として、図 5(a) に示すように動作領域の中心から r_v を越えた時点で位置モードから速度モードに切り替える方法が考えられる。しかしこの方法では、一旦位置モードから速度モードに移った後に再び位置モードに戻ったときにマスタアームの位置が作業領域の中心から大きくずれてしまうため、再び速度モードに切り替わってしまう可能性が高い。これは、精密な作業をスレーブの動作範囲内の数箇所で行い、その間を速度モードで迅速に移動したい場合には都合が悪い。そこで本研究では、図 5(b) に示すように一旦速度モードに移ってから再び位置モードに戻る際の境界領域を中心付近の r_p とすることにより、位置モードに戻る際には常にマスタアームが動作領域の中心付近に戻るようにした。図 6 に、提案した切り替え手法を適用した 2 次元システムでの実験結果を示す。動作範囲が制限されたマスタアームの操作により、位置モードと速度モードを切り替えながら大きな範囲でスレーブアームを操作できていることが分かる。

提案手法の有効性を検証するために、従来のインデッキング法、速度ジョイスティック法との作業性の比較を行った。まず図 7 に示すように、2 次元システム上において予備実験を行った。この実験で提案手法の問題点として (i) 速度モードから位置モードに戻る際の中心付近の領域が分かりにくい、(ii) 速度モード移行する領域はオペレータの動作意図を汲み取って可変とすべき、などが

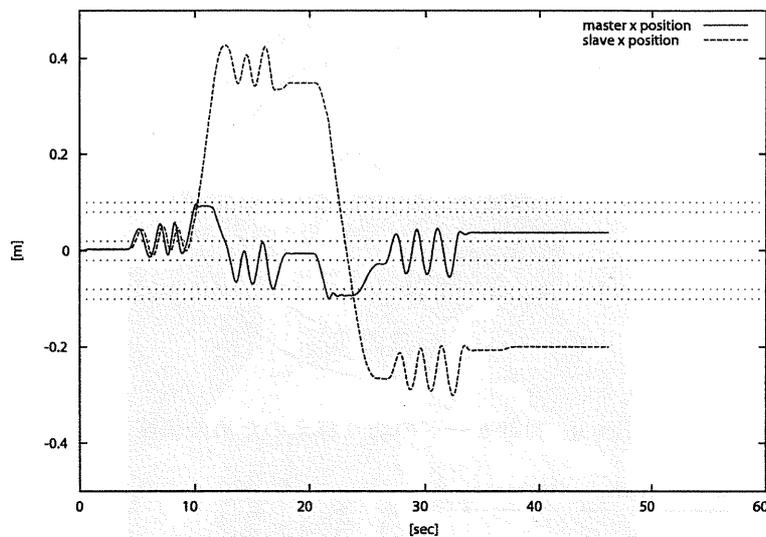
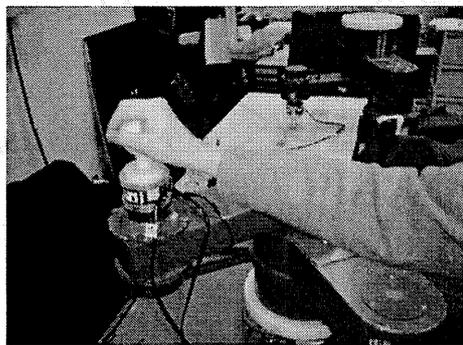
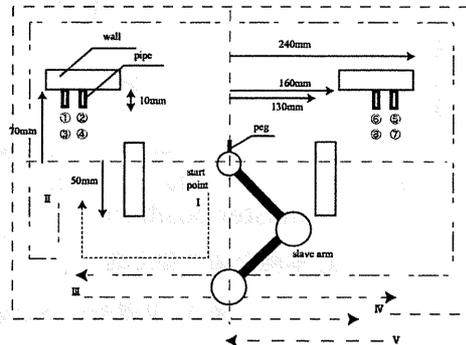


図 6: 制御モード切り替えの実験結果



(a) 実験の様子

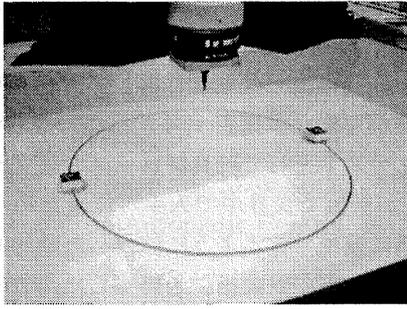


(b) 実験装置の構成

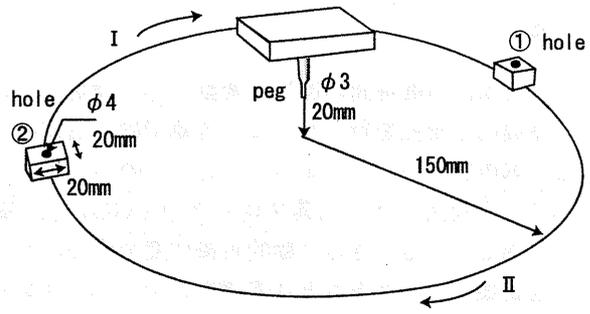
図 7: 2次元システムでの実験

明らかとなった。そこで、3次元システムでの実験では、(i) 速度モードにおいては領域中心へ向かう復元力をマスターアームに付加する、(ii) マスターアームの速度が大きいとそれだけあらかじめ設定した半径 r_l よりも小さい半径で速度モードに切り替わる、といった改良手法も同時に検討することとした。

図 8 に、3次元実験の環境を示す。スレーブアーム先端に直径 3[mm] のペグを装着し、環境中には半径 150[mm] の円周上に 2箇所直径 4[mm] のホールを配置した。一方のホールから円周上を回ってもう一方のホールにペグを挿入するという作業を繰り返して、作業時間を計測して作業性を評価した。提案手法と 2つの改良法を加えた合計 3種の提案手法と、従来法としてインデッキング法及び速度ジョイスティック法を比較した。図 9 に、実験結果を示す。4人の被験者について実験が行われ、グラフは左から被験者 1 によるインデッキング法、速度ジョイスティック法、提案手法、提案手法+改良法 1、提案手法+改良法 2 であり、以下被験者 2, 3, 4 と同様である。どの被験者においても速度ジョイスティック法では多くの時間を要しており、ペグ挿入作業のような精密な作業には速度ジョイスティック法は不向きであることが分かる。提案手法とインデッキング法との間には、要した時間では優位な差は出なかったが、提案手法ではマスターアームの移動距離が、速度ジョイスティック法と同程度であったのに対し、インデッキング法ではこの距離が



(a) 実験環境の外観



(b) 実験環境の構成

図 8: 3次元システムでの実験環境

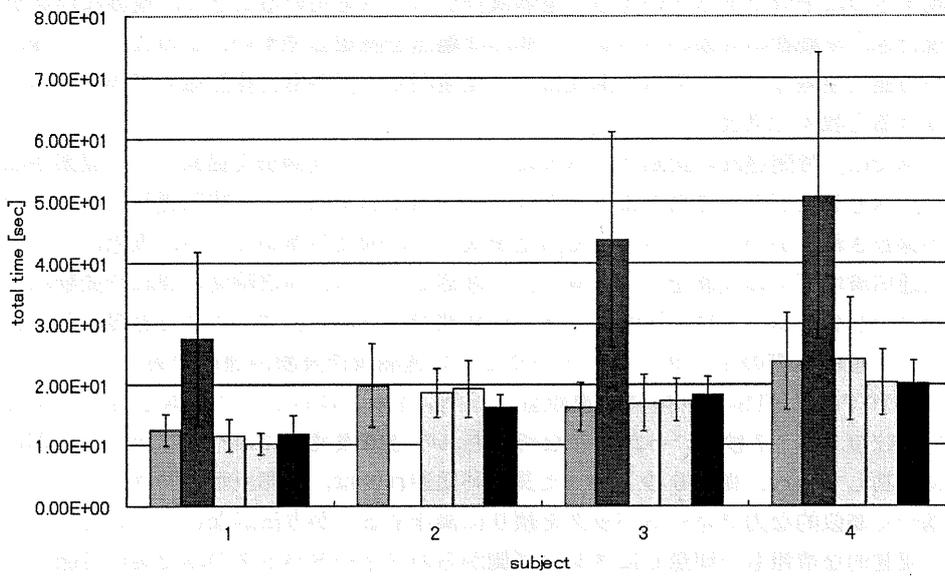


図 9: 3次元実験の結果

非常に大きくなっており、操作者の疲労を招く原因となりうる。スレーブアームの速度に制限がある場合や、移動距離がさらに長くなった場合には、作業時間においても提案手法とインデッキング法とで差が生じてくるものと思われる。

5 まとめ

本研究では、通信時間の遅れと変動を伴う環境下での遠隔操作法の確立を目指して、種々の視点からの基礎的な研究を行った。まず1章では、器用な作業が可能な多指型マスタ・スレーブハンドの設計・試作を行い、テレオペレーションのベンチマークテストとして玩具ブロックの組立作業を用いることを提案した。玩具ブロック (LEGO) は、品質が一定で世界中で入手可能なためベンチマークに適している。さらに動的可操作度を多指ハンド系に適用できるように拡張した動的多指可操作度を提案し、これをもとに多指型のマスタ・スレーブハンドの設計指針を提案した。この評価指標を用いて、幾つかの候補の中から最も評価の高い関節配置 (リンク長の配分比とリンクの取り付け位置) を選び、さらに評価値が最も良くなるような最適リンク長を算出した。ある器用な作業が遠隔操作で実現された時、スレーブ側の機構、センサを含めたシステムは、自律化させて同じ作業を実現するのに十分であるといえる。遠隔操作システムを用いることで、複雑な作業が比較的簡単に実現でき、操縦者の立場からスレーブ側の問題点を特定しやすい。このように、器用な組み立て作業が可能な遠隔操作システムの開発は、一見遠回りながらも自律型組立て作業ロボットの基盤ともなりうると我々は考えている。

次に2章では、時間遅れの変動下でも安定なバイラテラル制御法を提案した。提案手法は、散乱理論をベースとしながらも従来のように保守的な対処法ではなく、時間遅れの変動下でも厳密に安定性が保証され、かつシステムの性能劣化を最低限に抑える事ができる。実際にインターネットを模した通信環境下での実験を行い、有効性を確認している。通信時間の遅れや変動は、インターネットなどの計算機ネットワークを介した通信経路では避けられず、ここで提案した手法への期待は大きい。今後は実際のインターネットを介しての遠隔操作実験が課題である。

続いて3章では、ETS-VII(技術試験衛星 VII 型) 搭載のロボットアームを用いた遠隔制御実験を行ない、往復6秒~7秒といった大きな時間遅れの通信環境下でのバイラテラル制御による種々の作業に成功している。従来6秒といった長い時間遅れでは、予測表示の助けを借りたり、環境モデルに基づく擬似的な力フィードバックを頼りに操作するしか方法がないとされていたが、作業によっては視覚的な情報も一切無しにスレーブ側からのフィードバックのみで実行可能なことが示された。本実験から、バイラテラル制御の時間遅れに明確な上限はなく、与えられたタスクの難易度に依存するという極めて自然な知見が得られた。また筆者らは本実験の経験から、既存の通信インフラでの時間遅れに対処するのではなく、ロボット遠隔操縦を考慮した新たな通信インフラを構築するという発想の転換が大事ではないかと考えている。

最後に4章では、3次元空間作業用マスタ・スレーブ遠隔操縦システムを開発し、さらに動作範囲に制限のあるマスタアームによる遠隔操縦法を提案し、この制御法の実験的検証を行った。コンパクトなマスタ装置は、設置面積の制限のある宇宙船内や災害現場などで迅速に設置したい場合などに有効である。ここでは試作した3次元空間作業用マスタ・スレーブ遠隔操縦システムを用いて、提案する遠隔操縦法の操作性を実験的に評価した。1章で提案した玩具ブロックの組立実験を行うには3次元操作が可能なマスタスレーブハンドを付加しなければならない。本研究では、既に開発した3次元空間作業用マスタ・スレーブ遠隔操縦システムに付加できるような3次元操作用マスタスレーブハンドの設計も行った。実際のハンドの製作及び3次元でのベンチマークテストの実行が今後の課題である。

以上のように、本研究では通信時間の遅れと変動を伴う環境下での遠隔操作法の確立のために様々な角度からの研究を行った。これらの成果は、将来実際にインターネット等を介して器用な作業を遂行できる遠隔操作システムを構築する際の重要な基礎となるであろう。

参考文献

- [1] 横小路, 吉川: “オペレータのダイナミクスを考慮した遠隔操縦用マスターアームの可操作性”, 計測自動制御学会論文集, vol.26, no.7, pp.818-825, 1990.
- [2] R.J.Anderson and M.W.Spong: “Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay,” IEEE Trans. on Automatic Control, vol.34, no.5, pp.494-501, 1989.
- [3] 小菅, 村山: “コンピュータネットワークを介したテレオペレーション”, 電学論 C, vol.117, no.5, pp.521-527, 1997.
- [4] G.Niemeyer and J.J.E.Slotine: “Towards Force-Reflecting Teleoperation Over the Internet”, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation pp.1909-1915, 1998.
- [5] R.Oboe and P.Fiorini: “A Design and Control Environment for Internet-Based Telerobotics,” Int. J. Robotics Res., vol.17, no.4, pp.433-449, 1998.

関連文献別刷り

多指型マスタ・スレーブハンドの設計とテレオペレーションのベンチマークテスト

1. Yasuyoshi Yokokohji, Yukihiro Iida and Tsuneo Yoshikawa: "‘Toy Problem’ as the Benchmark Test for Teleoperation Systems", Proc. of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000), (Takamatsu, October 31–November 5, 2000), pp.996–1001, 2000.
2. 横小路 泰義, 飯田 行寛, 吉川 恒夫: “多指ハンド型ハプティックマスタの設計指針”, 第19回ロボット学会学術講演会予稿集, (2001年9月18日~20日, 東京都文京区), pp.183-184, 2001.
3. 横小路 泰義, 飯田 行寛, 吉川 恒夫: “遠隔操作による玩具ブロック組立実験からの身体スキルの考察”, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2001) 予稿集, (2001年12月20日~22日, 名古屋市), pp.325-326, 2001.
4. 横小路 泰義, 藤原 政記, 吉川 恒夫: “動的多指可操作性の提案 -マスタ・スレーブハンド設計指標への拡張-”, 第20回ロボット学会創立20周年記念学術講演会予稿集, (2002年10月12日~14日, 豊中市), 1E24(CD-ROM), 2002.
5. Masaki Fujiwara, Yasuyoshi Yokokohji and Tsuneo Yoshikawa: “Guideline for Designing Haptic Master Hands based on Dynamic Multi-fingered Manipulability”, Proc. of the 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, (Los Angeles, CA, March 22-23, 2003), 2003. (to appear)

時間遅れの変動下でも安定なバイラテラル制御法

6. 横小路 泰義, 今井田 卓, 吉川 恒夫: “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, (2000年5月11日~13日, 熊本県益城郡), 2P1-35-050(CD-ROM), 2000.
7. Yasuyoshi Yokokohji, Takashi Imaida and Tsuneo Yoshikawa: “Bilateral Control with Energy Balance Monitoring Under Time-Varying Communication Delay”, Proc. of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (San Francisco, CA, April 24-28, 2000), pp.2684–2689, 2000.
8. 横小路 泰義, 辻岡 照泰, 吉川 恒夫: “時間遅れの変動下でも安定なバイラテラル制御による遠隔操作実験”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'01講演論文集, (2001年6月8日~10日, 高松市), 2P2-K2(CD-ROM), 2001.
9. Yasuyoshi Yokokohji, Teruhiro Tsujioka and Tsuneo Yoshikawa: “Bilateral Control with Time-Varying Delay including Communication Blackout”, Proc. of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, (Orland, FL, March 24-25, 2002), pp.285- 292, 2002.

大きな通信時間遅れの下での直接バイラテラル制御による技術試験衛星 VII 型搭載ロボットアームの地上遠隔操作実験

10. 今井田 卓, 横小路 泰義, 土井 利次, 小田 光茂, 吉川 恒夫: “大きな通信時間遅れの下での地上からのバイラテラル遠隔操作の操作性評価”, ETS-VII「おりひめ」「ひこぼし」実験成果報告会前刷集, (2000年3月14日, 東京都), pp.185-194, 2000.
11. 今井田 卓, 横小路 泰義, 土井 利次, 小田 光茂, 吉川 恒夫: “直接バイラテラル制御による ETS-VII 搭載ロボットアームの地上遠隔操作実験”, 第 18 回ロボット学会学術講演会予稿集, (2000年9月12日~14日, 草津市), pp.1371-1372, 2000.
12. Takashi Imaida, Yasuyoshi Yokokohji, Toshitsugu Doi, Mitsushige Oda and Tsuneo Yoshikawa: “Ground-Space Bilateral Teleoperation Experiment Using ETS-VII Robot Arm with Direct Kinesthetic Coupling”, Proc. of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (Soul, Korea, May 21-26, 2001), pp.1031-1038, 2001.
13. Takashi Imaida, Yasuyoshi Yokokohji, Toshitsugu Doi, Mitsushige Oda and Tsuneo Yoshikawa: “Ground-Space Bilateral Teleoperation of ETS-VII Robot Arm by Direct Bilateral Coupling under 7-sec Time Delay Condition”, Proc. of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space (i-SAIRAS 2001), (Montreal, CANADA, June 18-22, 2001), CD-ROM, 2001.
14. 今井田 卓, 横小路 泰義, 土井 利次, 小田 光茂, 吉川 恒夫: “大きな通信時間遅れの下での直接バイラテラル制御による技術試験衛星 VII 型搭載ロボットアームの地上遠隔操作実験”, 日本ロボット学会誌, vol.21, no.4, 2003. (掲載予定)

3次元空間作業用マスタ・スレーブ遠隔操縦システムの開発と動作範囲に制限のあるマスタアームによる遠隔操縦法

15. 横小路 泰義, 廣瀬 良二, 吉川 恒夫: “動作範囲に制限のあるマスタアームによる遠隔操縦法”, 第 20 回ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集, (2002年10月12日~14日, 豊中市), 3F24(CD-ROM), 2002.

その他 (総合論文, 講習会資料, 解説等)

16. 横小路 泰義: “仮想環境への視覚/力覚インターフェイスとその応用 -テレオペレーションから機械メディアへの展開-”, 日本機械学会研修会: VR とロボメカ技術による次世代テレコミュニケーション (ロボティクス・メカトロニクス部門 企画), (2000年11月29日, 吹田市), pp.27-39, 2000.
17. Yasuyoshi Yokokohji: “Toward Mechano-Media from Teleoperation,” Proc. of Workshop on Advances in Interactive Multimodal Telepresence Systems, (Munich, Germany, March 29-30, 2001), pp.3-20, 2001.
18. Yasuyoshi Yokokohji, Takashi Imaida, Yukihiro Iida, Toshitsugu Doi, Mitsushige Oda and Tsuneo Yoshikawa: “Bilateral Teleoperation: Towards Fine Manipulation with Large Time

Delay," Experimental Robotics VII (D.Rus and S.Singh Eds.), Springer-Verlag, LNCIS 271, pp.11-20, 2001.

19. 横小路 泰義: "複合現実感とテレロボティクスにおける視覚/力覚インタフェース", 計測自動制御学会関西支部シンポジウム講演論文集, (2002年10月25日, 吹田市), pp.19-22, 2002.