

受動性に基づく可変スケール型とマルチラテラル型 テレオペレーションシステムの構築と評価

菅野 貴皓

平成25年

Abstract

Ensuring the stability of teleoperation systems is a challenging problem in the field of robotics, since such systems are in contact with human operators and environments. Passivity, i.e. a system does not output extra energy than that is input, is an effective property for such teleoperation systems. If a controller is designed to be passive under the condition that the operator and environment are passive, the passivity of the whole system or the system stability is guaranteed. In this thesis, control methods of several teleoperation systems are designed based on passivity.

First, controller of variable-scaled teleoperation system is designed. Variable-scaled teleoperation allows the operator to adjust the velocity scale and force scale between the master arm and the slave arm. The control method is based on scattering transformation, which deals with the passivity condition as a $\mathcal{H}_\infty$ control problem. Gain-scheduled $\mathcal{H}_\infty$ control is introduced to guarantee the robust stability against the change of scaling parameters. A systematic way to adjust the weights on control objectives is proposed to obtain a controller with good performance.

Usability tests on variable-scaled teleoperation are conducted in order to confirm if it is still effective even with extra burden on the operator to adjust scaling during the task.

Next, a method to compensate for the position drift in wave-variables-based bilateral control is proposed. Wave-variables guarantee stability against arbitrary length of communication time delay if it is constant. If the time delay is not constant, however, the system may be unstable or position drift occurs due to the distortion of the waveform. A conventional position drift compensation using wave-integral-error feedback is reformulated so that the compensation terms include the absolute position error. By using the proposed method, not only the position drift due to the time-varying delay but also that due to the numerical integration error are compensated. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

Finally, multilateral teleoperation system, which allows the transmission of position and force information among three or more manipulators, is designed. A multilateral control method is proposed based on wave-variables. A wave node, which connects multiple wave-transmission-lines, is introduced so that the operators can manipulate the remote object as if the operators are touching the environment using a branched soft rod. A method to set the priority of each master is also proposed. It simply inserts a virtual nonlinear spring to limit the input force from the operators. The

best form of nonlinear spring is determined experimentally.

謝辞

まず、本論文の主査を引き受けて頂いた松野文俊教授と副査を引き受けて頂いた樫木哲夫教授、藤本健治教授に感謝の意を表します。松野教授には、研究会などの場で私の研究について深い議論をして頂き、様々なアドバイスをいただきました。

また、神戸大学の横小路泰義教授に感謝の意を表します。横小路教授には、京都大学に在籍されていた時代から研究の進め方やテレオペレーション制御の理論について丁寧な指導をいただき、また、神戸大学に異動されてからも研究指導委託という形で私を神戸大学に受け入れ、引き続きご指導いただきました。また、マルチラテラル・テレオペレーションという研究テーマのアイデアを頂いたほか、実験装置の製作といった細かな点においても様々な助言をいただきました。

また、神戸大学での研究会などで議論をして頂いた神戸大学の深尾隆則准教授に感謝いたします。

Katholieke Universiteit Leuven の Emmanuel B. Vander Poorten 氏には、研究に用いたソフトウェアや実験装置の使用法のほか、論文執筆についても多大なる助言をいただきました。また、Vander Poorten 氏とご家族の皆様には、私がベルギーに滞在している間の生活についてサポートをいただき、ベルギーの文化についても色々と教えていただきました。この場を借りて感謝いたします。

京都大学工学部の技術職員の佐藤裕司氏には、研究を進めるにあたって欠かせない実験装置の設計・製作や機器の購入などに際してお手伝いいただきました。ここに感謝の意を表します。

また、研究室の事務手続きに関して様々なサポートを頂いた京都大学事務補佐員の北村瑞絵氏、神戸大学事務補佐員の長瀬まどか氏に深く感謝いたします。

京都大学メカトロニクス研究室の山本裕敏氏、土橋宏規氏、木原康之氏、さらに神戸大学複雑系機械工学研究室の佐伯一夢氏、吉田武史氏には数多くの議論をして頂きました。また、神戸大学の後輩である武藤正吾氏と山根孝規氏には、私と共にテレオペレーションの研究に取り組み、研究の進展に大きく貢献していただきました。また、研究室のメンバーの皆様には、度々ユーザビリティテストに協力していただいたほか、普段から私の心の支えともなっていました。ここに感謝の意を表します。

また、本研究の遂行にあたり、特別研究員（DC2）として研究費と経済的な支援を頂いた日本学術振興会に感謝いたします。

最後に、私を精神的な面や経済的な面で支えていただいた私の家族と親戚の皆様にも深く感謝いたします。

目次

第 1 章	緒言	7
1.1	遠隔操縦型ロボットシステム	7
1.2	微細作業のためのテレオペレーション	8
1.3	計算機ネットワークを介したテレオペレーション	10
1.4	マルチユーザ・テレオペレーション	12
1.5	本研究の目的	13
第 2 章	オペレータと環境の不確かさを考慮した可変スケールバイラテラル制御	17
2.1	はじめに	17
2.2	制御対象の定式化	20
2.3	ゲインスケジューリング制御器の設計	27
2.4	スケール比依存重みの導入	34
2.5	コントローラの設計手順	36
2.6	提案手法の効果の検証	37
2.7	制御性能確認実験	42
2.8	おわりに	49
付録 2.A	L_2 ノルムの定義	51
付録 2.B	一般化制御対象の係数行列	51
付録 2.C	線形化アルゴリズム	52
第 3 章	可変スケールテレオペレーションのユーザビリティ評価	53
3.1	はじめに	53
3.2	視覚システムとの統合とユーザビリティ評価	54
3.3	おわりに	66
付録 3.A	ユーザビリティ評価実験のアンケート内容	67
第 4 章	変動時間遅れに対応した波変数に基づくバイラテラル制御	69

4.1	はじめに	69
4.2	波変数に基づくバイラテラル制御	71
4.3	位置ドリフトの補償	72
4.4	エネルギー収支モニタによる受動性の保証	76
4.5	実験	77
4.6	おわりに	83
第 5 章	計算機ネットワークを介したマルチラテラル・テレオペレーション	87
5.1	はじめに	87
5.2	波変数に基づくマルチラテラル制御	89
5.3	波変数の積分誤差への対処法	91
5.4	制御性能の評価実験	92
5.5	オペレータ入力の競合に対処する制御手法	98
5.6	競合回避に関する実験	102
5.7	おわりに	106
第 6 章	結言	109
6.1	本論文のまとめ	109
6.2	今後の課題	111
参考文献		113

第 1 章

緒言

1.1 遠隔操縦型ロボットシステム

現在，工場での組み立て作業などにおいて産業用ロボットアームの導入が進んでおり，その台数は世界で 100 万台を超えている [45]．自律型のマニピュレータとしては，1961 年の Unimate が世界初の産業用ロボットとされている．一方で，操縦型のマニピュレータはさらに古い歴史を有しており，1940 年代から手動操縦型のマスタ・スレーブ型マニピュレータが開発され，主に原子力プラント内のホットセルでの作業に用いられてきた [44]．マスタ・スレーブ方式のテレオペレーションシステムは，オペレータがマスタアームの手先位置を持って動かすとスレーブアームの手先位置がそれに追従するようなシステムであり，ロボットの構造を意識することなく直感的に操縦することが可能である．また，環境からの反力をオペレータにフィードバックすることによって，作業対象をオペレータが実際に触っているかのような感覚で作業を行うことができる．

工場での作業などは，作業対象があらかじめ治具などで固定されていたり，部品形状があらかじめ分かっているため，事前に動作をプログラムすることで十分に作業をこなすことができる．しかしながら，現在のコンピュータが人間と同等の環境認知能力や判断能力を有しているとは言い難く，複雑な環境での作業においては依然として人間が操縦するロボットシステムが優位であると考えられる．その例の一つとして，極限環境での作業が挙げられる．原子力プラントや宇宙空間，海底といった人間が容易に立ち入ることができず，かつ作業対象が複雑または未知であり自律型ロボットでの作業ができない場合には，遠隔操縦型ロボットが実際に起用されている．マスタ・スレーブ方式のほうが直感的に作業が可能であるにもかかわらず，現在極限環境や災害現場に投入されている遠隔操縦ロボットはジョイスティックやコンピュータ上の GUI で操縦するものが主流である．マスタ・スレーブ方式のロボットを現場に投入するにあたり，解決すべき課題がいくつか存在する．マスタアームはモータや位置センサを搭載するため，ジョイスティックよりも高価

である．そのため，様々なロボットの操縦装置に手軽に導入できるような安価なデバイスの開発が望まれる．さらに大きな課題として挙げられるのが安定な制御手法の確立である．力覚フィードバックのあるマスタ・スレーブシステムは，動特性の不確かなオペレータと環境に接する．例えば，オペレータの腕や手は複雑な筋骨格系からなっており，その動特性は非線形である．さらに，オペレータは能動的に筋力を発生させたり腕の剛性を変化させることができる．また，スレーブアームは自由空間中を移動している場合もあれば，剛体壁に接触している場合もある．すなわち，環境のインピーダンスはゼロから無限大まで変動しうることになる．このようにオペレータと環境のインピーダンスは幅広く変動するため，ロバスト安定な制御則を設計することは難しい．さらに，マスタとスレーブが離れた場所に設置されており，通信の時間遅れが存在するような場合には安定な制御則の構築はさらに難しくなる．

1.2 微細作業のためのテレオペレーション

前節で挙げたような災害救助用のロボットは，一般的にジョイスティックやキーボード，あるいはコンピュータ画面上の GUI を通して操縦されており，現時点ではマスタ・スレーブ型のものはほとんど用いられていない．

一方で，医療ロボットなどの分野においてはマスタ・スレーブ方式が用いられつつある．従来から行われてきた内視鏡手術は，切開する量が少なく患者への負担が軽減されるという利点があるものの，高度な技能が必要な手術であり医師の熟練が要求される．マスタ・スレーブ方式の手術システムを用いれば，医師は従来の開腹手術と同様に手を動かすだけで内視鏡手術ができるようになるため，手術時間の短縮や安全性の向上が可能になると期待される．マスタ・スレーブ型手術ロボットの代表例としては，Intuitive Surgical 社の内視鏡手術ロボット da Vinci [21] が挙げられる．da Vinci はマスタ側のコンソールに双腕のマスタアームが用いられており，2本の鉗子をそれぞれマスタ・スレーブで操縦することが可能である．また，スレーブ側にはステレオカメラが搭載されており術部を立体視することができる．

マスタ・スレーブ型手術ロボットの大きな特徴として，マスタアームの動作にある一定の倍率（スケール比）を掛けてスレーブの動作を縮小していることが挙げられる．このようなシステムは，スケールドテレオペレーションシステムと呼ばれており，オペレータはあたかも拡大された環境を操作しているかのように作業を行うことができるようになる．このような技術は，今後は手術だけでなく，細胞のマニピュレーションやマイクロマシンの試作などへの応用も期待される．

従来のスケールドテレオペレーションでは，位置と力のスケール比は一定であった．しかしながら，マイクロテレオペレーションにおいてはスケール効果の影響を受けるので，

単純に位置と力がある一定のスケール比でスケーリングするだけでは微細環境を直感的に操作することが難しくなる場合がある．例として，位置のスケール比を ϕ ，すなわち環境の位置情報を ϕ 倍に拡大して表示するテレオペレーションシステムを考える．環境中のバネを，同じ弾性係数で大きさが ϕ 倍のバネであるかのように提示するためには力のスケール比を ϕ^2 に設定する必要がある．一方で，ある質量を同じ密度で大きさが ϕ 倍の質量として提示するには力のスケール比を ϕ^4 に設定しなければならない．したがって，提示したい物理量に応じて最適な位置と力のスケールは異なることになる．このようなスケール効果を補償するには，環境に仮想的な質量などのインピーダンスを加える方法 [11][64] などが提案されているが，これらの方法は環境の質量などが事前に分かっている場合にのみ適用できる手法であり，環境が未知の場合には場面に応じて力のスケール比を適宜調整するという対処が必要になると考えられる．

スケールドテレオペレーションのもう一つの課題として，作業対象のレンジが広いことが挙げられる．例えば，手術において切除したい病巣が複数箇所に散らばっているような場合には，病巣の位置を特定してその位置までアームを近づけるまでの間は広範囲を見渡し，かつ素早くアームを動作させた方が効率が良い．しかし，実際に病巣にメスを入れる時点では，病巣部分を拡大して慎重に作業するほうが望ましい．また，力のスケール比についても，スケール効果の影響を低減するために位置のスケール比の変化に合わせて調整することが望ましい．さらに，大きな力が必要な場合にはスケール比を小さくし，繊細な力加減が必要な場面ではスケール比を大きくするといったように，位置のスケール比とは独立に設定できることが望ましい．

上記では微細作業における例を挙げたが，マスタの動作を拡大してスレーブに伝える重作業についても同様のことがあてはまる．例えば建設現場においては，柱や梁などの重量物を運搬する時はスケールを小さくして操縦者の負担を軽減し，実際に組み立てる際にはスケール比を大きくして精密な位置決めを行い，かつ部材に無理な力が加わらないようにするといったことが考えられる．

このようなことから，位置と力のスケール比を作業中に変更可能な可変スケールテレオペレーションが有効であると考えられる．これまでに提案されている可変スケールテレオペレーションとしては，Dubey らによるもの [12] が挙げられる．このシステムは，マスタとスレーブの速度のスケール比を可変とし，位置決めが必要な領域ではスケール比を自動的に大きくして微細動作を行いやすくするものである．Dubey らによるシステムは力覚フィードバックのないシステムであったが，Sano ら [54] や Bouknifer ら [6] は，それぞれゲインスケジューリング制御と H_∞ 制御を用いた可変スケールバイラテラル制御を提案している．

可変スケールテレオペレーションは，スケール比の変化に応じてシステムの特性が変化する時変システムである．また，システムは動特性が不確かなオペレータと環境に接す

る。したがって、システムの安定性を保証できるような制御則を確立することが大きな課題となっている。Sano らや Bouknifer らの手法では、スケール比の変動には対応できていたもののオペレータと環境の不確かさには対応できていない。

また、オペレータが手動でスケール比を調整するシステムにおいては、スケール調整のためのユーザインタフェースの設計が重要となる。スケール調整インタフェースが不適切であれば、スケール比の調整に時間を要してしまい作業効率が低下したり、誤ったスケール比を設定することによる事故の危険が生じてしまう。したがって、可変スケールテレオペレーションの実用化のためには、スケール比の変動とオペレータ・環境の不確かさに対して安定な制御則と、適切なユーザインタフェースの設計指針を確立することが必要である。

1.3 計算機ネットワークを介したテレオペレーション

近年のブロードバンドや無線 LAN などの普及に伴い、安価に遠隔操縦ロボットシステムを構築することが可能になりつつある。将来的には、モバイル通信の低価格化・高速化が進むことによって、ロボットを様々な場所に配置し遠隔操縦することが可能になることが期待される。これらの最新のネットワーク技術を利用すれば、マスタアームとスレーブアームをそれぞれ既存のネットワークに接続するだけで、従来よりも簡単にロボットの遠隔操縦システムを構築することができる。

前節までに述べたような遠隔操縦ロボットは、宇宙空間での作業や内視鏡手術などといった、特殊な用途のロボットがほとんどであったが、インターネットなどの計算機ネットワークを用いることで、テレオペレーションシステムの用途そのものが広がる可能性がある。その例として、遠隔コミュニケーションやエンタテインメントの分野が挙げられる。1990 年代にインターネットの普及が始まるとともに、Telegarden をはじめとする Web ブラウザから操縦できるロボットが多数公開され、誰もがロボットの遠隔操縦を体験することが可能となった [59]。さらに、2 体のクマのぬいぐるみをマスタ・スレーブで動作させて遠隔コミュニケーションを行う RobotPHONE が開発された [56]。また、近年ではヒトの外観に近い遠隔操作型コミュニケーションロボット「テレノイド」や「エルフォイド」が石黒らによって開発されている [47][38]。

既に製品化が進められているものとしては、Anybots 社の QB[2] などが挙げられる。QB は、車輪での移動および映像と音声の伝送が可能であるが、マニピュレータが搭載されていないため遠隔での作業には適していない。このようなコミュニケーションロボットにマニピュレータが搭載され、マスタ・スレーブで操縦できるようになることによって、あたかも自分が遠隔地にいるかのような感覚で作業を行ったり遠隔地の人と触れ合ったりすることが可能となる。舘らによって開発されている「TELESAR V」[14] は、ステレオ

カメラの他、5本指のマニピュレータや触覚センサなどを搭載しており、スレーブ側の環境を立体視し、かつ環境に触れた感覚を感じながら作業のできる臨場感の高いテレオペレーションシステムである。

インターネットなどの計算機ネットワークを介した遠隔操縦において問題になるのが通信の時間遅れである。計算機ネットワークにおいては、送信された情報が相手の端末に届くまでに複数の機器を経由するため、各々の機器内での処理による遅延が蓄積され、数十～数百ミリ秒の時間遅れが発生する。また、送信された情報が毎回同じ経路をたどる保証がないため、経路の変動によって遅れ時間が変動する。経路の変動以外にも、ネットワークの混雑度などの様々な要因で遅れ時間は変動する。

力覚フィードバックのないテレオペレーションは通信の時間遅れがある場合でも安定に動作することが多いが、オペレータに力覚を提示するバイラテラルテレオペレーションでは、従来の単純な制御則を適用するとシステムが不安定になる。手術用のテレオペレーションなどの高い安全性が要求されるシステムの場合には、信頼性の高い専用回線を導入することで遅れ時間をできるだけ小さく抑えるという解決策が考えられるが、コミュニケーションロボットではコストの面から専用回線を使うことは現実的ではなく、また極限作業ロボットや災害救助ロボットにおいては物理的な制約から専用回線を引くことが難しい。したがって、時間遅れおよびその変動に対して安定な制御則を確立することが不可欠であると考えられる。

これまでに、通信遅延に対して安定なテレオペレーション制御手法として、様々なものが提案されている [24]。Leung らは、時間遅れをシステムの加法的不確かさとしてモデル化し、 μ 設計法を用いたロバスト制御手法を提案した [36]。また、Oboe と Fiorni は PD 制御型の制御則を導入した [48]。Sano らは、ゲインスケジュールド H_∞ 制御によって遅れ時間の変動に対処する手法を提案した [53]。これらの手法は、コントローラの設計を行う段階で最大の遅れ時間などが分かっている必要がある。遅れ時間が設計時に想定された最大遅れ時間を超えた場合、システムは不安定になる可能性がある。また、安定性を保証するために最大遅れ時間を大きく設定し過ぎるとコントローラが保守的となり、時間遅れが小さい時には制御性能の低下につながる。コミュニケーションロボットなどの、マスタとスレーブの距離がユーザの利用形態によって大きく変わるシステムでは、システムを設計する段階で遅れ時間を予測することは困難である。

Anderson と Spong は散乱変換を用いることによって、任意長の一定時間遅れに対して受動性を保証する手法を提案した [1]。この手法は、後に Niemeyer と Slotine によって「波変数」として定式化が行われた [41]。

波変数は、速度と力の線形和で表される変数である。位置や力といった情報の代わりに波変数を送受信することによって、ネットワーク通信を受動的な分布定数回路のように振舞わせることでシステムの安定性を保証する手法である。波変数に基づく制御を適用する

と、マスタアームとスレーブアームとの間をバネと質量が連なる柔軟な棒で繋いだような動特性が実現するため、オペレータはシステムの挙動をある程度直感的に予測することが可能である。

しかしながら、波変数には速度情報が含まれているものの絶対的な位置情報は含まれていない。時間遅れが変動すると、送信した波形が歪んでしまうため、波変数の積分値が送信側と受信側で一致しない。したがって、波変数の積分誤差によってマスタとスレーブとの間の位置のドリフトが発生する。また、波形の歪みだけでなく、数値計算の誤差によっても位置ドリフトは発生する。波変数に基づく制御では、一般に波変数から速度情報を取り出し、それを積分して目標位置を計算するが、積分の数値計算に誤差が生じることで位置のドリフトが起こる。数値計算の誤差は、変動時間遅れによる誤差に比べると蓄積が非常に遅いため、短時間の作業では問題にならないが、数時間に及ぶ作業ではこの影響は無視できない。また、変動時間遅れの下では、システムの受動性は保証されない。

変動時間遅れに対して受動性を保証する手法や、位置のドリフトを補償する手法については、それぞれ様々なものが提案されているものの、変動時間遅れによる位置ドリフトと数値積分の誤差による位置ドリフトの両方に対応した手法はまだ確立していない。

1.4 マルチユーザ・テレオペレーション

従来のバイラテラル・テレオペレーションではマスタアーム1台とスレーブアーム1台との間で位置情報と力情報をやり取りしていた。一方で、文字情報、音声、映像といった情報については、3台以上のコンピュータの間で伝送することが可能である。現在広く用いられているビデオ通話やテキストチャットのソフトウェアには、グループ通話機能やグループチャット機能が搭載されているものが数多く存在する。

テレオペレーションの分野でも、3台以上のアームの間で情報をやり取りするマルチラテラル・テレオペレーションシステムの研究が近年進められている。マルチラテラル・テレオペレーションは、複数台のマスタと1台のスレーブを用いた操縦トレーニングシステム [46] や、1台のマスタによって群ロボットを操縦するシステム [16] などへの応用が可能である。操縦トレーニングシステムは、作業に熟練したオペレータと初心者のオペレータが同時にテレオペレーションシステムを操縦することによって、初心者のオペレータが徐々にロボットの操縦や作業の手順を学習するというシステムである。これは、書道の先生と生徒が1本の筆を同時に持って筆の運びを教えることに似ているが、マルチラテラル・テレオペレーションでは全てのアーム間で完全に位置と力の追従を達成することはできないため、このようなシステムがどの程度有用であるかは未知数である。

また、2人のオペレータが協調して操縦することによって、旅客機を機長と副操縦士が同時に操縦したり、自動車教習において教官がブレーキを踏むのと同様な感覚で、ロボッ

トの安全性を向上することができる。特に遠隔操縦ロボットにおいては、ヒューマンエラーによる作業ミスだけでなく、マスタアームの故障や通信途絶などによって一方のマスタが使用不能になる可能性も高いため、マスタを冗長化することで、片方のマスタにトラブルが発生しても作業を継続することが可能になる。

これまでに、いくつかのマルチラテラル制御が提案されている。例えば、Nudehi ら [46] は、 $\mathcal{H}_\infty$ 制御を用いて手術用ロボットのトレーニングシステムを構築している。また、Sirouspour ら [58]、Katsura ら [29] はそれぞれ $\mathcal{H}_\infty$ 制御および外乱オブザーバに基づいた制御則を提案している。これらの制御則は、制御系を設計する際に時間遅れの長さについての情報が必要であったり、そもそも時間遅れに対する安定性が保証されていないなど、遅れ時間が事前に予測できない計算機ネットワークを介したテレオペレーションへの適用は難しい。一方、Carignan ら [7] は、波変数に基づいたテレオペレーション制御を提案し、任意長の一定時間遅れに対して安定性を保証する制御則を構築したが、システムの構成は2マスタ・1スレーブに限られており、3台以上のマスタを用いたり、ロボットの数が変動するようなシステムには対応していない。

1.5 本研究の目的

本研究では、可変スケール型のバイラテラル・テレオペレーションについて、ロバスト制御理論に基づいて受動的なオペレータと環境に対して安定な制御則の設計および実験システムを構築してのユーザビリティテストを行う。また、変動時間遅れのあるバイラテラル・テレオペレーションについて、波変数に基づいた制御則を適用した際に起こる位置ドリフトを補償する制御則を構築する。さらに時間遅れのあるマルチラテラル・テレオペレーションについて、波変数に基づき、任意の台数のアームを接続しても受動性が保証される制御則の提案とシステムの評価を行う。

2章では、可変スケールテレオペレーションについて、散乱変換とゲインスケジュールド $\mathcal{H}_\infty$ 制御を用いることで、任意の受動的なオペレータと環境に対してロバスト安定性を保証する制御系の設計を行う。この理論は、藤原ら [18] によって提案されていたものの、制御系に対する重み付けが不適切であったため、十分な位置と力の追従を達成できていなかった。また、Vander Poorten は、制御性能を向上するためにオペレータのモデルの導入や重みの調整を試みているが [61]、重みの設定方法に関しては十分に体系的であったとは言えない。また、実機において十分な追従を達成するには至っていない。本論文では、制御目的を変更してコントローラの次数を下げたほか、力の制御目的についてはバネ特性を持たせることで最適化計算の数値的安定性を向上させた。さらに、スケール比に応じて変化するような重みを導入し制御性能の向上を図った。また、制御目的の重みの決定方法について考察を行い、位置や力の追従性とオペレータ・環境に対するロバスト安定性

がトレードオフの関係にあることを確認した。また実験に用いたスレーブアームには摩擦をはじめとする非線形なモデル化誤差が含まれており、位置と力の追従が十分ではない。本研究においてはこれらのモデル化誤差を補償してスレーブアームの動特性を理想的な線形モデルの動特性に近づけることで、提案する手法が実機でも十分な追従性が得られることを確認した。

3章では、可変スケールテレオペレーションのユーザビリティについて議論する。まず、ズーム機構を持つマイクロスコープをスレーブ側に配し、速度のスケール比とマイクロスコープのズーム倍率を連動させた VST システムを試作した。スレーブ側の力に大きなレンジが必要となるタスクを考案し、位置スケール比と力スケール比の双方が可変となる VST システムのユーザビリティ評価実験を行った。実験の結果から、スケールを可変とすることが有効であるかどうかを確認し、スケール調整インターフェースの設計について議論する。

4章では、波変数に基づくバイラテラル制御において、遅れ時間の変動と数値積分の誤差の双方によって引き起こされる位置ドリフトを補償する制御則の検討を行う。これまでに提案されており、変動時間遅れによるドリフトを補償することが可能な積分誤差フィードバック [65] に対して、絶対位置情報のフィードバック項が現れるように式変形を施すことによって、数値誤差にも対応できるように拡張する。積分誤差フィードバックおよび等価な絶対位置フィードバックは、時間遅れが一定の時には補償を行わないため、波変数が本来持つ動特性への影響を最小限に抑えられる。さらに、時間遅れの変動や通信途絶が存在する環境下でも受動性が保証できるように、システムのエネルギー量を監視して制御出力を停止するエネルギー収支モニタを導入する。実際の計算機ネットワークの通信遅延を再現した実験を行い、提案手法が位置ドリフトを低減していることを確認する。

5章では、マルチラテラル・テレオペレーションシステムについて、波変数に基づいた制御手法を提案する。従来の波変数に基づく制御においては、伝送路がバネと質量が連なる分布定数系の動特性を模擬しているが、提案手法では、複数の分布定数系を結合する節点を導入する。これにより、複数のオペレータが、枝分かれした柔軟な棒を持って対象物を操作するような感覚で協調作業を行うことが可能となる。また、提案手法では各アームと節点との間は従来の波変数と変わらないため、4章で導入したような位置ドリフト補償を容易に適用することが可能である。しかしながら、提案手法では、すべてのマスターアームからの入力に平等に扱われることから、用途によっては不都合が生じる場合がある。例えば、ロボットを協調して操縦する際に、片方のオペレータが誤った動きをした場合、もう一方のオペレータは反対向きに相当大きな動作指令を出さなければならない。本論文では、波変数に基づいたマルチラテラル制御においても複数のオペレータの動作に優先度を付けられる制御則を提案し、熟練度の異なるオペレータが協調して操縦する場面を想定した実験を行い、制御則の有効性を確かめる。

最後に，6 章で本論文のまとめと今後の課題について述べる．

第 2 章

オペレータと環境の不確かさを考慮した可変スケールバイラテラル制御

2.1 はじめに

可変スケールテレオペレーション (Variable-scale teleoperation: VST) は、オペレータが位置スケール比とカスケール比の双方を作業中に調節可能なテレオペレーションシステムである。VST システムはオペレータと環境という動特性が不確かなサブシステムを含んでいるだけでなく、スケール比の変化に応じてシステム自身の特性が変化する時変システムでもある。そのため、安定性を保証するような制御則の確立が重要な課題となっている。

動特性の不確かさに対処するための手法として、 H_∞ 制御や μ 設計法などのロバスト制御理論が挙げられる。例えば、Kazerooni らは力制御型のテレオペレーション制御系を H_∞ に基づく最適制御によって設計した [30]。また、Lee と Jeong はテレオペレーションシステムの位置制御と力制御に異なる設計手法を導入しているが、そのうちの力制御に H_∞ 制御を用いている [34]。また、Lee らは μ 設計法に基づくロバスト制御を提案している [35]。マスタとスレーブの位置と力に一定のスケール比を導入する固定スケールテレオペレーションについても、ロバスト制御理論が適用されている。例えば、Yan と Salcudean は固定スケールテレオペレーションに対して、位置情報と力情報の両方をフィードバックする 4 チャンネル型の H_∞ 制御を提案している [62]。また、Kim らは μ 設計法を用いてシステムの比較を行う手法を提案している [31]。その他、システム内のむだ時間要素をモデルの不確かさとして取り扱うことによって、通信の時間遅れのあるテレオペレーションにも適用可能である [36]。

しかしながら、テレオペレーションシステムにおいてはオペレータと環境の不確かさをどのように取り扱うかが大きな問題となる。オペレータは複雑な筋骨格系であり、その動

特性は非線形であるため、線形時不変な数値モデルで近似することは難しい。また、環境についても、自由空間から剛体壁まで幅広いものが考えられるため、オペレータと同様にモデル化が難しい。上に述べた手法は、いずれもオペレータと環境のノミナルモデルあるいは正確なモデルを必要とする。一方で、受動性に基づいたテレオペレーション制御においては、数値的なモデルを用いずに任意の受動的なオペレータと環境に対してロバスト安定性を保証することができる。Colgate[11]は受動的なオペレータと環境を構造的な不確かさとして表現し、 μ 解析法に基づくロバスト安定性の解析手法を示した。Colgateの研究においてはコントローラの設計はなされていなかったが、Huらは H_∞ 制御による最適コントローラの設計を行なっている[25]。また、吉川ら[67]は H_∞ 制御よりも保守性の低い μ 設計法によるコントローラ設計手法を提案した。

しかしながら、上記の手法においてはスケール比の変化は考慮されていない。可変スケールテレオペレーションについても、これまでに制御手法が幾つか提案されている。Dubey[12]らは、センサの情報や環境のモデルに応じて速度のスケール比を変化させてオペレータを支援する方法を提案したが、バイラテラル制御ではなく速度のスケール比のみを可変としている。Kosugiらは外乱オブザーバを用いた可変スケールバイラテラル制御を提案しているが、理論的な安定性保証はなされておらず、制御系の設計を実験的に行っている[33]。時変システムのロバスト制御の一つとしてゲインスケジューリング制御があり、Sanoらは変動時間遅れのあるバイラテラル制御に適用している[53]。Sano[54]らは、さらにスケール比の変化に対しても安定性を保証するため、スケール比をスケジューリングパラメータとするゲインスケジューリング制御を提案した。また、Boukhniifer[6]らはゲインスケジューリングを用いずに H_∞ 制御をベースとしたVSTシステムの制御則を提案した。しかしながら、文献[54][6]で用いられたシステムのモデルにおいては、環境の動特性は既知としているほか、オペレータの動特性についても考慮されていないため、パラメータが未知の環境に対してはこれらの手法では安定性が保証されない。藤原ら[18][19]、Vander Poorten[61]は、文献[11][67]などと同様にオペレータと環境を構造的な不確かさで表現し、スケールド H_∞ 制御とゲインスケジューリング制御を適用することで、オペレータと環境のモデルが未知であるVSTシステムを安定に動作させる制御法を提案したが、十分な制御性能のあるコントローラを得るためには重みを試行錯誤により調整しなければならない。

本章では、藤原ら、Vander Poortenの手法をベースとし、これまでの制御目的より達成が容易な介在バネ要素付きの制御目的を導入した。さらに、スケール比に応じて変化するような重みを導入し制御性能の向上を図った。また、制御目的の重みの決定方法について考察を行い、位置や力の追従性とオペレータ・環境に対するロバスト安定性がトレードオフの関係にあることを確認した。また実験に用いたスレーブアームには摩擦をはじめとする非線形なモデル化誤差が含まれており、位置と力の追従が十分ではない。本研究で用

いたアームのみならず，マイクロ環境においては低摩擦なアクチュエータが必ずしも利用できるとは限らないため， $\mathcal{H}_\infty$ 制御などの線形制御理論を用いる際には摩擦への対処が必要となる可能性が高い．本研究においては，これらのモデル化誤差を補償してスレーブアームの動特性を理想的な線形モデルの動特性に近づけることで，提案する手法が実機でも十分な追従性が得られることを確認した．

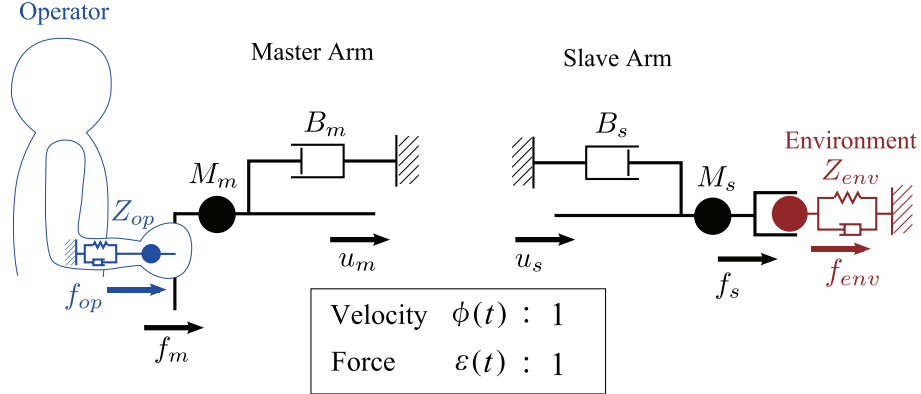


Fig. 2.1 1DOF master-slave system model

2.2 制御対象の定式化

2.2.1 理想応答の定義

Figure 2.1 のように、速度のスケール比を ϕ 、力のスケール比を ε と定義する．オペレータがあたかも環境を直接操作しているかのような感覚を得ることが理想的であるから、マスタの速度と拡大されたスレーブの速度が一致し、マスタの力と拡大されたスレーブの力が一致することが制御目的である． ϕ と ε は時間に依存するから、理想応答は、

$$\begin{aligned}\dot{x}_m(t) &= \phi(t)\dot{x}_s(t) \\ f_m(t) &= \varepsilon(t)f_s(t)\end{aligned}\tag{2.1}$$

と書ける．ここで、 x_m および x_s はマスタアームとスレーブアームの手先位置であり、 f_m はオペレータがマスタアームに加える力、 f_s はスレーブアームが環境に加える力である．ここで、理想応答を式 (2.1) ではなく位置の追従 $x_m(t) = \phi(t)x_s(t)$ で定義しても制御系の設計は不可能ではないが、この場合 ϕ が変化するとオペレータがマスタアームを動かしていないのにスレーブが動くことになるので不適切である．よって理想応答としては式 (2.1) が適当である．

2.2.2 システムのモデル

本節では、文献 [18][61] と同様の方法により、1 自由度システムのモデル化を行う．

スケールドテレオペレーションシステムは、Fig. 2.1 のように、マスタアーム、スレーブアーム及びオペレータと環境から構成される．マスタアームとスレーブアームの運動方程式は次のように書ける．

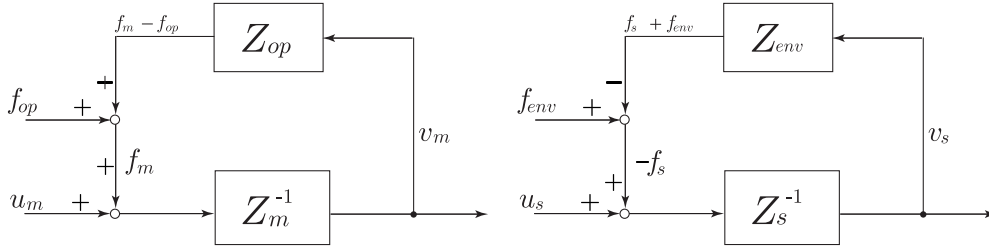


Fig. 2.2 Block diagram of coupled master/operator and coupled slave/environment

$$\begin{aligned} u_m(t) + f_m(t) &= M_m \ddot{x}_m(t) + B_m \dot{x}_m(t) \\ u_s(t) - f_s(t) &= M_s \ddot{x}_s(t) + B_s \dot{x}_s(t) \end{aligned} \quad (2.2)$$

ここで、 u_m, u_s はアクチュエータがマスタ、スレーブに加える制御入力、 M_m, M_s, B_m, B_s はマスタおよびスレーブの質量と粘性係数である。また、オペレータと環境は受動的、すなわち自らエネルギーを発しないものであると仮定する。仮に、オペレータと環境が線形時不変であるならば、これらの動特性は周波数領域で次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} F_{op}(s) - F_m(s) &= Z_{op}(s)V_m(s) \\ F_{env}(s) + F_s(s) &= Z_{env}(s)V_s(s) \end{aligned} \quad (2.3)$$

ここで、 Z_{op} および Z_{env} はオペレータと環境のインピーダンスであり、 F_{op} はオペレータが能動的に発する力、すなわち筋力に相当し、 F_{env} は環境が能動的に発する力に相当する。また、 F_m, F_s, V_m, V_s はそれぞれ $f_m, f_s, \dot{x}_m, \dot{x}_s$ のラプラス変換である。ここで、 f_{op}, f_{env} はシステムの状態に依存しないものと仮定する。 f_{env} が存在する場合の例として、操作対象が心臓などの運動する器官である場合や、スレーブがグラインダなどの電動工具を持っている場合などがある。すなわち、オペレータと環境が発する力 f_m および $-f_s$ は、受動的なインピーダンスによる反力とシステムの状態に依存しない外乱 f_{op}, f_{env} の和として扱う。これらのモデルのブロック図を Fig. 2.2 に示す。図中の Z_m, Z_s はそれぞれマスタアームとスレーブアームのインピーダンスであり、

$$Z_m(s) = M_m s + B_m, \quad Z_s(s) = M_s s + B_s \quad (2.4)$$

と表される。また、 $v_m = \dot{x}_m, v_s = \dot{x}_s$ である。

2.2.3 オペレータと環境の散乱行列表現

オペレータと環境は、一般にはモデルの不確かなものであり、特に環境については、実際に様々な環境との接触が考えられるために数値的なモデル化は難しい。そのため、マスタ・スレーブシステムの制御においてはオペレータと環境は任意の受動的なシステムと仮

定する場合が多い。\$H_\infty\$ 制御において受動性の概念を取り扱うために、ここでは散乱行列表現 [63] を用いる。まず、Fig. 2.3 において、散乱変換されたオペレータ・環境への入力波 \$a_m, a_s\$ と、逆にオペレータ・環境からの出力波 \$b_m, b_s\$ を、

$$a_m \triangleq \{(f_{op} - f_m) + \dot{x}_m\}/2, \quad a_s \triangleq \{(f_{env} + f_s) + \dot{x}_s\}/2 \quad (2.5)$$

$$b_m \triangleq \{(f_{op} - f_m) - \dot{x}_m\}/2, \quad b_s \triangleq \{(f_{env} - f_s) + \dot{x}_s\}/2 \quad (2.6)$$

と定義する。これを変形すると、

$$\begin{bmatrix} a_m \\ f_m - f_{op} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_m \\ \dot{x}_m \end{bmatrix} = T_m \begin{bmatrix} b_m \\ \dot{x}_m \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} a_s \\ f_s + f_{env} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_s \\ \dot{x}_s \end{bmatrix} = T_s \begin{bmatrix} b_s \\ \dot{x}_s \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

となり、オペレータと環境は Fig. 2.3 のようなブロック図で表される。また、Fig. 2.3 の \$S_{op}, S_{env}\$ は、反射係数と呼ばれ、\$b_m = S_{op}a_m\$, \$b_s = S_{env}a_s\$ の関係を満たす。この反射係数はインピーダンスを用いて

$$S_{op} = \frac{Z_{op} - 1}{Z_{op} + 1} \quad (2.9)$$

$$S_{env} = \frac{Z_{env} - 1}{Z_{env} + 1} \quad (2.10)$$

のように表され、これは式 (2.5), (2.6) の関係式からも確かめられる。ここで、オペレータと環境を受動的なもの（すなわち \$Z_{op}, Z_{env}\$ は正実関数）と仮定すると、付録 2.A から

$$\begin{aligned} \|a_m\|_2^2 - \|b_m\|_2^2 &= \int_0^\infty a_m^2(t)dt - \int_0^\infty b_m^2(t)dt \\ &= \int_0^\infty (f_{op}(t) - f_m(t))\dot{x}_m(t)dt \\ &\geq 0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

であるので、\$\|b_m\|_2/\|a_m\|_2 \le 1\$ である。\$L_2\$ ゲインが \$H_\infty\$ ノルムに等しい、つまり \$\|S_{op}\|_\infty = \sup_{\|a_m\|_2 \neq 0} \frac{\|b_m\|_2}{\|a_m\|_2}\$ という性質を用いると、

$$\|S_{op}\|_\infty \leq 1 \quad (2.12)$$

が成り立つ。同様にして環境についても \$\|S_{env}\|_\infty \le 1\$ が成立する。よって、オペレータと環境の特性は、散乱行列 \$\mathbf{S}\$ を用いて次のように表現できる [67]。

$$\begin{bmatrix} b_m \\ b_s \end{bmatrix} = \mathbf{S} \begin{bmatrix} a_m \\ a_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{op} & 0 \\ 0 & S_{env} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_m \\ a_s \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

このようにオペレータと環境の不確かさを合わせて散乱行列 \$\mathbf{S}\$ として表現したとき、\$\mathbf{S}\$ の \$H_\infty\$ ノルムが 1 以下であることが、オペレータと環境が受動的であることと等価であるが、この不確かさ \$\mathbf{S}\$ が \$\|S_{op}\|_\infty \le 1, \|S_{env}\|_\infty \le 1\$ を満たす要素で構造化されている点が重要である。

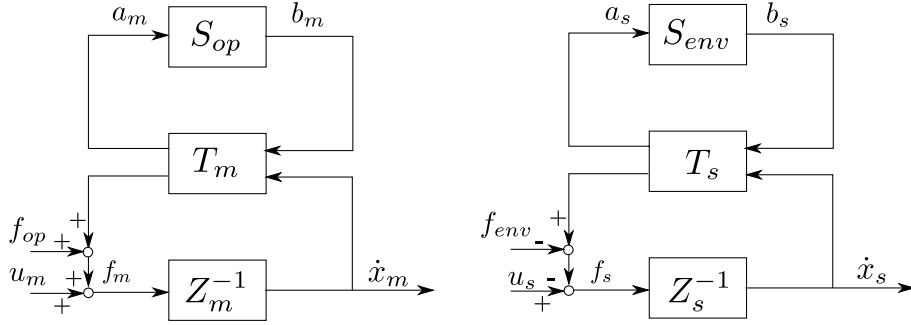


Fig. 2.3 Operator and environment after scattering transformation

2.2.4 制御目的の設定

ここで、システム全体を一般化制御対象として表現するために、制御目的のベクトル z_{perf} を次式のように定義する。

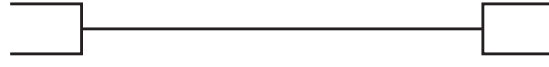
$$z_{\text{perf}} = \begin{bmatrix} e_p \\ e_f \\ u_m \\ u_s \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} x_m(t) - \hat{x}_s(t) \\ f_m(t) - \varepsilon(t)f_s(t) - (k_1 x_m(t) + k_2 \hat{x}_s(t)) \\ u_m \\ u_s \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

ここで、 $\hat{x}_s(t)$ はスケーリングされたスレーブの速度を積分したもので、

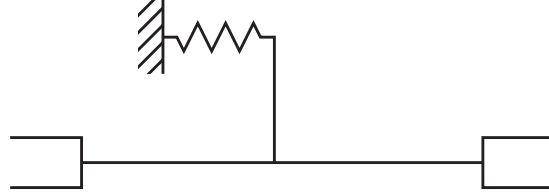
$$\hat{x}_s = \int_0^t \phi(\tau) \dot{x}_s(\tau) d\tau \quad (2.15)$$

と定義されるものである。式 (2.14) ではアクチュエータ入力が増大にならないように u_m と u_s を z_{perf} に含めている。また、力の制御目的については、式 (2.1) の理想応答型ではなく、バネ定数が k_1, k_2 で表される介在バネ要素を持たせた制御目的を設定する。

式 (2.1) が達成されれば、システムは Fig. 2.4(a) に示すような質量 0 の剛体棒のように振る舞う。しかし、この理想的なシステムはオペレータや環境からの入力が無くなってもしその場に留まり続けるため、位置が原点に収束しない不安定なシステムである。本研究では、線形行列不等式 (LMI) を用いて制御系設計を行うが、LMI では閉ループ系が安定になるような解を探索する。したがって、理想応答型の制御目的は LMI を用いる限り達成することができず、そのような達成不能な制御目的を設定すると数値計算の安定性が低下してしまう。そこで、本論文では Fig. 2.4(b) に示すようにシステムを原点に戻すようなバネ特性を持った制御目的を導入する。このバネは数値計算の安定性を向上させるためのものであり、バネ定数 k_1, k_2 はオペレータが感じない程度の小さな値に設定すれば十分である。



(a) System achieving Ideal responses



(b) System with intervening spring

Fig. 2.4 Ideal and spring-anchored teleoperation systems

2.2.5 一般化制御対象の構成

以上の準備の下で、マスタ・スレーブシステム全体を、Fig. 2.5 で表される一般化制御対象の形に変形する。状態量 $\mathbf{x}$ 、システムへの外生入力 $\mathbf{w}$ 、コントローラによる制御入力 $\mathbf{u}$ 、出力 $\mathbf{z}$ 、観測量 $\mathbf{y}$ を、

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_m \\ \dot{x}_m \\ \hat{x}_s \\ \dot{x}_s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_\Delta \\ \mathbf{w}_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_m \\ b_s \\ f_{op} \\ f_{env} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_m \\ u_s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{z} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_\Delta \\ \mathbf{z}_{perf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_m \\ a_s \\ \mathbf{z}_{perf} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} x_m \\ \dot{x}_m \\ \hat{x}_s \\ \dot{x}_s \\ f_m \\ f_s \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

とすると、プラント P の状態方程式は次式のように書ける。

$$P : \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\phi(t))\mathbf{x} + \mathbf{B}_1\mathbf{w} + \mathbf{B}_2\mathbf{u} \\ \mathbf{z} = \mathbf{C}_1(\varepsilon(t))\mathbf{x} + \mathbf{D}_{11}(\varepsilon(t))\mathbf{w} + \mathbf{D}_{12}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}_2\mathbf{x} + \mathbf{D}_{21}\mathbf{w} \end{cases} \quad (2.17)$$

このプラントの各行列の成分を 2.B に示す。

2.2.6 制御目的に対する周波数重み

制御量ベクトル $\mathbf{z}_{perf}$ の各成分に対しては、Fig. 2.5 に示すように周波数に依存する重み $W_p(s)$, $W_f(s)$, $W_{um}(s)$, $W_{us}(s)$ により重み付けをする。

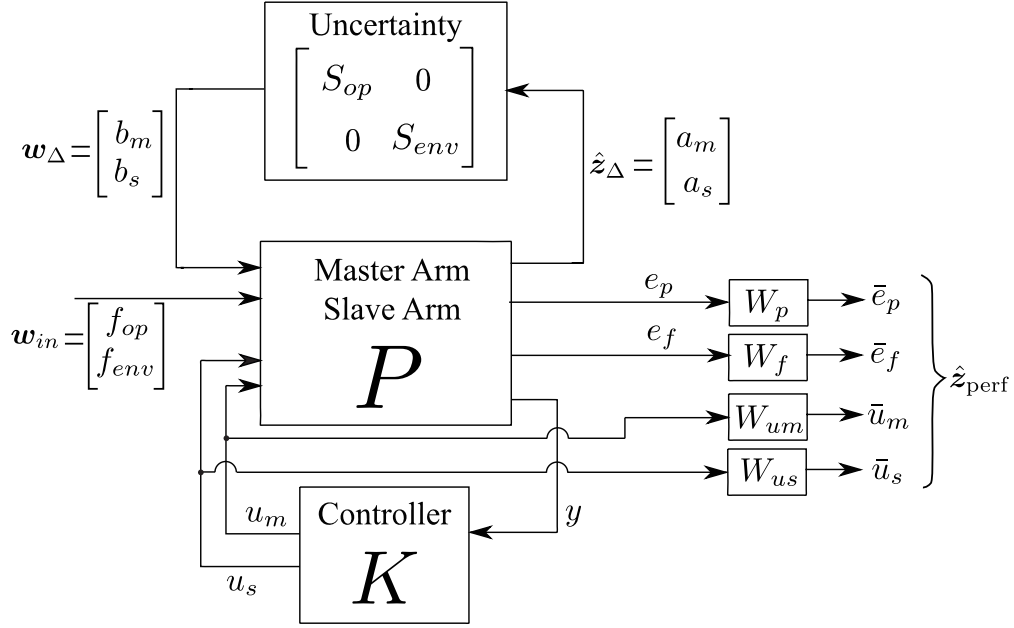


Fig. 2.5 Generalized plant

これら重み関数の設定の方針としては、 $W_{um}(s)$, $W_{us}(s)$ については、高周波で高くなるように設定し、システムへの高周波領域での入力を抑制する。また、 $W_p(s)$, $W_f(s)$ については、高周波での重みを小さく設定することで、外乱領域での無理な追従を緩和する。

重み付けされた制御目的 $\hat{z}_{\text{perf}} \triangleq [\bar{e}_p, \bar{e}_f, \bar{u}_m, \bar{u}_s]^T$ を含む出力 $\hat{z}$ は次式のように表される。

$$\hat{z} = \begin{bmatrix} a_m \\ a_s \\ \hat{z}_{\text{perf}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W_p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & W_{um} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_{us} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_m \\ a_s \\ e_p \\ e_f \\ u_m \\ u_s \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

周波数重みの状態量を x_w とし、式 (2.18) の状態空間表現を次式のように表す。

$$W : \begin{cases} \dot{x}_w = A_w x_w + B_w z \\ \hat{z} = C_w x_w + D_w z \end{cases} \quad (2.19)$$

状態ベクトルを新たに $\hat{x} = [x^T, x_w^T]^T$ と定義すると、周波数重みを合わせた一般化プラントの状態方程式は、速度と力のスケール比をまとめて $\alpha = [\phi, \varepsilon]^T$ と表記することにする。

ると,

$$\hat{P}(\alpha) : \begin{cases} \dot{\hat{x}} = \begin{bmatrix} A(\alpha) & \mathbf{0}_{4 \times 4} \\ B_w C_1(\alpha) & A_w \end{bmatrix} \hat{x} \\ \quad + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_w D_{11}(\alpha) \end{bmatrix} w + \begin{bmatrix} B_2 \\ B_w D_{12} \end{bmatrix} u \\ \hat{z} = \begin{bmatrix} D_w C_1(\alpha) & C_w \end{bmatrix} \hat{x} \\ \quad + D_w D_{11}(\alpha) w + D_w D_{12} u \\ y = \begin{bmatrix} C_2 & \mathbf{0}_{6 \times 4} \end{bmatrix} \hat{x} + D_{21} w \end{cases} \quad (2.20)$$

と表される. 以降, このシステムを以下のように表すものとする.

$$\hat{P}(\alpha) : \begin{cases} \dot{\hat{x}} = \hat{A}(\alpha) \hat{x} + \hat{B}_1(\alpha) w + \hat{B}_2 u \\ \hat{z} = \hat{C}_1(\alpha) \hat{x} + \hat{D}_{11}(\alpha) w + \hat{D}_{12} u \\ y = \hat{C}_2 \hat{x} + \hat{D}_{21} w \end{cases} \quad (2.21)$$

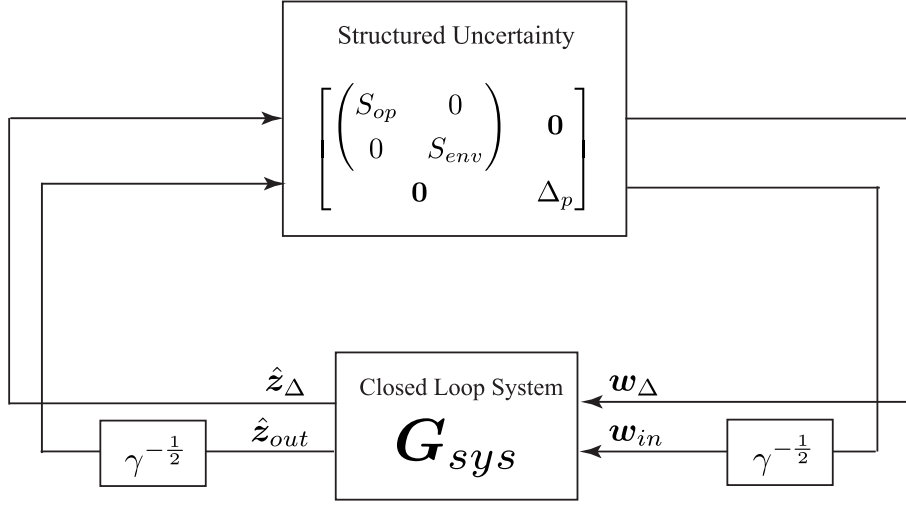


Fig. 2.6 Closed loop system with a structured uncertainty

2.3 ゲインスケジューリング制御器の設計

2.3.1 コントローラの設定

2.3.4 節で示すように、本論文では前節で導出した一般化制御対象においてスケール比を $\alpha = [\phi(t), \varepsilon(t)]^T$ と可変にした場合でもシステムを安定化できるようなゲインスケジューリング制御が適用可能であることが示される。ゲインスケジューリング制御は、プラント内の測定可能な時変パラメータの変動に応じてコントローラを変化させる制御である。ここではゲインスケジューリング制御を適用することを前提として、スケジューリングパラメータ α に依存するコントローラ K を次式で表す。

$$K : \begin{cases} \dot{x}_K = A_K(\alpha)x_K + B_K(\alpha)y \\ u = C_K(\alpha)x_K + D_K(\alpha)y \end{cases} \quad (2.22)$$

一般化プラントとコントローラをあわせた閉ループ系全体の状態方程式を、状態量を $x_{sys} = [\hat{x}^T, x_K^T]^T$ として、以下で定義する。

$$G_{sys}(\alpha) : \begin{cases} \dot{x}_{sys} = A_{sys}(\alpha)x_{sys} + B_{sys}(\alpha)w \\ \hat{z} = C_{sys}(\alpha)x_{sys} + D_{sys}(\alpha)w \end{cases} \quad (2.23)$$

2.3.2 スケールド H_{∞} 制御によるロバスト安定化

閉ループ系 $G_{sys}(\alpha)$ の伝達関数行列を G_{sys} とする。ここで、不確かさブロックからの閉ループ系への入力を $w_{\Delta} = [b_m \ b_s]^T$ ，外部からの入力を $w_{in} = [f_{op} \ f_{env}]^T$ ，不確かさ

ブロックへの出力を $\hat{z}_\Delta = [a_m \ a_s]^T$, 制御目的 $\hat{z}_{out} = \hat{z}_{perf}$ と定義する. ここで,

$$\mathbf{w}_{in} = \frac{1}{\gamma} \Delta_p \hat{z}_{out} \quad (2.24)$$

という, 外生入力から制御目的までのフィードバックループを設定する. ここで, Δ_p はロバスト制御性能条件 ($\|\hat{z}_{out}\| < \gamma \|\mathbf{w}_{in}\|$) をロバスト安定条件に変換するために導入する $\|\Delta_p\|_\infty < 1$ を満たす仮想的な不確かさであり, γ の値が小さいほど制御性能が良いことになる.

このとき, この系は Fig. 2.6 に示すようなブロック図で表すことができる. このロバスト制御性能を組み入れた不確かさは,

$$\hat{\Delta} = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} S_{op} & 0 \\ 0 & S_{env} \end{pmatrix} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Delta_p \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

と表される. 不確かさ $\hat{\Delta}$ の H_∞ ノルムは1以下であるから, $\|\mathbf{G}_{sys}\|_\infty \leq 1$ ならばこのシステムはロバスト安定である. しかし, 不確かさが式 (2.25) のように構造化されているとき, この条件は十分条件に過ぎず, 保守的な制御となる. 保守性を軽減し, 制御性能を向上させる手法の一つとして, スケーリング行列 $\mathbf{D}_l, \mathbf{D}_r$ を導入する方法がある [27]. これらの行列は, $\mathbf{D}_r \hat{\Delta} = \hat{\Delta} \mathbf{D}_l$ を満たす行列で, 次のように設定する.

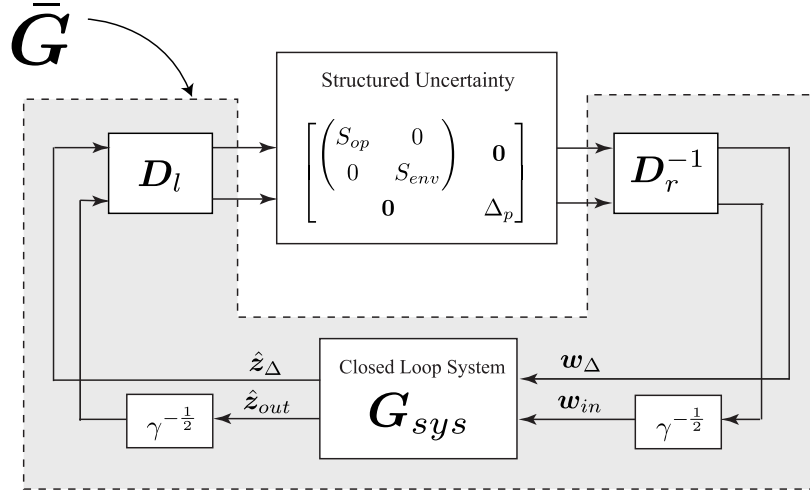
$$\mathbf{D}_l = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} l_1^{\frac{1}{2}} & 0 \\ 0 & l_2^{\frac{1}{2}} \end{pmatrix} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & l_3^{\frac{1}{2}} \mathbf{I}_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_r = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} l_1^{\frac{1}{2}} & 0 \\ 0 & l_2^{\frac{1}{2}} \end{pmatrix} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & l_3^{\frac{1}{2}} \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

このスケーリング行列は, $\hat{\Delta} = \mathbf{D}_r^{-1} \hat{\Delta} \mathbf{D}_l$ という関係が成り立つ. 従って, Fig. 2.6 の系にスケーリング行列を導入すると Fig. 2.7 のようになり, スケーリングを施した系の伝達関数 $\bar{\mathbf{G}}$ は, $\mathbf{\Gamma}_l \triangleq \text{diag}[\mathbf{I}_2, \gamma^{-\frac{1}{2}} \mathbf{I}_4]$, $\mathbf{\Gamma}_r \triangleq \text{diag}[\mathbf{I}_2, \gamma^{-\frac{1}{2}} \mathbf{I}_2]$ とすると, 次式のようになる.

$$\bar{\mathbf{G}} = \mathbf{D}_l \mathbf{\Gamma}_l \mathbf{G}_{sys} \mathbf{\Gamma}_r \mathbf{D}_r^{-1} \quad (2.27)$$

この系のロバスト安定条件は, $\|\bar{\mathbf{G}}\|_\infty < 1$ となる. このロバスト安定条件を満たし, かつ γ を最小にするような l_1, l_2, l_3 を計算することで, 目的のコントローラを得ることができ, この手法はスケーリングされた伝達関数を対象とするのでスケールド H_∞ 制御と呼ばれている.

不確かさが構造的な場合に H_∞ 制御の保守性を軽減する方法として, 上記のスケールド H_∞ 制御の他に μ 設計法がある. μ 設計法のスケーリング行列が周波数依存であるのに対し, スケールド H_∞ 制御ではスケーリング行列が定数行列となる. μ 設計法を用いた方が保守性がより低く性能の良いコントローラが求まる可能性があるが, 理論的にロバ

Fig. 2.7 Scaled H_∞ control arrangement of a master-slave system

スト安定性が保証されるのは、モデルの不確かさのクラスが線形時不変の場合に限られる [51]。一般にオペレータと環境は非線形で時変な特性を持つため、理論的に安定性が保証されるのはスケーリング行列が定数行列の場合だけである。また、スケールド H_∞ 制御は次節で述べる LMI を用いた設計が可能である。以上の理由から、本論文ではスケールド H_∞ 制御に基づく設計を行うものとする。

2.3.3 ロバスト安定条件の LMI 表現

ゲインスケジューリング制御器の設計には一般に線形行列不等式 (Linear Matrix Inequality: LMI) が用いられる。式 (2.27) の $\bar{G}$ の実現を $\{\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{D}\}$ とし、 $\bar{L}_l \triangleq \Gamma_l D_l$, $\bar{L}_r \triangleq \Gamma_r D_r^{-1}$ と定義すると、

$$\begin{aligned} \bar{G} &= \bar{L}_l G_{sys} \bar{L}_r \\ &= \bar{L}_l \{C_{sys}(sI - A_{sys})^{-1} B_{sys} + D_{sys}\} \bar{L}_r \\ &= \bar{C}(sI - \bar{A})^{-1} \bar{B} + \bar{D} \end{aligned} \quad (2.28)$$

であるから、

$$\bar{A} = A_{sys} \quad \bar{B} = B_{sys} \bar{L}_r \quad (2.29)$$

$$\bar{C} = \bar{L}_l C_{sys} \quad \bar{D} = \bar{L}_l D_{sys} \bar{L}_r \quad (2.30)$$

となる。ここで、有界実補題 (Bounded Real Lemma) を用いると、 $\|\bar{G}\|_\infty < 1$ という条件は次の LMI を満たす正定行列 P が存在することと等価である [3]。

$$\begin{bmatrix} P\bar{A} + \bar{A}^T P & P\bar{B} & \bar{C}^T \\ \bar{B}^T P & -I & \bar{D}^T \\ \bar{C} & \bar{D} & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (2.31)$$

この LMI に式 (2.29)(2.30) を代入し、さらに、左右から $\text{diag}[\mathbf{I}, \bar{\mathbf{L}}_r^{-1}, \bar{\mathbf{L}}_l^{-1}]$ をかけると、

$$\Phi(\mathbf{P}) \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{P}\mathbf{A}_{sys} + \mathbf{A}_{sys}^T \mathbf{P} & \mathbf{P}\mathbf{B}_{sys} & \mathbf{C}_{sys}^T \\ \mathbf{B}_{sys}^T \mathbf{P} & -\bar{\mathbf{L}}_r^2 & \mathbf{D}_{sys}^T \\ \mathbf{C}_{sys} & \mathbf{D}_{sys} & -\bar{\mathbf{L}}_l^{-2} \end{bmatrix} < 0 \quad (2.32)$$

が得られる。この不等式には、解くべき行列 $\mathbf{P}$ と $\mathbf{A}_{sys}, \mathbf{B}_{sys}$ の積が含まれているため線形ではない。よって、文献 [17][57] などに見られる合同変換という手法によりこの不等式を線形化する。まず、 $\mathbf{P}, \mathbf{P}^{-1}$ を次のように表現しなおす。

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y} & \mathbf{N} \\ \mathbf{N}^T & \mathbf{Z} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{X} & \mathbf{M} \\ \mathbf{M}^T & \mathbf{W} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

さらに、 $\mathbf{\Pi}_X$ と $\mathbf{\Pi}_Y$ を、

$$\mathbf{\Pi}_X = \begin{bmatrix} \mathbf{X} & \mathbf{I} \\ \mathbf{M}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{\Pi}_Y = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{Y} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{N}^T \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

と定義すると、 $\mathbf{P}\mathbf{\Pi}_X = \mathbf{\Pi}_Y$ という関係が成立する。 $\mathbf{\Pi} = \text{diag}[\mathbf{\Pi}_X, \mathbf{I}, \mathbf{I}]$ を用いて $\mathbf{\Pi}^T \Phi(\mathbf{P}) \mathbf{\Pi}$ という変換をすると、次の行列不等式が得られる。

$$\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{A}}\mathbf{X} + \mathbf{X}\hat{\mathbf{A}}^T + \hat{\mathbf{B}}_2\tilde{\mathbf{C}} + (\hat{\mathbf{B}}_2\tilde{\mathbf{C}})^T & \hat{\mathbf{A}} + \hat{\mathbf{B}}_2\tilde{\mathbf{D}}\hat{\mathbf{C}}_2 + \tilde{\mathbf{A}}^T \\ (\hat{\mathbf{A}} + \hat{\mathbf{B}}_2\tilde{\mathbf{D}}\hat{\mathbf{C}}_2)^T + \tilde{\mathbf{A}} & \mathbf{Y}\hat{\mathbf{A}} + \hat{\mathbf{A}}^T\mathbf{Y} + \tilde{\mathbf{B}}\hat{\mathbf{C}}_2 + (\tilde{\mathbf{B}}\hat{\mathbf{C}}_2)^T \\ (\hat{\mathbf{B}}_1 + \hat{\mathbf{B}}_2\tilde{\mathbf{D}}\hat{\mathbf{D}}_{21})^T & (\mathbf{Y}\hat{\mathbf{B}}_1 + \tilde{\mathbf{B}}\hat{\mathbf{D}}_{21})^T \\ \hat{\mathbf{C}}_1\mathbf{X} + \hat{\mathbf{D}}_{12}\tilde{\mathbf{C}} & \hat{\mathbf{C}}_1 + \hat{\mathbf{D}}_{12}\tilde{\mathbf{D}}\hat{\mathbf{C}}_2 \\ \hat{\mathbf{B}}_1 + \hat{\mathbf{B}}_2\tilde{\mathbf{D}}\hat{\mathbf{D}}_{21} & (\hat{\mathbf{C}}_1\mathbf{X} + \hat{\mathbf{D}}_{12}\tilde{\mathbf{C}})^T \\ \mathbf{Y}\hat{\mathbf{B}}_1 + \tilde{\mathbf{B}}\hat{\mathbf{D}}_{21} & (\hat{\mathbf{C}}_1 + \hat{\mathbf{D}}_{12}\tilde{\mathbf{D}}\hat{\mathbf{C}}_2)^T \\ - \left(\begin{pmatrix} l_1 & 0 \\ 0 & l_2 \end{pmatrix} & \mathbf{0} \right) & (\hat{\mathbf{D}}_{11} + \hat{\mathbf{D}}_{12}\tilde{\mathbf{D}}\hat{\mathbf{D}}_{21})^T \\ \mathbf{0} & \gamma l_3 \mathbf{I}_2 \\ \hat{\mathbf{D}}_{11} + \hat{\mathbf{D}}_{12}\tilde{\mathbf{D}}\hat{\mathbf{D}}_{21} & - \left(\begin{pmatrix} l_1^{-1} & 0 \\ 0 & l_2^{-1} \end{pmatrix} & \mathbf{0} \right) \\ & \mathbf{0} & \gamma l_3^{-1} \mathbf{I}_4 \end{pmatrix} < 0 \quad (2.35)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{A}} &= \mathbf{N}\mathbf{A}_K\mathbf{M}^T + \mathbf{N}\mathbf{B}_K\hat{\mathbf{C}}_2\mathbf{X} + \mathbf{Y}\hat{\mathbf{B}}_2\mathbf{C}_K\mathbf{M}^T \\ &\quad + \mathbf{Y}(\hat{\mathbf{A}} + \hat{\mathbf{B}}_2\mathbf{D}_K\hat{\mathbf{C}}_2)\mathbf{X} \\ \tilde{\mathbf{B}} &= \mathbf{N}\mathbf{B}_K + \mathbf{Y}\hat{\mathbf{B}}_2\mathbf{D}_K \\ \tilde{\mathbf{C}} &= \mathbf{C}_K\mathbf{M}^T + \mathbf{D}_K\hat{\mathbf{C}}_2\mathbf{X} \\ \tilde{\mathbf{D}} &= \mathbf{D}_K \end{aligned} \quad (2.36)$$

である。また、 $\mathbf{P} > 0$ だから、

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X} & \mathbf{I} \\ \mathbf{I} & \mathbf{Y} \end{bmatrix} > 0 \quad (2.37)$$

が得られる．式 (2.35) では，解くべき行列 $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \tilde{\mathbf{A}}, \tilde{\mathbf{B}}, \tilde{\mathbf{C}}, \tilde{\mathbf{D}}$ 同士の積の形はなくなったが，スケーリングの値 l_i とその逆数 l_i^{-1} ($i = 1, 2, 3$) が含まれているので，まだ線形ではない．そのため， $l_1 \rightarrow v_1, l_2 \rightarrow v_2, \gamma l_3 \rightarrow v_3, l_1^{-1} \rightarrow w_1, l_2^{-1} \rightarrow w_2, \gamma l_3^{-1} \rightarrow w_3$ と置きかえると，

$$v_i = w_i^{-1} > 0 \quad (i = 1, 2) \quad (2.38)$$

$$v_3 w_3 = \gamma^2 \rightarrow \text{minimize} \quad (2.39)$$

という条件式が得られる．さらに式 (2.38) は，次のように書き換えられる．

$$\begin{bmatrix} v_i & 1 \\ 1 & w_i \end{bmatrix} \geq 0, \quad \text{rank} \begin{bmatrix} v_i & 1 \\ 1 & w_i \end{bmatrix} \leq 1 \quad (i = 1, 2) \quad (2.40)$$

この条件式のうち，2 つ目のランク条件は依然として凸条件ではないが，この LMI は線形化アルゴリズム (付録 2.C 参照) による反復計算を用いて解くことができる．

以上の LMI 条件を満たす $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, v_i, w_i$ ($i = 1, 2, 3$), $\tilde{\mathbf{A}}, \tilde{\mathbf{B}}, \tilde{\mathbf{C}}, \tilde{\mathbf{D}}$ が求まれば，次式からコントローラを得ることができる．

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_K(\boldsymbol{\alpha}) &= \mathbf{N}^{-1} \{ \tilde{\mathbf{A}} - \mathbf{N} \mathbf{B}_K \hat{\mathbf{C}}_2 \mathbf{X} - \mathbf{Y} \hat{\mathbf{B}}_2 \mathbf{C}_K \mathbf{M}^T - \mathbf{Y} (\hat{\mathbf{A}} + \hat{\mathbf{B}}_2 \mathbf{D}_K \hat{\mathbf{C}}_2) \mathbf{X} \} \mathbf{M}^{-T} \\ \mathbf{B}_K(\boldsymbol{\alpha}) &= \mathbf{N}^{-1} (\tilde{\mathbf{B}} - \mathbf{Y} \hat{\mathbf{B}}_2 \mathbf{D}_K) \\ \mathbf{C}_K(\boldsymbol{\alpha}) &= (\tilde{\mathbf{C}} - \mathbf{D}_K \hat{\mathbf{C}}_2 \mathbf{X}) \mathbf{M}^{-T} \\ \mathbf{D}_K(\boldsymbol{\alpha}) &= \tilde{\mathbf{D}} \end{aligned} \quad (2.41)$$

2.3.4 ゲインスケジューリング制御

可変スケール比 $\boldsymbol{\alpha} = [\phi(t), \varepsilon(t)]^T$ をゲインスケジューリング制御におけるスケジューリングパラメータとみなし，Fig. 2.8 に示す長方形領域 Λ (パラメータボックス) 内を移動するものとする．このようなゲインスケジューリングコントローラを求めるには， Λ 内の各点で定義される式 (2.35) を連立させて解けばよい．このとき， $\tilde{\mathbf{A}}, \tilde{\mathbf{B}}, \tilde{\mathbf{C}}, \tilde{\mathbf{D}}$ は各 LMI ごとに定義される未知変数であり， $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, v_i, w_i$ ($i = 1, 2, 3$) はすべての LMI 条件式において共通の変数である．しかし，この LMI 条件をそのままゲインスケジューリング制御に適用するには， Λ 上のあらゆる点における LMI，すなわち無限個の連立 LMI 条件を解くことになるので，解を求めることは事実上不可能である．

ところが，システムがスケジューリングパラメータに関してアフィン，すなわち，システムの係数行列の各成分が ϕ または ε の 1 次式で表されているならば，任意の ϕ, ε におけるシステムを Fig. 2.8 のパラメータボックスの各頂点 $\boldsymbol{\alpha}_1 = [\phi_{\min}, \varepsilon_{\min}]^T$, $\boldsymbol{\alpha}_2 = [\phi_{\max}, \varepsilon_{\min}]^T$, $\boldsymbol{\alpha}_3 = [\phi_{\min}, \varepsilon_{\max}]^T$, $\boldsymbol{\alpha}_4 = [\phi_{\max}, \varepsilon_{\max}]^T$ における 4 つのシステムのバイリニア補間によって厳密に表現することができる．すなわち，任意の $\boldsymbol{\alpha} \in \Lambda$ にお

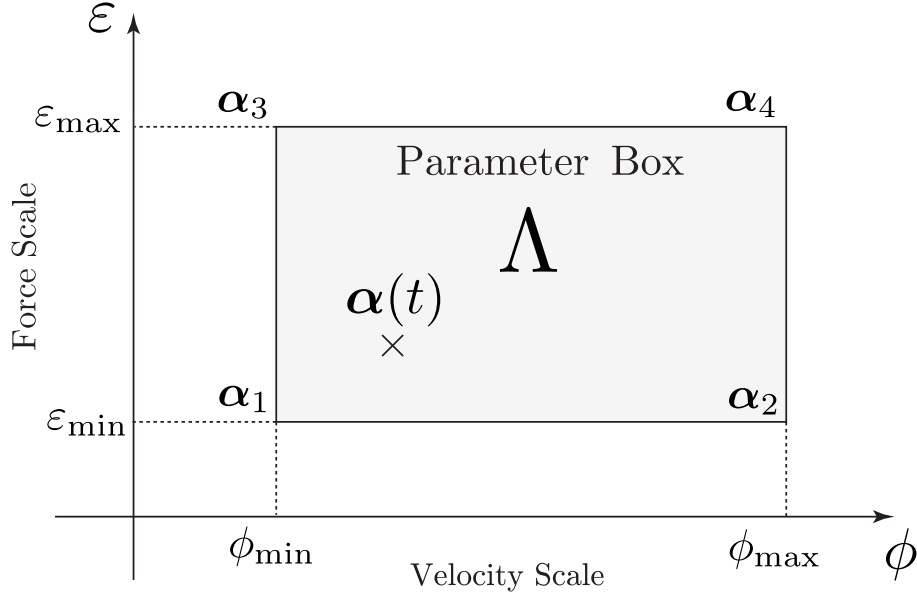


Fig. 2.8 Scheduling parameter box

けるシステムは, ξ を補間係数として, 次のように表される.

$$\begin{bmatrix} \hat{A}(\alpha) & \hat{B}_1(\alpha) \\ \hat{C}_1(\alpha) & \hat{D}_{11}(\alpha) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^4 \xi_i(\alpha) \begin{bmatrix} \hat{A}(\alpha_i) & \hat{B}_1(\alpha_i) \\ \hat{C}_1(\alpha_i) & \hat{D}_{11}(\alpha_i) \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$\xi_i(\alpha) \geq 0, \quad \sum_{i=1}^4 \xi_i(\alpha) = 1$$

ここで, 補間係数 ξ_i は次のように表される.

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \frac{\phi_{\max} - \phi(t)}{\phi_{\max} - \phi_{\min}} \cdot \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon(t)}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}} \\ \xi_2 &= \frac{\phi_{\max} - \phi(t)}{\phi_{\max} - \phi_{\min}} \cdot \frac{\varepsilon(t) - \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}} \\ \xi_3 &= \frac{\phi(t) - \phi_{\min}}{\phi_{\max} - \phi_{\min}} \cdot \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon(t)}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}} \\ \xi_4 &= \frac{\phi(t) - \phi_{\min}}{\phi_{\max} - \phi_{\min}} \cdot \frac{\varepsilon(t) - \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}} \end{aligned} \quad (2.43)$$

システムが式 (2.42) の形で表現できるとき, LMI 条件は各頂点の 4 個に有限個化され, 各頂点において解を求めることができる. ここで各頂点 $\alpha_i, (i = 1, 2, 3, 4)$ でのコントローラを $K(\alpha_i)$, その実現を $\{A_K(\alpha_i), B_K(\alpha_i), C_K(\alpha_i), D_K(\alpha_i)\}$ とすると, Λ 内の任意の $\alpha(t)$ における $K(\alpha)$ も同じ補間によって表現することができ,

$$\begin{bmatrix} A_K(\alpha) & B_K(\alpha) \\ C_K(\alpha) & D_K(\alpha) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^4 \xi_i(\alpha) \begin{bmatrix} A_K(\alpha_i) & B_K(\alpha_i) \\ C_K(\alpha_i) & D_K(\alpha_i) \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

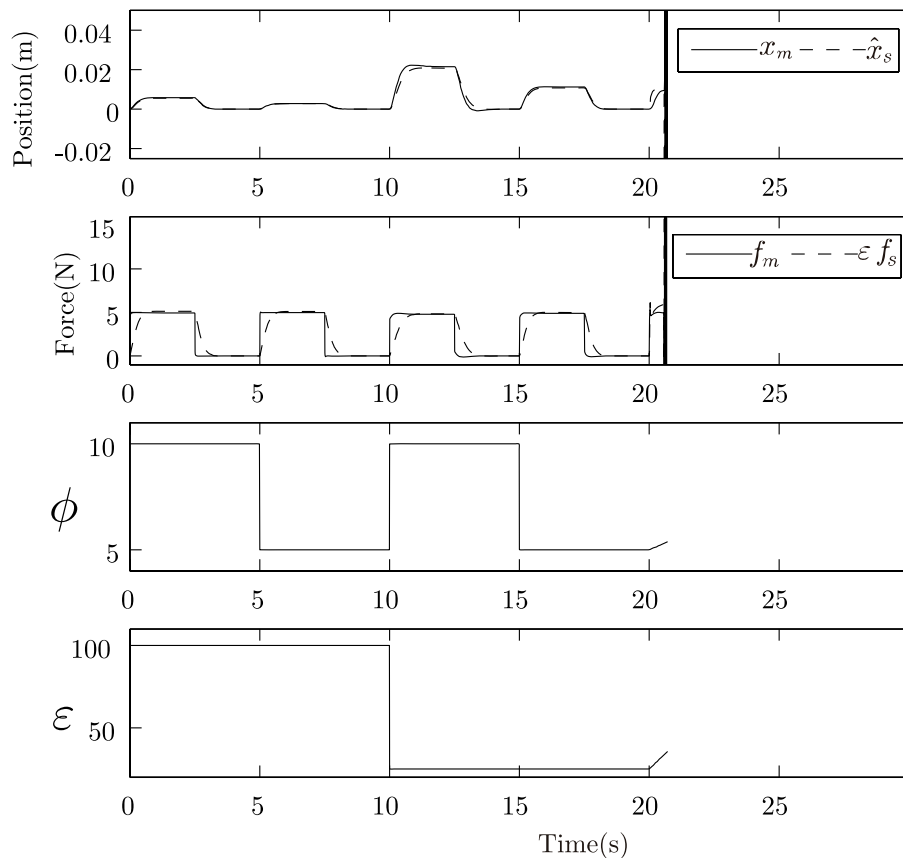


Fig. 2.9 Simulation result using naive controller interpolating four constant-scale controllers

で与えられる.

可変スケール型バイラテラル制御系は式 (2.21) の α を可変にしたものであり, 式 (2.20) と付録 A の式より, 式 (2.21) は式 (2.42) のように表され, 式 (2.44) で表されるゲインスケジューリング制御が適用可能であることがわかる.

ここでゲインスケジューリング制御の必要性を示すために, 試しにパラメータボックス Λ の各頂点それぞれのスケール比による固定スケールテレオペレーションのコントローラを 2.3.3 節で示した方法で設計し, 得られた 4 つのコントローラを (2.44) 式と同様に補間したコントローラを用いて Simulink によるシミュレーションを行った結果を Fig. 2.9 に示す. シミュレーションに用いた各種パラメータの詳細は省略するが, パラメータボックスの各頂点上ではもちろん安定に動作するものの, 頂点以外の点では 4 つの固定スケール用コントローラを単に補間するだけでは不安定になることが確認された. したがって, VST の安定性を保証するためにゲインスケジューリング制御が必要であることが分かる.

2.4 スケール比依存重みの導入

一般に、 H_∞ 制御理論によるコントローラ設計ではいかに適切な重みを設定するかが重要である。しかしながら VST において変化させるスケール比の範囲が広い場合には、最適な重みはスケール比によって異なる可能性があるため、コントローラの設計を行う際に、パラメータボックス Λ 内のすべてのスケール比で満足するいく性能を実現できるような重みを1つだけに選ぶことは難しい。そこで、本節ではスケール比 ϕ, ε に応じてこの重みを変化させることを考える。そうすることで、コントローラ設計の際に設定できるパラメータが増加し、コントローラの保守性を軽減する効果も期待される。

ただし、LMI のアフィン性を維持するためには、すべての制御目的に対する重みをスケール比依存にすることはできず、 W_p および W_f のみをパラメータ ε, ϕ に依存させることが可能である。ここでは、スケジューリングパラメータ $\alpha = [\phi, \varepsilon]^T$ に依存する周波数重みの形として、重みのゲイン部分をスケール依存とする次式を導入することにする。

$$W_p = \frac{10K_p(\alpha)}{s+10} \quad W_f = \frac{10K_f(\alpha)}{s+10} \quad (2.45)$$

入力に対する重みはスケール比依存にできないので、以下のような固定重みを設定する。

$$W_{um} = \frac{K_{um}s}{s+500} \quad W_{us} = \frac{K_{us}s}{s+500} \quad (2.46)$$

これら4つの重みは2.2.6節で述べた方針に基づいて W_p, W_f は一次遅れ系としてローパス特性を持たせ、 W_{um}, W_{us} はハイパス特性を持たせた。以上の4つの重みからなる式(2.18)を式(2.19)のように状態空間表現で実現する際に B_w, C_w のとり方は無数に存在するが式(2.21)の $\alpha = [\phi, \varepsilon]^T$ に関するアフィン性が損なわれないように B_w, C_w を決定する必要がある。状態空間表現として例えば次式のものを選べば、式(2.21)に相当する式の係数行列は式(2.21)同様に α に関してアフィンとなる。

$$W : \begin{cases} A_w = \text{diag}(-10, -10, -500, -500) \\ B_w = [\mathbf{0}_{4 \times 2} \quad \mathbf{I}_4] \\ C_w = [\mathbf{0}_{2 \times 4} \quad \text{diag}(K_p(\alpha), K_f(\alpha), \\ \quad -500K_{um}, -500K_{us})] \\ D_w = \text{diag}(1, 1, 0, 0, K_{um}, K_{us}) \end{cases} \quad (2.47)$$

一方、状態空間実現を、

$$W : \begin{cases} A_w = \text{diag}(-10, -10, -500, -500) \\ B_w = [\mathbf{0}_{4 \times 2} \quad \text{diag}(K_p(\alpha), K_f(\alpha), \\ \quad -500K_{um}, -500K_{us})] \\ C_w = [\mathbf{0}_{2 \times 4} \quad \mathbf{I}_4] \\ D_w = \text{diag}(1, 1, 0, 0, K_{um}, K_{us}) \end{cases} \quad (2.48)$$

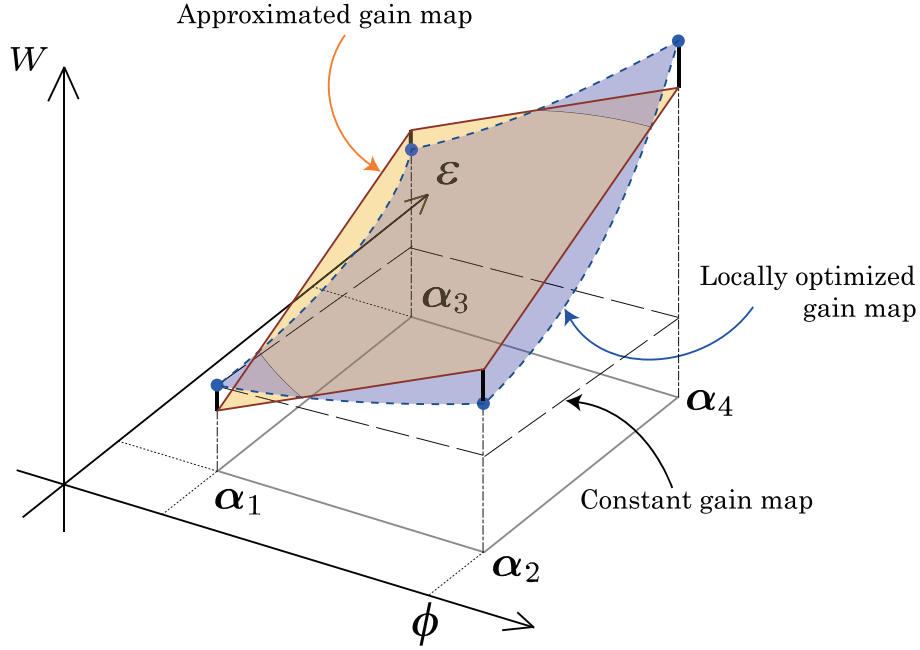


Fig. 2.10 Parameter dependent gain map

ととった場合、式 (2.20) の $B_w D_{11}(\alpha)$ に相当する部分は、

$$\begin{aligned}
 & B_w(\alpha) D_{11}(\alpha) \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2K_f(\alpha) & -2\phi(t)K_f(\alpha) & K_f(\alpha) & \phi(t)K_f(\alpha) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.49)
 \end{aligned}$$

となり、 ϕ と $K_f(\alpha)$ の積が現れるためアフィンではない。さらにゲイン $K_p(\alpha)$, $K_f(\alpha)$ そのものもスケジューリングパラメータに対してアフィンになるように設定する必要がある。すなわちゲイン K は Fig. 2.10 に示すようにパラメータ空間上ではある傾きをもった平面となっていなければならない。

次にこの平面をどのように決定するかが問題となる。その一つの方法として Fig. 2.10 に示したように、パラメータ空間上の個々の点で固定したスケール比での最適なゲインマップの曲面を最もよく近似するような平面とすることが考えられるが、そもそもパラメータ空間上のある一点に対応する LMI を解くだけでよい固定スケールコントローラと、4 頂点に対応する LMI をすべて連立させて解かなければならないゲインスケジューリング制御器では、コントローラの性質が違うので、固定スケールの最適ゲイン曲面の平面近似が必ずしも適当なゲイン設定であるとは言い難い。そこで本論文ではこの平面の傾きや高さを適当に与えてシミュレーションの結果を見ながら自動的に探索するという方法を採用した。この点については次節で詳しく述べる。

2.5 コントローラ的设计手順

2.5.1 計算の手順

第 2.2 節から第 2.4 節までの議論に基づいたコントローラの具体的な設計手順は以下のようになる。

手順 1 制御目的に対する重みを設定する

手順 2 式 (2.35), 式 (2.37) の連立 LMI を満足する $X, Y, \tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}, \tilde{D}, v_i, w_i$ ($i = 1, 2, 3$) を求める。

手順 3 手順 2 の解を初期値として, 線形化アルゴリズムによる反復計算を行い, $v_1 w_1$ と $v_2 w_2$ を 1 に収束させる。

手順 4 v_1, v_2, w_1, w_2 を手順 3 で得られた値に固定した上で線形化アルゴリズムを用い, $v_3 w_3 (= \gamma^2)$ を最小化する

手順 5 式 (2.41) によってコントローラを得る。

制御目的に対する重みを適切に設定しなければ, 十分な制御性能が得られず, システムが安定に動作しない場合もある。本節では, 適切な制御性能が得られるような重みの調整方法について述べる。

まず, 入力に対する重み W_{um}, W_{us} を調整する。このシステムでは, マスタとスレーブの力を追従させるという制御目的が含まれている。しかし, 力の理想応答を達成するためには, アームの慣性や粘性をキャンセルする必要があるので, コントローラのゲインは慣性をキャンセルするために高周波で非常に大きなものとなり, システムが不安定になる。この問題を回避するために, W_{um}, W_{us} を高周波領域で十分大きな値に設定する。

次に, W_p と W_f の設定を行うが, 現状では先見知識から W_p と W_f の最適な値を求めることは容易ではなく, シミュレーションの結果を見ながら試行錯誤的に調整しなければならない。しかしながら, W_p と W_f の比については, 目標となる追従誤差をもとに決定することが可能である。例えば, 目標となる位置の追従誤差を 10^{-3} m, 力の追従誤差を 1 N とすれば, 位置は力の 1000 倍の追従性能が要求されることになるので, $W_p/W_f = 1000$ となる。従来は W_p と W_f という 2 つの重みを探索しなければならなかったが, 比を固定することによって探索すべき重みが 1 つに減少し, 効率のよいコントローラ的设计が可能となる。

Table 2.1 Parameters in simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
M_m	1.0 (kg)	M_s	0.1 (kg)
B_m	1.0 (Ns/m)	B_s	0.05 (Ns/m)
m_{op}	1 (kg)	m_{env}	0.1 (kg)
b_{op}	0.4 (Ns/m)	b_{env}	3 (Ns/m)
k_{op}	1 (N/m)	k_{env}	50 (N/m)

本論文では、 K_p については下記に示すような 50 種類の重みを与える。

$$K_p(\phi, \varepsilon, n) = \left\{ K_\phi \frac{\phi - (\phi_{\max} + \phi_{\min})/2}{\phi_{\max} - \phi_{\min}} + K_\varepsilon \frac{\varepsilon - (\varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\min})/2}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}} \right\} K_n \quad (2.50)$$

$$K_n = 10^{n/10+2}, \quad (n = 1 \dots 50) \quad (2.51)$$

ただし、 K_ϕ および K_ε はスケール比依存重みにおいて、それぞれ ϕ 軸方向と ε 軸方向の傾きを表している。例えば、 $K_\phi > 0$ ならば速度のスケール比 ϕ が大きくなるに従って重みを大きくすることを意味する。また、 K_n を指数関数的に与えることで幅広く重みを探索することにする。本論文ではスケール比依存重みの効果を検証しやすいように 50 種類の重みを試行しているが、実際にコントローラを設計する際には下記のような手順で効率よく重みを調整することが可能である。

手順 1 幅広い範囲に対して K_n を粗く探索する。

手順 2 制御性能が高い K_n の範囲に絞り込んで細かく探索する。

2.6 提案手法の効果の検証

2.6.1 介在バネ要素の効果

本節では、式 (2.14) において導入した介在バネ要素の効果を検証する。前節で述べた手順に従って設定した 50 組の重みに対しそれぞれコントローラを算出し、シミュレーションを行なって制御性能を確認する。本節でコントローラの算出およびシミュレーションに使用したパラメータは、Table 2.1 の通りである。また、シミュレーションにおいてはオペレータの入力 f_{op} として大きさ 5[N], 周期 5[s] の矩形波入力を加え、環境からの外生入力 f_{env} は 0 とした。

また、シミュレーション結果の位置と力の追従誤差については、次式で表される

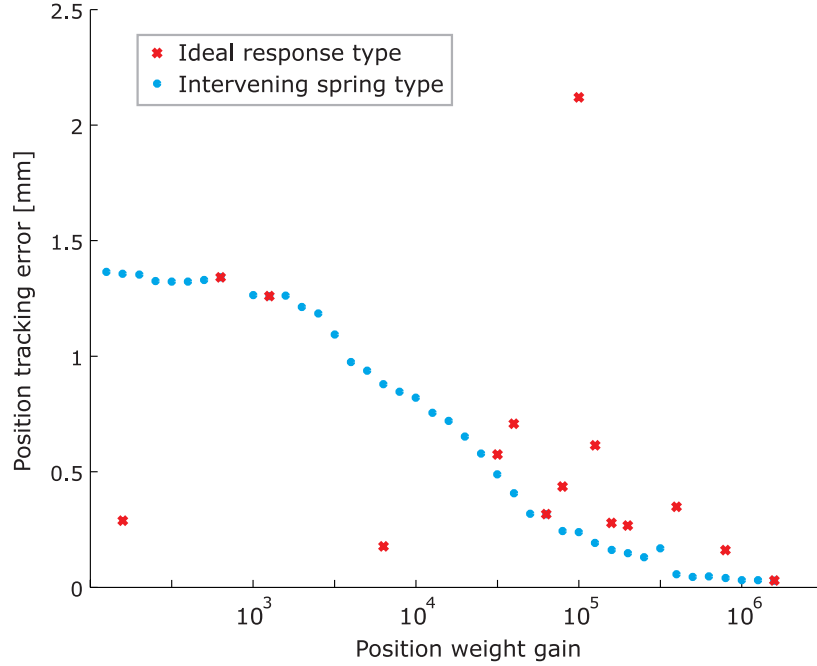


Fig. 2.11 Effect of intervening spring

RMSE(二乗平均平方根誤差)を用いて評価する.

$$e_p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (x_m(t) - \hat{x}_s(t))^2 dt} \quad (2.52)$$

$$e_f = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (f_m(t) - \varepsilon(t)f_s(t))^2 dt} \quad (2.53)$$

本節では、50組の重みを設定して50個のコントローラを求め、それぞれに対してシミュレーションを実行する。重みの大きさと位置の追従誤差の関係を Fig. 2.11 に示す。従来の理想応答型の制御目的を用いた場合、50個のうち安定なコントローラは15個しか得られなかったが、介入バネ要素を導入することで安定なコントローラが41個得られた。また、Fig. 2.11 から、従来法では重みと追従性の関係が大きくばらついており重み調整が困難であったが、バネ要素によって重みと追従性の関係がはっきりと分かるようになったため、重みの設定が容易になっていると言える。

2.6.2 スケール比依存重みの効果

次に、2.4節で導入したスケール比依存重みの効果を検証する。50組の重みに対して重みの大きさと上式の追従誤差の関係をプロットしたものを Fig. 2.12 および Fig. 2.13 に示す。なお、Fig. 2.12 においては、次に示す5種類の重みを与えた。

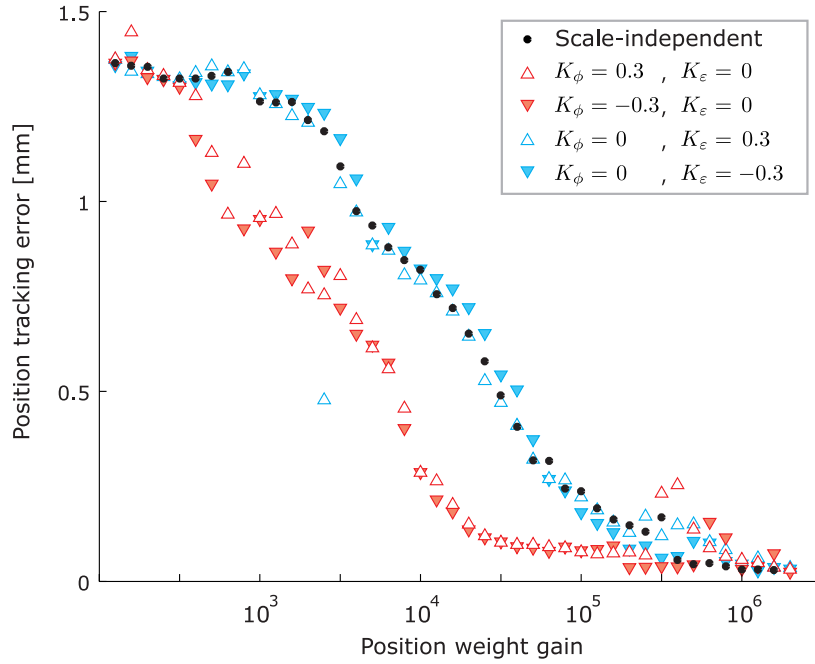


Fig. 2.12 Relation between weight and position tracking error

- スケール比に依存しない重み（一定重み）
- ϕ に依存する重み ($K_\phi = 0.3, K_\varepsilon = 0$)
- ϕ に依存する重み ($K_\phi = -0.3, K_\varepsilon = 0$)
- ε に依存する重み ($K_\phi = 0, K_\varepsilon = 0.3$)
- ε に依存する重み ($K_\phi = 0, K_\varepsilon = -0.3$)

図から、全体的な傾向として重みを大きくするほど追従誤差が低下する。また、重みの平均が同じであれば、 ϕ に依存する重みを設定することで追従誤差が低下することが分かる。一方で、 ε に依存する重みを導入しても制御性能にはほとんど影響を与えない。

次に、制御性能とロバスト安定性との関係について検証する。本来、 $v_1 w_1 = v_2 w_2 = 1$ でなければロバスト安定条件は満たされないが、実際にコントローラの算出を行うと $v_i w_i$ の値が1より大きくなる場合がある。このような場合、ロバスト安定条件が厳密には満たされず、オペレータや環境のパラメータあるいはスケール比の変化によってシステムが不安定となる可能性がある。Fig. 2.14 に重みとロバスト安定性指標 $v_1 w_1 v_2 w_2$ の関係を示す。図より、重みが大きくなると $v_1 w_1 v_2 w_2$ の値が大きくなりロバスト安定性が低下していることが分かる。次に、ロバスト安定性指標 $v_1 w_1 v_2 w_2$ と位置の追従誤差の関係を Fig. 2.15 に示す。図から、ロバスト安定性と制御性能のトレードオフの関係が確認できる。また、 ϕ に依存する重みを導入した場合、制御性能は向上しているがロバスト安定性には影響を与えていないことも分かる。従って、スケール比依存重みを導入することによって、

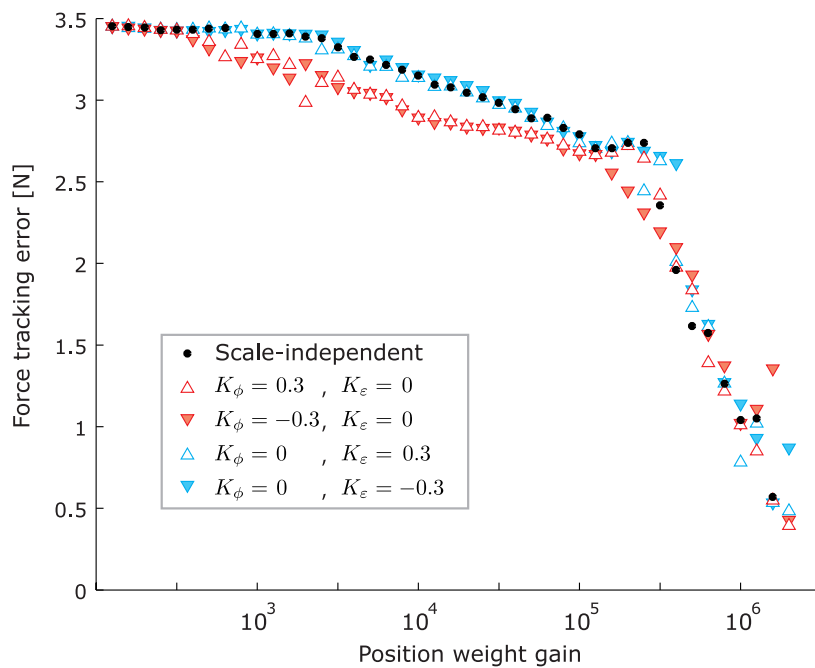


Fig. 2.13 Relation between weight and force tracking error

重みの自由度を向上させコントローラの保守性を低減できていることが確認された。

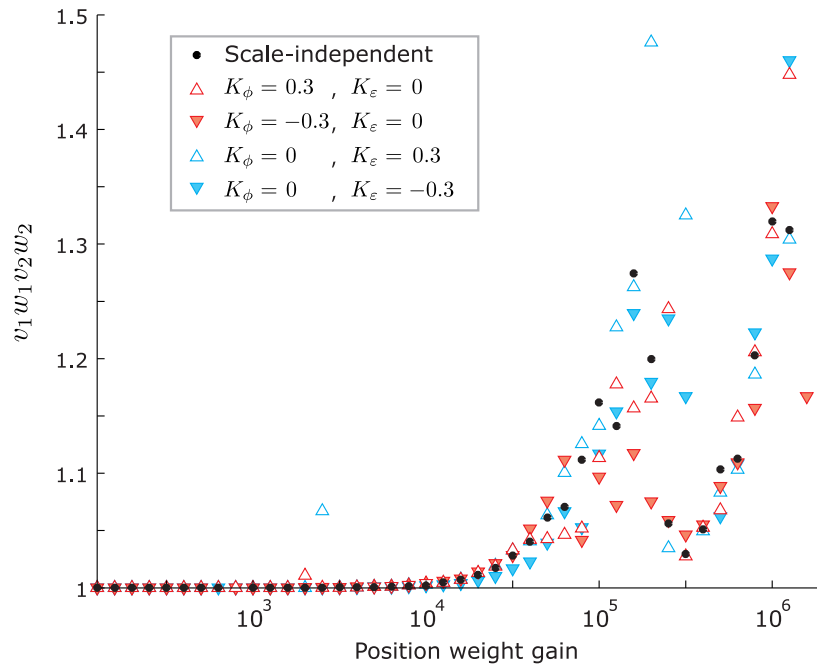


Fig. 2.14 Relation between weight and robustness index

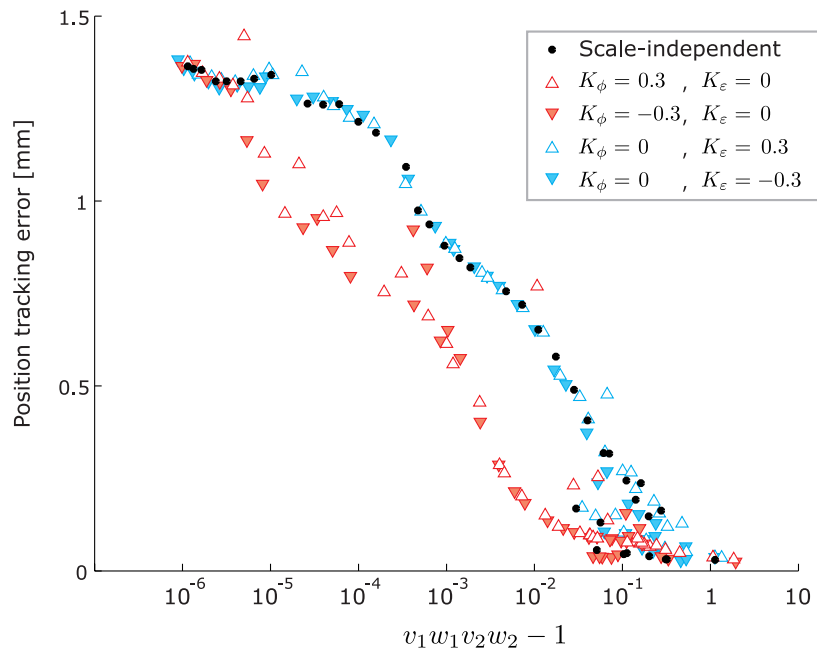


Fig. 2.15 Relation between robustness index and position tracking error

Table 2.2 Parameters of master arm and slave arm

Parameter	Value	Parameter	Value
M_m	5.83 (kg)	M_s	0.019 (kg)
B_m	13.3 (Ns/m)	B_s	1.158 (Ns/m)

2.7 制御性能確認実験

2.7.1 実験装置

提案する手法が実機においても十分な制御性能が得られることを確認するために、実験を行った。

実験に用いるマスタ・スレーブシステムは、Fig. 2.16 のマスタアームと Fig. 2.17 のスレーブアームから構成される。マスタアームは平面 3 自由度の DD モータで駆動されるスカラ型ロボットアームであるが、今回は 1 自由度の実験であるため、第 1 軸を固定して第 2 軸 (肘関節) のみを使用する。アームの長さは 300[mm]、エンコーダ分解能は 120,000[pulse/rev] で、手先に 6 軸力センサを備える。スレーブアームに用いた装置は、直動型ボイスコイルモータで Fig. 2.17 のプローブを駆動することが可能な位置検出器であり、エンコーダ分解能は 2000[pulse/mm]、ストロークは約 12[mm]、内蔵する力センサは最大 0.2[N] まで検出可能である。また、Fig. 2.17 に示すように環境としてスポンジを設置した。制御にはリアルタイム OS の VxWorks が動作する PC(Pentium II, 450MHz) を用い、制御周期は 1000[Hz] である。なお、実機の質量および粘性係数は Table 2.2 のとおりである。

スケール比の範囲は、使用するスレーブ装置の可動範囲や力センサの性能から、 $5 \leq \phi \leq 10$, $25 \leq \varepsilon \leq 100$ とした。オペレータがスケール比を調節する方法として、Fig. 2.18 に示す 2 個のダイヤル (可変抵抗器) を用いる。それぞれのダイヤルの値を単純にスケール比 ϕ, ε に割り当ててもよいが、スケール効果を考慮すると ϕ の変化に連動して ε を変化させるほうが良い。そこで、一方のダイヤルの値はそのまま ϕ に対応させるが、もう一方のダイヤルの値は以下に示す κ ($\log_{10} 25 \leq \kappa \leq \log_5 100$) に対応させ、 ε は次式で与えるようにする。

$$\varepsilon = \begin{cases} 25 & (\phi^\kappa < 25) \\ \phi^\kappa & (25 \leq \phi^\kappa \leq 100) \\ 100 & (100 < \phi^\kappa) \end{cases} \quad (2.54)$$

この方法では、例えば $\kappa = 2$ に設定すれば、 ϕ のダイヤルで速度スケール比を変化させても、環境の見かけの弾性係数を一定に保つことができるという利点があるが、操作性の良

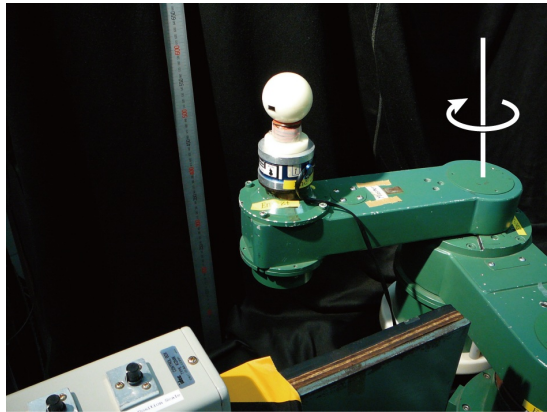


Fig. 2.16 Master arm

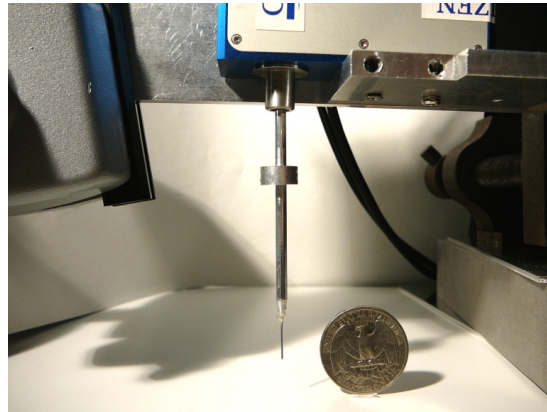


Fig. 2.17 Slave arm

さに関しては今後評価実験により確認する必要がある.

2.7.2 アームのモデル誤差補償による追従性の向上

実験で用いた Fig. 2.17 のスレーブアームには、重力や摩擦力、さらに装置内部の配線の影響と思われるバネ力が作用しているため、これらの影響を除去し、式 (2.2) で示した特性に近づけるために Fig. 2.19 に示すような補償制御を行った. Fig. 2.19 の τ_g は重力

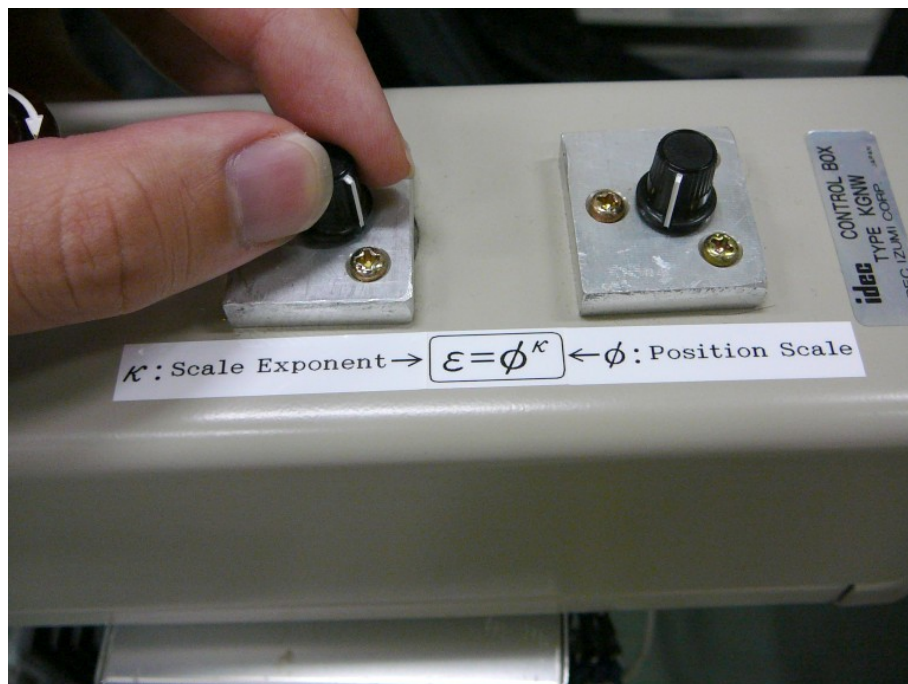


Fig. 2.18 Scale adjustment dials

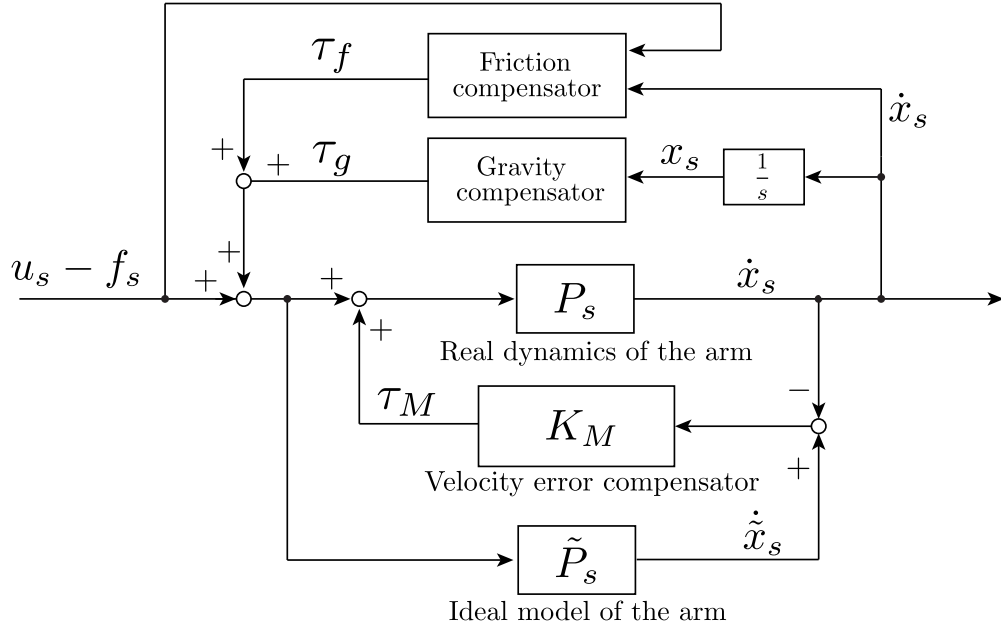


Fig. 2.19 Model error compensators

とバネ力を打ち消すための補償入力であり，重力とバネ力の同定データをもとに以下のような入力を加えた．

$$\begin{aligned} \tau_g = & -6.251 \times 10^{-7} x_s^5 - 2.362 \times 10^{-6} x_s^4 + 2.706 \times 10^{-4} x_s^3 \\ & + 3.769 \times 10^{-3} x_s^2 + 2.235 \times 10^{-2} x_s + 1.453 \times 10^{-2} \text{ [N]} \end{aligned} \quad (2.55)$$

ここで，スレーブアームの位置 $x_s[\text{mm}]$ はスレーブアームのストローク最下端位置を原点とし，下向きを正とする．また，スレーブアームにかかる摩擦の大きさを測定したデータをもとに，Fig. 2.19 の摩擦補償入力 τ_f は次式のように与えた．

$$\tau_f = \begin{cases} \text{sgn}(u_s - f_s) \tau_\mu & (\dot{x}_s = 0) \\ \text{sgn}(\dot{x}_s) \tau_\mu & (\dot{x}_s \neq 0) \end{cases} \quad (2.56)$$

ただし， $\text{sgn}(x)$ は x の符号を表し， $\text{sgn}(0) = 0$ とし，摩擦の大きさ τ_μ は τ_g と同様に同定実験の結果を基に多項式近似された次式で与えられる．

$$\begin{aligned} \tau_\mu = & -9.078 \times 10^{-6} x_s^5 - 2.115 \times 10^{-4} x_s^4 - 1.566 \times 10^{-3} x_s^3 \\ & - 3.786 \times 10^{-2} x_s^2 - 2.158 \times 10^{-3} x_s + 9.727 \times 10^{-3} \text{ [N]} \end{aligned} \quad (2.57)$$

また，実験で用いたスレーブアームには局所的に大きな静止摩擦が再現性なく発生するため，式 (2.56)，(2.57) のようなある x_s に対して一意的に決まるような補償入力だけでは十分な位置追従性が得られなかった．そこで，実際のスレーブアームの特性 $P_s(s)$ がコントローラの設計に用いた理想的なアームの特性 $\tilde{P}_s(s) = 1/(M_s s + B_s)$ に近づくように，理想的なアームのモデル $\tilde{P}_s(s)$ が出力する速度 $\dot{\tilde{x}}_s$ と実際の速度 $\dot{x}_s$ との誤差をフィード

バックした。フィードバックゲイン K_M は今回は 0.2 とした。なお、マスタアームには Fig. 2.19 に示したものと同様に、大きさ 0.515[N] の摩擦補償および $K_M = 10$ とするモデル化誤差補償を加えた。ただし、式 (2.55) に相当する重力およびバネ力の補償は行っていない。

なお、 $K_M \rightarrow \infty$ とするとアームの特性は理想的なモデル $\tilde{P}_s(s)$ に一致するが、実際にゲイン K_M を設定する際には、速度や力の測定ノイズによる振動が発生しない程度の値を選ぶ。

なお、本節で提案したモデル化誤差補償は非線形システムを対象としたものであり、補償後のアームに可変スケールバイラテラル制御を適用したときの全体システムの安定性を理論的に示すことは困難である。そこで、本節では PD 制御による単純な位置フィードバック系を構築し、アームが補償器を導入することで理想モデルの応答に近づいていることを実験的に示す。位置フィードバックの実験結果を Fig. 2.20 に示す。図から、提案手法を用いることでシステムの応答が理想モデルに近づいていることが確認できる。

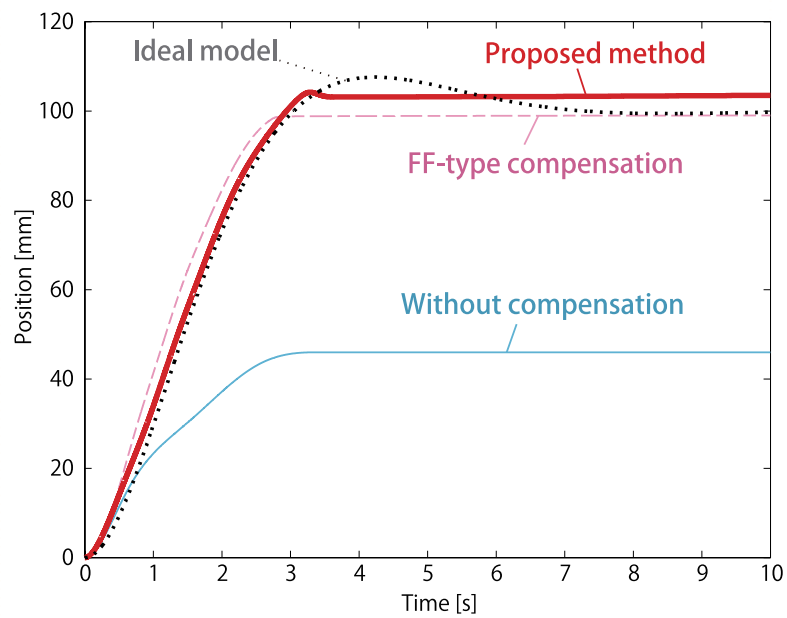
2.7.3 実験結果

2.7.4 マスタ・スレーブでの実験結果

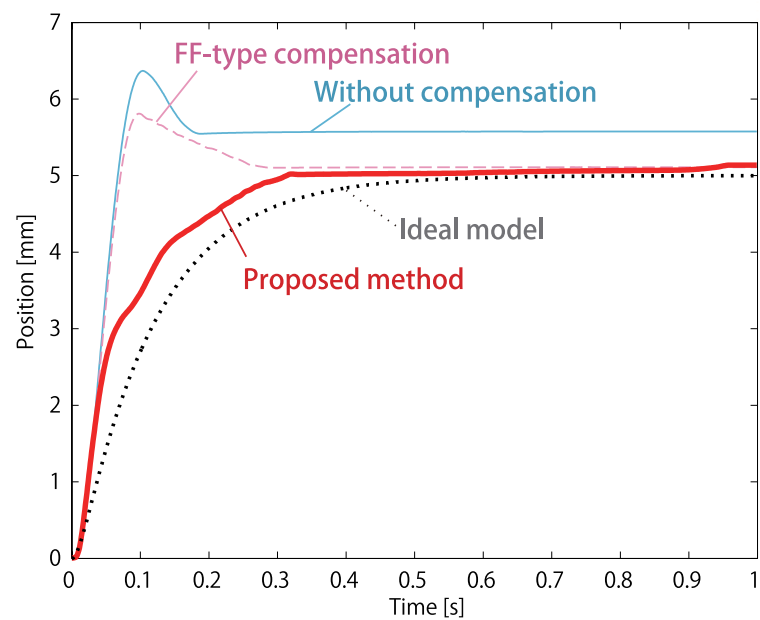
Table 2.2 のパラメータを用いてコントローラを設計し、シミュレーションを行うと Fig. 2.21 に示すような結果が得られ、理想的なアームにおいては十分な位置追従性が得られている。しかし、同じコントローラを用いて 2.7.2 節の補償制御を行わなかった場合の実験を行ったところ、Fig. 2.22 のような結果となり、位置・力ともに追従誤差が大きく、十分な性能が得られているとは言えない。

次に、式 (2.55), (2.56) の摩擦補償と重力補償のみを行って実験を行った。このときの実験結果を Fig. 2.23 に示す。補償を行っていない場合と比べて追従性が改善されたものの、摩擦や重力の同定誤差が存在するため、追従性を大きく改善することはできなかった。

次に、2.7.2 節で示した補償制御を全て用いた場合の実験結果を Fig. 2.24 に示す。モデル化誤差補償を行うことで、理想的なアームを仮定したシミュレーションと同等の制御性能が得られたことが分かる。



(a) Master arm



(b) Slave arm

Fig. 2.20 Effect of model error compensation

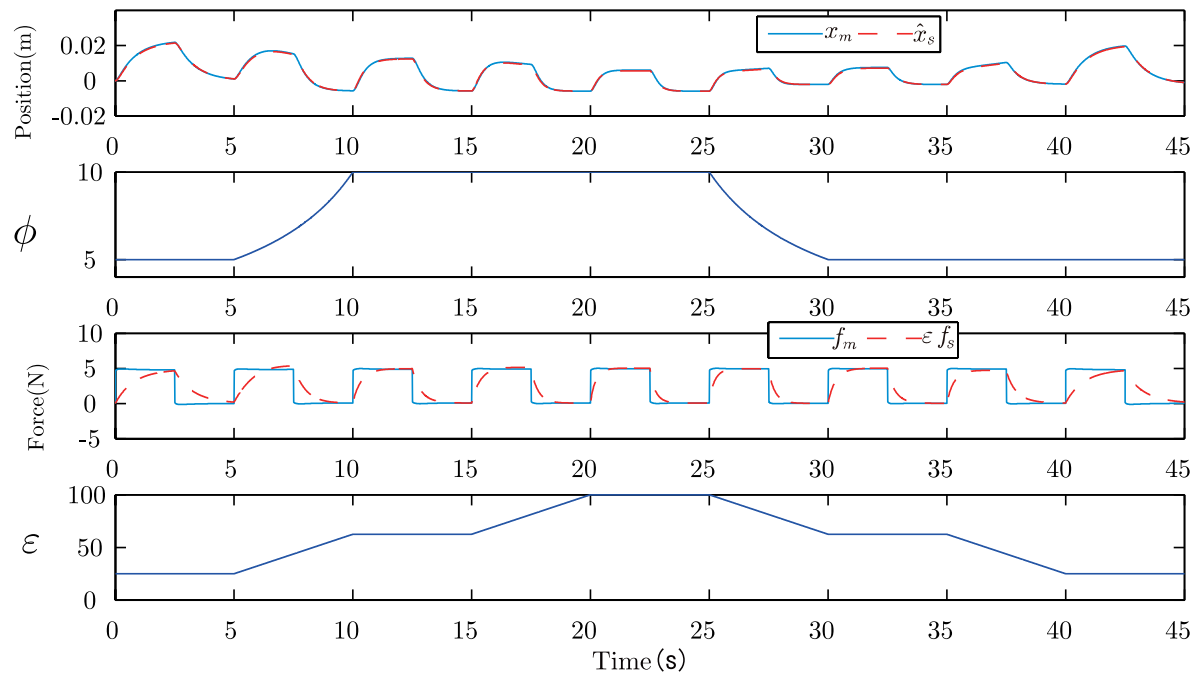


Fig. 2.21 Simulation result with ideal master and slave arms

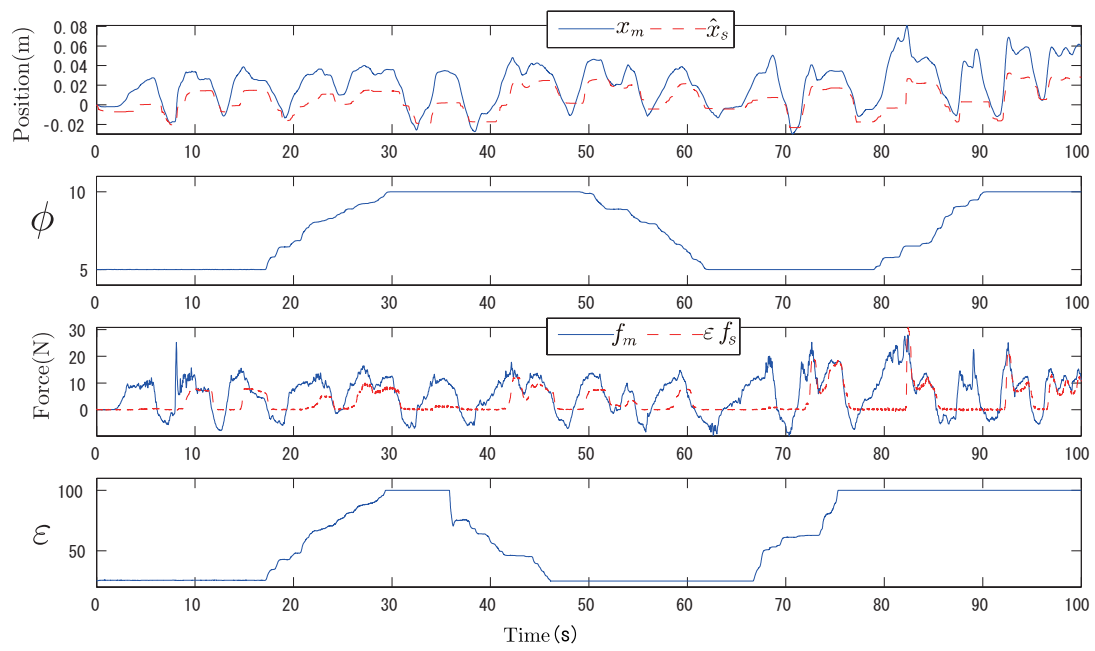


Fig. 2.22 Experimental result (without model error compensation)

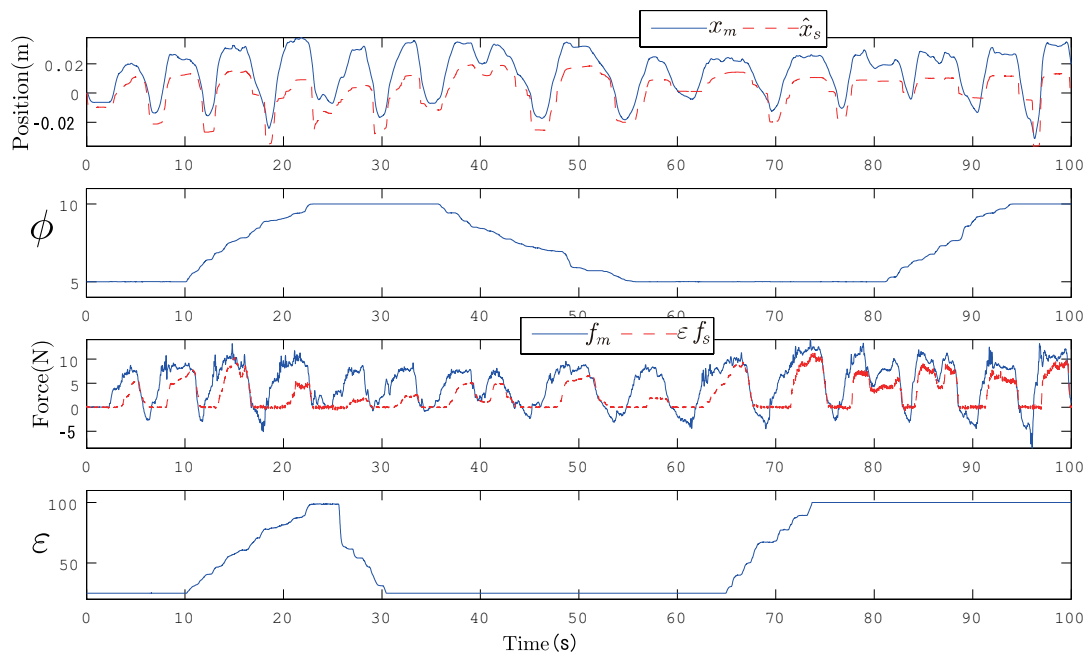


Fig. 2.23 Experimental result (with friction and gravity compensation only)

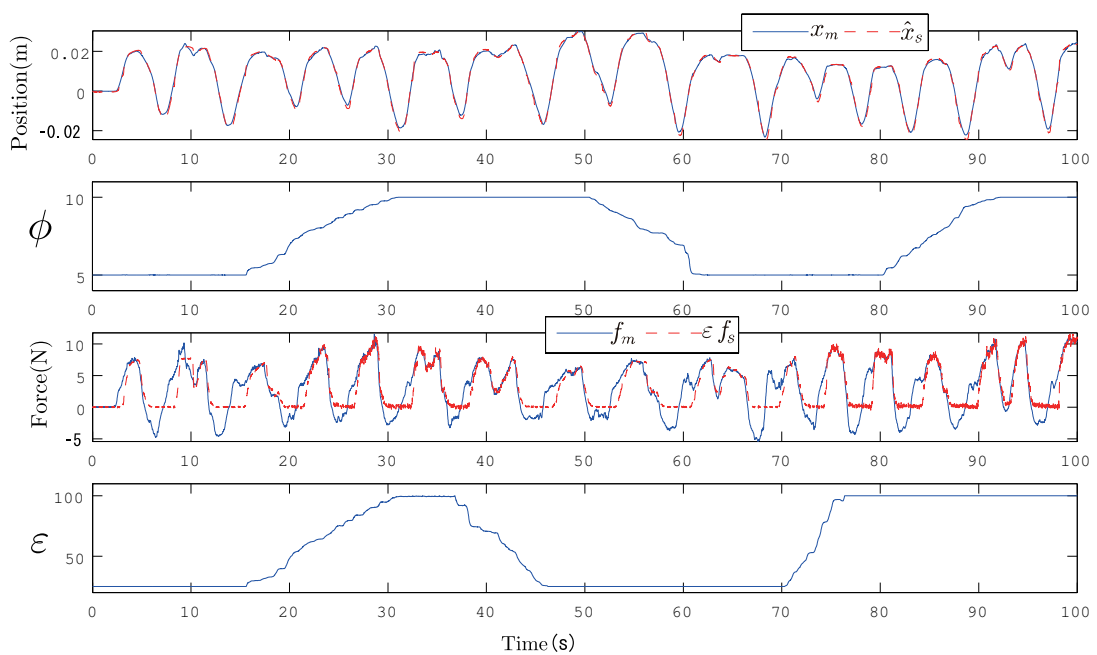


Fig. 2.24 Experimental result (with the proposed model error compensation)

2.8 おわりに

本章では、可変スケールテレオペレーションシステム (VST) を安定に制御するコントローラを設計するための理論的枠組みを提案し、実験によりその有効性を示した。オペレータと環境の不確かさを取り扱うために、オペレータと環境を受動的なものと仮定して H_∞ ノルムが 1 以下の構造化された散乱行列として表現し、これらの変動に対するロバスト安定性を保証するためにスケールド H_∞ 制御を導入し、そのロバスト安定条件を LMI 表現の形で導出した。スケールド H_∞ 制御を用いることで、 μ 設計では保証されなかった非線形時変のオペレータ/環境に対するロバスト安定性が保証される。VST は一種の時変システムとなるが、VST の状態空間表現がスケール比に対してアフィンであることから、スケール比をスケジューリングパラメータとするゲインスケジューリング制御が適用可能であることを示した。

本章では、コントローラ最適化計算の数値的安定性を高めるために、システムを原点に引き戻すようなバネ要素を制御目的に追加した。シミュレーションを行い、バネ要素を導入することで重みと制御性能の相関が強くなり重み調整が容易になったことを確認した。さらに、設計の自由度を高めるために、制御目的に対するスケール比依存型の重みを導入し、スケール比に対する LMI のアフィン性を損ねないような重みの設定方法を示した。このスケール比依存重みと従来の一定の重みとを比較した結果、スケール比依存重みを用いることで制御性能の高いコントローラを発見できる可能性が向上できることが分かった。また、入力に対する重みを固定し、かつ位置の重みと力の重みの比率を固定することによって、重み探索の自由度を下げても効率良く探索できる手法を提案した。また、アームのモデル化誤差を補償し、理想的な線形モデルに近づけるような制御系を加えることによって、実験装置においても十分な制御性能が確保されることを確認した。

しかしながら、現状では、位置と力を追従させ、かつコントローラの高周波ゲインを抑えるという制御目的を達成するために、制御目的に対する重みを非常に大きなものに設定しなければならない、それによりオペレータと環境に対するロバスト安定性が厳密には満足されていないという問題点があることが分かった。現状でも重みの探索とシミュレーションを繰り返すことで十分に安定に動作するコントローラを得ることが可能であるが、今後は計算のアルゴリズムを再検討してロバスト安定性を厳密に保証できる手法を検討する必要がある。

また、仕様を満たすコントローラが得られにくいもう一つの理由として、ゲインスケジューリング制御の保守性が挙げられる。本研究では、パラメータボックスの各頂点で定義される LMI を解いてコントローラを得ているが、LMI 中のリアプノフ変数は全ての LMI に対して共通でなければならない。この問題に対して、リアプノフ変数をスケジュー

リングパラメータに依存させる伸長型 LMI などの研究が進んでおり [8][13], そのような新しい手法を適用することで保守性の低減が期待される.

付録 2.A L_2 ノルムの定義

複素関数行列 $G(s)$ の L_2 ノルムは次式で定義される.

$$\|G(s)\|_2 \triangleq \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{tr}[G^*(j\omega)G(j\omega)]d\omega \right)^{1/2} \quad (2.58)$$

パーセバルの等式から, L_2 ノルムは時間領域で次式のようにも書ける.

$$\|G(s)\|_2 \triangleq \left(\int_{-\infty}^{\infty} \text{tr}[G^*(t)G(t)]dt \right)^{1/2} \quad (2.59)$$

付録 2.B 一般化制御対象の係数行列

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m+1}{M_m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \phi \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{B_s+1}{M_s} \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{M_m} & 0 & \frac{1}{M_m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2}{M_s} & 0 & \frac{1}{M_s} \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{M_m} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{M_s} \end{bmatrix} \quad C_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ -k_1 & -1 & -k_2 & -\varepsilon \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & -2\varepsilon & 1 & \varepsilon \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad D_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad D_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

付録 2.C 線形化アルゴリズム

線形化アルゴリズム [27][20] は,

$$\begin{bmatrix} X & I \\ I & S \end{bmatrix} \geq 0 \quad (2.60)$$

の条件化で $\text{tr}XS$ を最小化するアルゴリズムである. ある点 (X_0, S_0) において, $\text{tr}XS$ の線形近似は

$$\phi_{\text{lin}} = \text{constant} + \text{tr}(S_0X + X_0S)$$

という形をとる. このアルゴリズムは次のようになる.

1. 解 X_0, S_0 を見つける. もし解がなければ終了する. $k = 0$ とする.
2. $V_k = S_k, W_k = X_k$ として, 式 (2.60) の条件下で次の LMI 問題を解く.

$$\text{minimize } \text{tr}(V_kX + W_kS)$$

3. $k = k + 1$ として 2. に戻る.

第 3 章

可変スケールテレオペレーションの ユーザビリティ評価

3.1 はじめに

可変スケールテレオペレーション (VST) システムは、素早い動作と繊細な動作を組み合わせた微細作業を効率よく行うことができると考えられる。しかしながら、スケール比の調整に時間を要するため、VST システムが本当に有効であるかどうかについては実験を行なって確認する必要がある。

長谷川らは、ロボット群の操縦インタフェースにズーム機構つきのカメラを導入し、ロボット群の一部を拡大して局所的に動作司令を与えられるシステムを提案している [23]。しかしながら、ロボット自体の操縦はマスタ・スレーブシステム方式ではなく、力覚フィードバックが存在しない。Dubey らが提案した可変スケールシステム [12] においても、タスクを設定して作業に要する時間を測定し、速度のスケール比を可変にすることの有効性を示したものの、力のスケール比が可変ではないほか、速度のスケール比はスレーブアームの位置に応じてあらかじめ決められたものであるため、本研究が対象とする速度と力のスケール比をユーザが任意に決定できるシステムとは実験環境が異なっている。またヴァンダーポールテンら [60] は、VST システムのカメラ制御アルゴリズムを幾つか提案し、計算機上のシミュレーションで各々のアルゴリズムのユーザビリティ評価を行ったが、オペレータへの力のフィードバックが存在していない。したがって、オペレータがスケール比を調整し、かつ力のスケール比が可変となっているシステムの有効性について示された例はこれまでのところないと言える。

本節ではズーム機構を持つマイクロ스코プをスレーブ側に配し、速度のスケール比とマイクロ스코プのズーム倍率を連動させた VST システムを試作した。スレーブ側の力に大きなレンジが必要となるタスクを考案し、速度のスケール比と力のスケール比の双方

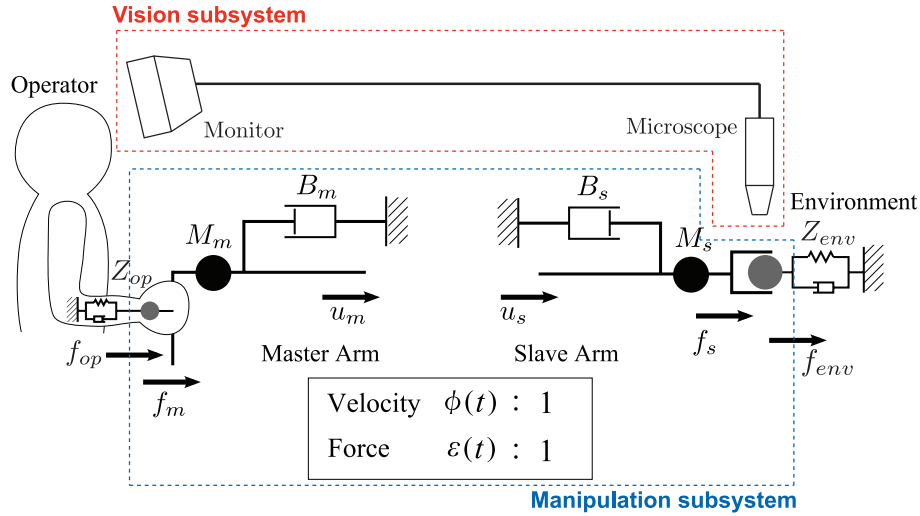


Fig. 3.1 1-DOF VST system with visual feedback

が可変となる VST システムのユーザビリティ評価実験を行った。予備実験の結果をもとに適切なスケール比調整インタフェースを試作し、本実験を行った。実験の結果から、オペレータ毎に個人差があるものの VST が有効であることを確認した。

3.2 視覚システムとの統合とユーザビリティ評価

3.2.1 視覚システムを統合した VST システムの試作

前章までの議論により、VST システムを安定に動作させ、かつ十分な追従性を達成できる制御系の設計が可能となった。しかし、実際にテレオペレーションシステムを利用するには、スレーブ側の視覚情報を操縦者にフィードバックすることが不可欠である。本節では、Fig. 3.1 に示すズーム機構を有するマイクروسコープをスレーブ側に設置した VST 統合システムについて述べる。

スレーブ側の視覚情報をオペレータに提示するために、スレーブ側に Fig. 3.2 に示すマイクروسコープを設置する。マイクروسコープは KEYENCE 製 VH-5000 であり、同社製のズームレンズ VH-Z25（ズーム倍率 25～175 倍）が取り付けられている。本実験においては、速度スケール ϕ が 5～10 であるので、 $\phi = 5$ にズーム倍率 25 を、 $\phi = 10$ にズーム倍率 50 をそれぞれ対応させる。

マイクروسコープの倍率はズームドライビングを回すことで調節できるが、Fig. 3.2 に示すようにこれをモータ駆動とし、P 制御によってスケール調整ダイヤルに連動してズーム倍率が変化するようにした。

マイクروسコープの映像は Fig. 3.3 に示すようにマスタアームの奥に設置されたディ

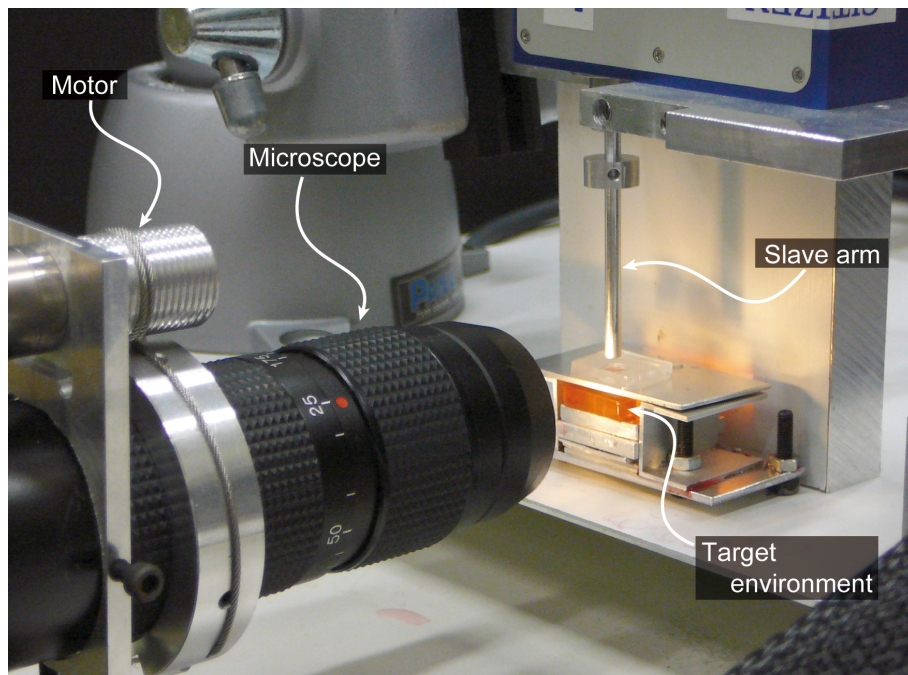


Fig. 3.2 Microscope

スプレイを用いて操作者に提示される．また，このディスプレイの真上に Fig. 3.4 に示すような現在のスケールを確認するためのディスプレイを設置した．

3.2.2 ユーザビリティ評価の予備実験

実験方法

可変スケールテレオペレーションが実際に有用であることを確認するとともに，今後構築する多自由度システムを実用性の高いシステムとするための情報を得ることを目的として，ユーザビリティ評価実験を行う．まず評価方法自体の妥当性の検証も含めて予備的な実験を行った．

対象物としては，Fig. 3.5 に示すような2層のゼリーをスレーブ側の環境として設置する．このうち，透明なゼリー (A 層) は厚さ約 2[mm] で大きさは約 10[mm]×10[mm] であり，0.20～0.30[N] 程度の力を加えると貫通する．赤いゼリー (B 層) も厚み約 2[mm] で大きさは約 10[mm]×10[mm] と A 層のゼリーと同じ大きさであるが，A 層よりも多少柔らかくしてあり，さらに B 層のゼリーは被験者に判別させるために弾性率の異なる2種類のゼリーを用意した．柔らかいゼリーは，0.05～0.07[N] 程度の力で破損し，硬いゼリーは 0.15～0.20[N] 程度の力で破損する．

タスクの内容は，マスタアームを操作してスレーブ先端のプロープで A 層を貫通させ，

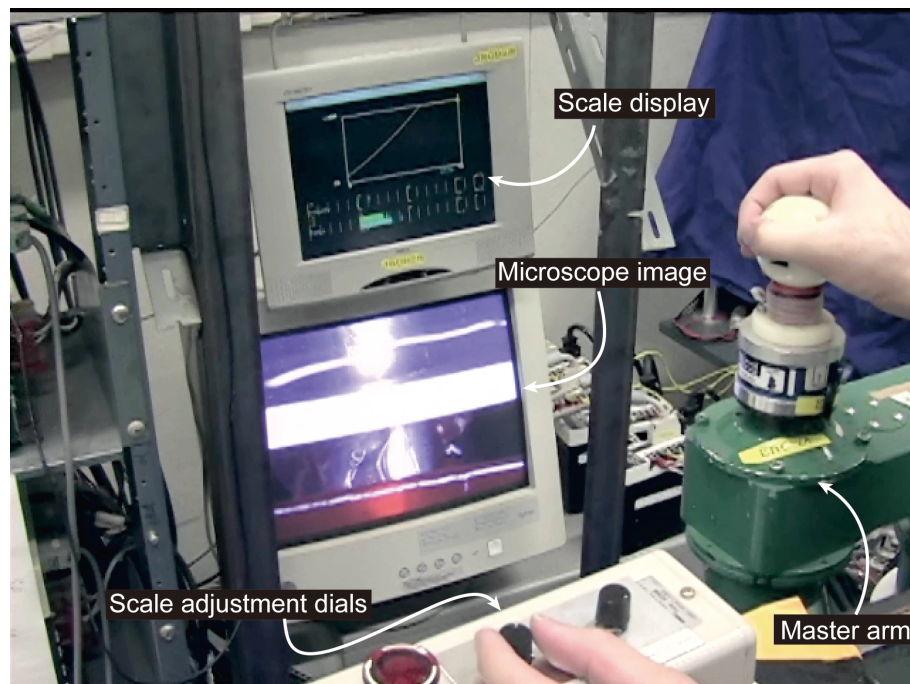


Fig. 3.3 An overview of the master console

B層を破損しないよう注意しながらプローブを接触させ、B層のゼリーが「硬いゼリー」か「柔らかいゼリー」かを判別することである。B層を破損せず、かつゼリーの硬さを正しく判別できた場合にそのタスクを成功とし、それ以外の場合を失敗とする。

上記のタスクを、次の3種類のスケール比について各4回ずつ行い、タスクの成功率や所要時間を調べる。

(LF: low fixed) $\phi = 5, \varepsilon = 25$ に固定

(HF: high fixed) $\phi = 10, \varepsilon = 100$ に固定

(V: variable) 可変スケール

なお、各4回の実験のうち、硬いゼリーと柔らかいゼリーをランダムな順番でそれぞれ2回ずつ提示した。なお、実験結果が習熟効果の影響を受けないように、モード LF, HF, V の順番は被験者ごとに異なる順番とした。例えば、ある被験者は LF4 回, HF4 回, V4 回の順で実験を行い、別の被験者は HF4 回, V4 回, LF4 回の順に実験を行った。今回のユーザビリティ評価実験における被験者は 20 代～40 代の男性 5 名、女性 1 名の計 6 名である。

なお、本節の実験におけるタスクは実際の作業を想定したものではなく、1 自由度システムで作業が可能で、かつ幅広い力加減が必要になるように設定された抽象的なタスクである。このタスクは、細胞膜を針で貫通して中の細胞核を操作するという作業に類似して

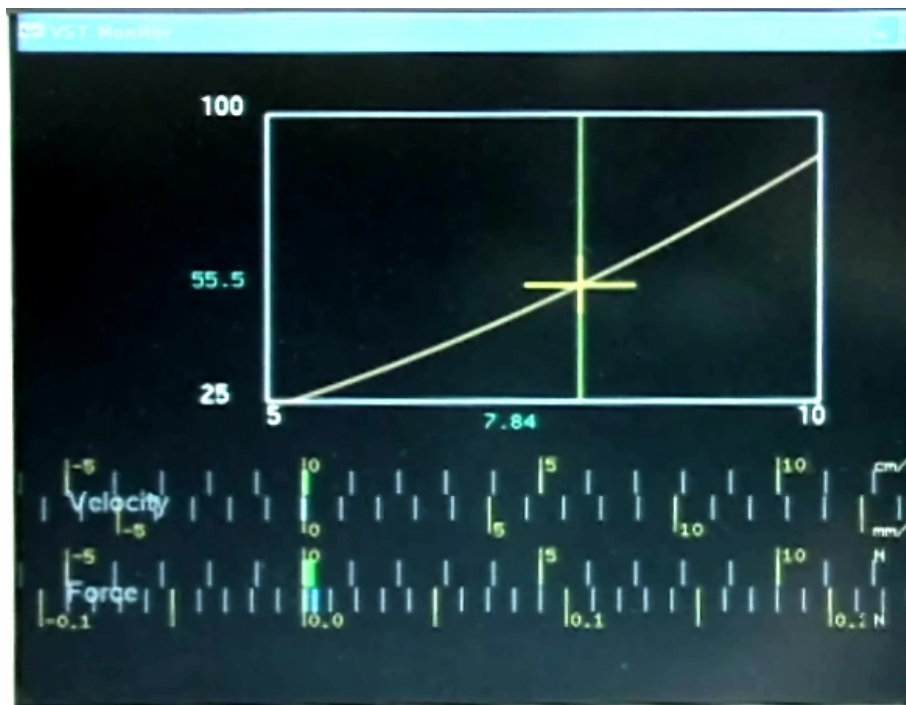


Fig. 3.4 Scale display

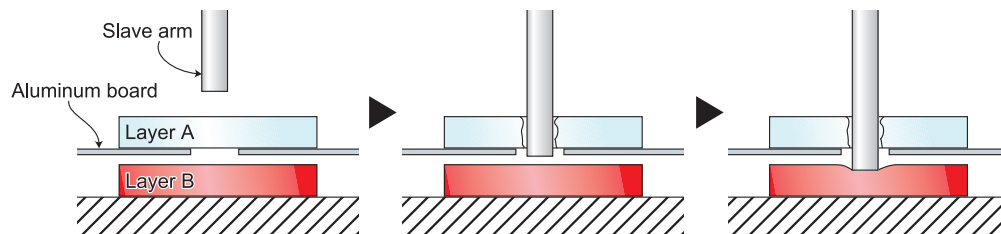


Fig. 3.5 Target task

いるため、本実験の結果は細胞操作への応用が可能と考えられる。しかしながら、手術などの作業は一般に多自由度の複雑な作業であるほか、本実験のように環境を真横から見えるようにカメラを配置することは難しい。従って、手術を対象とした VST システムについてはさらなるユーザビリティテストやインターフェース設計が必要であり、今後の課題と考えられる。

ユーザビリティ評価の予備実験の結果

Table 3.1 にタスクの成功率を示す。結果から、スケールの種類がタスクの成功率に与えた影響は小さかったことがわかる。

次に、タスクの所要時間を Fig. 3.6 に示す。3つのスケールのうち、可変スケールが

Table 3.1 Success rate (%)

Subject No	Mode LF	Mode HF	Mode V
1	75	75	75
2	75	100	100
3	75	100	75
4	50	75	75
5	100	50	75
6	50	75	50
Average	70.8	79.2	75.0

最も早かった被験者は2名であった。有意水準 0.05 の t 検定によって有意差の有無を調べたが、可変スケールが有意に早い被験者はいなかった。一方で、被験者3については、モード HF のほうが可変スケールよりも有意に早いという結果になった。

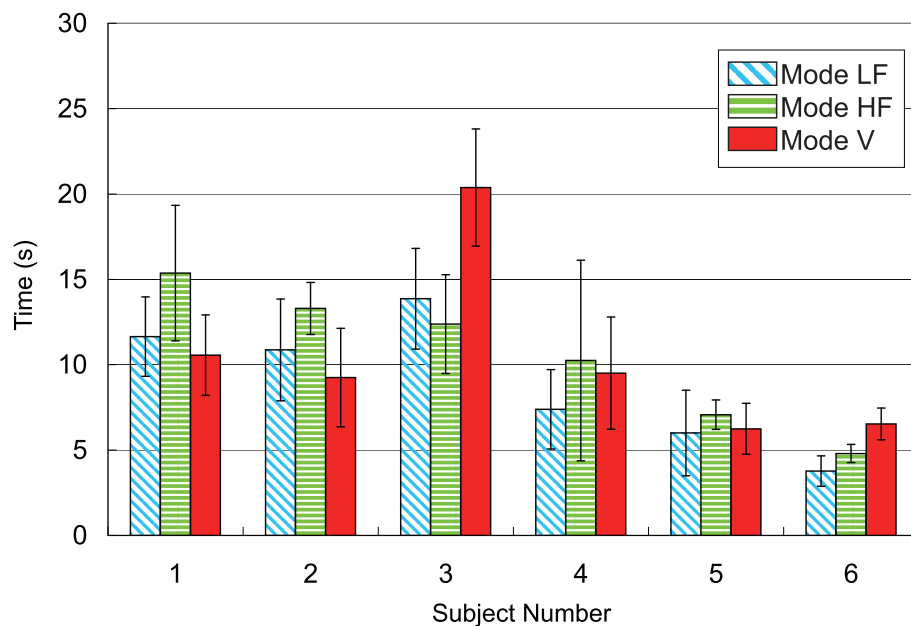


Fig. 3.6 Task completion time

以上のことから、この実験結果からは VST システムがマイクロテレオペレーションの効率を向上させるのに有効であるとは言い難い。VST システムの有効性が示せなかった理由としては、実験方法の問題とユーザインタフェースの問題が考えられる。まず、予備実験では実験の後半になるほど被験者が操作に慣れてタスク所要時間が短くなったため、事前の練習回数が不十分であったと考えられる。また、モード LF でも B 層の硬さを容易

に判別できてしまう被験者もいたことから、B 層に使われた硬いゼリーと柔らかいゼリーの弾性率の違いが大き過ぎることも分かった。

上記のような実験方法の初歩的な問題のほか、本実験の結果および被験者からのアンケートの回答などから、現状の VST システムには次のような問題点があることも分かった。

- 速度スケールとカスケールのダイヤルを間違えて操作するケースが存在する。
- ダイアルの回転に時間を費やすため、タスク所要時間が長くなる。
- スケールのプリセットがあれば操作性が向上する可能性がある。
- 速度スケールはカメラのズームと連動しているので直感的に把握できるが、カスケールは画面に提示されているだけなので直感的ではない。

3.2.3 インタフェース部分の改良後のユーザビリティ評価実験

前節の予備実験によって、ダイヤルの操作性やスケール比の提示方法に問題があることが分かったので、本節ではこれらの問題を解決するためにスケールの調整および提示インタフェースを変更し、再びユーザビリティ評価実験を行った。

改良したシステム

実験装置の構成を Fig. 3.7 に示す。

まず、VST システムにおいてはスケール比を調整するという動作が必要になるが、前節のようにダイヤルを用いると調整に時間がかかりタスクの所要時間が長くなることが分かった。そこで、改良したシステムにおいてはダイヤルよりも素早く操作が可能になるように、Fig. 3.8 に示すようなスライド式の可変抵抗器を用いたスケール比調節器を試作した。速度スケール比のスライダとカスケール比のスライダを平行にすれば、2 本指で同時にスケール比を調整できるものの、速度スケールのダイヤルとカスケール比のダイヤルを間違える可能性が高い。そこで、Fig. 3.8 の装置においては2つのスライダを直交させ、速度スケール比は横方向のスライダで、カスケール比は縦方向のスライダで調節する方式にした。

現状ではスケール比の範囲が狭く、予備実験でもほとんどの被験者がスケール比の上限と下限のみを用いて操作を行ったので、改良したシステムにおいては式 (2.54) のような割り当ては用いなかった。

現在のスケール比をオペレータに提示するために、予備実験ではディスプレイに Fig. 3.4 に示すような表示を行ったが、この方法ではスケール比を直感的に把握することが難しかったため、Fig. 3.9 に示すような表示方法に改良した。Fig. 3.9 のスケール比を表

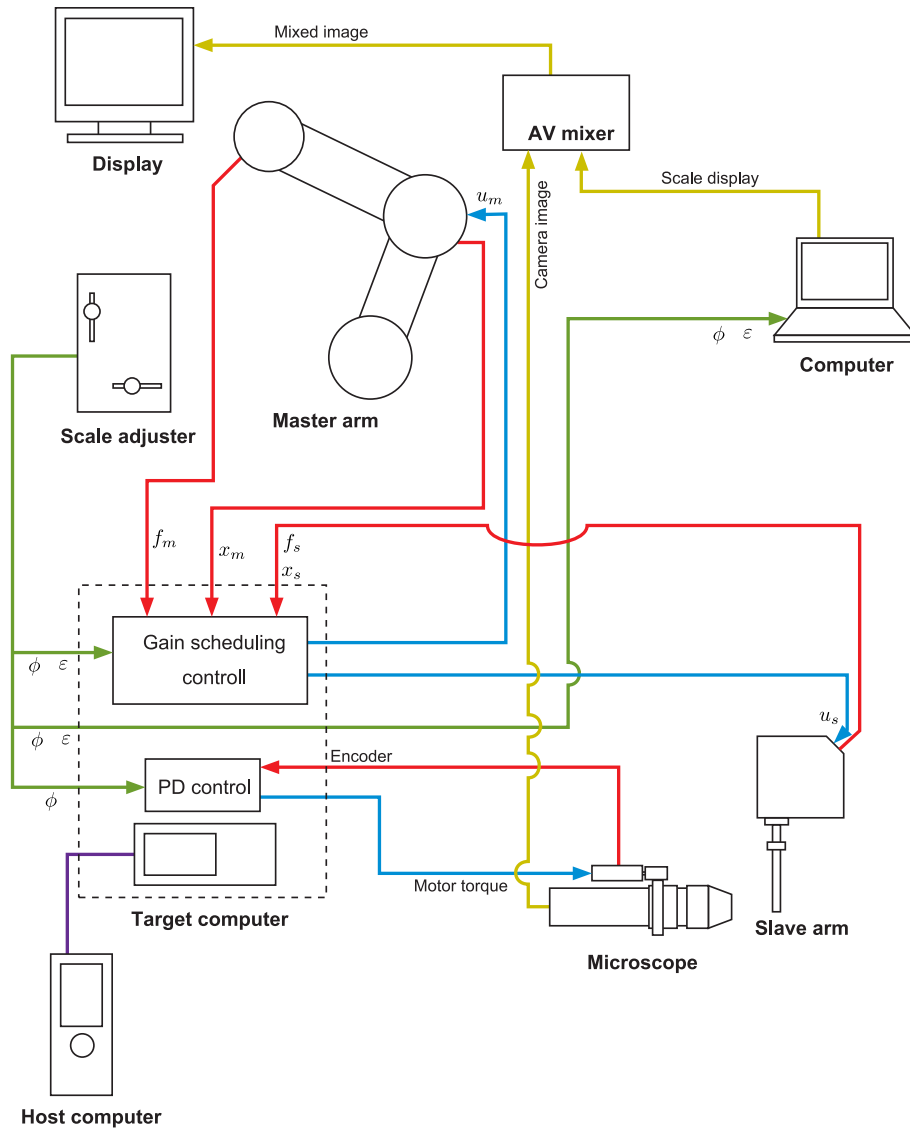


Fig. 3.7 Configuration of the experimental setup

示するバーの向きと Fig. 3.8 のスライダの向きとを対応させ、さらにディスプレイに表示する速度スケール比のバーとカスケール比のバーの形状を異なるものにし、それぞれのバーにアイコンを表示させた。これらの対策を施したことで、スライダの誤操作を防ぐことが可能であると思われる。また、前節の実験ではスケール比表示画面を注視していなかった被験者が存在したため、Fig. 3.10, Fig. 3.11 に示すようにマイクروسコープの映像とスケール比の表示をクロマキーによって重ね合わせ、ユーザの視線移動を低減するようにした。

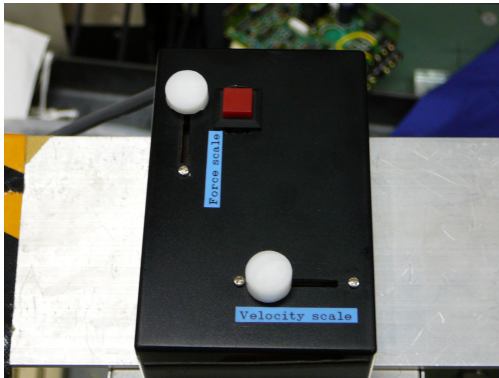


Fig. 3.8 Scale adjustment slider

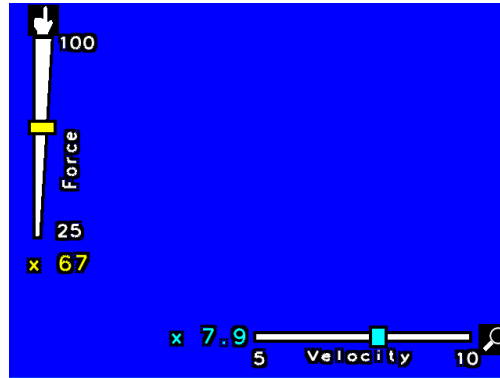
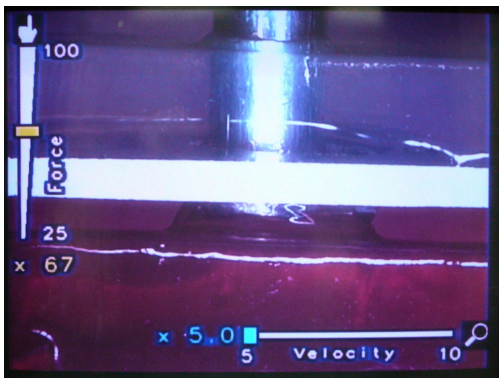
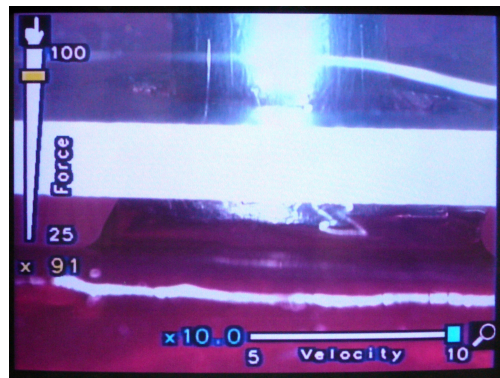


Fig. 3.9 Improved scale display

Fig. 3.10 Scale display overlaid on the microscope image ($\phi = 5$)Fig. 3.11 Scale display overlaid on the microscope image ($\phi = 10$)

評価実験

3.2.3 節のシステムを用いて再度ユーザビリティ評価実験を行った。タスクの内容は前節の予備実験と同様であるが、本節の実験は被験者を 20 代～50 代の男性 8 名、女性 1 名に増やした。実験は被験者 1 名につき 18 回（各モード 6 回ずつ）行った。予備実験では単一のモードでの実験を 4 回連続で行ったが、実験結果を被験者ごとに見ると習熟効果の影響が大きく出ていたので、本実験では 3 種類のモードをランダムな順番で実験することにした。さらに、実験装置の操作に慣れるとともにゼリーの硬さを把握するため、事前に 12 回（各モード 4 回）以上の練習を行った。なお、予備実験の時よりも「硬いゼリー」と「柔らかいゼリー」の弾性率の差を小さくし、モード LF では判別しにくくしている。

本実験のタスク成功率を Table 3.2 に示す。モード HF およびモード V における成功率は前回と同程度だったが、モード LF の成功率が半減した。これはゼリーの硬さの差が小さくなったために、力のスケール比が低く反力が小さい状態だと判別が難しかったためだと考えられる。この成功率を各被験者ごとに χ^2 検定（有意水準 5%）により検定したとこ

ろ、LF と V との間には有意差が認められた被験者は9名中3名いたが、HF と V との間には9名いずれの被験者においても有意差は見られなかった。

次に、本実験のタスク所要時間を Fig. 3.12 に示す。モード V よりもモード LF が有意に速かった被験者は2名であった。一方、モード HF よりもモード V が有意に速かった被験者は3名であった。モード HF では、透明なゼリーを貫通するために大きな力が必要であったため、タスクの所要時間が大きくなる傾向があった。可変スケールではスケールの調整に多少の時間を要するためモード LF よりもタスク遂行に時間がかかったものと考えられる。可変スケールの方がモード HF より速かった被験者は3名（9名中）であるが、これらの3名は可変スケールのメリットをよく理解してモード V を使いこなしていると言える。すなわち、可変スケールテレオペレーションはこれら3名にとっては確かに有効であるが、残りの6名の被験者では有意に速くはなかったので、使いこなすにはある程度の慣れが必要であるとも言える。

以上の実験結果から、可変スケールテレオペレーションシステムを利用することで、低倍率による素早い操作と高倍率による正確な操作をうまく組み合わせて効率的なマイクロマニピュレーションを行える可能性が示された。ただし、本実験での A 層のゼリーと B 層のゼリーが破壊するときの力の大きさの比（約 4 倍）は、力スケール比の範囲 ($25 \leq \varepsilon \leq 100$) に合わせて設定されたものであるが、実際には作業に必要な力のレンジに基づいて ε の範囲を設定してシステムの設計をするべきである。

また、速度スケール比については、スケール比の範囲が狭かったことや、システムが 1 次元であり 2.1 節で述べたような広範囲を探索するタスクが設定できなかったことから、本実験ではその有効性が十分に示されなかったと言える。

被験者からの意見

実験後に、各被験者に対して 3.A の Fig. 3.13, Fig. 3.14, Fig. 3.15 に示すようなアンケートを行った。このアンケートの集計結果（被験者が回答したスコアの平均）を Table 3.3, Table 3.4 に示す。A 層を貫通するタスクについてはモード LF とモード V がモード HF よりも簡単だったという回答が得られた。B 層の硬さを判別するタスクについては、モード HF とモード V がモード LF よりも簡単だったという回答が得られた。

また、スケール比を調整する装置は前回よりも使いやすいという回答が得られた。速度のスケール比については、アンケートの回答が前回、今回ともに良い値が得られており、速度スケールがカメラのズームと連動しているため直感的に把握しやすいためと思われる。また、問 4（ウ）の回答から、力のスケール比は装置の改良によって直感的に提示できたことが分かる。このアンケートでは、速度スケールよりも力スケールのほうが直感的に把握しやすいという結果が得られている。これについては、「速度スケール」という用語よりも「位置スケール」という用語の方が分かりやすい、という意見が一部の被験者か

Table 3.2 Success rate (%)

Subject No	Mode LF	Mode HF	Mode V
1	50	83	67
2	0	67	100
3	50	67	100
4	50	100	67
5	67	83	67
6	0	83	67
7	33	83	83
8	17	83	67
9	67	67	67
Average	37.0	79.6	75.9

ら寄せられており、このことが影響している可能性がある。

また、スケール比のプリセットは本節の実験では導入しなかったが、今後スケール比のプリセットを実装して、操作性が改善されるかどうかの実験を行う必要があると思われる。

その他、被験者からの意見として以下のようなものがあり、本システムには改良すべき点が多く存在することが分かる

1. マスタアームの慣性が大きいため、環境からの反力が十分に感じられない
2. 力の情報を可視化してはどうか
3. 各スケール比ごとに環境の特性を学習しなければならない
4. スケール比を調整する作業は面倒である

1. については、慣性や粘性の小さいマスタアームを利用することで解決可能だが、制御器を改良して力の追従性を向上させることも必要と思われる。2. の力情報の可視化は、微細作業を行うにあたって有用であると思われるが、視覚の情報量が増えるため、作業効率が低下する可能性も考えられる。3. については、スケール比のプリセットを導入してスケール比の組み合わせを有限にする、あるいはスケール比を変化させても環境の特性が変化しないように式 (2.54) の割り当てを用いるなどといった方法で解決可能と思われる。4. の課題は、ジョイスティックやタッチパネルなどの2次元情報を入力可能なインタフェースを利用すれば改善できると思われるが、装置が高価になってしまうというデメリットもある。

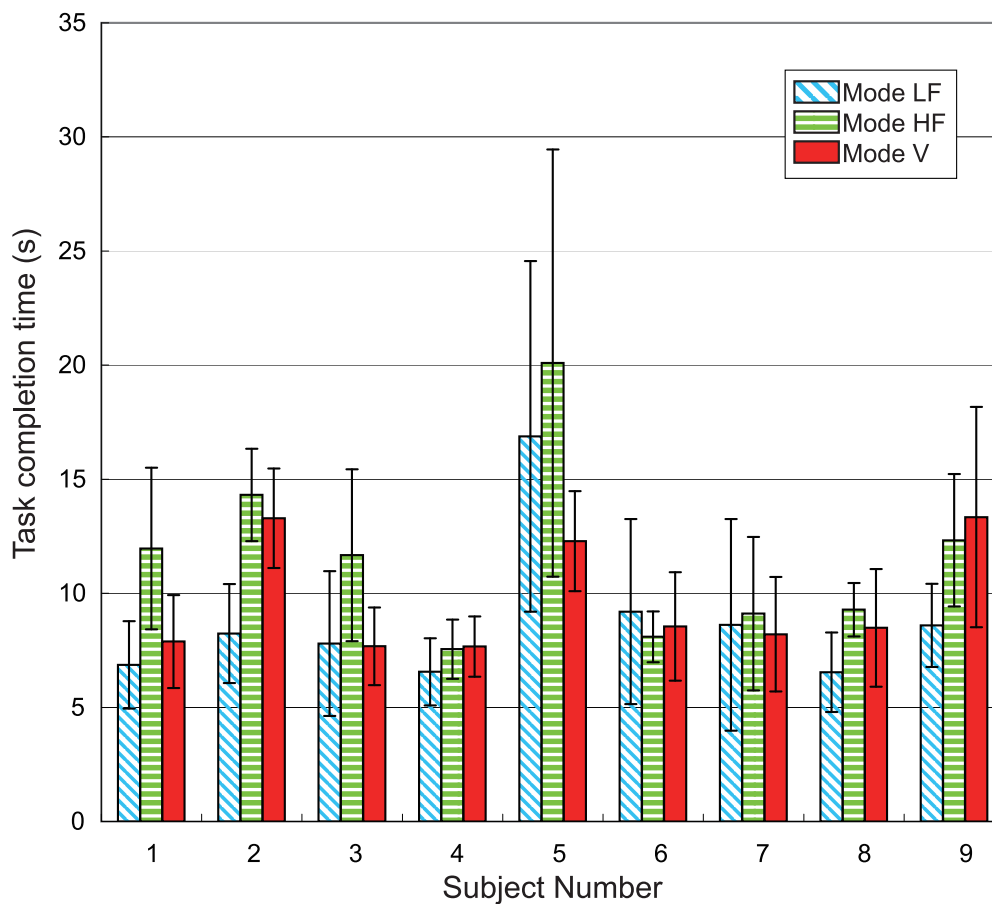


Fig. 3.12 Task completion time

Table 3.3 Questionnaire data 1

Scale mode	LF 1st	LF 2nd	HF 1st	HF 2nd	V 1st	V 2nd
Penetration subtask	4.2	4.4	2.4	2.8	4.0	4.0
Contact subtask	4.2	3.2	3.6	3.4	3.8	3.2
Identification subtask	2.7	1.6	3.8	3.0	3.4	2.6

Average numbers of answers of the five subjects who participated in both first and second experiments are shown. A higher number indicates that the tasks were easier.

Table 3.4 Questionnaire data 2

Question	Old device	New device
Is the scale adjustment device easy to use?	2.4	3.8
Is the velocity-scale displaying intuitive?	3.4	3.6
Is the force-scale displaying intuitive?	2.0	3.8

A higher number means positive answer, and a lower number means negative one.

3.3 おわりに

本章では可変スケールテレオペレーションシステムにズーム機構を持つカメラシステムを統合し、可変スケール制御の有効性を検証するためのユーザビリティ評価実験を行った。予備評価実験の結果から、2つのダイヤルを回してスケールを調整する方法はオペレータにとって直感的ではなく、タスクに時間を要したりタスクが失敗する場合があった。また、スケール比を表示するディスプレイがカメラ映像と独立しているため視線の移動が多いという課題があった。そこで、直交させた2個のスライダで速度と力のスケール比を調整する方法を提案し、さらにスケール比の設定をスレーブ側カメラ映像に合成し、スケール表示の向きとスライダの向きを合わせるようにした。再度評価実験を行った結果、スケール比の調整に戸惑うケースが減少し、タスク所要時間が一部のユーザにおいては固定スケールよりも有意に短くなった。したがって可変スケールは有効であると言えるが、全ての被験者にとって有効であったとは言えず、操作にはある程度の熟練が必要であることが分かった。

本論文で行った操作性評価は1自由度システムを利用したものであるため、今後は多自由度のシステムを構築するとともに、実際の微細作業を想定したタスクを設定した評価実験を行う必要がある。特に、実際のユーザである医師による評価を受けてインタフェースを改良することによって、実用的な可変スケールシステムを開発することが望まれる。

また、本研究では直動型のスライダ2個を使用してスケール比の調整を行ったが、オペレータが両腕を使用して作業をする場合には、スライダとマスタアームとの間で片方の手を行き来させなければならず、作業の支障となることが予想される。今後は、双腕作業においても容易に用いることのできるスケール調整インタフェースの開発が必要である。その方法として、例えばスレーブ側に仮想のスケール調整インタフェースを提示するといった拡張現実的な手法が挙げられる。どのようなインタフェースが最適であるかは、今後様々な実験を行なって検証する必要があると思われる。

付録 3.A ユーザビリティ評価実験のアンケート内容

3.2.3 節の実験の後に被験者に行ったアンケート用紙を Fig. 3.13, Fig. 3.14, Fig. 3.15 に示す。

名前 _____

VST のユーザビリティ評価実験についてのアンケート

8段階評価の項目について

前回の実験に参加された方のうち、前回の記憶が十分に残っている方は、前回の感想を×印で、今回の感想を○印で記入してください。
前回の感想を記入しない方は、○印のみ記入してください。

記入例

1	2	3	4	5
難しかった		○		簡単だった
		前回		

1. $\phi=5$ (低倍率) の固定スケールについて

(ア) 透明なゼリーを貫通する作業は簡単でしたか？

1	2	3	4	5
難しかった				簡単だった

(イ) 赤いゼリーを破損しないように接触するのは簡単でしたか？

1	2	3	4	5
難しかった				簡単だった

(ウ) 赤いゼリーの硬さを判断することは簡単でしたか？

1	2	3	4	5
難しかった				簡単だった

(エ) その他、感想があればご記入ください。

Fig. 3.13 Questionnaire sheet (Page 1)

2. $\phi=10$ (高倍率) の固定スケールについて
(ア) 透明なゼリーを貫通する作業は簡単でしたか？

1	2	3	4	5
難しかった				簡単だった

(イ) 赤いゼリーを破損しないように接触するのは簡単でしたか？

1	2	3	4	5
難しかった				簡単だった

(ウ) 赤いゼリーの硬さを判別することは簡単でしたか？

1	2	3	4	5
難しかった				簡単だった

(エ) その他、感想があればご記入ください。

3. 可変スケールについて
(ア) 透明なゼリーを貫通する作業は簡単でしたか？

1	2	3	4	5
難しかった				簡単だった

(イ) 赤いゼリーを破損しないように接触するのは簡単でしたか？

1	2	3	4	5
難しかった				簡単だった

(ウ) 赤いゼリーの硬さを判別することは簡単でしたか？

1	2	3	4	5
難しかった				簡単だった

(エ) その他、感想があればご記入ください。

Fig. 3.14 Questionnaire sheet (Page 2)

4. スケールの調整について
(ア) スケールを調整する装置は使いやすいですか？

1	2	3	4	5
使いにくい				使いやすい

(イ) 速度のスケールを直感的に把握できましたか？

1	2	3	4	5
できなかった				できた

(ウ) 力のスケールを直感的に把握できましたか？

1	2	3	4	5
できなかった				できた

(エ) (前回の実験に参加された方のみ)
ダイヤル (前回) とスライド (今回) はどちらが操作しやすいですか？

1	2	3	4	5
スライド				ダイヤル

5. 本システムの全体的な感想や、改善してほしい点などがあればご記入ください。

ご協力ありがとうございました。

Fig. 3.15 Questionnaire sheet (Page 3)

第 4 章

変動時間遅れに対応した波変数に基づくバイラテラル制御

4.1 はじめに

計算機ネットワークを介した通信には時間遅れが存在し、回線の状況によって遅れ時間は変動する。このような環境下でのバイラテラルテレオペレーションシステムでは、制御系の安定性と追従性が大きな課題となっている。Anderson と Spong[1] は散乱理論を導入することによって、受動性を保証する制御手法を提案した。Niemeyer と Slotine[41] はこの考えを発展させ、波変数に基づいた制御則を提案した。これらの手法は遅れ時間が一定ならば安定性が保証される。

しかし遅れ時間が変動すると送信された波形が歪んで受信される。その結果、マスタとスレーブの位置がドリフトするほか、システムの受動性が満たされなくなるという問題が起こる。この問題に対処するため、Kosuge らは受信側にバッファを導入して一定時間遅れを擬似的に実現した [32]。しかし、この方法ではシステムの性能は最長の遅れ時間に合わせて低下してしまう。一方で Niemeyer と Slotine は波変数の積分データを送信することで波形の歪みを防ぐ手法を提案した [43]。また、Lozano らは、波の歪みに対しても受動性が保証されるように受信側に可変ゲインを導入した [37]。この手法は Berestesky らによって離散時間系へと拡張された [5]。また、Yokokohji らは遅れの変動によってずれた波変数の積分と本来の積分値をフィードバックすることで位置のドリフトを補償した [65]。しかし、これらの手法は遅れ時間の変動による波の歪みには対応できているが、波変数が速度情報しか持っていないという問題には対処できておらず、数値積分の誤差が蓄積することによって位置のドリフトが生じる可能性がある。数値積分の誤差は、波の歪みと比べると微小であるが、長時間の作業を行う際にはその影響は無視できない。

数値積分誤差による位置ドリフトを防ぐためには制御系に絶対位置情報を含めるこ

とが必要となる。Niemeyer らは、本来あるべき位置偏差と実際の位置偏差を波変数へとフィードバックした [42]。また、Chopra らは位置データを直接送信して位置誤差をフィードバックする方法を提案した [10]。一方で、波変数を変形して絶対位置情報を持たせる手法 [9] や、環境接触時の位置誤差も含めて補償する手法 [55] など提案されている。しかし、これらの手法は一定時間遅れを仮定している [42][9]、あるいは波変数の本来の動特性が失われる [10][55] という問題点がある。すなわち、波変数の本来の特性が失われないようにしながら、遅れ時間の変動や数値積分誤差に起因するドリフトをすべて補償できるような手法はまだ提案されていない。

テレオペレーションシステムの受動性については従来周波数領域で議論されてきたが、線形時不変なコントローラしか設計することができず保守的となっていた。これに対し Hannaford ら [22] は時間領域の受動性に基づいた制御系設計を提案した。この手法は遅れ時間変動を含むテレオペレーションにも応用されている [49]。時間領域受動性に基づく手法では、本来は時間遅れに対して不安定な制御則に対してエネルギーを監視する補償器を追加している。したがって、時間遅れが一定であっても制御器のスイッチングが起こり、オペレータが感じる力覚にノイズが生じる。また、受動性を保証するために速度や力の目標値を補正するため、時間遅れのあるテレオペレーションに適用した場合には位置のドリフトや力の定常偏差などが生じている [4][50]。一方で、横小路らは波変数に基づく制御則に対して、通信の途絶に対しても受動性を保証するためにエネルギー収支モニタ [66] を導入している。エネルギー収支モニタは、システムの受動性を監視するという点では時間領域受動性と類似しているものの、通信途絶などの極端な場合にのみ作動し、遅れ時間の変動が小さい時にはコントローラのスイッチングが起こることは稀である。

本章では、これまでに提案されている積分誤差補償器に位置情報を持たせることで積分誤差に対応させる制御則を提案する。提案する手法により、遅れ時間変動による位置ドリフトと数値積分の誤差による位置ドリフトを同時に補償する事が可能となるだけでなく、波変数が本来持つ直感的な動特性が保たれる。提案する手法に筆者らが既に提案しているエネルギー収支モニタを組み合わせることでシステムの受動性を保証する制御則を構成する。さらに、通信の途絶と回復を含む実験を行って提案手法が実機においても有効であることを確認する。

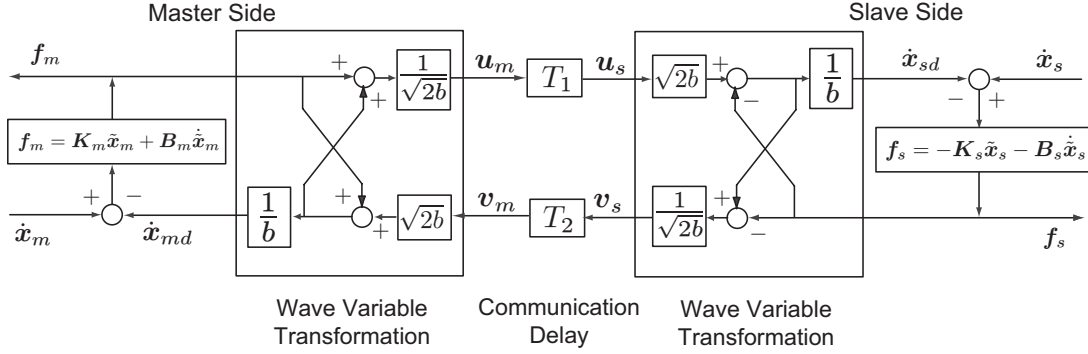


Fig. 4.1 Symmetric-type wave-variable-based teleoperator.

4.2 波変数に基づくバイラテラル制御

波変数による制御では、マスタおよびスレーブの速度と力は次式で表される波変数に変換されてから相手側に送信される。

$$\mathbf{u}_m(t) = \frac{b\dot{\mathbf{x}}_m(t) + \mathbf{f}_m(t)}{\sqrt{2b}} \quad (4.1)$$

$$\mathbf{v}_s(t) = \frac{b\dot{\mathbf{x}}_s(t) - \mathbf{f}_s(t)}{\sqrt{2b}} \quad (4.2)$$

ここで $\dot{\mathbf{x}}_m(t)$, $\dot{\mathbf{x}}_s(t)$ はそれぞれマスタとスレーブの速度を表す。 $\mathbf{f}_m(t)$ はオペレータがマスタアームに加える力であり、 $\mathbf{f}_s(t)$ はスレーブアームが環境に加える力である。また b は特性インピーダンスと呼ばれるパラメータである。受信側の波変数は以下のように表される。

$$\mathbf{u}_s(t) = \frac{b\dot{\mathbf{x}}_s(t) + \mathbf{f}_s(t)}{\sqrt{2b}} = \mathbf{u}_m(t - T_1) \quad (4.3)$$

$$\mathbf{v}_m(t) = \frac{b\dot{\mathbf{x}}_m(t) - \mathbf{f}_m(t)}{\sqrt{2b}} = \mathbf{v}_s(t - T_2) \quad (4.4)$$

ここで T_1 はマスタからスレーブへの遅れ時間、 T_2 は逆方向の遅れ時間を表す。図 4.1 にマスタ・スレーブ両側で力を入力、速度を出力とする波変数変換と PD 制御を組み合わせた対称型の制御系を示す。ただしこの構成の場合、波変数変換に用いる速度は実際のアームの速度ではなく、PD 制御の目標値の速度であること、また波変数変換に用いる力も実際にアームに外部から加わる力ではなく、PD 制御によって決まる駆動力である点に注意する必要がある。この制御系は、図 4.2 に示すように質量とバネが分布した系と同じ物理的特性を持つ。



Fig. 4.2 Physical interpretation of symmetric-type wave-variable-based teleoperator.

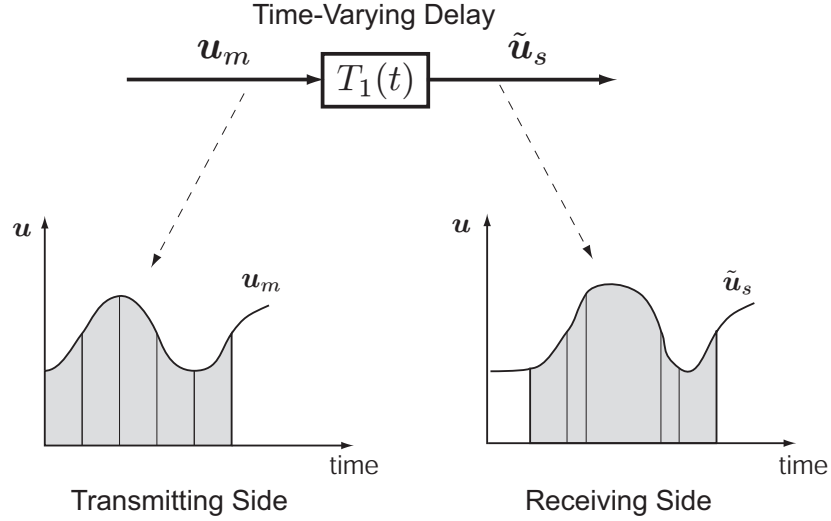


Fig. 4.3 Distortion of the waveform due to the fluctuating time delay.

4.3 位置ドリフトの補償

4.3.1 波変数積分誤差補償によるドリフト補償

遅れ時間が変動すると、図 4.3 に示すように送信側と受信側の波形が一致せず、波変数の積分が送信側と受信側で異なる値になり、これが位置情報に誤差が発生しマスタとスレーブの間の位置ドリフトが生じる要因となる。

図 4.4 に示すように、 $\tilde{u}_s(t)$ を時変な伝送路を経由して歪んだ波形とする。 $u_m(t)$ を送信するときの情報にタイムスタンプを含めておけば、歪みのない波形 $u'_s(t)$ を復元することができる。このとき、次式が成り立つ。

$$\int_0^t u'_s(\tau) d\tau = \int_0^{t_m^{\text{last}}(t)} u_m(\tau) d\tau \quad (4.5)$$

$t_m^{\text{last}}(t) = t - T_1(t)$ はスレーブ側で受け取ったマスタ側の最新のタイムスタンプを表す。 $\int_0^t u'_s(\tau) d\tau$ は、タイムスタンプを用いて計算するほかに、あらかじめマスタ側で $\int_0^t u_m(\tau) d\tau$ を計算したものを受信することでも得られる。UDP 通信を利用する場合や通信途絶が起こり得る場合など、データが損失するような通信環境下であったり、通信のサンプリングがローカルな制御のサンプリングよりも長いような場合には式 (4.5) の積分

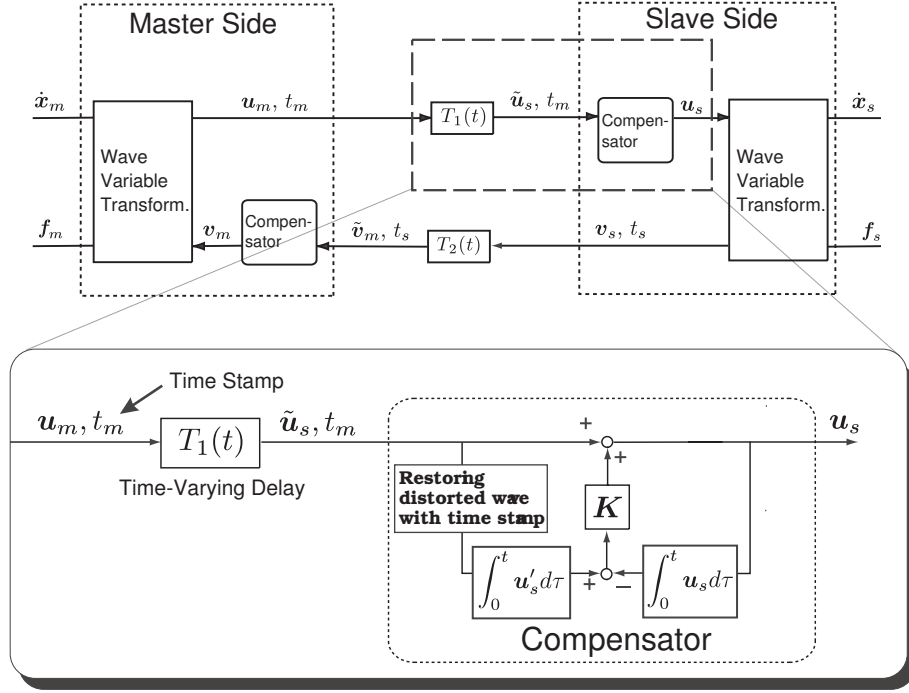


Fig. 4.4 Overall structure of the proposed system.

に誤差が生じるので、積分計算をマスタ側で行う方が望ましい。

u'_s と u_s の積分の誤差を次式のようにフィードバックすることによって波変数の歪みを補償する [65].

$$u_s(t) = \tilde{u}_s(t) + K e_s(t) \quad (4.6)$$

ここで K は正定のフィードバックゲインである. また $e_s(t)$ は波変数積分誤差であり次式で定義される.

$$e_s(t) = \int_0^t u'_s(\tau) d\tau - \int_0^t u_s(\tau) d\tau. \quad (4.7)$$

K を大きくするほど誤差を素早く補償できるが、遅れ時間の変動に敏感になる.

4.3.2 絶対位置情報を用いたドリフト補償

前節の補償を行うことで遅れ時間変動による誤差は補償されるが積分の数値誤差による位置ドリフトは補償されない. 数値誤差に対処するためには、速度情報を持つ波変数の代わりに位置情報を利用する必要がある. まず、波変数積分誤差は以下のように書き換えら

れる.

$$\begin{aligned}
e_s(t) &= \int_0^t \mathbf{u}'_s(\tau) d\tau - \int_0^t \mathbf{u}_s(\tau) d\tau \\
&= \int_0^{t-T_1(t)} \mathbf{u}_m(\tau) d\tau - \int_0^t \mathbf{u}_s(\tau) d\tau \\
&= \frac{1}{\sqrt{2b}} \left(b\mathbf{x}_m(t-T_1(t)) + \int_0^{t-T_1(t)} \mathbf{f}_m(\tau) d\tau \right) \\
&\quad - \frac{1}{\sqrt{2b}} \left(b\mathbf{x}_s(t) + \int_0^t \mathbf{f}_s(\tau) d\tau \right)
\end{aligned} \tag{4.8}$$

この式には位置情報が存在するが、力の積分が含まれている．式 (4.8) を書き換えるため、次のように変数を定義する．

$$\mathbf{P}_m(t) \triangleq \int_0^t \mathbf{f}_m(\tau) d\tau, \tag{4.9}$$

$$\mathbf{P}_s(t) \triangleq \int_0^t \mathbf{f}_s(\tau) d\tau, \tag{4.10}$$

$$\mathbf{V}_m(t) \triangleq \int_0^t \mathbf{v}_m(\tau) d\tau = \frac{b\mathbf{x}_m(t) - \mathbf{P}_m(t)}{\sqrt{2b}}, \tag{4.11}$$

$$\mathbf{V}_s(t) \triangleq \int_0^t \mathbf{v}_s(\tau) d\tau = \frac{b\mathbf{x}_s(t) - \mathbf{P}_s(t)}{\sqrt{2b}} \tag{4.12}$$

$\mathbf{U}_m(t)$ および $\mathbf{U}_s(t)$ も式 (4.11), (4.12) と同様に定義できる．式 (4.11) より次式が得られる．

$$\begin{aligned}
\mathbf{P}_m(t-T_1(t)) &= -\sqrt{2b}\mathbf{V}_m(t-T_1(t)) + b\mathbf{x}_m(t-T_1(t)) \\
&= -\sqrt{2b}\{\mathbf{V}_s(t-T_{12}(t)) - \mathbf{e}_m(t-T_1(t))\} \\
&\quad + b\mathbf{x}_m(t-T_1(t))
\end{aligned} \tag{4.13}$$

$\mathbf{e}_m$ はマスタ側の波変数積分誤差であり、同様にして次のように定義される．

$$\begin{aligned}
\mathbf{e}_m(t) &= \int_0^t \mathbf{v}'_m(\tau) d\tau - \int_0^t \mathbf{v}_m(\tau) d\tau \\
&= \int_0^{t-T_2(t)} \mathbf{v}_s(\tau) d\tau - \int_0^t \mathbf{v}_m(\tau) d\tau \\
&= \mathbf{V}_s(t-T_2(t)) - \mathbf{V}_m(t)
\end{aligned} \tag{4.14}$$

ここで $\mathbf{v}'_m(t)$ は理想的な波形である．

$T_{12}(t)$ を

$$T_{12}(t) \triangleq T_1(t) + T_2(t-T_1(t)) \tag{4.15}$$

と定義する．これは時刻 t でスレーブに到達したデータの往復時間である．上記の表記を用いると，

$$\begin{aligned}
\mathbf{e}_s(t) &= \frac{1}{\sqrt{2b}} \{b\mathbf{x}_m(t - T_1(t)) + \mathbf{P}_m(t - T_1(t))\} \\
&\quad - \frac{1}{\sqrt{2b}} \{b\mathbf{x}_s(t) + \mathbf{P}_s(t)\} \\
&= \sqrt{2b}\mathbf{x}_m(t - T_1(t)) - \mathbf{V}_s(t - T_{12}(t)) \\
&\quad + \mathbf{e}_m(t - T_1(t)) - \sqrt{\frac{b}{2}}\mathbf{x}_s(t) - \frac{1}{\sqrt{2b}}\mathbf{P}_s(t) \\
&= \sqrt{2b}\mathbf{x}_m(t - T_1(t)) - \frac{1}{\sqrt{2b}} \{b\mathbf{x}_s(t - T_{12}(t)) \\
&\quad - \mathbf{P}_s(t - T_{12}(t))\} + \mathbf{e}_m(t - T_1(t)) \\
&\quad - \sqrt{\frac{b}{2}}\mathbf{x}_s(t) - \frac{1}{\sqrt{2b}}\mathbf{P}_s(t) \\
&= \sqrt{2b} \left[\mathbf{x}_m(t - T_1(t)) - \frac{1}{2} \{ \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{x}_s(t - T_{12}(t)) \} \right] \\
&\quad - \frac{1}{\sqrt{2b}} \int_{t-T_{12}(t)}^t \mathbf{f}_s(\tau) d\tau + \mathbf{e}_m(t - T_1(t)) \tag{4.16}
\end{aligned}$$

が得られる．式 (4.16) の最終行は，マスタとスレーブの絶対位置の誤差，力の積分，マスタ側の積分誤差の項からなっている．力の積分項が残っているが，限られた時間（往復時間）の積分であり，誤差が蓄積し続けることはない．また，この項は波変数が本来もつバネ特性を維持するための項と解釈することができる．マスタ側についても，同様に变形すると

$$\begin{aligned}
\mathbf{e}_m(t) &= \sqrt{2b} \left[\mathbf{x}_s(t - T_2(t)) - \frac{1}{2} \{ \mathbf{x}_m(t) + \mathbf{x}_m(t - T_{21}(t)) \} \right] \\
&\quad + \frac{1}{\sqrt{2b}} \int_{t-T_{21}(t)}^t \mathbf{f}_m(\tau) d\tau + \mathbf{e}_s(t - T_2(t)) \tag{4.17}
\end{aligned}$$

が得られる． T_{21} は時刻 t でマスタに到達したデータの往復時間であり，次式で定義される．

$$T_{21}(t) \triangleq T_2(t) + T_1(t - T_2(t)) \tag{4.18}$$

Niemeyer らは時間遅れが一定かつ対称的な場合に数値積分の誤差を補償するため，位置誤差項と力の積分項を用いた手法を導入している [42]．提案手法は式の形が類似しているため，Niemeyer らの手法を遅れ時間変動する場合や，行きと帰りの時間遅れの大きさが異なるような場合に対応できるように拡張したものと解釈することも可能である．また，本手法の特徴として，複数の補償器を組み合わせるのではなく単一の制御則によって遅れ

時間の変動による位置ドリフトと数値誤差による位置ドリフトを同時に補償できる点が挙げられる。

4.4 エネルギー収支モニタによる受動性の保証

4.4.1 時間領域の受動性

時間遅れが変動する場合や前節の位置ドリフト補償を加えた場合には、制御系に波変数を用いても受動性が保証されない。例えば、通信が途絶した場合スレーブには最後に受信した波変数 $\mathbf{u}_m(t_m^{\text{last}}(t))$ が出力され続け、無限にエネルギーが生じてしまう。

そこで、本論文においてはエネルギー収支モニタ [66] を導入することで受動性を保証する。エネルギー収支モニタは時間領域の受動性 [22] の定義を用いた手法の一種である。時間領域受動性を用いれば、マスタ・スレーブシステムが受動的である条件は

$$\int_0^t \dot{\mathbf{x}}_m(\tau)^T \mathbf{f}_m(\tau) d\tau - \int_0^t \dot{\mathbf{x}}_s(\tau)^T \mathbf{f}_s(\tau) d\tau \geq -E_{\text{total}}(0) \quad (4.19)$$

と表せる。ここで $E_{\text{total}}(0)$ は初期状態でシステムに蓄積されているエネルギーである。上式さえ満たしていれば非線形・時変なコントローラを用いることも許容されるため、周波数領域の受動性を用いるよりも柔軟な制御系設計が可能である。

波変数を用いれば、伝送路および補償器に蓄積されたエネルギー $E_{\text{total}}(t)$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} E_{\text{total}}(t) = & \frac{1}{2} \left(\int_0^t \|\mathbf{u}_m(\tau)\|^2 d\tau - \int_0^t \|\mathbf{v}_m(\tau)\|^2 d\tau \right. \\ & \left. + \int_0^t \|\mathbf{v}_s(\tau)\|^2 d\tau - \int_0^t \|\mathbf{u}_s(\tau)\|^2 d\tau \right) \end{aligned} \quad (4.20)$$

4.4.2 エネルギー収支モニタ

エネルギー収支モニタは積分誤差補償器に蓄積されたエネルギーを監視し、受動性が満たされなくなる前に波の出力を停止する手法である。まず、スレーブ側の積分誤差補償器に蓄積されたエネルギー $E_s(t)$ ，すなわち伝送路から入力されたエネルギーとスレーブに出力するエネルギーの差を次式で定義する。

$$E_s(t) = \frac{1}{2} \left(- \int_0^t \|\mathbf{u}_s(\tau)\|^2 d\tau + - \int_0^{t_m^{\text{last}}} \|\mathbf{u}_m(\tau)\|^2 d\tau \right) \quad (4.21)$$

式 (4.5) の $\mathbf{u}_s(t)$ を新たに $\mathbf{u}_s^{\text{comp}}(t)$ と表し、出力 $\mathbf{u}_s(t)$ を次式のように修正する。

$$\mathbf{u}_s(t) = \begin{cases} \mathbf{u}_s^{\text{comp}}(t) & \text{if } E_s \geq -E_s^{\text{limit}} \\ \mathbf{0} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.22)$$

ここでエネルギーの上限 E_s^{limit} は正の数である．これにより補償器から発生するエネルギーは一定の上限に抑えられ、

$$E_{\text{total}}(t) \geq E_m(t) + E_s(t) \geq -E_m^{\text{limit}} - E_s^{\text{limit}} \quad (4.23)$$

が成立するのでシステムの受動性が保証される．ただし $E_m(t)$ および E_m^{limit} はマスタ側の蓄積エネルギーとエネルギー上限でありスレーブ側と同様に定義される．

4.4.3 通信途絶からの回復

通信が回復した直後は式 (4.21) のエネルギーが枯渇している場合が多いので、このまま作業を続ければ波の出力が頻繁に停止してしまう．そこでエネルギーを初期状態に回復するために、Niemeyer らが提案したアルゴリズム [42] に近い方法を導入する．

まず、通信が途絶していた時間の積分データ $\int_{t_b}^{t_r} \mathbf{u}_m(\tau) d\tau$ をマスタから受信し、 $\int_0^t \mathbf{u}_s'(\tau) d\tau$ を更新する．ここで、 t_b , t_r はそれぞれ通信が途切れた時刻と通信が回復した時刻を表す．この処理は途絶中に蓄積した位置ドリフトを補償するために必要であるが、波変数の積分を送信側に実装する場合にはさらに、途絶中にマスタから送られるはずであったエネルギー $\frac{1}{2} \int_{t_b}^{t_r} \|\mathbf{u}_m(\tau)\|^2 d\tau$ を受信する．

また、 $E_s(t) \geq 0$ となるまでの間は以下のように $\mathbf{u}_s$ を出力する．

$$\mathbf{u}_s(t) = \begin{cases} \tilde{\mathbf{u}}_s(t) + \mathbf{K} \mathbf{e}_s(t) & \text{if } \|\tilde{\mathbf{u}}_s(t) + \mathbf{K} \mathbf{e}_s(t)\| \leq \|\tilde{\mathbf{u}}_s(t)\| \\ \tilde{\mathbf{u}}_s(t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.24)$$

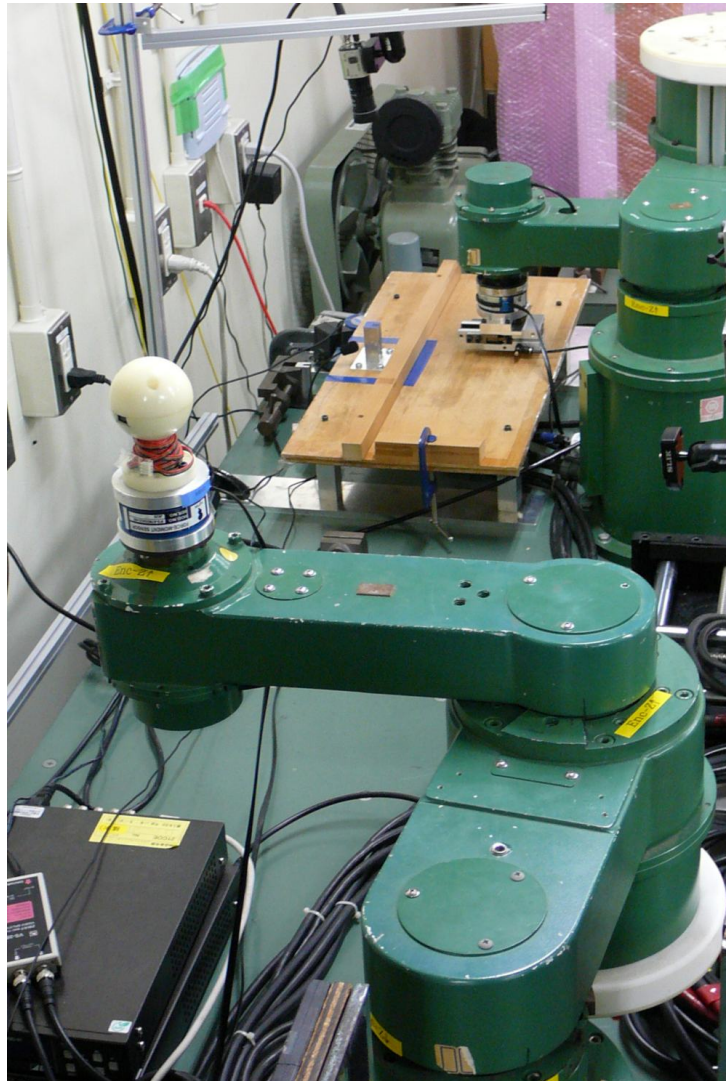
これは積分誤差補償器によるエネルギー出力を防ぎ E_s を増加させる効果がある．マスタ側についても同様の手順でエネルギーを回復する．

なお、波変数の積分計算を送信側で行う場合には、通信の途絶や回復を検出して t_b や t_r の値を知る必要はなく、単純に積分データを送受信し続ければよい．同様にして、エネルギーの値についてもマスタ側で積分 $\int_0^{t_m^{\text{last}}} \|\mathbf{u}_m(\tau)\|^2 d\tau$ を計算してから送信することで実装が容易になる．本論文で行った実験においては、このような理由から波変数・エネルギーともに積分計算は送信側で行った．ただし、この方法を用いる場合送受信するデータ量が増加するという欠点がある．

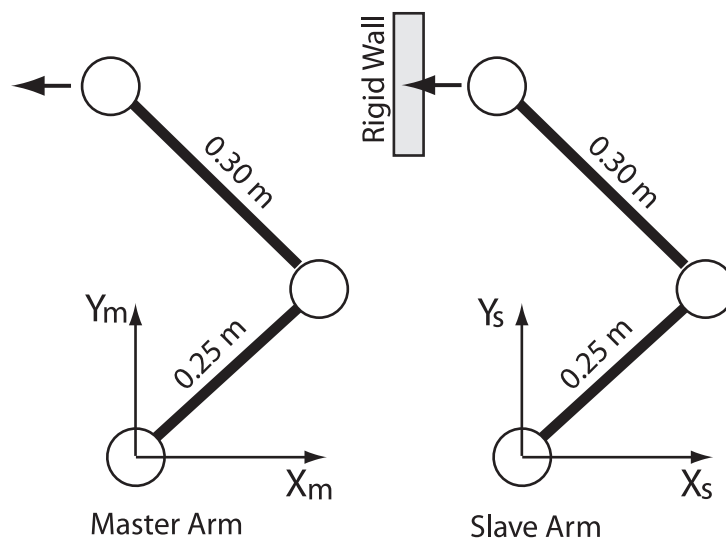
4.5 実験

4.5.1 実験システム

Fig. 4.5 に実験システムを示す．マスタアームとスレーブアームはそれぞれ DD モータで駆動される SCARA 型の平面 3 自由度マニピュレータである．2 台のアームは横に



(a) Overview of the system



(b) Task coordinates

Fig. 4.5 Master-slave system for experiment

並んでおり、オペレータはスレーブアームを直視することができる。実際のテレオペレーションシステムではスレーブ側にカメラを設置し、オペレータは遅延のある映像を見ながら作業を行うが、本節の実験は単に位置追従性を確認する目的であるため、視覚システムは導入していない。マスタアームおよびスレーブアームはリアルタイム OS の VxWorks が動作するターゲットコンピュータ (Core 2 Duo) 1 台によって制御される。

複数の実験を同一の条件下で行うために、時間遅れの大きさは一度インターネットを用いた実際のネットワーク通信において測定したものをを用いる。測定した時間遅れの長さの変動量が小さかったため、遅れの長さを測定量の 5 倍に加工し、2 台のアームを制御しているコンピュータ上で遅れをシミュレーションする。実験に用いられた遅れの長さを Fig. 4.6 に示す。時間遅れの大きさは、通常は 0.7~1.0 [sec] であるが、時々 3 [sec] に達するものとなっている。マニピュレータの制御周期は 1 [msec] であり、波変数などのデータを送信する周期は 10 [msec] である。

本実験においては、マニピュレータの手先位置と姿勢は別々に制御を行う。制御には、Fig. 4.1 に示すような対称形の波変数に基づく制御を用いる。Fig. 4.1 における PD 制御のゲインおよび波変数の特性インピーダンスは、手先の並進運動に関しては $\mathbf{K}_m = \mathbf{K}_s = 500\mathbf{I}[\text{N/m}]$, $\mathbf{B}_m = \mathbf{B}_s = 100\mathbf{I}[\text{Ns/m}]$, $b = 100[\text{Ns/m}]$ に設定し、手首の回転運動に関しては、 $K_m = K_s = 1.0[\text{Nm/rad}]$, $B_m = B_s = 0.1 [\text{Nms/rad}]$, $b = 1.0 [\text{Nms/rad}]$ に設定した。また、波変数の積分誤差フィードバックゲインは $\mathbf{K} = 0.5\mathbf{I}[1/\text{s}]$ とした。

Fig. 4.5(b) にマスタアームとスレーブアームの座標系を示す。スレーブ側には剛体壁が x 軸と垂直に設置されており、オペレータは x 軸の方向にアームを動かしてこの剛体壁を押す。オペレータは、約 10[N] の力で 5 [s] と 35 [s] の時点で壁を押し始め、20 [s] と 50 [s] の時点で壁から離れ始める。

4.5.2 実験結果

位置ドリフト補償を行わなかった場合、Fig. 4.7 に示すように位置のドリフトが発生している。実験終了時にはオペレータも環境もアームに力を加えていない状態であるため、このときの位置の定常偏差が位置ドリフトと見なせる。補償を行わなかった場合の位置ドリフトは 20.10[mm] である。なお、Fig. 4.7 および以降の実験結果で示す力のグラフは、PD 制御によってアクチュエータに加えられた力である。

式 (4.6) で示される積分誤差フィードバックを用いたときの実験結果を Fig. 4.8 に示す。ここで、標準時間遅れの値は $\bar{T}_1 = 0.7[\text{s}]$ and $\bar{T}_2 = 0.7$ とした。Fig. 4.7 の結果と比べると、位置の偏差は 4.05[mm] となっており、積分誤差フィードバックの有効性が確認された。

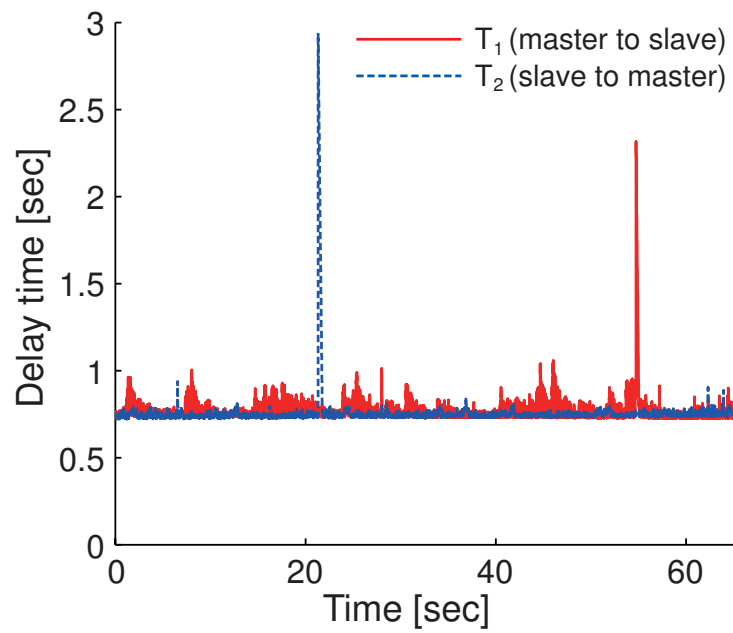


Fig. 4.6 Time delay used for experiment

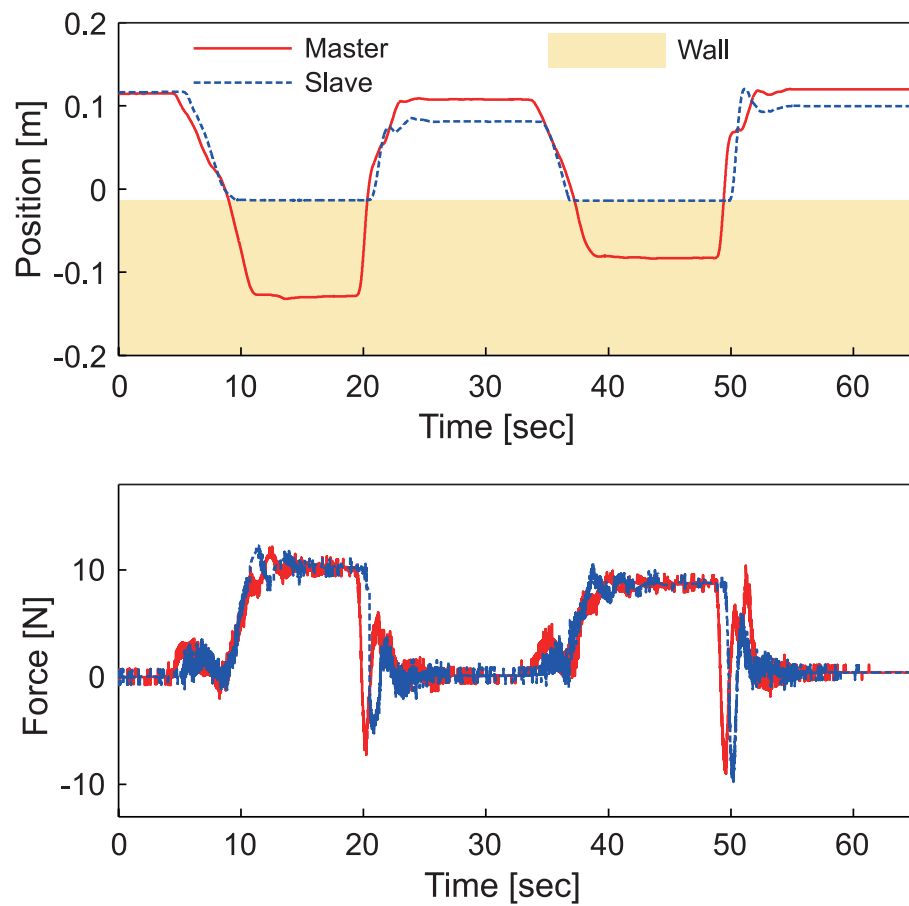


Fig. 4.7 Position drift caused by time delay fluctuation.

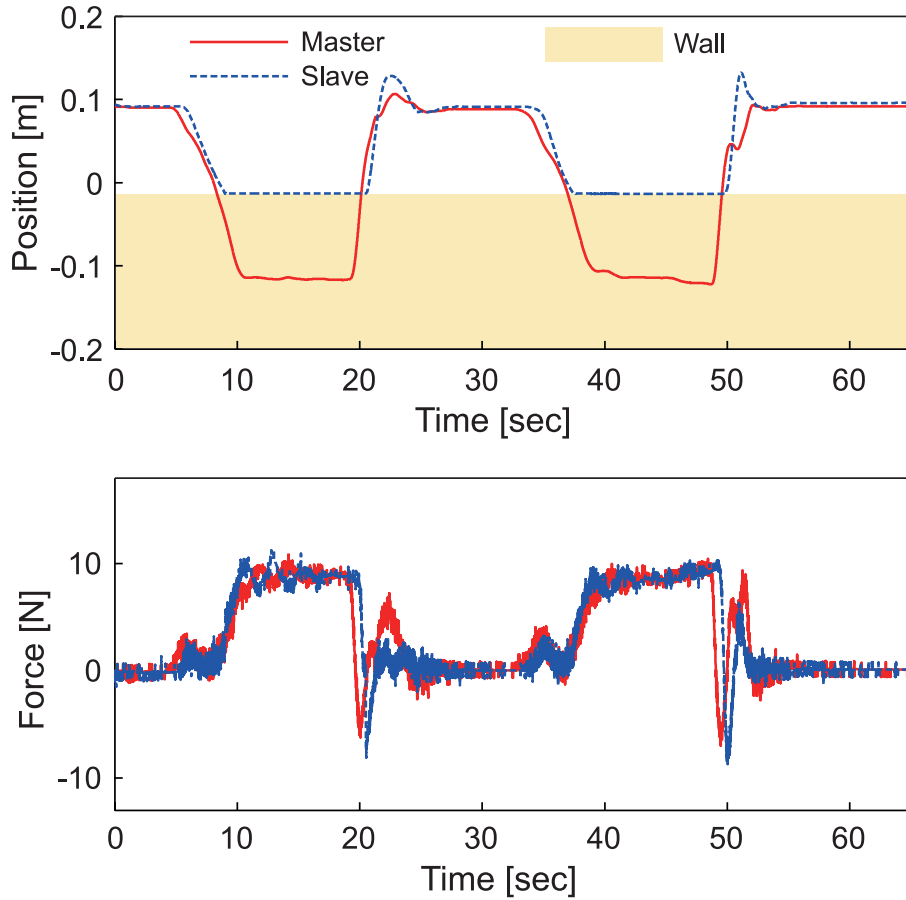


Fig. 4.8 Experiment result with the wave-integral-error feedback.

しかしながら、式 (4.6) では絶対位置情報を用いていないため、数値積分の誤差や速度計測の誤差、初期位置のずれなどによる位置ドリフトは補償されない。位置ドリフト補償制御の効果を確認しやすくするために、人工的にマスタとスレーブとの間に初期の位置ずれを設定した。40[mm] の位置ずれを設定した場合、Fig. 4.9 に示すように積分誤差フィードバックでは 35.84[mm] の位置ドリフトが残っていることが分かる。

式 (4.16) の絶対位置誤差フィードバックを用いることで、初期の位置ずれが存在しても実験終了時の位置の偏差は 2.59[mm] までに低減されており、位置ドリフトが補償されていることが分かる。

一方で、力の応答に関してはいずれの実験条件においてもほとんど差異はないことから、提案する位置ドリフト補償は波変数に基づく制御が本来持つ動特性に対して影響をほとんど与えていないことが分かる。なお、アームが壁に触れていない時に若干の力が発生し、また壁を離れるときに負の力が発生している。自由空間上での力は波変数が持つ分布定数系の慣性によるものであり、負の力はオペレータが素早くアームを動かすために大きな引張り力を加えたためである。波変数では、減衰のないバネ-質量系の動特性を示すため、オペレータが力を加えるのをやめてもアームは動き続ける。一方、波変数でない手法

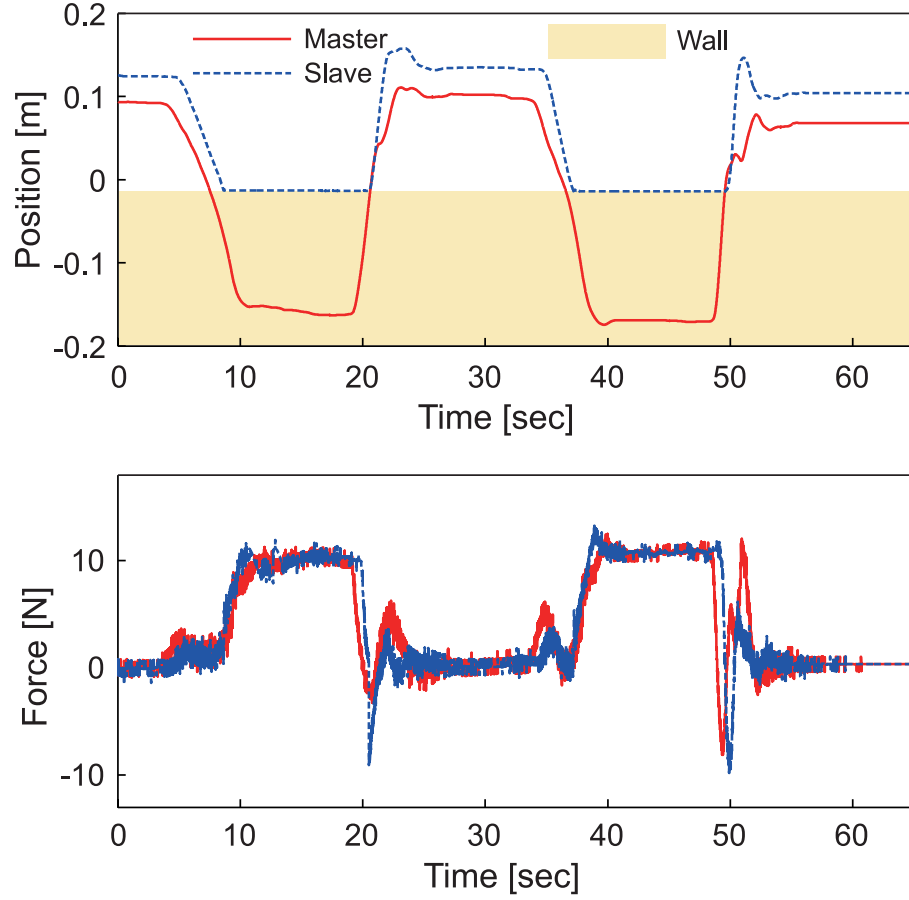


Fig. 4.9 Experiment result with the wave-integral-error feedback and initial offset.

を用いた場合、安定化のために導入されるダンパの影響があるため、オペレータはアームを動かし続けるために力を加え続けなければならない。

受信バッファを用いて一定時間遅れを模擬する単純な手法と比較するため、3[sec]の一定時間遅れを用いた際の実験を行った。その結果を Fig. 4.11 に示す。このような長い時間遅れのもとでは、オペレータはスムーズに環境を操作することがほぼ不可能となる。

$t = [15, 16]$ [s] および $t = [30, 45]$ [s] の間に通信が途絶した場合の実験結果を Fig. 4.12 に示す。4.4 節のエネルギー収支モニタを導入し、その閾値は $E_s^{\text{limit}} = 1.0$ [J] に設定した。

$t = 30$ [s] で通信が切れた後、しばらくの間スレーブアームが壁を押し続け、エネルギーを消費する。 $t = 38$ [s] においてエネルギーが完全に枯渇するためスレーブアームは壁を押すのをやめる。次に、通信が回復した後は、マスタとスレーブの間の位置の偏差は徐々に収束している。エネルギーの値 $E_s(t)$, $E_m(t)$, $E_{\text{total}}(t)$ を Fig. 4.12 に示す。 $t = 45$ [s] において $E_s(t)$ が不連続になっているが、これは通信が切れている間にシステムに加えられたエネルギー量である。

なお、 $t = [15, 16]$ の短時間の通信途絶の際には、エネルギーは完全には消費されない

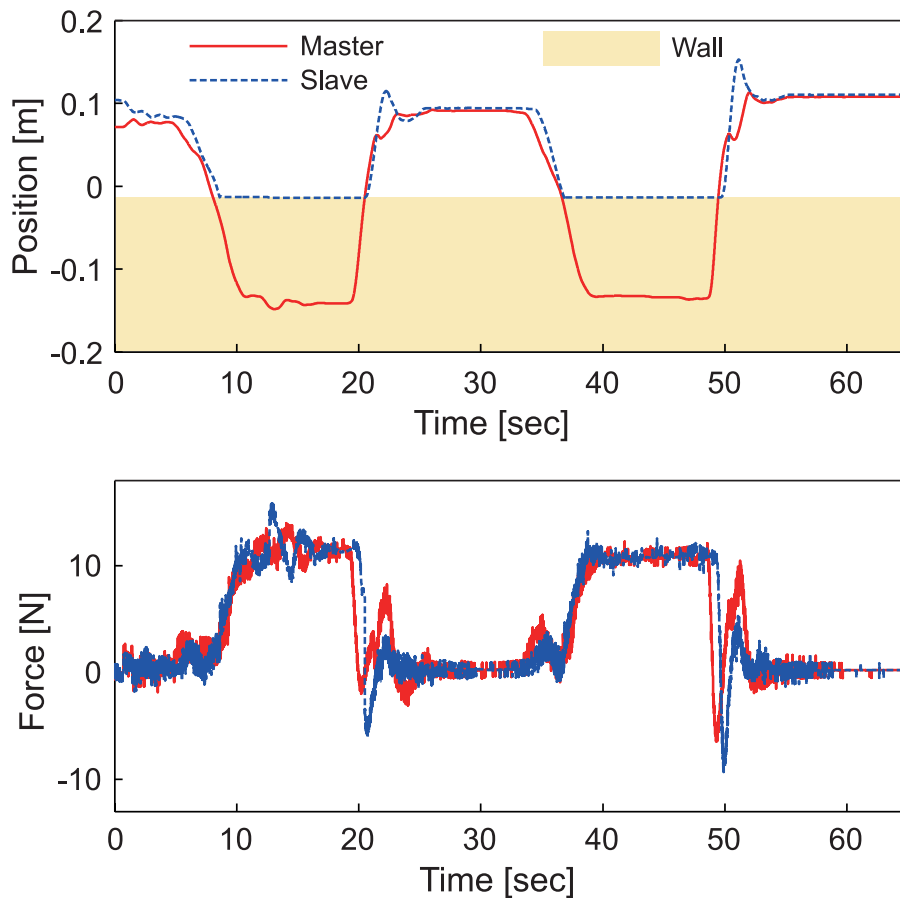


Fig. 4.10 Experiment result with the absolute-position-error feedback and initial offset.

ため、作業はスムーズに継続することができている。もし厳密な時間領域受動性の条件を用いた手法を導入していれば、このような短時間の途絶であってもシステムが停止してしまう。

4.6 おわりに

本章では、時間遅れが変動するマスタ・スレーブシステムにおいて、波変数の積分誤差によって生じる位置ドリフトを保証する制御則を提案した。従来の波変数の積分誤差をフィードバックする手法では、時間遅れの変動に対処できたが積分計算の誤差による位置ドリフトが残っていたが、本研究では積分誤差のフィードバック項に等価な変形を行って絶対位置情報を持たせることにより、数値計算に由来する位置ドリフトを補償できるようにした。

提案手法は1つの制御則により時間遅れの変動と積分計算の誤差の両方を統一的に補償できるほか、波変数に基づく制御系がもつ本来のバネ特性を失わないというメリットがある。さらに、システムの安定性を保証するためにエネルギー収支モニタを導入した。

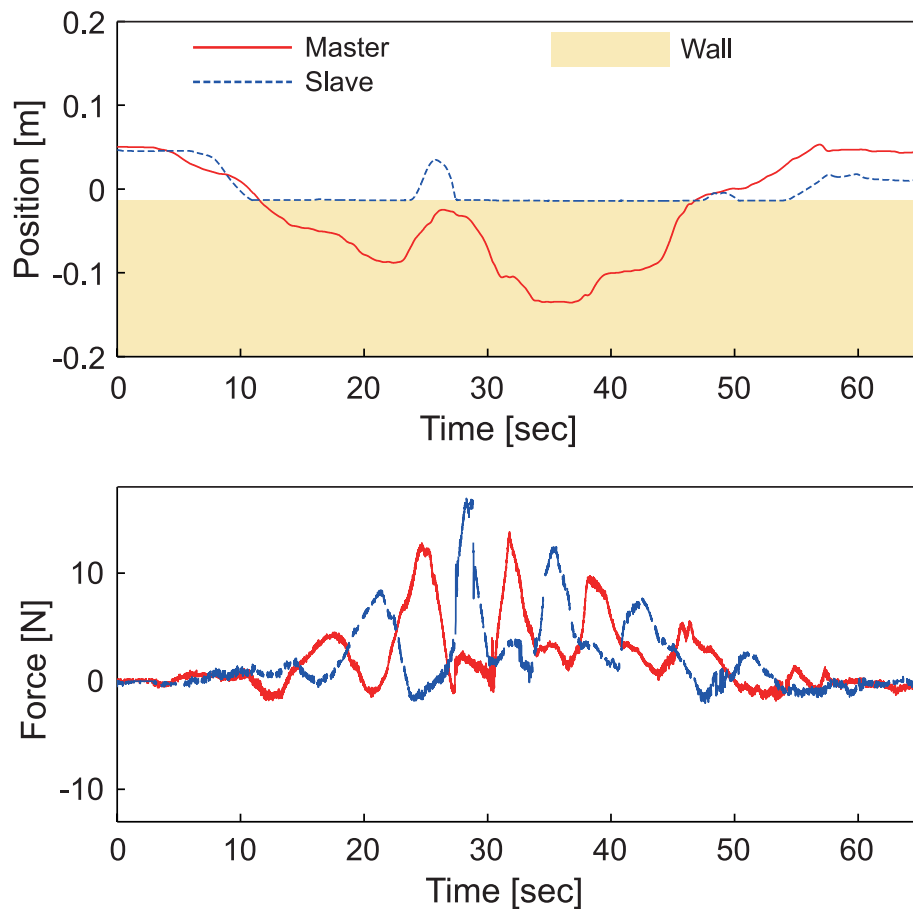


Fig. 4.11 Experiment result with 3 sec of constant time delay

実験を行い、絶対位置誤差フィードバックを用いることで、変動時間遅れだけでなく初期位置のずれによる位置ドリフトも補償できていることを確認した。また、エネルギー収支モニタについても、通信が途絶した際に安定性を保証しているが、短時間の途絶に対してはシステムは停止せずスムーズに作業を継続できることを確認した。

今後の課題としては、送受信するデータ量の低減などが挙げられる。提案手法を導入すると、絶対位置やエネルギー量などを送信する必要があるため、マスタとスレーブとの間でやり取りするデータの量が増加するという課題がある。送信データ量が増大することによって回線の容量を圧迫してしまうと、時間遅れが増大したりパケットロスが頻発する可能性がある。今後は、データ量の圧縮など実用化に向けた制御系の改良が必要であると考えられる。位置ドリフトの蓄積は通信のサンプリング周期に比べると十分に長い。従って、波変数そのものは従来と同じサンプリング周期で送信しながら、ドリフト補償に用いる積分データや絶対位置データについてはより長いサンプリング周期で送信するといった方法でデータの圧縮が可能である。

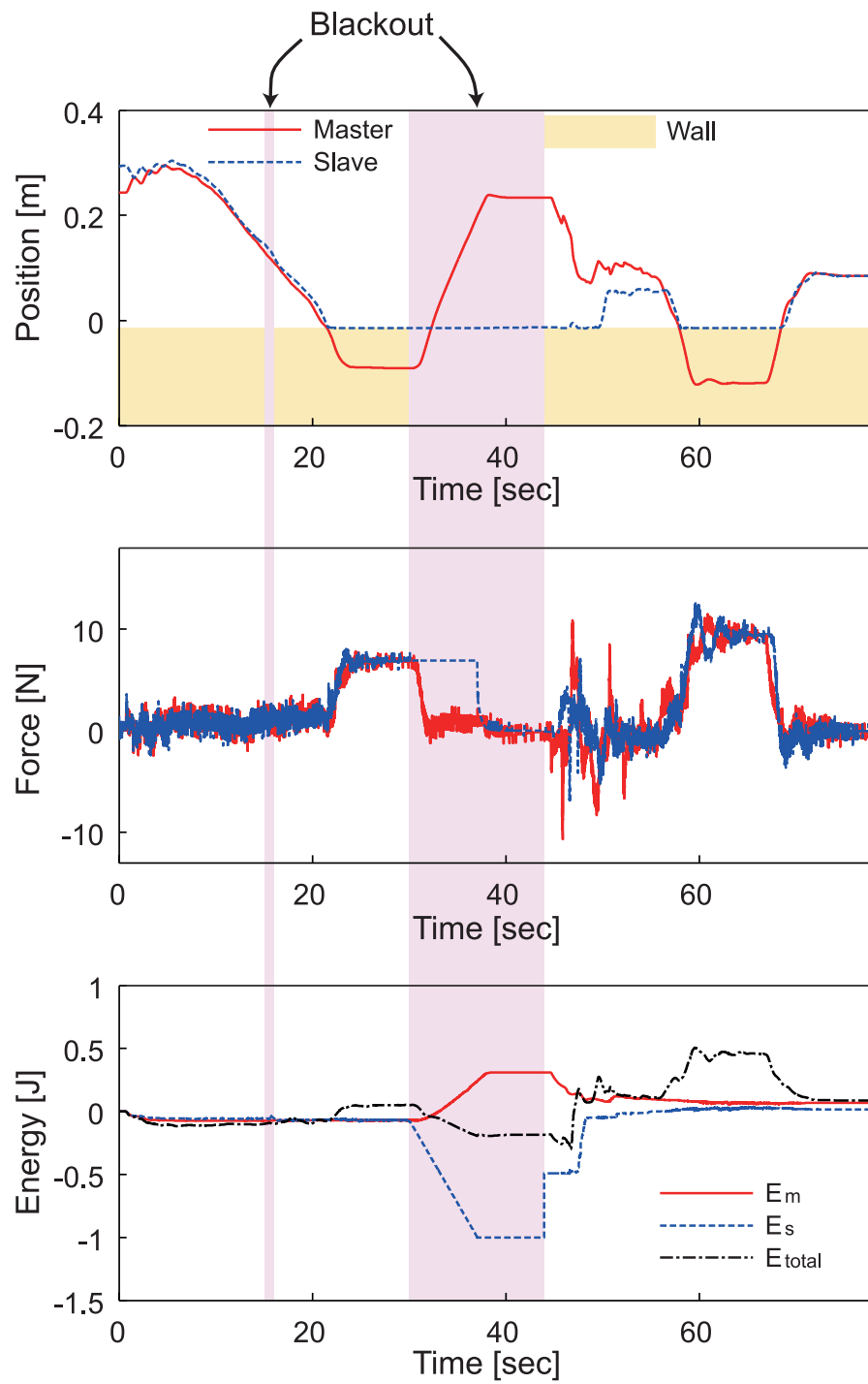


Fig. 4.12 Experimental result of resuming the system after the blackout.

第 5 章

計算機ネットワークを介したマルチラテラル・テレオペレーション

5.1 はじめに

これまでのテレオペレーションシステムは、1 台のマスタアームと 1 台のスレーブアームからなるシステムであった。一方で、近年になって 3 地点以上で互いに位置と力の情報をやり取りするマルチラテラル・テレオペレーションシステムの研究が進められている。3 地点以上のテレオペレーションについては、様々な構成のものが考えられる。例えば、複数のマスタアームと単一のスレーブアームを用いてロボットの操縦トレーニングを行うシステム [46] や、1 台のマスタアームを用いて群ロボットの操縦を行うシステム [16] がこれまでに提案されている。上記以外にも、複数のマスタアームを用いることでテレオペレーションシステムの安全性を向上することが可能となる。例えば、通信が途絶したりマスタ側の装置が故障した場合、従来のバイラテラル・テレオペレーションでは作業が途絶えてしまうが、マルチラテラル・テレオペレーションシステムを用いることでマスタを冗長化し、片方のマスタが使用不能になっても残っているマスタを用いて作業を継続することができる。さらに、作業に慣れていないオペレータが操縦を誤った場合に経験者がロボットの動作を修正することも可能となる。

これまでに、マルチラテラル・テレオペレーションを実現する制御則がいくつか提案されている。Sirouspour らは μ 設計法に基づいた制御則を提案し [58]、Katsura らは外乱オブザーバに基づいた制御則を提案した [29]。Khademian らは 4 チャンネル構造を用いたものを設計している [28]。また、Nudehi らはスレーブからの力覚フィードバックはないものの、 $\mathcal{H}_\infty$ 制御を用いた操縦トレーニングシステムを提案している [46]。Morris らは、バーチャルリアリティによって骨の手術を訓練するシステムにおいて、先生の動きを生徒に伝達するマルチラテラルシステムを構築している [40]。また、Fotoohi らはマルチ

ラテラル型のバーチャルリアリティシステムにおいて、LANなどの通信時間遅れが短い場合において制御系の安定性を解析する手法を提案している [15]. 上記 $\mathcal{H}_\infty$ 制御, μ 設計法, PD 制御などに基づいた手法は, 制御系を設計する際に遅れ時間の最大値などの情報が必要であり, 時間遅れの予測が難しい計算機ネットワークを介したテレオペレーションには適さないと考えられる.

一方で, マルチラテラル制御を実現する方法として, 4章で取り上げた波変数に基づく制御が考えられる. 波変数を用いた制御は任意長の時間遅れに対して安定性 (受動性) が保証されるため, 時間遅れの大きさが事前に予測できないインターネットを介したマルチラテラル制御に適している. 波変数に基づくマルチラテラル制御は, Carignan らによって 2 マスタ・1 スレーブの構成に対応したものが提案されている [7] が, マスタ同士を直接通信させたり, 4 台以上のアームの間で位置と力をやり取りする手法はまだ存在していない. しかしながら, マルチラテラル・テレオペレーションにおいては, オペレータの数を動的に増減させる場面が考えられる. 例えば, 長時間の作業においてオペレータを交代させる場合には, 交代前のオペレータと交代後のオペレータが一時的に同時に操縦することによって, 作業の引き継ぎを滑らかに行うことが可能となる. このような用途に対応するために, 任意の台数のロボットを接続することが可能なマルチラテラル制御則の確立が望まれる.

また, Nudehi ら [46] や Khademian ら [28] が提案するマルチラテラル制御においては, オペレータの操作入力を加重平均することが可能である. また, Moghimi らも位置と力のマッピングを非線形にすることでオペレータの操作入力を調整する制御則を提案している [39]. 入力の重み付けは, 経験者と初心者が共同で操縦する際に有用である. 例えば, 初心者が操縦を誤った場合に経験者が操作に介入して作業の失敗を防ぐことが可能となる. しかしながら, 波変数に基づくマルチラテラル制御においては, これまでにオペレータの入力に優先度を設定する手法が存在せず, オペレータの操作入力は常に平等に取り扱われていた.

本章では, Carignan らによる手法を一般化し, 様々な構造のマルチラテラルテレオペレーションシステムを構築できる制御則を提案する. 提案手法では, 複数の波変数を 1 点で接続する節点を導入し, 位置の拘束条件と力の釣り合い条件から制御則を導出する. また, 熟練度の異なるオペレータが共同でロボットを操縦する場合に, 片方のオペレータの入力を制限する制御則を検討し, 実験によりどのような制御則が適しているかを検証する.

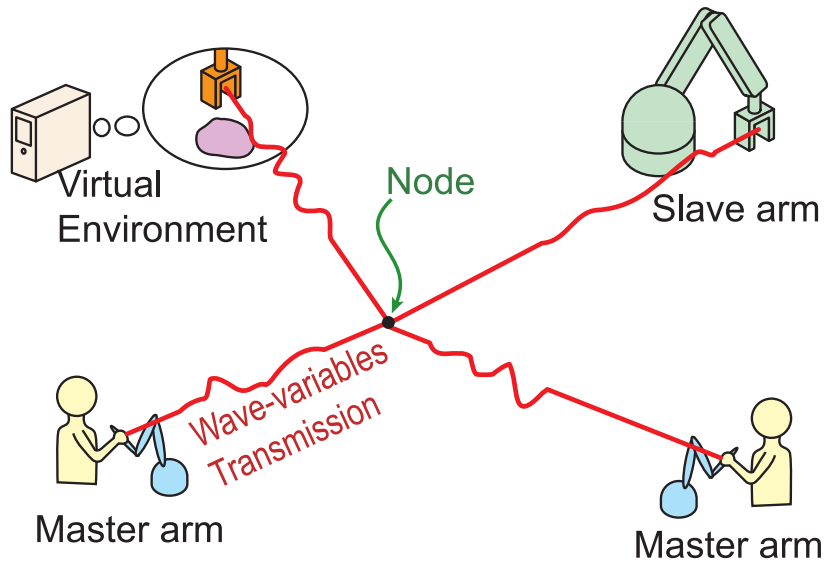


Fig. 5.1 Overview of multilateral teleoperation system

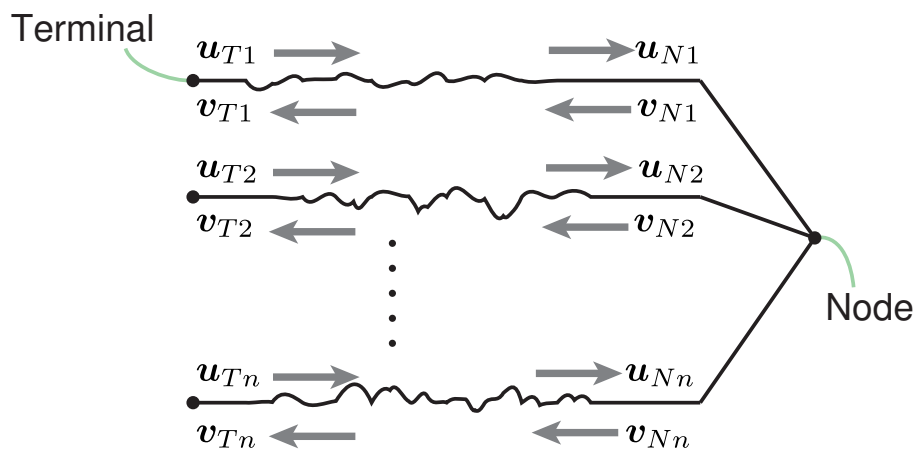


Fig. 5.2 Wave-variable-based multilateral control

5.2 波変数に基づくマルチラテラル制御

本研究が対象とするシステムは、Fig. 5.1 に示すように、3地点以上のオペレータ・環境・仮想環境などが波変数を伝える分布定数的な質量バネ特性を持つ伝送路を介して繋がっており、位置と力の情報をやりとりすることを目的とする。このシステムを実現するためには図中の分岐・合流点 (Node) が必要であるが、以下ではこの分岐・合流点の動作を模擬するための制御則の定式化を行う。

Fig. 5.2 に示すような、 n 個の端末 (Terminal) から伸びる波変数伝送路が1個の節点

(Node) に接続するシステムを考える. $\mathbf{x}_{Ti}$, $\mathbf{f}_{Ti}$ を端末 i における位置と力, $\mathbf{x}_{Ni}$, $\mathbf{f}_{Ni}$ を伝送路 i の節点側の位置と力とする. 式 (4.1), (4.2), (4.3), (4.4) と同様にして, 波変数を次式で定義する.

$$\mathbf{u}_{Ti}(t) = \frac{b\dot{\mathbf{x}}_{Ti}(t) + \mathbf{f}_{Ti}(t)}{\sqrt{2b}}, \quad \mathbf{v}_{Ti}(t) = \frac{b\dot{\mathbf{x}}_{Ti}(t) - \mathbf{f}_{Ti}(t)}{\sqrt{2b}} \quad (5.1)$$

$$\mathbf{u}_{Ni}(t) = \frac{b\dot{\mathbf{x}}_{Ni}(t) + \mathbf{f}_{Ni}(t)}{\sqrt{2b}}, \quad \mathbf{v}_{Ni}(t) = \frac{b\dot{\mathbf{x}}_{Ni}(t) - \mathbf{f}_{Ni}(t)}{\sqrt{2b}} \quad (5.2)$$

節点は, $\mathbf{u}_{Ni}$ を受信して $\mathbf{v}_{Ni}$ を各端末に返すという動作を行うが, $\mathbf{v}_{Ni}$ は以下のようにして求めることができる. まず, 節点において伝送路がすべて結合していることから, 位置の拘束条件と力の釣り合い条件を次式で表すことができる.

$$\dot{\mathbf{x}}_{N1} = \dot{\mathbf{x}}_{N2} = \cdots = \dot{\mathbf{x}}_{Nn} \triangleq \dot{\mathbf{x}}_N \quad (5.3)$$

$$\sum_i \mathbf{f}_{Ni} = 0 \quad (5.4)$$

式 (5.2)(5.3) から,

$$\mathbf{f}_{Ni} = \sqrt{2b}\mathbf{u}_{Ni} - b\dot{\mathbf{x}}_N \quad (5.5)$$

であるから, これを式 (5.4) に代入すると,

$$\dot{\mathbf{x}}_N = \frac{\sqrt{2b}}{bn} \sum_i \mathbf{u}_{Ni} \quad (5.6)$$

となる. これを式 (5.5) に代入して $\mathbf{f}_{Ni}$ が求まるので, 節点が送信すべき $\mathbf{v}_{Ni}$ が式 (5.2) から以下のように求まる.

$$\mathbf{v}_{Ni} = -\mathbf{u}_{Ni} + \frac{2}{n} \sum_j \mathbf{u}_{Nj} \quad (5.7)$$

また, 実際にアームを制御する際には, 4.2 節のときと同様にして, $\mathbf{u}_{Ti}$, $\mathbf{v}_{Ti}$ からアームの目標位置を求め, PD 制御を適用する.

5.2.1 受動性の検証

各端末が伝送路に加えたエネルギーの総和が正であれば, マルチラテラル制御系は受動的であると言える. したがって, 受動性の条件は

$$E(t) = \sum_{i=1}^n \left(\int_0^t \dot{\mathbf{x}}_{Ti}(\tau)^T \mathbf{f}_{Ti}(\tau) d\tau \right) \geq -E_{\text{init}} \quad (5.8)$$

と表せる．ここで， $E(t)$ を伝送路のエネルギー収支 E_{trans} と節点のエネルギー収支 E_{node} に分解し， E_{trans} と E_{node} を

$$\begin{aligned} E(t) &= E_{\text{trans}} + E_{\text{node}} \\ E_{\text{trans}} &\triangleq \sum_{i=1}^n \left(\int_0^t \dot{\mathbf{x}}_{Ti}(\tau)^T \mathbf{f}_{Ti}(\tau) d\tau - \int_0^t \dot{\mathbf{x}}_{Ni}(\tau)^T \mathbf{f}_{Ni}(\tau) d\tau \right) \\ E_{\text{node}} &\triangleq \sum_{i=1}^n \left(\int_0^t \dot{\mathbf{x}}_{Ni}(\tau)^T \mathbf{f}_{Ni}(\tau) d\tau \right) \end{aligned} \quad (5.9)$$

と定義すると， E_{trans} は以下の通りとなる．

$$\begin{aligned} E_{\text{trans}} &= \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{2} \left(\int_0^t \|\mathbf{u}_{Ti}(\tau)\|^2 d\tau - \int_0^t \|\mathbf{v}_{Ti}(\tau)\|^2 d\tau \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \int_0^t \|\mathbf{v}_{Ni}(\tau)\|^2 d\tau - \int_0^t \|\mathbf{u}_{Ni}(\tau)\|^2 d\tau \right) \right\} \\ &= \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{2} \left(\int_0^t \|\mathbf{u}_{Ti}(\tau)\|^2 d\tau - \int_0^{t-T_{Fi}} \|\mathbf{u}_{Ti}(\tau)\|^2 d\tau \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \int_0^t \|\mathbf{v}_{Ni}(\tau)\|^2 d\tau - \int_0^{t-T_{Bi}} \|\mathbf{v}_{Ni}(\tau)\|^2 d\tau \right) \right\} \\ &= \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{2} \left(\int_{t-T_{Fi}}^t \|\mathbf{u}_{Ti}(\tau)\|^2 d\tau + \int_{t-T_{Bi}}^t \|\mathbf{v}_{Ni}(\tau)\|^2 d\tau \right) \right\} \\ &\geq 0 \end{aligned} \quad (5.10)$$

ここで， T_{Fi} および T_{Bi} は，伝送路 i においてそれぞれ端末から節点に向かう時間遅れと節点から端末に向かう時間遅れである．さらに，式 (5.3) および (5.4) で定義した拘束条件を用いると，以下の式が成り立つ．

$$\begin{aligned} E_{\text{node}} &= \sum_{i=1}^n \left(\int_0^t \dot{\mathbf{x}}_{Ni}(\tau)^T \mathbf{f}_{Ni}(\tau) d\tau \right) \\ &= \int_0^t \dot{\mathbf{x}}_N(\tau)^T \left(\sum_{i=1}^n \mathbf{f}_{Ni}(\tau) \right) d\tau = 0 \end{aligned} \quad (5.11)$$

したがって， $E(t) \geq 0$ であるから，この制御系は受動的である．

5.3 波変数の積分誤差への対処法

4 章では，波変数に基づくバイラテラル制御における位置ドリフトの問題を扱った．本章のマルチラテラル制御は波変数に基づいた手法であるため，バイラテラル制御の場合と

同様に変動時間遅れの下では位置のドリフトが生じてしまう．本節では，4章の位置ドリフト補償制御をマルチラテラル制御に組み込む．

積分誤差補償器は図 5.3 のような構成をとる．まず送信側で波変数の積分計算を行い，その値を送信する．次に受信側では次式に示すように受信した積分値と出力すべき波変数の積分値の誤差をフィードバックすることで，波変数の歪みに起因する積分誤差を補償する．

$$\mathbf{u}_{Ni} = \tilde{\mathbf{u}}_{Ni} + \mathbf{K} \left(\int_0^{t-T_{Fi}(t)} \mathbf{u}_{Ti}(\tau) d\tau - \int_0^t \mathbf{u}_{Ni}(\tau) d\tau \right), \quad (5.12)$$

ここで， $\tilde{\mathbf{u}}_{Ni}$ ， $T_{Fi}(t)$ ， $\mathbf{K}$ はそれぞれ変動時間遅れで歪んだ波変数，遅れ時間，補償器のゲインを表す．ここでは節点側の式を示したが，端末側の積分誤差補償も同様の方法で行う．このフィードバック則によって，受信側がアームに出力する波変数 $\mathbf{u}_{Ni}$ の積分は送信側で計算した積分値に収束し，位置のドリフトが補償される．

このように，節点を用いたマルチラテラル制御においては，従来のバイラテラル制御において用いられた位置ドリフト手法をそのまま各々の伝送路に対して適用するだけでよい．4章で導入した絶対位置誤差フィードバックを導入する際についても，同様にして各々の伝送路に対して補償制御を行えばよい．

5.4 制御性能の評価実験

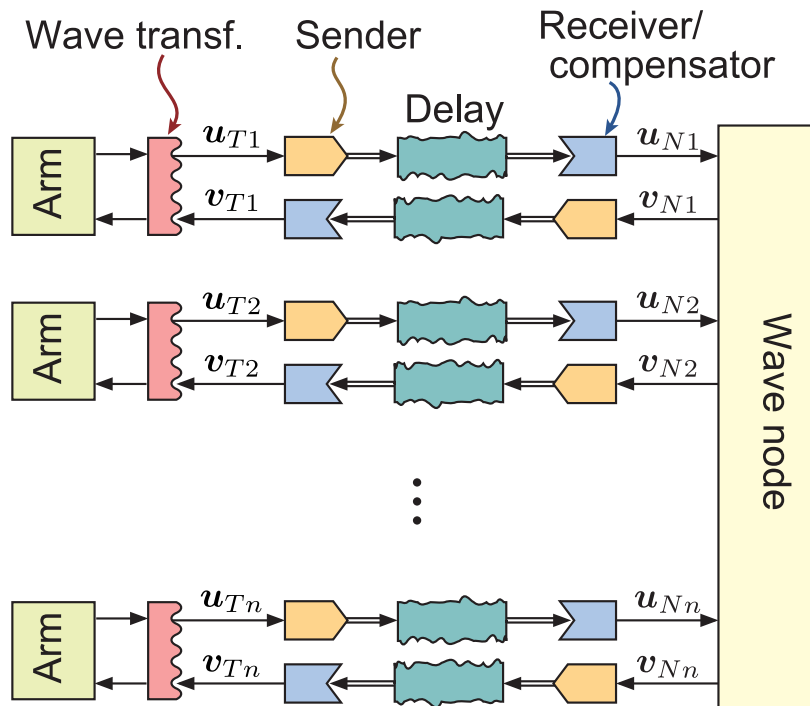
5.4.1 実験システム

本実験では，遠隔地にある物体の触覚情報を複数のユーザが共有するような状況を模擬するシステムを構築する．マスタ側のデバイスには図 5.4 に示す Sensable PHANTOM Omni 2 台を用い，スレーブ側には Fig. 5.5 に示す Novint Falcon を用いる．これらのアームおよび仮想環境は 1 台のコンピュータ (Intel Core i7, Windows 7 64bit) で制御され，その制御周期は約 1[ms] である．

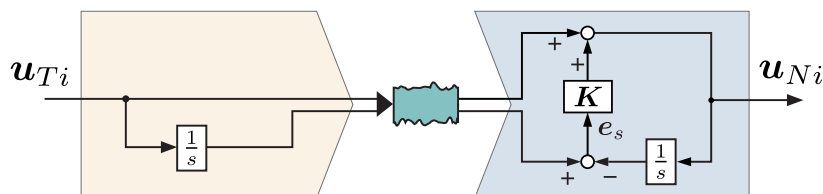
複数のマスタがクライアントとしてスレーブに接続するシステムであるため，節点はスレーブ側に配置されているものとし，節点-スレーブ間の時間遅れは 0 とした．一方，各々のマスタと節点との間には図 5.6 に示すような変動時間遅れを設定する．マスタ側の制御パラメータを Table 5.1 に，スレーブ側の制御パラメータを Table 5.2 に示す．ただし，表中の b ， K ， K_p ， K_d はそれぞれ特性インピーダンス，積分誤差補償ゲイン，アームの P ゲイン，アームの D ゲインを表す．

5.4.2 タスク設定

本実験では，マスタ 2 台を使用するオペレータに以下のような役割を割り当てる．



(a) Overall architecture of drift compensation



(b) Each of position drift compensator

Fig. 5.3 Position drift compensators

第1ユーザ マスタ1を使用し、能動的にスレーブを動かす。

第2ユーザ マスタ2を軽く把持し、第1ユーザの動きに追従する。

スレーブ側の環境として、図 5.7 に示すような三角波状の板を配置する。大きさの異なる 3 種類の板を用意し、それぞれの板の山と山との間隔は 12 mm, 15 mm, 20 mm である。

第1ユーザはスレーブ側の環境を目視することが可能であり、スレーブの動きを確認しながら波板の表面をなぞる。一方で、第2ユーザの手元には環境の波板 3 種類のコピーを用意する。第2ユーザは、第1ユーザのなぞり動作によるハプティックデバイスの動きと手元のコピーの触感を比較し、第1ユーザがなぞっている波板がどの大きさのものである



Fig. 5.4 Devices for masters (PHANTOM Omni)

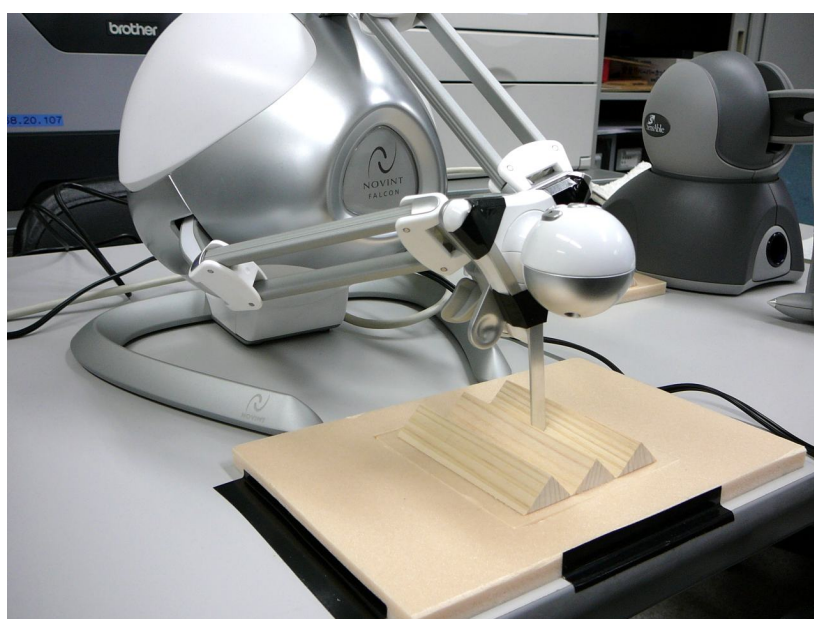


Fig. 5.5 Device for slave (Falcon)

Table 5.1 Controller parameters for masters

Variable	Value	Variable	Value
b	100	K	1.0
K_p	300	K_d	1.0

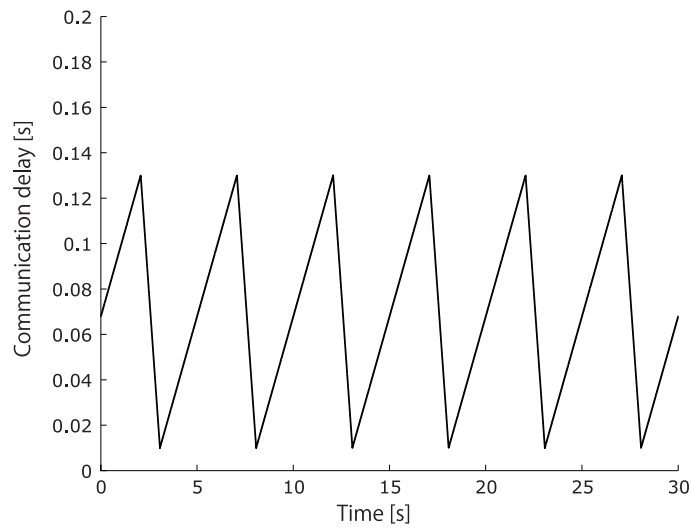


Fig. 5.6 Time delay pattern

Table 5.2 Controller parameters for slave

Variable	Value	Variable	Value
b	100	K	1.0
K_p	500	K_d	30.0

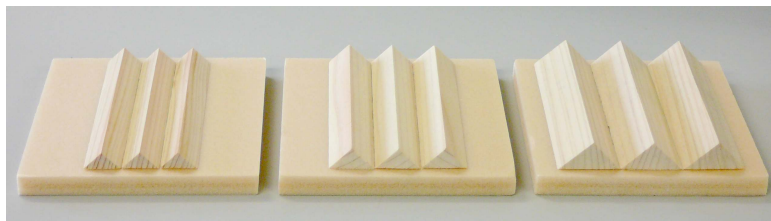


Fig. 5.7 Wave-formed plates

かを回答する.

20 代男性 5 名が第 2 ユーザとして実験に参加し、操縦に慣れた 20 代男性 1 名が第 1 ユーザとして実験を行う.

5.4.3 実験結果

各被験者の正答率を Fig. 5.8 に示す. 本実験での正答率は 50% 前後であり, 被験者はかろうじて環境の大きさを判別できていることが分かる. 12 mm の板と 20 mm と答えた割合およびその反対を Fig. 5.9 に示す. 図から, このような極端な誤りが起こった割

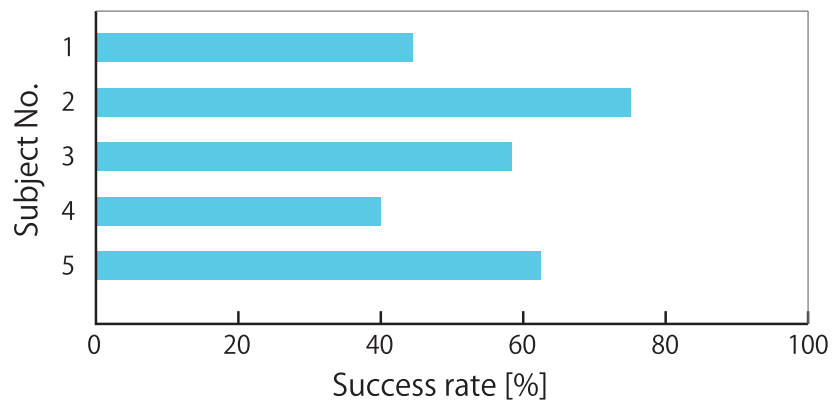


Fig. 5.8 Success rate

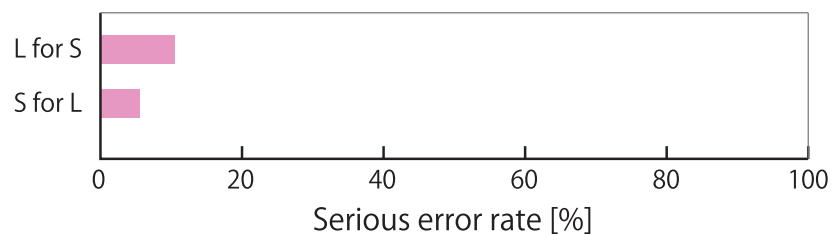


Fig. 5.9 Serious error rate

合は 10% 程度であり、被験者は 8 mm 程度の大きさの違いを容易に判別できていると言える。しかし触覚共有システムを実現するには、8 mm 程度の分解能では不十分と考えられる。

次に、マスタおよびスレーブの実際の位置を Fig. 5.10 に、波変数から変換される目標位置を Fig. 5.11 に示す。マスタとスレーブとの間には約 10 mm の位置追従誤差が発生しているのに対し、波変数の位置情報の誤差は、変動時間遅れがあるにもかかわらず 1 mm 程度に抑えられている。したがって、波変数に基づく手法が適切に位置の目標値を計算できているものの、PD 制御による位置制御が十分に達成されていないことが分かる。この原因としては、スレーブ側に用いた Falcon の摩擦が大きく、デバイスがマルチラテラル制御に適していないことが考えられる。

本実験では十分な追従性能が得られなかったものの、以下のような対策を施すことによって追従性を大きく改善することが可能と考えられる。

- 速度の測定ノイズを低減するフィルタを設計し、D ゲインを向上する。
- 高い剛性が実現できるアドミッタンス型スレーブアームを導入する。

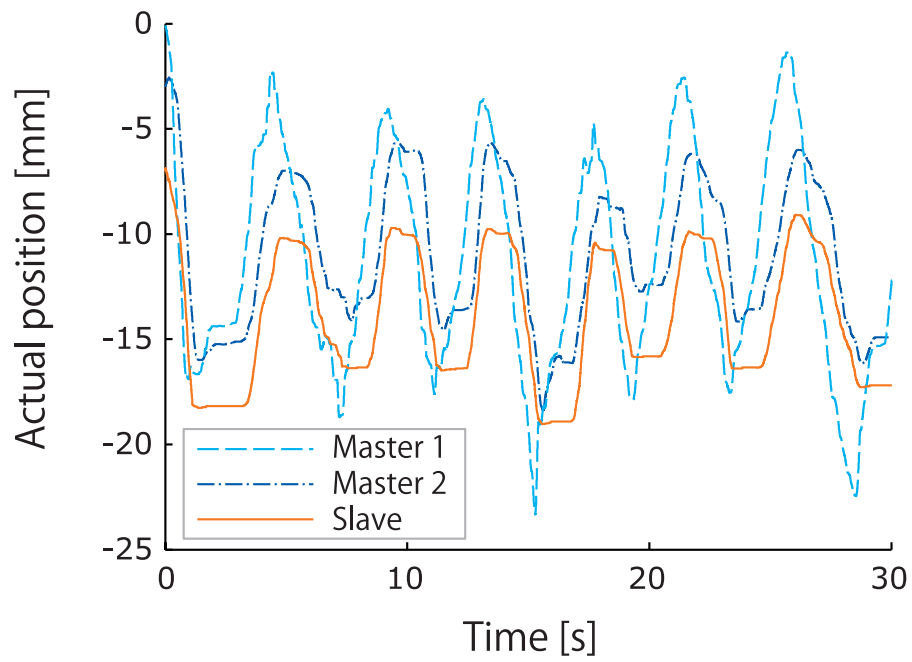


Fig. 5.10 Experimental result (actual position)

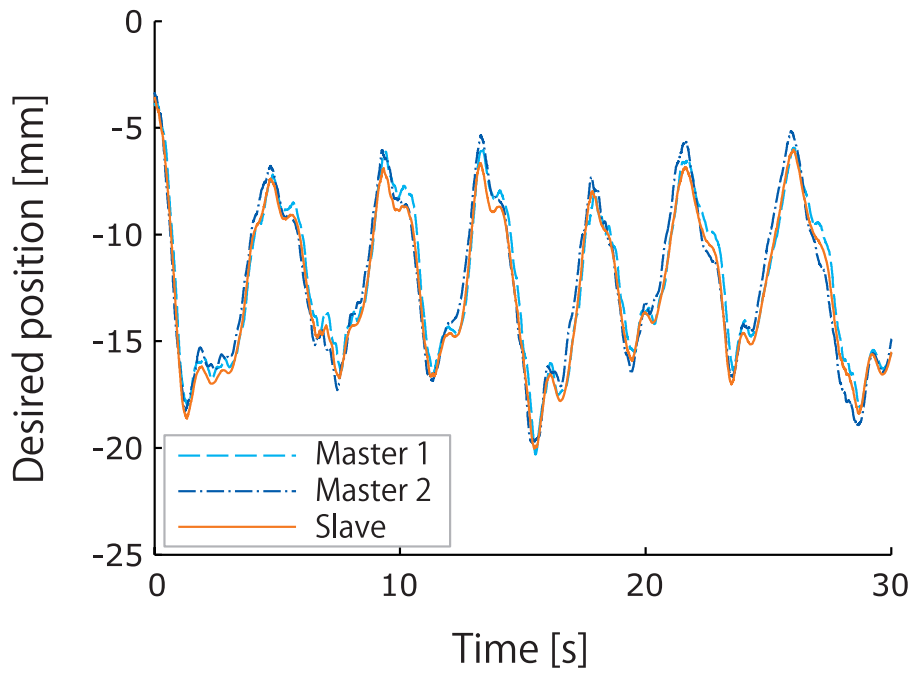


Fig. 5.11 Experimental result (desired position)

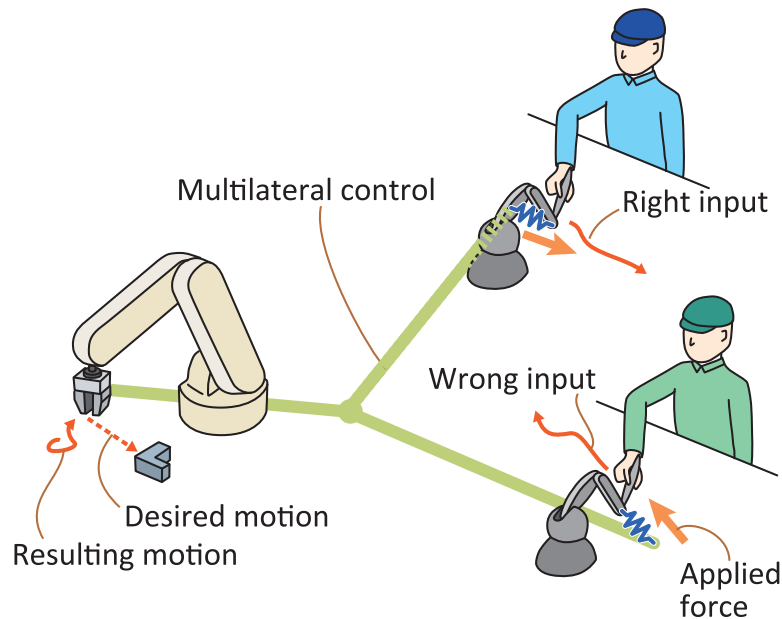


Fig. 5.12 Conflict of operators' input motions

5.5 オペレータ入力競合に対処する制御手法

5.5.1 仮想非線形バネによるオペレータの優先度の設定

マルチラテラル・テレオペレーションにおいては、複数人のオペレータの動作指令が足し合わされる。特に、波変数に基づくマルチラテラル制御においては、全てのオペレータの入力が単純に足し合わされるため、例えば Fig. 5.12 に示すように2人のオペレータの意思が競合し、反対向きの動作指令を出した場合にはスレーブアームはオペレータの意図した通りには動かなくなってしまう。

本節では、複数のオペレータがうまく協調できずに入力の差異が生じた場合でも作業がスムーズに継続できるように、熟練オペレータなど一方のオペレータに操作の主導権を与えられる手法について検討を行う。まず、オペレータの動作入力を修正または制限するような手法の候補として、下記のようなものが挙げられる。

- 力のスケーリング
- エネルギーの監視
- 非線形位置制御

力のスケーリングは、スレーブアームからの力にある倍率を掛けて提示する方法であ

り、次式で表される。

$$\mathbf{f}_{Ti} = \varepsilon_{Ti}(\mathbf{f}_{Ni}) \quad (5.13)$$

ここで、 ε_{Ti} はアーム i に割り当てられた力のスケール比である。これにより、オペレータが加える力を抑えることは可能であるが、環境からの反力が拡大されて提示されるため、オペレータが感じ取る環境のインピーダンスが変化する。また、 ε_{Ti} が非線形な関数である場合や時変である場合、マスタとスレーブの間の位置ドリフトを生じさせるという問題点がある。

エネルギーの監視は、オペレータがシステムに入力したエネルギーを監視し、一定の閾値を超えた場合に入力を遮断する、あるいはマスタから送信される波変数に一定倍率を掛けて入力を縮小する方法である。この方法は、システムの受動性を保証できるというメリットがあるが、エネルギーの閾値を直感的に調整することが難しい。また、力のスケールリングによる方法と同じく、位置のドリフトが生じてしまう。

そこで、本研究においては下記に述べる非線形位置制御による方法を提案する。提案手法においては、4.2 節で述べた位置制御を PD 制御から次式で示されるような制御則に置き換え、各オペレータが入力できる力を抑制する。

$$\mathbf{f}_{Ti} = \tilde{K}_p(\mathbf{x}_{Ti} - \mathbf{x}_{Tir}) + K_d(\dot{\mathbf{x}}_{Ti} - \dot{\mathbf{x}}_{Tir}) \quad (5.14)$$

ここで、 $\mathbf{x}_{Tir}$ はアーム i の実際の手先位置である。また、 $\tilde{K}_p(\mathbf{d})$ は位置と力のマッピング関数であり、様々な関数が考えられるが、本節では下記の 2 種類を導入する。

- 入力飽和

$$\tilde{K}_p(\mathbf{d}) = \begin{cases} K_p \mathbf{d} & (\|\mathbf{d}\| < f_{th}/K_p) \\ f_{th} \mathbf{d}/\|\mathbf{d}\| & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (5.15)$$

- 2 段階ゲイン

$$\tilde{K}_p(\mathbf{d}) = \begin{cases} K_p \mathbf{d} & (\|\mathbf{d}\| < f_{th}/K_p) \\ K_{p2} \mathbf{d} + f_{th}(1 - K_{p2}/K_p) \mathbf{d}/\|\mathbf{d}\| & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (5.16)$$

ここで、 f_{th} はゲインを切り替える力の閾値を表し、 $K_{p2} < K_p$ は切り替え後のゲインである。これらの関数形状を Fig. 5.13 に示す。この手法を導入することで、Fig. 5.14 に示すように閾値を超える力を加えると柔らかくなるような非線形バネを介したシステムとなり、入力飽和の場合は閾値より大きな力をオペレータが入力することが不可能になる。従って、熟練者側のマスタアームに従来の PD 制御を適用し、初心者側のマスタアームに非線形バネを適用すれば、初心者の操作入力を制限して熟練者の操作を優先させることが可能となる。2 段階ゲインを用いると、環境に大きな力を加える必要がある時や、優先度の低いオペレータから優先度の高いオペレータに意思を伝える必要がある場合には、十分

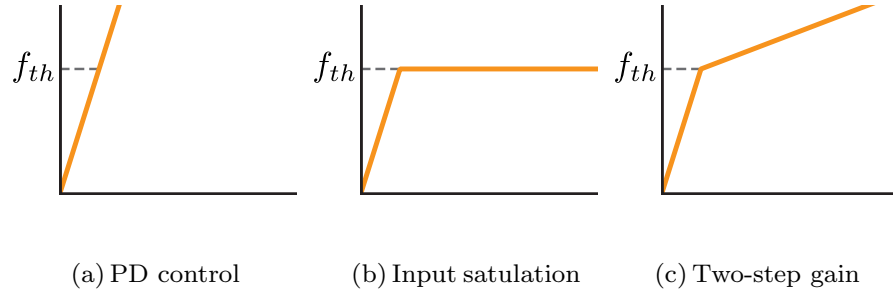


Fig. 5.13 Conflict avoiding controllers

大きな位置偏差を生じさせることで閾値を超える力を入力することができる。優先度の低いオペレータが意思を伝える場合の例としては、どちらのオペレータも完全には熟練しておらず優先度の高いオペレータが作業を誤る場合などが挙げられる。

提案手法においては波変数そのものに対する演算が行われず、マスター-スレーブ間の位置ドリフトは生じないため、波変数に基づくマルチラテラル制御に適していると考えられる。また、上記に挙げた関数だけでなく、硬さが滑らに変化するような関数を用いることも可能である。

5.5.2 仮想非線形バネの受動性

仮想非線形バネは受動的な物理現象を模擬しているためシステムの受動性を損ねないことは明らかであるが、本節では提案手法が受動性条件を満たしていることを示す。なお、受動的なシステムを結合しても受動性は維持されるので、本節では位置制御系の受動性のみを検証する。

まず、位置制御器の受動性条件は次式で定義される。

$$E_{PC}(t) = - \int_0^t (\dot{\mathbf{x}}_{mi}(\tau)^T \mathbf{f}_{mi}(\tau) + \dot{\mathbf{x}}_{Ti}(\tau)^T \mathbf{f}_{Ti}(\tau)) d\tau \geq E_{PC}(0) \quad (5.17)$$

ここで、 $\dot{\mathbf{x}}_{mi}$ と $\mathbf{f}_{mi}$ はそれぞれ i 番目のマスターアームの手先位置とアクチュエータ入力を表し、 E_{PC} は位置制御器のエネルギー収支を表している。ここで、位置制御器を次式で表すことにする。

$$\mathbf{f}_{mi} = -\mathbf{f}_{Ti} = \mathbf{f}(\mathbf{e}) + K_d \dot{\mathbf{e}} \quad (5.18)$$

ここで、 $\mathbf{f}(\mathbf{e})$ は位置と力のマッピング関数であり、また $\mathbf{e} \triangleq (\mathbf{x}_{Ti} - \mathbf{x}_{mi})$ である。この

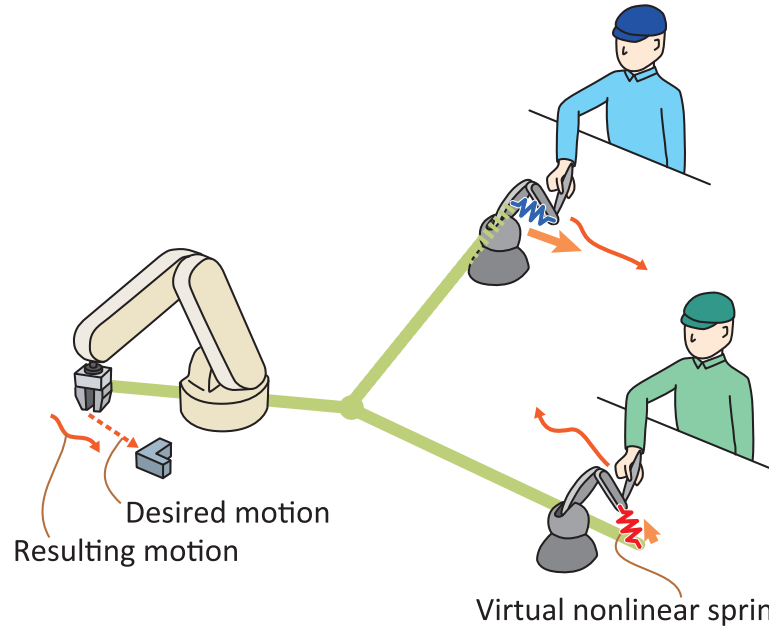


Fig. 5.14 Nonlinear spring introduced in the master controller

ときエネルギーの値 E_{PC} は以下のように表される.

$$\begin{aligned}
 E_{PC} &= \int_0^t [\dot{e}(\tau)^T \{f(e(\tau)) + K_d \dot{e}(\tau)\}] d\tau \\
 &= \int_0^t K_d |\dot{e}(\tau)|^2 d\tau + \int_0^t \dot{e}(\tau)^T f(e(\tau)) d\tau
 \end{aligned} \tag{5.19}$$

また,

$$\begin{aligned}
 \int_0^t \dot{e}(\tau)^T f(e(\tau)) d\tau &= \int_0^t \frac{de^T}{d\tau} f(e(\tau)) d\tau \\
 &= \int_0^{e(t)} f(\epsilon)^T d\epsilon.
 \end{aligned} \tag{5.20}$$

である. したがって, ポテンシャル $\int_0^{e(t)} f(\epsilon)^T d\epsilon$ が非負であれば位置制御器は受動性条

件を満たす．2段階ゲイン型の非線形バネについては，ポテンシャルは次式で表される．

$$\begin{aligned} & \int_0^{e(t)} f(\epsilon)^T d\epsilon \\ &= \begin{cases} \frac{1}{2} K_p |e|^2 & (|e| < f_{th}/K_p) \\ \frac{1}{2} K_{p2} |e|^2 + f_{th} \left(1 - \frac{K_{p2}}{K_p}\right) |e| + c & (\text{otherwise}) \end{cases} \end{aligned} \quad (5.21)$$

なお，積分定数 $c \triangleq \frac{1}{2} \left(\frac{K_{p2} - K_p}{K_p^2} \right) f_{th}^2$ はポテンシャル関数が連続的になるように決定する．この場合， $\int_0^{e(t)} f(\epsilon)^T d\epsilon \geq 0$ が成り立つため受動性が示される．なお，入力飽和型の非線形バネの受動性は，式 (5.21) に $K_{p2} = 0$ を代入することで示される．

5.6 競合回避に関する実験

本節では，前節で提案した非線形バネ2種類の特徴を実験によって比較する．

5.6.1 実験システム

実験では，2人のオペレータが同時にロボットを操縦する場面を想定した2マスタ-1スレーブのシステムを構築した．

マスタアームとしては，SensAble 社製力覚提示デバイス PHANTOM Omni を2台使用する．これらのマスタアームは1台の PC(Windows 7) 上で制御周期 1 ms で制御される．スレーブには，Fig. 5.15 に示すような仮想環境を用いる．この仮想環境には，6個の仮想押しボタンが配置されており，鉛直下向きに押すことが可能である．仮想環境のシミュレーション周期は 0.1 ms であり，仮想スレーブアームの制御周期は 1 ms である．また，仮想環境の映像はシミュレーションとは別のスレッドで OpenGL を用いてレンダリングを行い，その更新周期は約 30 ms である．スレーブアームは質量 3 kg, 粘性 1 Ns/m の質点であり，仮想押しボタンのバネ定数は 1 N/m である．

マルチラテラル制御の節点は，仮想環境と同じ PC 上で動作させる．波変数の特性インピーダンスは $b = 30$ Ns/m に設定した．マスタ側 PC とスレーブ側 PC との間での波変数の送受信には UDP 通信を用い，通信のサンプリング周期は 2 ms とした．この実験では，ローカルエリア内で通信しており通信遅延がほとんど生じないため，各マスタと節点との間に 100 ms の仮想時間遅れを導入した．また，仮想環境の画像は映像配信ソフト「LiveCapture2」を使用してマスタ側に伝送する．

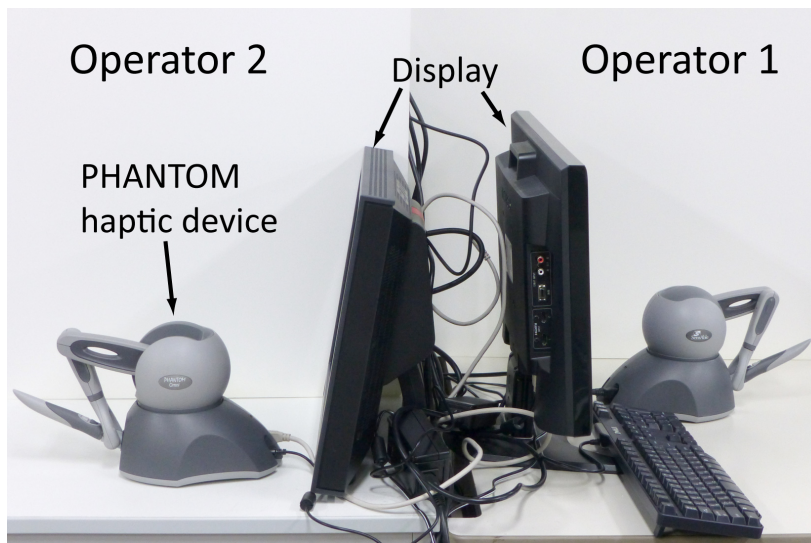


Fig. 5.15 Experimental system

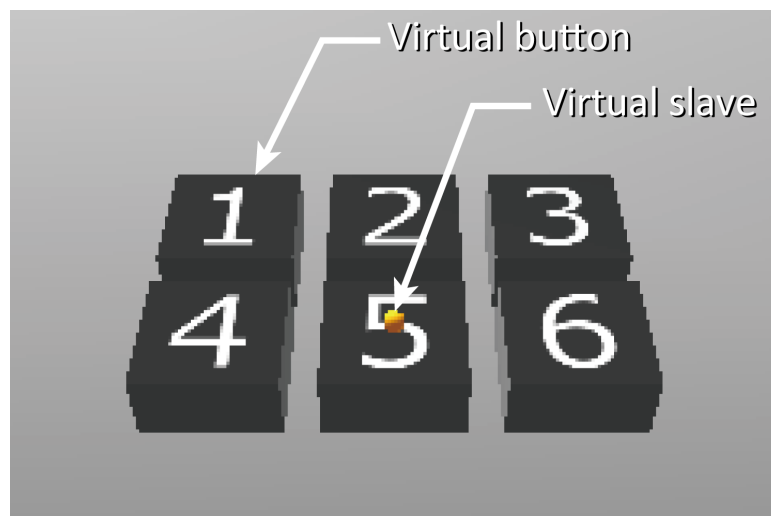


Fig. 5.16 Virtual environment

5.6.2 実験方法

実際に作業に慣れたオペレータとそうでないオペレータによる実験を行うことが望ましいが、作業に熟練するためには十分な練習が必要であり現実的ではない。そこで、本実験では手順が複雑で覚えるのに熟練を要する作業を熟練者と初心者のオペレータが協調して作業を行うことを想定した実験を行う。ただし、被験者として熟練者と初心者を集めることは容易ではないため、本実験では以下に示すようなタスク設定により、複雑でかつ熟練



Fig. 5.17 Task display

度の異なる2人による協調作業を擬似的に実現する。

実験では、Fig. 5.17に示すように2人のオペレータに数字（1～6）の列を提示し、オペレータは仮想スレーブを操縦して、表示された数字に対応する仮想押しボタンを順番に押すものとする。また、オペレータの自信度を擬似的に再現するため、表示される数字に信頼度を設定し、信頼度に応じた色分けを行なってオペレータに提示する。数字が黒字の場合はその数字はほぼ正確であり、オペレータは自信を持って作業をすることができるが、青字の場合は50%の確率で誤りを含んでいるためオペレータは相手のオペレータの動作を考慮して慎重に作業することが期待される。また、一定の割合で数字が表示されない場合がある。オペレータ1をある程度作業に慣れた熟練者、オペレータ2を初心者という想定で、提示される信頼度および正誤の組み合わせはTable 5.3に示す7通りとした。実験では各パターン2回ずつ合計14回をシャッフルして提示する。なお、表中の「パターン5」のみ黒字で誤った数字を提示しているが、これは初心者役オペレータが作業手順を「勘違い」している状況を想定したものである。

オペレータ1は熟練者役であるため、従来どおりのPD制御を用いるが、初心者役のオペレータ2が操作するマスタについては、PD制御および式(5.15)、(5.16)に示される入力抑制手法の計3種類から各試行ごとにランダムに選択する。また、仮想環境についてはPD制御を用いる。制御系のパラメータはTable 5.4に示すとおりである。

本実験の参加者は20代男性6名であり、オペレータ1とオペレータ2の役割をそれぞれ12回行った。参加者は、提示されている数字などの情報を発言したり、口頭でもう一人のオペレータに指示を出すことは認められないが、緊張を解すため実験タスクに関係のない会話をすることは許可されている。

5.6.3 実験結果

制御則および信頼度/正誤パターンごとに、正しいボタンを押した割合をTable 5.5に示す。信頼度/正誤パターン1, 2, 3, 4, 6については、ほとんどの試行が成功している。初心者の勘違いを想定したパターン5と、経験者が誤っているパターン7については、他のパターンと比べて失敗の割合が高いため、本節で考察を行う。

パターン5においては、非線形の位置制御を用いたほうがPD制御と比べて成功率が高くなっている。このことから、初心者の入力を制限することによって、経験者の動作指令

Table 5.3 Confidence and correctness patterns

Pattern	Operator 1		Operator 2	
	Conf.	Corr.	Conf.	Corr.
1	++	✓	++	✓
2	++	✓	+	✓
3	++	✓	+	
4	++	✓	-	
5	++	✓	++	
6	+	✓	++	✓
7	+		++	✓

++ : Certain (Displayed in master console in black),

+ : Uncertain (Displayed in master console in blue),

- : Unknown (Hidden), ✓: Correct

Table 5.4 Control parameters

Name	Variable	Value
Master P gain	K_p	500 N/m
Master D gain	K_d	2 Ns/m
Master 2nd gain	K_{p2}	20N/m
Slave P gain	K_p	100 N/m
Slave D gain	K_d	10 Ns/m
Force threshold	f_{th}	1 N

を優先させることに成功していると言える。

一方、パターン 7 では、入力飽和を用いた場合に他の 2 つの制御則と比べて成功率が低下している。入力飽和を用いた場合、初心者が一定以上の力を入力できないため、経験者が誤っていた場合に初心者が動作を正すことができないことがわかる。一方、2 段階ゲインを用いると、経験者の動作が優先されるものの、初心者が十分大きな力を加えて経験者に操作力を伝えて動作を正すことが可能となる。

なお、 χ^2 検定 (有意水準 10%) を行った結果、パターン 5 においては PD 制御と入力飽和、PD 制御と 2 段階ゲインの両方において有意差が見られた。また、パターン 7 においては PD 制御と入力飽和、入力飽和と 2 段階ゲインとの間にそれぞれ有意差がみられた。

Table 5.5 Success rate of the task (%)

Pattern	PD control	Input saturation	Two-step gain
1	100.0	95.8	97.9
2	100.0	100.0	100.0
3	93.8	97.9	97.9
4	95.8	100.0	97.9
5	64.5	89.5	87.5
6	95.8	97.9	100
7	79.1	41.7	72.9
Avg.	89.9	89.0	93.5

5.7 おわりに

本章では，複数のオペレータがロボットを協調して操縦できるマルチラテラル・テレオペレーションシステムについて，波変数に基づいた制御則を提案した．まず，従来のバイラテラル制御で用いられた波変数の理論を拡張し，複数の分布定数系を結合する節点を導入した．位置の拘束条件と力の釣り合い条件をもとに，節点が送信すべき波変数の値を導出した．提案手法を用いることで，任意長の一定時間遅れに対して安定に位置と力の情報をやり取りすることが可能である．実験を行った結果，提案手法が安定に動作していることが確認されたが，低価格なハプティックデバイスでは，摩擦などの影響で位置と力の追従が十分でないことが分かった．今後は，低価格かつ追従性の高いデバイスの開発が望まれる．

波変数に基づくマルチラテラル制御では，力の釣り合いを制御目的としているため，複数のオペレータの入力が平等に扱われる．本章では，波変数の端点のPD制御を仮想非線形バネに置き換えることで，動特性の直感性を損ねずにオペレータが入力できる力を制限する手法を提案した．非線形バネの種類として，入力飽和型と2段階ゲイン型を導入し，実験により2段階ゲイン型が優れていることを確認した．なお，本実験は，2人のオペレータ間で力をやり取りしていたものの，環境からの反力が重要となるタスク設定ではなかった．今後は，環境からの反力が重要となるようなタスクにおいて本章で提案した手法が実際に使えるかどうかの検証が必要である．

今後は，制御性能の観点からさらなる改良が必要であると考えられる．提案した手法では，式(5.7)に示されるように節点に送られてきた波の一部が送信元に反射される．波の

反射率はシステム内のアームの台数に応じて大きくなり、大規模なマルチラテラルテレオペレーションにおいては操作入力の大半がオペレータに返ってくるため、操縦が困難になってしまう。従来、波変数に基づくバイラテラル制御ではフィルタの適用やインピーダンス整合によって波の反射を抑えていたが、マルチラテラル制御においても同様の手法を適用することで反射を低減し制御性能を向上することが可能と考えられる。

本章では、任意台数のロボットを接続可能なマルチラテラル制御を提案したが、ロボットを作業中に追加または削除できる可変台数のシステムを構築するには至っていない。今後は、受動性の条件を満たしつつ台数を可変とする制御則の確立と、ロボットの接続・切断を管理できるソフトウェアの実装を行なっていく予定である。

また、本研究では2人のオペレータによる協調作業を取り扱ったが、マルチラテラル制御を用いれば、人とコンピュータによる協調作業も可能となる。例えば、画像処理を用いて障害物を回避したり最適な作業手順をオペレータに提示する操縦アシストシステムにおいて、マスタ側やスレーブ側のコンピュータの性能が不足している場合には遠隔地の大型計算機を接続してのマルチラテラル制御が有効と思われる。人と機械の協調については、既に自動車の運転アシストなどの分野では実用化が進んでいるが、人がシステムを過信してしまうなど様々な課題が残っている [26]。コンピュータによる操縦アシストのあるマルチラテラル・テレオペレーションシステムについても、自動車などと同様に安全性やオペレータの過信の問題を考慮したシステムの開発が必要であると考えられる。

第 6 章

結言

6.1 本論文のまとめ

本論文では、まず可変スケール型のテレオペレーションシステムを安定に動作させる制御手法の確立を目指し、スケールド H_∞ 制御とゲインスケジューリング制御によってオペレータと環境の不確かさおよびスケール比の変化の両方に対応できる制御則の設計を行った。さらに、可変スケールテレオペレーションのスケール調整インタフェースをユーザビリティテストの結果を元に設計した。次に、計算機ネットワークを介した変動時間遅れの存在するテレオペレーションシステムにおいて、波変数を用いた制御則を適用した際に生じる位置ドリフトを補償するために、絶対位置の誤差をフィードバックする手法を提案した。最後に、計算機ネットワークを介して任意の台数のロボットを接続できるマルチラテラル・テレオペレーションシステムについて、波変数の伝送路を結合する節点に基づいた制御則を提案し、さらに熟練度の異なるオペレータが協調して操縦する場合に、熟練度の低いオペレータの入力を制限する手法を提案した。

2 章では、可変スケールテレオペレーションシステムを安定に制御するコントローラを設計するための理論的枠組みを提案し、実験によりその有効性を示した。オペレータと環境の不確かさを取り扱うために、オペレータと環境を受動的なものと仮定して H_∞ ノルムが 1 以下の構造化された散乱行列として表現し、これらの変動に対するロバスト安定性を保証するためにスケールド H_∞ 制御を導入し、線形行列不等式 (LMI) を用いてコントローラを導出した。可変スケールテレオペレーションシステムは、その状態空間表現がスケール比に対してアフィンであることから、スケール比をスケジューリングパラメータとするゲインスケジューリング制御が適用可能であることを示した。

さらに、設計の自由度を高めるために、制御目的に対するスケール比に依存するような重みを導入し、スケール比に対する LMI のアフィン性を損ねないような重みの設定方法を示した。また、このスケール比依存重みと従来の一定の重みとを比較した結果、スケー

ル比依存重みを用いることで制御性能の高いコントローラを発見できる可能性が向上できることが分かった。また、アームのモデル化誤差を補償し、理想的な線形モデルに近づけるような制御系を加えることによって、実験装置においても十分な制御性能が確保されることを確認した。

3章では、可変スケールテレオペレーションシステムにズーム機構を持つカメラシステムを統合し、可変スケール制御の有効性を検証するためのユーザビリティ評価実験を行った。予備評価実験の結果から、2つのダイヤルを回してスケールを調整する方法はオペレータにとって直感的ではなく、タスクに時間を要したりタスクが失敗する場合があった。そこで、直交させた2個のスライダでスケール比を調整する方法を提案し、再度評価実験を行った結果、スケール比の調整に戸惑うケースが減少し、タスク所要時間が一部のユーザにおいては固定スケールよりも有意に短くなった。したがって可変スケールは有効であると言えるが、全ての被験者にとって有効であったとは言えず、操作にはある程度の熟練が必要であることが分かった。

4章では、計算機ネットワークなどの通信の時間遅れがあるマスタ・スレーブシステムにおいて、位置のドリフトが起らないバイラテラル制御を提案した。波変数に基づく制御則は、時間遅れが一定であればシステムの受動性が保証されるが、通信の遅延が変動する場合には受動性は保証されず、さらにマスタとスレーブとの間に位置のドリフトが発生する。位置のドリフトを補償するために波変数の積分誤差をフィードバックする手法がこれまでに提案されていたが、本研究では積分誤差フィードバック則に対して等価な式変形を加え、絶対位置のフィードバック項があるドリフト補償制御を導出した。提案手法は遅れの変動だけでなく、数値積分の誤差や初期位置のずれによる位置ドリフトも補償可能である。実際のネットワークの通信遅延を模擬した実験を行い、提案手法が変動時間遅れがある場合と初期位置のずれがある場合の双方に対して位置ドリフトを補償できていることを確認した。

また、システムの受動性を保証するために、エネルギー収支モニタを適用した。この手法は、システムのエネルギーを監視し、エネルギー量がある閾値を超えた場合に波変数の出力を停止する手法であり、これにより通信途絶などの極端な遅れ変動が生じた場合でも受動性が保証される。実験により、本手法が長時間の通信途絶の際には出力を停止したが、1秒未満の僅かな途絶に対しては本手法は作動せずスムーズな作業を継続することができた。

5章では、計算機ネットワークを介して複数人でロボットを協調して操縦するマルチラテラル・テレオペレーションシステムの制御則を提案した。提案手法では、従来の波変数に基づく制御則を拡張し、波変数の伝送路を1点で結合する節点を導入した。節点を制御で実現するために、位置の拘束条件と力の釣り合い条件をもとにマルチラテラル制御則を導出した。提案手法は、任意の台数からなるマルチラテラルテレオペレーションに対して

受動性が保証される。また、節点とアームとの間は従来の波変数と同様であるため、変動時間遅れに対しても1対1のテレオペレーションシステムで用いられてきた位置ドリフト補償をそのまま適用することが可能である。

複数のオペレータの熟練度が異なる場合や、操縦トレーニングを行う場合には各々のオペレータの入力に重み付けあるいは優先度を付けることが望ましい。しかし、波変数に基づくマルチラテラル・テレオペレーションではオペレータからの入力に平等に扱われてしまう。そこで、本論文では波変数の分布定数系の端点とアームとを結合していたPD制御を仮想非線形バネに置き換えることでオペレータの入力を制限する手法を導入し、実験によってその有効性を確認した。

6.2 今後の課題

本研究では、可変スケール型のテレオペレーションと時間遅れのあるテレオペレーションについて、それぞれを安定化する制御則を構築したものの、時間遅れの変動とスケール比の変化の両方には対処できていない。また、テレオペレーションシステムを不安定にする要因には、時間遅れやスケール比の変化だけでなくアームのモデル化誤差やセンサノイズ、さらにコントローラの離散時間化など様々なものが考えられる。今後は、本論文や従来の研究ではそれぞれ個別に対処されていたこれらの問題を統一的に解決できるような手法の確立が望まれる。

また、今後は特殊な環境で用いる遠隔操縦ロボットだけでなく、遠隔コミュニケーションなどの様々な場面で用いられる遠隔操縦ロボットシステムの発展が望まれる。このようなロボットを実現するためには、安定な制御則が必要であることはもちろんであるが、ハードウェアの開発も重要となる。本研究を含め、バイラテラル制御に用いられているロボットは、マスタ側・スレーブ側ともに減速比の小さいアクチュエータを使用した低摩擦なアームを用いているが、このような低摩擦なアームはアクチュエータ自体が大型であり可搬性が低いため、遠隔コミュニケーションなどの用途で手軽に導入できるとは言い難い。このような用途のテレオペレーションのために、力センサを用いたアドミッタンス型のアームや、振動などを用いた擬似的な力覚提示デバイスが普及する可能性がある。そのようなデバイスは、従来のアームとは力学的特性が異なるため受動性の条件がそのまま適用できないと考えられる。例えば、振動を用いたデバイスでは一定の力を出力することができず、位置制御も不可能である。今後は、厳密な力学的な受動性の条件を満たすのではなく、オペレータが受動的と感じるかどうかに着目してシステムの安定条件を議論していくことが必要であると考えられる。

従来のマスタ・スレーブシステムにおいては、機構透明性など実現すべき課題が定まっていたが、マルチラテラル・テレオペレーションにおいて全てのアームの位置と力を一致

させることは不可能であるため、制御目的の設定自体が大きな課題である。本研究では、動特性の直感性を重視し力の釣り合いに基づく定式化を行ったが、システムの使用目的によっては、より適切な制御目的が存在する可能性が高い。今後は、実際のロボット作業を対象として複数ユーザが協調操縦を行うシステムを構築し、実験的にマルチラテラル・テレオペレーションに求められる仕様を定めることが求められる。

参考文献

- [1] 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.
- [2] <http://www.anybots.com/>
- [3] Pierre Apkarian, Pascal Gahinet and Greg Becker: “Self-scheduled H_∞ Control of Linear Parameter-varying Systems: a Design Example”, *Automatica*, vol.31, no.9, pp.1251–1261, 1995.
- [4] J. Artigas, J. Ryu, and C. Preusche, “Time Domain Passivity Control for Position-Position Teleoperation Architectures,” *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 19, no. 5, pp. 482–497, 2010.
- [5] P. Berestesky, N. Chopra, and M. W. Spong: “Discrete Time Passivity in Bilateral Teleoperation over the Internet,” *Proc. IEEE ICRA 2004*, pp.4557–4564, 2004.
- [6] M. Boukhniifer, A. Ferreira, J. G. Fontaine: “Scaled Teleoperation Controller Design for Micromanipulation over Internet”, *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.4577–4583, 2004.
- [7] C. R. Carignan and P. A. Olsson, “Cooperative control of virtual objects over the internet using force-reflecting master arms,” in *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2004, vol. 2, no. April, pp. 1221–1226.
- [8] 陳: “LMI による制御,” *システム/制御/情報*, Vol. 56, No. 6, pp. 287–290, 2012.
- [9] N. Chopra, M. W. Spong, and R. Lozano: “Adaptive Coordination Control of Bilateral Teleoperators with Time Delay,” *Proc. of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control*, Vol.5, pp.4540–4547, 2004.
- [10] N. Chopra, M. W. Spong, R. Ortega, and N. E. Barabanov: “On Tracking Performance in Bilateral Teleoperation,” *IEEE Trans. on Robotics*, Vol.22, No.4, pp.861–866, 2006.

- [11] J. E. Colgate: “Robust Impedance Shaping Telemanipulation”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.9, no.4, pp.374–384, 1993.
- [12] R. V. Dubey, S. E. Everett, N. Pernalet: “Teleoperation Assistance Through Variable Velocity Mapping”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.17, no.5, pp.761–766, 2001.
- [13] 蛸原, 萩原: “伸長型行列不等式を用いた制御系の解析と設計,” システム/制御/情報, Vol. 48, No. 9, pp. 355–360, 2004.
- [14] C. L. Fernando, M. Furukawa, T. Kurogi, K. Hirota, S. Kamuro, K. Sato, K. Minamizawa, and S. Tachi, “TELESAR V: TELExistence Surrogate Anthropomorphic Robot,” in SIGGRAPH ’12, 2012, p. 4503.
- [15] M. Fotoohi, S. Sirouspour, and D. Capson, “Stability and Performance Analysis of Centralized and Distributed Multi-rate Control Architectures for Multi-user Haptic Interaction,” The International Journal of Robotics Research, vol. 26, no. 9, pp. 977–994, Sep. 2007.
- [16] A. Franchi, P. R. Giordano, C. Secchi, H. I. Son, and H. H. Bühlhoff: “A Passivity-Based Decentralized Approach for the Bilateral Teleoperation of a Group of UAVs with Switching Topology,” in 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011, pp. 898–905.
- [17] 藤森: ロバスト制御. コロナ社, 2001.
- [18] 藤原, 横小路, 吉川: “Microsurgery を目的とした可変スケールテレオペレーションシステムの構築”, 計測自動制御学会第4回システムインテグレーション部門講演会, pp.950–951, 2003.
- [19] 藤原政記, “マイクロサージェリを目的とした可変スケールテレオペレーションシステムの構築,” 京都大学, 2004.
- [20] L. E. Ghaoui, F. Oustry and M. AitRami: “A Cone Complementarity Linearization Algorithm for Static Output-Feedback and Related Problems”, IEEE Transactions on Automatic Control, vol.42, no.8, pp.1171–1176, 1997.
- [21] G. S. Guthart and J. K. Salisbury, Jr.: “The IntuitiveTM Tele-surgery System: Overview and Application”, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.618–621, 2000
- [22] B. Hannaford and J.-H. Ryu: “Time-Domain Passivity Control of Haptic Interface,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.18, No.1, pp.1–10, 2002.
- [23] 長谷川, 佐藤, 野原, 松井: “人の直感的動作を利用するマイクロロボット群の遠隔操作システム”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.4, pp.567–573, 1996.
- [24] P. Hokayem and M. Spong, “Bilateral teleoperation: An historical survey,” Au-

-
- tomatica, vol. 42, no. 12, pp. 2035–2057, 2006.
- [25] Z. Hu, S. E. Salcudean, and P. D. Loewen, “Robust controller design for teleoperation systems,” in 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century, 1995, vol. 3, pp. 2127–2132.
 - [26] 稲垣: “人と機械の協調における安全と安心 —人間中心の自動化の視点からの考察—,” 日本交通科学協議会誌, Vol. 9, No. 1, pp. 11–20, 2010.
 - [27] 岩崎: LMI と制御. 昭晃堂, 1997.
 - [28] B. Khademanian and K. Hashtrudi-Zaad, “Shared control architectures for haptic training: Performance and coupled stability analysis,” The International Journal of Robotics Research, vol. 30, no. 13, pp. 1627–1642, Mar. 2011.
 - [29] S. Katsura, Y. Matsumoto, and K. Onishi: “Realization of ‘Law of Action and Reaction’ by Multilateral Control,” IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 52, no. 5, pp. 1196–1205, 2005.
 - [30] H. Kazerooni, T.-I. Tsay, and K. Hollerbach, “A controller design framework for telerobotic systems,” IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 1, no. 1, pp. 50–62, Mar. 1993.
 - [31] K. Kim, M. C. Cavusoglu and W. K. Chung: “Quantitative Comparison of Bilateral Teleoperation Systems Using μ -Synthesis”. IEEE Transactions on Robotics, vol.23, no.4, pp.776–789, 2007.
 - [32] K. Kosuge, H. Murayama, and K. Takeo: “Bilateral Feedback Control of Telemanipulators via Computer Network,” Proc. IEEE/RSJ IROS’96, pp.1380–1385, 1996.
 - [33] T. Kosugi and S. Katsura, “Experimental Investigation of Variable Scaled Bilateral Control,” in Proc. of 4th Int. Conf. on Human System Interactions, pp. 250–255, 2011.
 - [34] S. Lee and K. Jeong, “Design of robust time delayed teleoperator control system,” in Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS ’94), 1994, vol. 2, pp. 1413–1420.
 - [35] H.-K. Lee, K. Tanie, and M.-J. Chung, “Design of a robust bilateral controller for teleoperators with modeling uncertainties,” in Proceedings 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems., 1999, vol. 3, pp. 1860–1865.
 - [36] G. M. H. Leung, B. A. Francis and J. Apkarian: “Bilateral Controller for Teleoperators with Time Delay vis μ -Synthesis”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.11, no.1, pp.105–116, 1995.

- [37] R. Lozano, N. Chopra, and M. W. Spong: “Passivation of Force Reflecting Bilateral Teleoperators with Time Varying Delay”, *Proc. 8th Mechatronics Forum (Mechatronics’02)*, pp.954–962, 2002.
- [38] 港隆史, 西尾修一, 小川浩平, and 石黒浩, “携帯型遠隔操作アンドロイド「エルフォイド」の研究開発,” in 第29回日本ロボット学会学術講演会, 2011.
- [39] S. Moghimi, S. Sirouspour, and P. Malysz, “Haptic-enabled Collaborative Training with Generalized Force and Position Mappings,” in *2008 Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2008, pp. 287–294.
- [40] D. Morris, C. Sewell, F. Barbagli, K. Salisbury, N. Blevins, and S. Girod, “Visuo-haptic Simulation of Bone Surgery for Training and Evaluation,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 26, no. 6, pp. 48–57, Nov. 2006.
- [41] G. Niemeyer and J. J. E. Slotine: “Stable Adaptive Teleoperation,” *IEEE J. of Oceanic Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 152–162, 1991.
- [42] G. Niemeyer and J. J. E. Slotine: “Designing Force Reflecting Teleoperators with Large Time Delays to Appear as Virtual Tools,” *Proc. IEEE ICRA’97*, pp.2212–2218, 1997.
- [43] G. Niemeyer and J. J. E. Slotine: “Towards Force-Reflecting Teleoperation Over the Internet,” *Proc. IEEE ICRA’98*, pp.1909–1915, 1998.
- [44] 日本ロボット学会: ロボット工学ハンドブック, コロナ社, 2005.
- [45] 日本ロボット工業会: “世界の産業用ロボット稼働台数,” <http://www.jara.jp/data/dl/kado.pdf>, 2012
- [46] S. S. Nudehi, R. Mukherjee, and M. Ghodoussi: “A Shared-Control Approach to Haptic Interface Design for Minimally Invasive Telesurgical Training,” *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 13, no. 4, pp.588–592, 2005.
- [47] K. Ogawa, S. Nishio, K. Koda, G. Balistreri, T. Watanabe, and H. Ishiguro, “Exploring the natural reaction of young and aged person with telenoid in a real world,” *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, vol. 15, no. 5, pp. 592–597, 2011.
- [48] R. Oboe and P. Fiorini, “A Design and Control Environment for Internet-Based Telerobotics,” *International Journal of Robotics Research*, vol. 17, no. 4, pp. 433–449, 1998.
- [49] J.-H. Ryu and C. Preusche: “Stable Bilateral Control of Teleoperation Under Time-varying Communication Delay: Time Domain Passivity Approach,” *Proc. IEEE ICRA 2007*, pp.3508–3513, 2007.

-
- [50] J.-H. Ryu, J. Artigas, and C. Preusche, “A passive bilateral control scheme for a teleoperator with time-varying communication delay,” *Mechatronics*, vol. 20, no. 7, pp. 812–823, Oct. 2010.
 - [51] 佐伯: “ μ -設計と定数スケーリング行列つき H^∞ 設計の比較”, システム/制御/情報, vol.38, no.3, pp.161–163, 1994.
 - [52] 榊, 館: “インピーダンス制御型マスタ・スレーブシステム (II) —操作感の変更と操作能力の拡張—”, 日本ロボット学会誌, vol.8, no.3, pp.253–264, 1990.
 - [53] A. Sano, H. Fujimoto and M. Tanaka: “Gain-Scheduled Compensation for Time Delay of Bilateral Teleoperation Systems”, *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1916–1923, 1998.
 - [54] A. Sano, H. Fujimoto and T. Takai: “Human-Centered Scaling in Micro-Teleoperation”, *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.380–385, 2001.
 - [55] C. Secchi, S. Stramigioli, and C. Fantuzzi: “Position Drift Compensation in port-Hamiltonian Based Telemanipulation,” *Proc. IEEE/RSJ IROS 2006*, pp.4211–4216, 2006.
 - [56] D. Sekiguchi, M. Inami, and S. Tachi: “RobotPHONE: RUI for Interpersonal Communication,” *CHI 2001*, pp. 277–278, 2001
 - [57] C. Scherer, P. Gahinet and M. Chilali: “Multiobjective Output-Feedback Control via LMI Optimization”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.42, no.7, pp.896–910, 1997.
 - [58] S. Sirouspour: “Modeling and Control of Cooperative Teleoperation Systems,” *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 21, no. 6, pp.1220–1225, 2005.
 - [59] K. Taylor and B. Dalton: “Internet Robots: A New Robotics Niche,” *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 7, No. 1, pp. 27–34, 2000.
 - [60] ヴァンダーポールテン, 横小路: “可変スケールテレオペレーションの為カメラ制御方法の検討”, 第 24 回日本ロボット学会学術講演会, 2K22, 2006.
 - [61] Emmanuel B. Vander Poorten: “Improving Haptic Fidelity For Intuitive Manipulation In Scaled Teleoperation And Virtual Environment”, PhD thesis, Kyoto University, 2007.
 - [62] J. Yan and S. E. Salcudean, “Teleoperation Controller Design Using H_∞ Optimization with Application to Motion-Scaling,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 244–258, 1996.
 - [63] 横小路: “マスタ・スレーブ制御の理論”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.6, pp.794–802, 1993.

- [64] Y. Yokokohji, N. Hosotani, J. Ueda and T. Yoshikawa: “A Micro Teleoperation System for Compensating Scaling Effects Based on Environment Model”, Proceedings of Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, pp.709–716, 1994.
- [65] Y. Yokokohji, T. Imaida, and T. Yoshikawa: “Bilateral Teleoperation under Time-Varying Communication Delay,” *Proc. IEEE/RSJ IROS’99*, pp.1854–1859, 1999.
- [66] Y. Yokokohji, T. Tsujioka, and T. Yoshikawa: “Bilateral Control with Time-Varying Delay including Communication Blackout,” Proc. the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, March 24-25, Orlando, Florida, pp.285- 292, 2002.
- [67] 吉川, 横小路, 細谷, 井村: “環境とオペレータ特性の不確かさを考慮したマスター・スレーブシステムのロバスト制御”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.6, pp.836–845, 1996.