

報告番号	乙第	5570	号
------	----	------	---

人間－機械協調系としての新しい実用 遠隔操作システムの構築に関する研究

～システムの受動性を考慮したテレマニピュレータの
Task-oriented 制御法～

名古屋大学図書	
和	1300074

伊藤 友孝

目次

第1章 序論	4
1.1 はじめに	4
1.2 テレマニピュレーションシステム	5
1.3 実用テレマニピュレーションシステム構築における諸課題と本研究でのアプローチ	14
1.3.1 操作性・臨場感向上問題	15
1.3.2 安定性問題	16
1.3.3 安全性問題	18
1.3.4 その他の最近のトピックス	19
1.3.5 本論文の目的	21
1.4 本論文の構成	23
第2章 受動性 (Passivity) に基づく安定な制御系設計手法	27
2.1 システムの部分安定性と人間-機械系の安定性	28
2.2 受動性に基づくシステムの安定性解析	28
2.2.1 機械システムと電気システムの等価性	28
2.2.2 受動性 (Passivity) の定義	31
2.3 受動性に基づく安定な人間-機械協調システムの設計	33
2.3.1 システムのネットワーク表現	33
2.3.2 テレマニピュレーションシステムの安定性	33
2.4 受動性解析手法	36
2.4.1 リアプノフ関数を用いたシステムのエネルギー解析	37
2.4.2 積分不等式を用いたシステムのエネルギー解析	39
2.4.3 スキャタリング行列 (散乱行列) を用いたシステムのパワー伝達解析	40
2.5 まとめ	42

第3章	仮想ツールダイナミクスを用いたマニピュレータの汎用力制御系の構成	45
3.1	マニピュレータの力制御（従来手法とその問題点）	45
3.2	仮想ツールダイナミクス	48
3.2.1	力制御と座標系	48
3.2.2	仮想ツールダイナミクスとは	49
3.2.3	仮想ツールダイナミクスの特徴とその利点	52
3.2.4	仮想ツールの設計及び設計例	54
3.3	仮想ツールに基づく汎用力制御系の設計	58
3.3.1	制御系の設計手順	58
3.3.2	マニピュレータの汎用力制御系の実現	58
3.4	実験	63
3.5	まとめ	67
第4章	受動性に基づくテレマニピュレータの Task-oriented 制御 ～仮想ツールを用いたシステムの操作性向上～	69
4.1	実用遠隔操作システムの実現を目指して	69
4.2	遠隔操作システムにおけるシステムの理想応答とその問題点	72
4.3	半自律化仮想ツールを用いたテレマニピュレータの Task-oriented 制御	75
4.3.1	Task-oriented 制御とは	76
4.3.2	半自律化仮想ツールに基づくテレマニピュレーションシステムの操作性向上	78
4.4	テレマニピュレータの Task-oriented 制御系の実現	84
4.4.1	テレマニピュレータのダイナミクス	85
4.4.2	Task-oriented 制御系の構成と部分安定性	86
4.4.3	受動性に基づくシステムの安定性解析	88
4.4.4	力と運動のスケーリング（パワースケーリング）問題への拡張	92
4.5	実験	96
4.5.1	実験システム	97
4.5.2	実験1 半自律化仮想ツールを用いた円筒面の倣い作業	101
4.5.3	実験2 仮想環境を用いたスケーリング実験	105
4.5.4	実験3 実環境を用いたスケーリング実験（機械部品の組み付け作業）	108
4.6	まとめ	113

第5章 拡張仮想ツールに基づくテレマニピュレーションシステムの操作性向上	114
5.1 従来のテレマニピュレーションシステムの特徴と問題点	115
5.2 道具の持つ自由度とシステムに内在する冗長性の利用	116
5.3 拡張仮想ツールダイナミクス	120
5.4 拡張仮想ツールのための Task-oriented 制御系の実現	126
5.4.1 Task-oriented 制御系の構成	126
5.4.2 システムの部分安定性	128
5.4.3 システムの受動性	128
5.5 実験	129
5.5.1 実験システム	130
5.5.2 H_∞ 関節分散型制御を用いた油圧式マニピュレータのロバストな特性制御系の構成	130
5.5.3 実験1 拡張仮想ツールを用いた壁面の倣い作業	146
5.5.4 実験2 拡張仮想ツールのインテリジェントなジョイスティックとしての利用例	151
5.6 まとめ	152
第6章 通信遅れを有するスケールドテレマニピュレーションシステムの制御系設計	156
6.1 テレマニピュレーションシステムに存在する通信遅れの影響	157
6.2 スキャタリング変換に基づく無駄時間補償	160
6.3 スケールドテレマニピュレータのための制御系設計	162
6.4 実験	168
6.5 まとめ	176
第7章 結論	178
7.1 本論文のまとめ	178
7.2 今後の課題	180

第1章 序論

本研究は、テレマニピュレーションシステムに代表される遠隔操作システムの特徴を見直し、従来とは異なる観点から新しい実用遠隔操作システムを構築する一手法を提案するものである。本章では、本研究を行うに至った一般的背景と本研究の意義について説明する。まず最初に、本論文で議論していくテレマニピュレーションシステムの概要について説明する。次に、本研究の立場と意義を明確にするため、実用テレマニピュレーションシステムを構築する上でのいくつかの重要な課題について解説し、従来適用されてきた手法と比較しながら、これらの課題に対する本研究でのアプローチを紹介する。最後に、本論文の議論の流れを理解しやすくするため、論文の章構成について説明する。

1.1 はじめに

近年のロボット技術の急速な進歩により、多くの産業用ロボットが市場に投入され工場の生産ライン自動化等に大きな役割を果たしてきた。これらの産業用ロボットは、繰り返し精度が高く、均一で高速な動作が可能のため、従来人間が行っていたような単調な組み立て作業や溶接作業、重量物のハンドリングなど、多くの作業がロボットに置き換えられ、生産ラインの省力化と効率化が飛躍的に進められる結果となった。最近では計算機の低コスト化やネットワーク技術、情報管理技術等の進歩にともなって、ライン上の情報を統合し、より柔軟で多様性のある生産・管理システムを構築していこうとする動きが高まっている。しかし、現在実用化されているほとんどの産業用ロボットマニピュレータでは、位置制御系もしくは簡単な力制御系を用いてサーボ系が構成されており、制御方式も従来からのティーチングプレイバック方式が未だ主流となっている。そのため、現状のシステムでは多様な作業に対応できず、作業に応じて特殊なロボットを用意しなければならない。このことが現在の産業用ロボットを汎用性の低いものとしてきたのである。今後の工業製品に対する需要の多様化と更なる低コスト化に対応するためには、同一作業の繰り返しだけでなく、汎用的に様々な作業を行える必要が出てくる。このような汎用口

ボットシステムの構築によって、今後、ロボットの有用性が益々高まっていくであろう。

一方、これらの産業分野でのロボットの活躍とは裏腹に、その他の分野では一部の特殊な作業に応用されているのみで、総合的に見てロボットの実用化が成功したとは言いがたい。工場での使用例からも容易に想像できるように、ロボットの実用化の歴史は、人間とロボットとを隔離することから始まったと言っても過言ではない。しかし、これらはロボットの実用化のほんの一つの方向性でしかない。子供の頃、だれもがSF小説や漫画を読みふけり未来のロボットの活躍に思いを馳せたように、ロボットと人間とが共存する世界にこそ、新たなロボットの価値や在り方を見出すことができるのではないだろうか？ 近年、人間-機械協調システムやヒューマンインターフェースとしてのロボットシステム等が見直され始め、ロボットの次なる実用化の可能性を模索する動きが高まっており、人間共存型ロボットに関する大型プロジェクトも進行しつつある。本田技研工業（株）の自立歩行ロボット（P1～P3）をきっかけにヒューマノイド型のロボットも注目されてきている昨今、ロボットがより身近な所で活躍するようになる日もそう遠くはないであろう。

本研究では、人間-機械協調システムやヒューマンインターフェースとして、ネットワークロボティクスの分野でも応用が期待されているテレマニピュレーションシステムを研究対象とする。そして、人間と道具との関係をヒントに、ロボット援用作業における人間とロボットの協調関係について議論し、操作性・安定性・安全性を兼ね備えた実用性の高い遠隔操作システムを構築するための足がかりとすることを目標とする。また、実用テレマニピュレーションシステムのための制御系構築の一環として、マニピュレータの力制御系の設計問題についても議論し、多様な作業に対応可能な汎用力制御器の一構成手法を提案する。

1.2 テレマニピュレーションシステム

本節では、人間とロボットとの協調作業システムやヒューマンインターフェースとしても新たにその価値が見直され、今後、応用分野がますます拡大していくであろうテレマニピュレーションシステムの概要について解説する。

近年の科学技術の進歩にともない、人間は宇宙や海底など今まで近づくことができなかったような危険な環境へと進出し始めた。また、地上においても、原子力発電所内での作業など人間が直接行えないような作業が増加してきた。これらの中には、危険な未知環境で行わなければならない非定常な作業も多く、安全に作業を行える

手段が必要とされる。こうした状況下、いわゆる極限作業用ロボットの概念が生まれ、これまで様々なタイプのロボットが研究・開発されてきた。これらの遠隔・極限作業に対する主要なアプローチとしては、大きく分けて、人間が離れた場所からロボットを操作し間接的に作業を行わせる『遠隔操作型』のものと、ロボット自身に自律的に作業を行わせる『自律型知能ロボット』とが挙げられる。後者の自律型知能ロボットは、一部の定常作業を除いては適用するのが難しいため、前者の遠隔操作型のロボットが多く用いられてきた。最近では、遠隔操作システムの適用分野はこれらの極限作業に留まらずその応用は多岐にわたっており、マイクロ分野の技術の進歩によって遠隔医療やマイクロマニファクチャリング等、異スケール間での作業への応用も期待されている。また、ロボットと人間との間のインターフェースとしての役割も見直されてきており、福祉やアミューズメント等、新たな応用の可能性も模索され始めている。近年のロボットの知能化技術の発展は目覚ましく、遠隔操作技術と自律型知能ロボット技術とを融合しそれらの利点を生かすことで、人間の能力を拡大するための新しい統合システムとして、今後、さらに研究・開発の厚みが増していくであろう。

遠隔操作システムには、ジョイスティック型のものやマニピュレータ型のものなど、その用途や作業目的に応じて様々な形態が考えられる。本論文では、人間の多様な動作を伝達可能なマスタースレーブマニピュレータ型の遠隔操作システムの制御問題について取り扱っていく。良く知られているように、マスタースレーブマニピュレータは図 1.1 に示すような 2 本のマニピュレータから構成されている。オペレータはマスターマニピュレータを操作し、作業の指令を与えることで、スレーブマニピュレータに遠隔で作業を行わせることができる。このようなマニピュレータを介した作業はオペレータが直接作業を行っている時の形態に最も近く、ジョイスティックやスイッチを指令源とするシステムに比べて直感的に作業を行え、自然な操作感を得られるといった利点がある。マスタースレーブマニピュレータの研究・開発は、第二次世界大戦後の原子力の利用とともに本格的に進められるようになった。マスタースレーブマニピュレータは、その結合のされ方によって大きく二種類に分類できる。一つは、マスターマニピュレータとスレーブマニピュレータとが機械的に結合されたものであり、もう一つはそれらが電氣的に結合されたものである。最初の実用マスタースレーブマニピュレータは、1948 年にアルゴンヌ国立研究所 (ANL) の Goertz 博士らの手によって開発された、マジックハンドとも呼ばれる機械式のマスタースレーブマニピュレータ ANL-M1 である [1][2]。当初は、マスタースレーブ間の運動が構造的に結合され、機械的にマスタースレーブ系が構成されていた。し

かし、作業範囲の狭さや設置場所の制限などの理由から、マスタースレーブ間を電氣的に結合した電気式のマスタースレーブマニピュレータへと研究対象が変化していった。ANLでは、1954年に電気式のマスタースレーブマニピュレータ第一号機ANL-E1を試作している^[3]。その後の1958年には、General Electric社により、人間の手の持つ機能をより忠実に再現しマスタースレーブマニピュレータの実用性を向上させることを目的として、Handymanと呼ばれる電気式のマスタースレーブマニピュレータが開発された。(Handymanは指関節をも有する多自由度の電気油圧式マニピュレータであった。)電気式のマスタースレーブマニピュレータは、スレーブマニピュレータの運動がマスターマニピュレータの運動に応じて計算機制御されるのが特徴である。このような電気式マスタースレーブシステムは、設置場所による制限も少なく異構造のマニピュレータに対しても適用可能なため、図1.2のようにマスタースレーブマニピュレータの作業形態の自由度が大幅に増加することとなり、以後の研究開発の主流となっていった。そして、近年のコンピュータ技術やセンシング技術、アクチュエーション技術などの要素技術の急速な進歩が、遠隔操作システムの更なる発展に繋がったことは良く知られた事実である。例えば、1980年代には、NASAのスペースシャトル用マニピュレータが開発されたのをはじめ、A.K.Bejczyら^[72]の宇宙用テレオペレーションシステムやG.Hirtingerら^[73]のROTEXなど宇宙での応用を目的とする遠隔操作システムの研究開発が活性化し、現在では遠隔操作システムは宇宙や水中など様々な分野に応用されている。1997年に実施されたMars Pathfinderによる火星の遠隔探査実験は記憶に新しい。我が国でも1983年から1990年にかけて通産省工業技術院の大型プロジェクトが実施され、大規模な研究開発が行われた。この「極限作業用ロボット」プロジェクトでは約155億円という研究開発費が投じられ、極限作業用ロボット＝人間の近寄ることのできない環境で作業を代行するロボット」の研究が進められた。図1.6及び図1.7に本プロジェクトで開発された実証機の概観を示す。これらの実証機によって移動システムや視覚システム、遠隔操作技術などの重要な要素基盤技術が得られている。また、近年のマイクロ分野や医療分野の技術の発展やネットワーク技術の進歩に伴い、遠隔システムの遠隔医療などへの新たな応用も検討されており、福田・富永らのカテーテル操作シミュレータの遠隔操作実験(1995)や光石・橋詰らのマイクロサージェリシステムの遠隔操作実験(1997)など各種の実証試験も行われている。最近では、Rキューブ(Realtime Remote Robotics)や人間共存型ロボットに関するプロジェクトなどが話題となっており、ロボット技術・遠隔操作技術の更なる発展が期待される。

今日のマスタースレーブマニピュレータを始めとする遠隔操作システムの発展は

ハードウェアの開発と並行して行われてきた制御方式の研究開発によるところも大きい。中でもその後の発展に最も大きく貢献したのが「バイラテラルフィードバック技術」の登場であった。従来の方式と異なり、電気式サーボ機構はマスタースレーブ間の情報を相互に（バイラテラルに）伝達することを可能にし、マスタースレーブマニピュレータの操作感を著しく向上させた。図 1.3～図 1.5 に示すように、バイラテラルサーボ系の古典制御方式は以下の 3 基本型に分類される。

- 対称型：位置調整器をベースとする制御方式で、マスターとスレーブの位置情報を検出して相互に位置偏差を補償する方式である。外部から負荷トルクが加わることにより位置偏差が増加し、それによって力情報が伝達される。
- 力逆送型：スレーブ側に通常の位置サーボ系を構成した状態で、スレーブ側の負荷トルクを検出し、比例的もしくは簡単な関数関係を保ってマスター側に伝達する方式で、位置サーボ系とトルク伝達器を組み合わせたものである。
- 力帰還型：力逆送型と同様にスレーブ側は通常の位置サーボ系であるが、マスターとスレーブの各々のトルクを検出し、マスター側にトルク偏差の補償器を付加したもので、マスター側の力サーボ系とスレーブ側の位置サーボ系を組み合わせた方式である。

バイラテラルフィードバックサーボ機能は始め Goertz ら^[3]によって実現され、富成ら^{[4][5]}や野本ら^[6]、藤井ら^[7]、江尻ら^[8]など多くの研究者によって理論解析が盛んに行われた。富成らは、信号伝達線図を用いて双動型バイラテラルサーボ機構の解析を行っている^{[4][5]}。野本等や藤井らは、四端子網表現（マトリクス表現）を用いて、バイラテラルサーボ系の力の伝達特性や系の安定性に関する解析を行い、バイラテラルフィードバック系の特性を整理している。注目すべきことは、この時期すでに人間や環境の特性を考慮してシステムを設計することの必要性を指摘している論文が存在する点である。江尻ら^[8]は上述の定義のようにバイラテラルサーボ系を分類し、マスタースレーブ系の特性解析を行い、電気式マスタースレーブマニピュレータに関する重要な知見を示している。また、福田ら^[9]は現代制御理論の観点からバイラテラルサーボ系を整理し直し、状態空間での一般表現を導出してバイラテラルサーボ系の特性に対する統一的理解をまとめている。近年になって理想的なバイラテラルフィードバック系の実現を目指して様々なアプローチがなされているが、本研究の意義と立場を理解する上で重要であるため、これについては後節で記述することにする。

本研究は、マスタースレーブシステムに代表される遠隔操作システムの特性を見直し、従来とは異なる観点から新しい実用遠隔操作システムを構築する手法を提案するものである。理想応答の概念が象徴しているように、従来のマスタースレーブマニピュレータは、作業環境や対象物の特性をオペレータに正確に伝達するための媒介でしかなかった。そのため、マスタースレーブ系の特性を打ち消して、オペレータがあたかも直接に対象物を操っている感覚を実現することが最大の目標であった。また、マスタースレーブという名称からも分かるように、マスターマニピュレータとスレーブマニピュレータが同一の応答を示し、あたかも一つのマニピュレータのような特性を持つように制御するのが、暗黙の常識となってきた。本研究では、人間との協調作業システムとしての遠隔操作システムの特性を見直し、マスタースレーブ系の特性を総合的なものとして捉えることで、より柔軟で実用的な遠隔操作システムを構築していくことを目的としている^(注1)。『マスタースレーブマニピュレータ』という言葉には従来のマスタースレーブ系のイメージが強いため、以上のような理由から、本論文では、テレオペレーション技術とマニピュレータ制御技術を融合したマニピュレータ型の遠隔操作システムを総称して『テレマニピュレーションシステム』と呼ぶことにし、テレマニピュレーションシステムの新しい可能性について検討する。次節では、実用テレマニピュレーションシステムを構築する上での具体的な課題について解説し、本研究でのアプローチを紹介していく。

¹ 本論文では、まず最初に第4章において前者の理想応答の問題点について議論し、仮想ツールダイナミクス概念を用いた新しいマスタースレーブ系の構成法を提案する。そして、第5章において、仮想ツールの概念を拡張する形で後者の柔軟なマスタースレーブ系の特性設計問題に対してアプローチしていく。

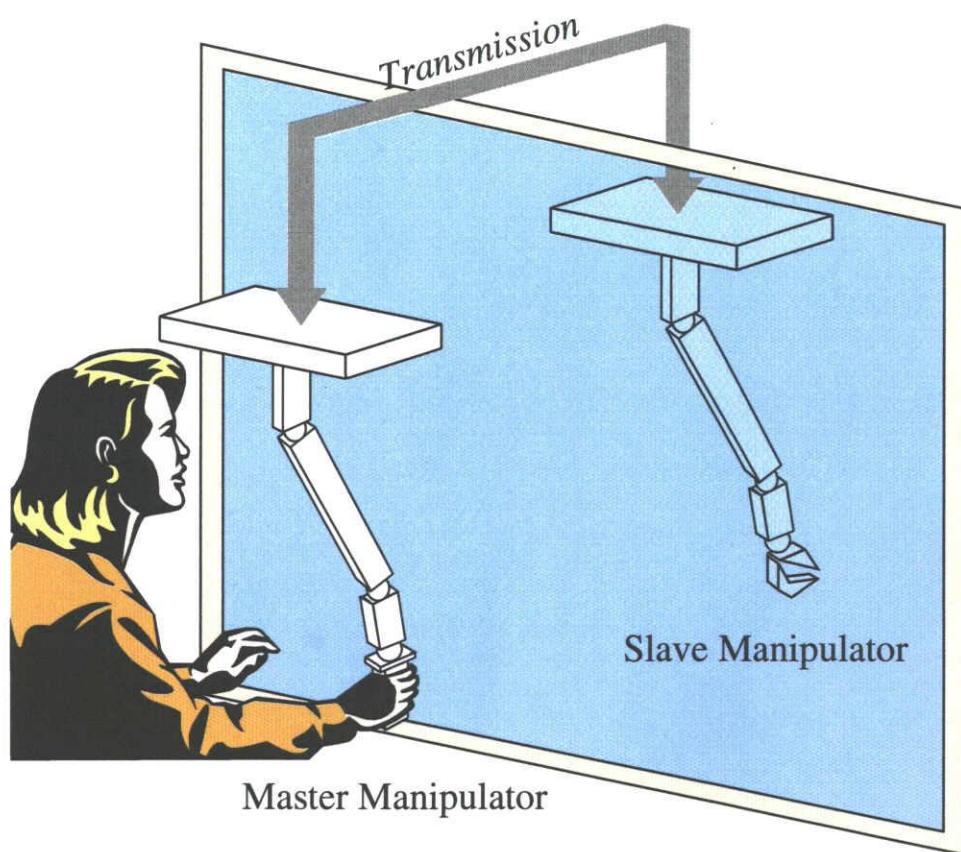


図 1.1: テレマニピュレータ（マスタースレイブマニピュレータ）の概念図

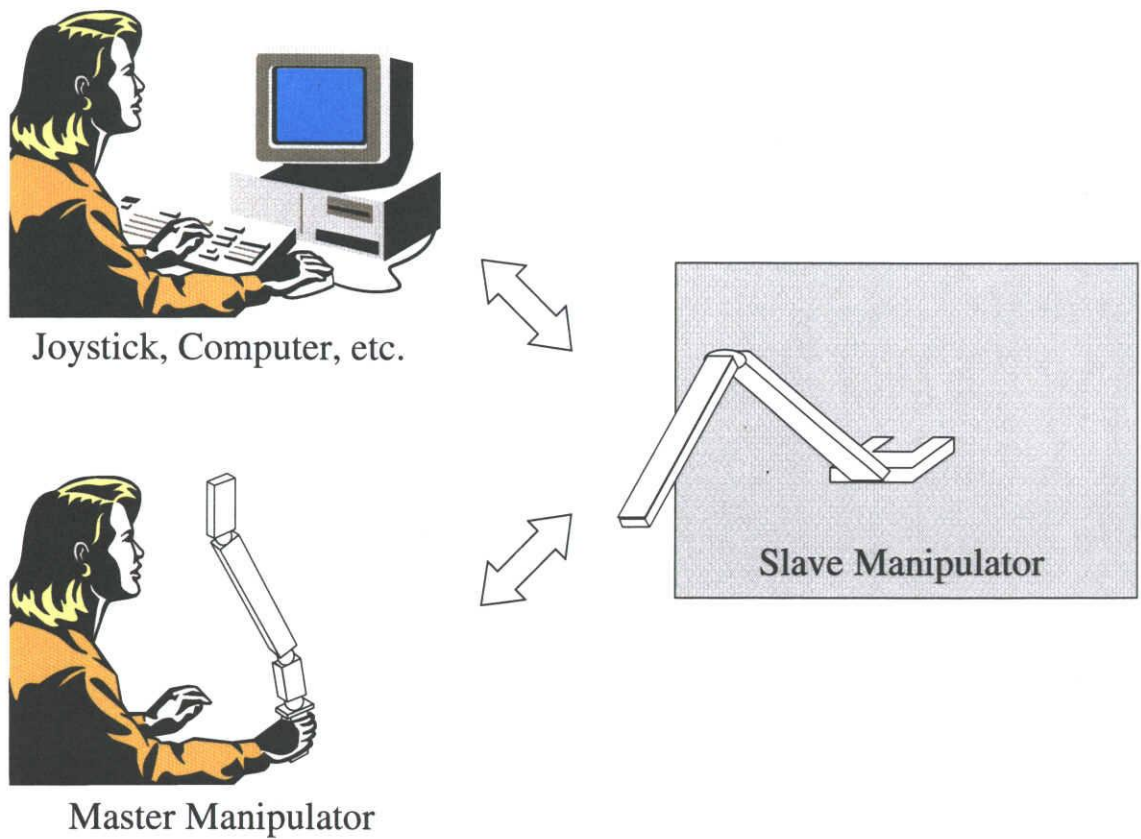


図 1.2: 電気式テレマニピュレータの作業形態

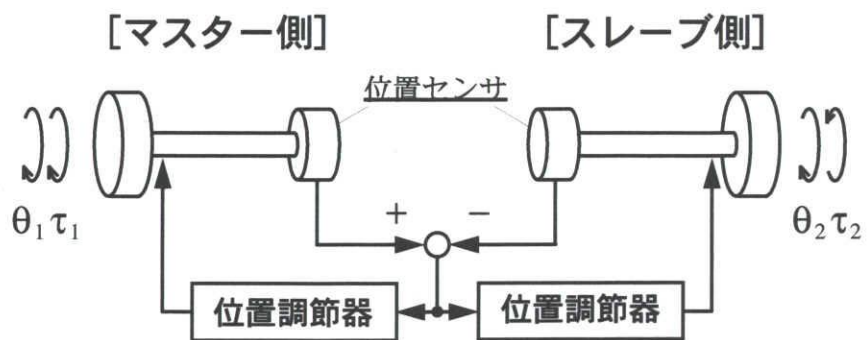


図 1.3: 対称型バイラテラルサーボ系

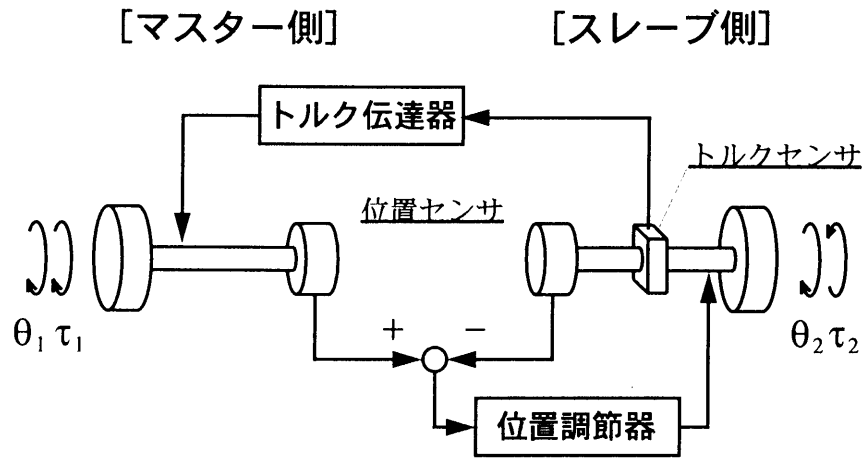


図 1.4: 力逆送型バイラテラルサーボ系

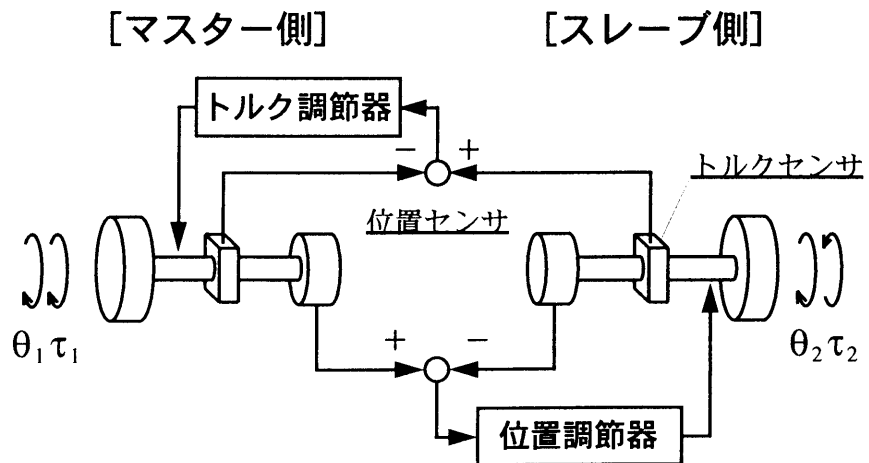


図 1.5: 力帰還型バイラテラルサーボ系



図 1.6: 「極限作業用ロボット」原子力ロボット実証機



図 1.7: 「極限作業用ロボット」海洋ロボット実証機

1.3 実用テレマニピュレーションシステム構築における諸課題と本研究でのアプローチ

実用的な遠隔操作システムを構築するためには、どのような観点からその特性を考え設計を行えば良いのであろうか？ ここでは、本研究の立場と意義を明確にするために、従来のアプローチの問題点について指摘しながら、テレマニピュレーションシステム設計時に考慮しなければならない、いくつかの重要な課題についてまとめる。

ロボットマニピュレータを介して間接的に作業を行うことを前提としたテレマニピュレーションシステムでは、これまで工場などで使用されてきた産業用ロボット単体での繰り返し作業とは異なり、人間に与える負担や作業効率、安全性など様々な問題に対して特別の注意を払わなければならない。すなわち、人間と機械との干渉を考慮して、システムの特性を総合的に捉えて設計を行っていかなければならない。このような人間-機械協調作業システムにおいては、図1.8に示すような、システムの操作性問題・安定性問題・安全性問題が設計を考える上での大きな柱となってくる。本論文では、これらの3つのキーワードを軸に実用的なテレマニピュレーションシステムの構築を目指す。以下、テレマニピュレーションシステムにおけるこれらの諸問題について考察し、我々の構築目標とするテレマニピュレーションシステムについて解説する。

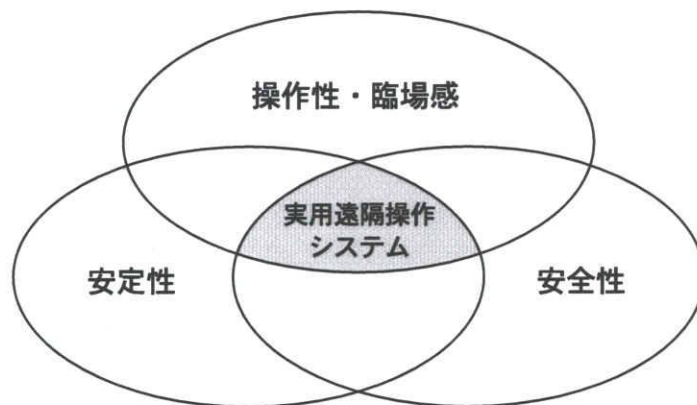


図 1.8: 実用遠隔操作システムの構築

1.3.1 操作性・臨場感向上問題

テレマニピュレーションシステム等の人間-機械系協調システムは、自律型ロボットシステムと異なり、人間（オペレータ）が与える直接指令に基づいて制御されるため、より複雑で非定常な作業を行うことができるという利点がある。このようなシステムでは、オペレータは作業を統括する指令塔の役割を果たすため、オペレータには非定常な作業を正確にかつ安全に遂行する能力が要求される。そのため、操作には熟練を要し、オペレータには相応の訓練期間が必要とされてきた。特にオペレータと作業環境とが離れた場所に存在するテレマニピュレーションシステムでは、作業時のオペレータの負担は、人間自身が直接作業を行うのに比べて非常に大きいものになってしまう。そのため、システムの操作性を向上し、如何にしてオペレータの負担を軽減するかが重要な課題となる。また、操作性と同じく実用システム構築の鍵を握るのが作業の臨場感向上問題である（図 1.9）。テレマニピュレーションシステムでは、スレーブ側の作業情報が適切な形でオペレータに提示されなければ、オペレータにとっては暗闇の中で手探りで作業しているのに等しい。オペレータに如何に上手く環境側の状況を認識させ、如何にマニピュレータと一体感を持って作業を行わせるかが、操作性向上問題とともにシステム構築時の最重要課題の一つとして挙げられる。

これらの問題点を解決するため、これまで様々な制御手法が提案されてきた。中でも一般的に良く知られているのが、バイラテラルフィードバックと呼ばれるマスタースレーブ間での双方向情報伝達技術である。バイラテラルフィードバック制御では、スレーブマニピュレータはオペレータによって操作されるマスターマニピュレータの運動に追従するように制御される。また、マスターマニピュレータは、スレーブマニピュレータが環境から受ける反力をオペレータに対してフィードバックするように制御される。このような双方向情報伝達技術を用いると、オペレータはリモートサイトの作業情報を得ながら指令を与えることができるため、作業の臨場感を向上させることができる。しかし、理想的なバイラテラルフィードバック系の構成は難しく、より高性能なバイラテラルフィードバック系の実現を目指して、多くの研究が行われてきた。例えば、小菅ら^{[10][12][13]}は仮想内部モデル追従制御系により、仕事に適した特性をマスターとスレーブの間に仮想内部モデルとして持たせてインピーダンス制御系を構成し、システムの操作感・安定性を向上する方法を提案した。JPL^[22]では、マスターとスレーブの間にインピーダンス特性を持たせることにより、システムの安定性を向上させる方法 (Shared Compliant Control) が提案された。また、館ら^[23]は、マスタースレーブ制御系の分類を行い、作業に臨場

感を持たせるために、インピーダンス制御型マスタースレーブマニピュレーションシステムを提案した。また、横小路ら^[25]は、マスタースレーブ系の理想応答を定義し、介在インピーダンスモデルを用いて理想的なバイラテラルフィードバック制御系の構成を目指した。

これまでの多くの研究では、『オペレータがテレマニピュレータを介さずにあたかも直接に作業を行っているような感覚』を実現することをバイラテラルフィードバック系の理想と考え、これを『理想応答』と定義して、その実現を目指してきた。しかし、実際には、オペレータと環境との間にはマニピュレータの実ダイナミクスなどが存在するため、例えば制御ゲインを無限大にするなどして、これらの特性を完全に打ち消さなければならない。完全な理想応答の実現が困難であることは明らかである。また、たとえ理想応答が実現されたとしても、オペレータの負担は低減されず、作業の成否は結局オペレータの腕にかかってきてしまう。そこで、本研究では、理想応答を追求するかわりに、逆にマニピュレータの持つダイナミクスを作業に生かすことで、オペレータの負担を軽減することを考える。そして、人間と道具との関わり合いをヒントに、人間と道具との間にあるような理想的な関係をテレマニピュレーションシステムで実現し、従来とは異なる観点から新しい遠隔操作システムを構成することで、システムの操作性向上と臨場感向上問題に対する解決法を提案する。

また、従来のテレマニピュレーションシステムでは、マスターマニピュレータとスレーブマニピュレータの特性を一致させ、外部から見たときにそれらがあたかも一つのマニピュレータであるように見せかけることが、システム構築時の暗黙の前提とされてきた。しかし、テレマニピュレーションシステムでは、オペレータと作業環境の間に二つのマニピュレータが存在している。テレマニピュレータを人間とロボットとの協調作業システムとみなし、これらの二つのマニピュレータの特性を総合的に捉えていくことで、より柔軟な遠隔操作システムを構築していくことができるのではないだろうか？ 本論文では、このような観点から新しい遠隔操作システムを構築する可能性についても議論し、操作性や作業性を向上させるための手法を提案する。

1.3.2 安定性問題

制御工学やロボット工学において、システム全体が安定になるように制御系を構成することは、制御目標の達成と同時に必ず議論される重要な問題である。制御系の安定性問題は古くから取り扱われ、ナイキストの方法やリアプノフの直接法など、

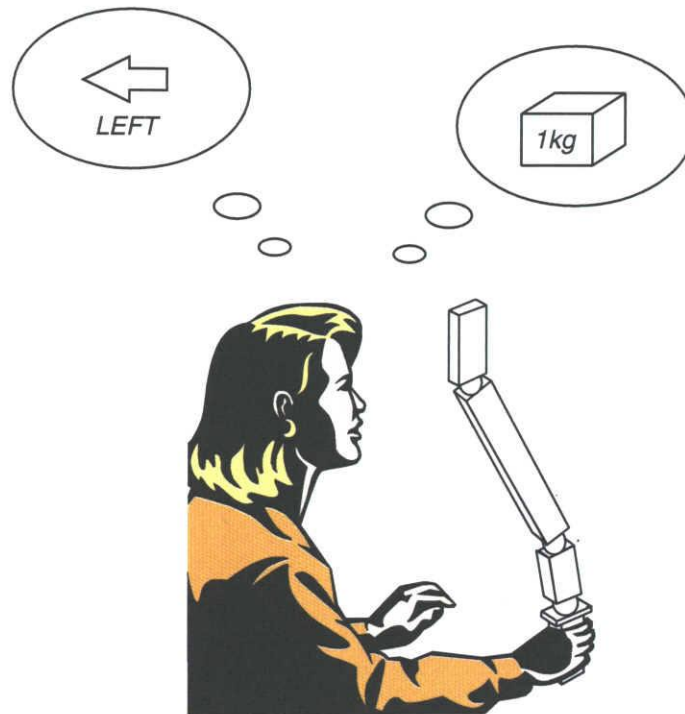


図 1.9: テレマニピュレータの臨場感向上問題

現在まで多くの有用なツールが提案され、様々な制御問題の安定性解析に使用されてきている。テレマニピュレーションシステムの制御系設計においても安定性問題は非常に重要である。しかし、テレマニピュレータのような人間-機械協調型のシステムは、他のシステムとは異なる解析困難な特徴を持っている。それは、人間-機械協調システムの特徴の中には、人間や環境という定量的に解析することが困難なダイナミクスが含まれる点である。特に、人間の特性は非線形で作業状況によっても変化し、しかも、これらの特性は閉ループ系を構成する形でシステム中に挿入されるのである。従来より多くの研究者によってテレマニピュレータの安定性解析が行われてきたが、これまで議論されてきた安定性解析は、そのほとんどが系としてマニピュレータのみを考えた、システムの部分安定性や誤差の収束性に関するものであった。しかし、実際の作業時には人間や環境によってマニピュレータが拘束されるため、部分安定性を保証しただけの従来の制御系では、作業時に不安定で振動的な挙動が現れるなど重大な問題が生じることがあった。

これらの安定性問題に対して、Hannafordら^[27]はオペレータと環境の特性を考慮してシステム全体のループゲインについて考察し、マスタースレーブ系の安定性

を解析した。また、宮崎ら^[29]らなど他の研究者によっても、オペレータや環境の特性に基づいて、例えばリアプノフの直接法などを用いて安定性の解析が行われた。しかし、これらの解析は、オペレータや環境のゲイン特性を仮定したり、それらのダイナミクスを簡単なバネ特性やインピーダンス特性として仮定したりした上で成り立っていた。現実には、オペレータや環境の特性は一般的には非線形で完全な特性の同定は難しく、すべての異なる環境やオペレータに対して安定性を議論することは不可能である。また、オペレータの特性は作業状況によっても変化していくため、これらの解析では安定性の保証が不十分であった。

近年になって、人間-機械系の安定性解析には受動性に基づく手法が有効であることがわかってきた。Rajuら^[30]は、マスタースレーブ系の特性行列であるインピーダンス行列から安定性を解析し、インピーダンス行列が正実となるように制御系を構成することが、システム全体の安定性の十分条件となることを示した。(このインピーダンス行列の正実性は、受動性の概念と深いつながりがある。)また、Andersonら^{[31][32]}やColgateら^[33]はシステムの特性を受動性の観点から議論し、受動性に基づく安定性解析の有効性について報告した。受動性に基づく手法は、テレマニピュレーションシステム等の人間-機械協調システムのための新しい安定性解析手法として、近年注目されてきている。本研究では、テレマニピュレータの特性が受動性の必要十分条件を満たすように運動制御系を構成することで、オペレータや環境の特性によらず安定に作業を行なえる実用テレマニピュレーションシステムを構築することを目指す。

1.3.3 安全性問題

前述のように、これまで実用化されてきたロボットのほとんどは、一部の特殊な用途を除いて人間と隔離して配置されてきた。実際、機械部品や電子製品などの自動化工場では、人体に危害が加わらないように、ロボットの作業範囲に人間が侵入できないような配慮がなされてきた。しかし、このようなロボットの使用法はロボット応用のひとつの側面にすぎない。今後の更なる発展を目指すためには、ロボットはこれまでのような閉じた空間だけでなく、広く社会に進出して行く必要があるものと考えられる。最近になって、ロボットと人間との関係の在り方が見直され、ヒューマノイドや医療・福祉ロボットなど、人間とロボットが互いに干渉することを考慮した人間共存型ロボットへの応用が着目され始めている。このような人間とロボットが同一空間に存在するような状況では、従来と異なる観点から安全性問題を見つ

め直す必要があり、現在、新しい安全性の基準が模索されている。

一般に、ロボットの安全設計については、次に示すような二つの観点から議論していく必要がある。

- ハードウェアから見たロボットの安全設計

ロボットと人間とが同一空間内に存在して作業などを行う場合には、突発的に人間とロボットの接触が生じる危険性を有している。このようなシステムでは、万が一の場合にも、人とロボットが安全に接触できるような『柔らかい』ロボットの設計を行うなど、ハードウェア面での安全対策が必要となってくるであろう。

- ソフトウェアから見たロボットの安全設計

人間共存型ロボットの設計にあたっては、ハードウェア技術と同様、ソフトウェア面での安全設計も非常に重要である。センサ等の情報を利用して積極的に人間をセンシングし、意図しない接触を回避したりする必要があるのと同時に、人間側の意志と異なる動作をすることのないように制御系を構成することが重要である。

本研究では、テレマニピュレータに対して作業に適した特性を持たせ、半自律化を行うことで、積極的にオペレータの作業支援を行うことを目指している。遠隔作業システムとしてのテレマニピュレータの性質を考慮すると、安全に作業を遂行するためには、非常時においてもシステムがオペレータの意図通りに動作することが重要である。本論文で提案する Task-oriented 制御では、人間と受動的な道具との間に存在するような関係に着目し、人間主体の道具としてソフトウェアの面からテレマニピュレーションシステムの安全設計を行う。また、従来のように人間とシステムの自律特性とが競合し互いに外乱となるような半自律化ではなく^(注2)、安全性を考慮した新しい半自律化の前提を設けることで、安全・確実に作業を行える実用テレマニピュレーションシステムの構築を目指す。

1.3.4 その他の最近のトピックス

近年のロボット技術の発展は目覚ましく、テレマニピュレーションシステムは、様々な分野に応用されようとしている。ここでは、上記のような課題の他に、本

² システムの安全設計への教訓として、近年の名古屋空港における中華航空機の事故は記憶に新しい。この事故は、不完全な半自律化によって制御装置の補助機能がパイロットの操縦より優先されてしまったことにより引き起こされた。事故後、航空機における自律化の安全設計の基準が見直されることとなった。

論文で取り扱う最近の応用面での技術課題について説明しておく。

マクロ・マイクロマニピュレーションへの応用

医療技術やマイクロ技術の進歩に伴い、マスターとスレーブでスケールの異なる新しいテレマニピュレーションシステムを遠隔医療やマイクロマシンの組み立て等に应用しようとする動きが高まっている。これらは、マクロ・マイクロマニピュレーションシステム、もしくはスケールドテレマニピュレーションシステムと呼ばれ、遠隔操作システムにおける近年の重要な研究領域の一つとなっている。図 1.10 にマクロ・マイクロマニピュレーションの一例としてテレサージェリの作業概念図を示す。オペレータは図のようにモニタディスプレイ等により遠隔環境側の情報を監視しながら作業を行う。マクロ・マイクロシステムではマスタースレーブ間の物理的スケールが異なるため、通常の1対1のマスタースレーブ系を構成したのでは作業が上手く遂行できない。そのため、遠隔環境での動作（力や運動の応答）を、オペレータにとって操作しやすいように自由にスケーリングする技術が必要となる。しかし、一般には、マスタースレーブ系に対して自由な応答のスケーリングを行おうとすると、システムの安定性が阻害されてしまうことが知られており、システムの安定性を保ちながら、実用的なマクロマイクロシステムを実現することが近年の課題となってきた。本研究では、スレーブ側に分割できる形でスケーリング制御則を構成し、環境の受動的な応答を害することなく、システムの伝達エネルギーが有界となるような安定なスケールドテレマニピュレーションシステムを構築していく。

ネットワークロボティクス（通信遅れ問題）

近年の通信技術やネットワーク技術の進歩により、ロボット技術とネットワーク技術を統合したネットワークロボティクスが注目を集めており、医療、福祉、コミュニケーション、ヒューマンインターフェースなど様々な分野への応用が期待されている（図 1.11）。ネットワークロボティクスの概念により、これまで単純な情報伝送の手段でしかなかったネットワークに対して、新たな付加価値を与えることになり、人間と機械とのインターフェースとしての遠隔操作技術や VR 技術はネットワークロボティクスにおいて中心的な役割を果たすであろうことが予想される。しかし、ネットワークを介して伝達される情報は、伝達距離やネットワークの性能等に依じた時間遅れを含んでいる。そのため、相互に通信を行う必要のあるテレマニピュレーションシステムでは、閉ループを構成する形で無駄時間がシステムに挿入

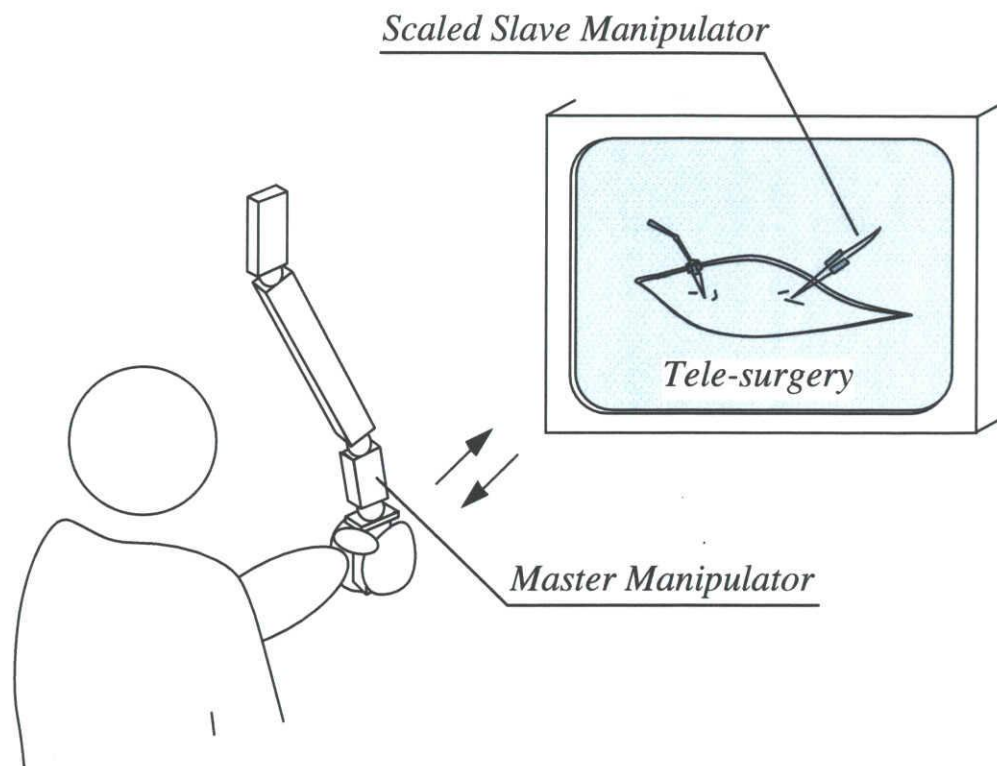


図 1.10: マクロマイクロマニピュレーションシステム

されてしまうことになる。一般に、このような無駄時間は閉ループ系の安定性を悪化させることが知られており、システムの通信遅れが無視できない場合には遅れの分を考慮した制御系設計が必要となる。地球-宇宙間など通信遅れの大きい場合には、例えばスーパーバイザリー制御（管理制御）などの手法が提案されているが、本研究では作業のリアルタイム性や臨場感を重視し、近年提案されたスキッタリング変換の手法を用いることにより通信部の遅れを補償し、安定なパワースケーリング手法と融合することで、通信遅れのある場合でも安定にパワースケーリングの行えるテレマニピュレーションシステムを構築していく。

1.3.5 本論文の目的

本研究は、テレマニピュレーションシステムにおける上記のような重要な要素・課題をふまえながら新しい遠隔操作システムの一つの在り方を提案するものである。最後に、本研究の目的と提案内容についてまとめておく。

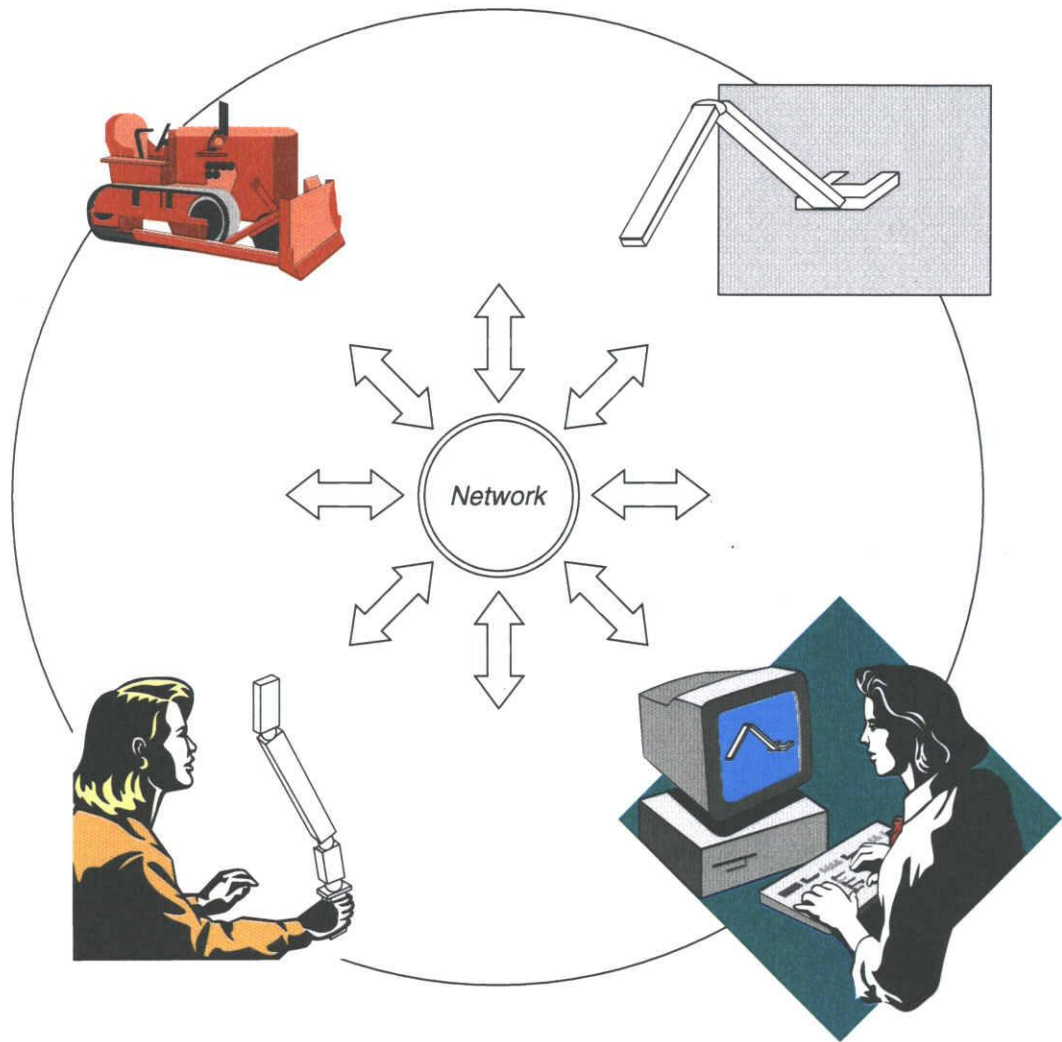


図 1.11: ネットワークロボティクス

- 仮想ツールダイナミクスに基づくマニピュレータの汎用力制御系の提案
- 人間と道具の理想的な関係に基づくテレマニピュレータの Task-oriented 制御系の提案（仮想ツール特性を用いたテレマニピュレータの操作性向上）
- 受動性に基づく安定なスケールドテレマニピュレーションシステムの構成法の提案
- 拡張仮想ツールダイナミクスに基づく新しいマスタースレーブ系の特性設計手法の提案

- 通信遅れを有する場合の安定なスケールドテレマニピュレーションシステムの構成手法の提案

1.4 本論文の構成

本論文は、全7章から構成される。本論文の構成を、図1.12に示す。本論文では、第2章及び第3章にて論文全体を通して使用される重要な二つの概念である『システムの受動性』と『仮想ツール特性』について説明する。その後、第4～6章において、実用テレマニピュレーションシステムの構成手法について順に解説し統合していく。以下、各章の内容について簡単に解説する。

第1章では、テレマニピュレーションシステムの概要について説明し、実用遠隔操作システムを構築する上で重要となる諸課題について解説を行った。また、従来の制御法と比較しながら、提案するテレマニピュレーションシステムでのアプローチについて紹介し、本研究の立場と目的を説明した。

第2章では、テレマニピュレーションシステムの安定性問題について議論する。テレマニピュレーションシステムはオペレータや作業環境の特性をループの形で含むため、従来のようなシステムの部分安定性の概念のみでは、作業時の系の安定性を十分に保証できない。この章では、人間や環境といった非線形システムを含む系の安定性解析に有効であることが分かってきた『受動性』の概念について説明する。そして、テレマニピュレーションシステムのような人間-機械系への適用法について説明する。また、システムの受動性解析に必要ないくつかのツールについて紹介・解説を行う。

第3章では、マニピュレータの汎用力制御器の構成手法について議論する。テレマニピュレータのように人間や環境との干渉を伴うシステムでは、作業に応じて柔軟な設計が可能な汎用力制御手法が必須である。この章では、力制御における座標系の役割について議論し、「仮想ツールダイナミクス」の概念により、作業に適した力制御系を陽に構成する手法について提案する。そして、仮想ツールに基づいたマニピュレータの力制御系の設計法について説明する。最後に、仮想ツールに基づく力制御系設計の有効性を、倣い作業の実験により確認する。

第4章では、仮想ツール特性に基づく実用テレマニピュレータの構成手法について議論する。まず最初に、従来の目標であったマスタースレーブ系の理想応答の問題点を指摘し、仮想ツール特性を利用して人間と道具のような理想的な関係の構築を目指す Task-oriented 制御系の設計方針について説明する。そして、人間-機械系

での使用を考慮して、新しい半自律化の前提に基づいた半自律化仮想ツールダイナミクスを定義し、その特性をマスタースレーブ系に持たせるための制御系を設計する。次に、構成したシステムの安定性解析を行い、受動的ないかなるオペレータや環境に対しても、受動性の観点からシステムの安定性が保証されることを示す。また、マクロ・マイクロマニピュレーションへの応用を目指し、システムの安定性を害することなく、自由に力と運動（パワー）のスケールリングを行えるよう Task-oriented 制御系を拡張する。最後に、Task-oriented 制御系を実際のテレマニピュレータに適用して作業実験を行い、提案するシステムの有効性を確認する。

第5章では、従来のテレマニピュレーションシステムの特性を見直し、従来までとは異なる観点からそれらの特性を捉え、遠隔操作システムの新しい可能性について検討する。これまでのテレマニピュレーションシステムでは、マスターとスレーブの特性を一致させ、外部から見たときにそれらがあたかも一つのマニピュレータであるように見せかけることが、システム構築時の暗黙の前提とされてきた。この章では、オペレータと環境との間に介在するマスターとスレーブという二つのマニピュレータの特性を総合的に捉えていくことで、より柔軟な遠隔操作システムを構築することを考える。まず最初に、日常の道具の特性をヒントに、より自由度が高く柔軟な遠隔操作システムの設計するための指針について説明する。そして、テレマニピュレーションシステムに内在する冗長性に注目して、システムの操作性や作業性を向上させるための拡張仮想ツール特性の概念について解説する。次に、拡張仮想ツールダイナミクスを定義し、その特徴と応用例を示す。そして、拡張仮想ツール特性をマスタースレーブ系に持たせるために拡張した Task-oriented 制御系を構成し、受動性の観点から、システムの安定性について議論する。最後に、実機を用いて作業実験を行い、システムの有効性を検討する。

第6章では、マスタースレーブ間の通信遅れ問題について議論する。テレマニピュレーションシステムをネットワークロボティクスや遠隔医療などへ応用する場合には、マスタースレーブ間の通信伝達部に存在する無駄時間を考慮して、制御系を設計しなければならない。この章では、まず最初に伝達部の通信遅れ特性について議論し、通信遅れのシステムへの影響について受動性の観点から考察する。次に、スキヤッタリング変換の手法について解説し、マスタースレーブ間の信号を Wave Variable と呼ばれる信号に変換して、実際の受動的な伝送線路の特性を模擬することで、システムの安定性の補償が可能であることを示す。そして、スキヤッタリング変換と前章で提案した安定なスケールリング手法を併用することで、通信遅れが存在する場合にも安定にスケールリングを行うことのできる制御系を構成する。最後に、通信遅

れを模擬した実験により，通信遅れが安定化され，設定されたスケーリングが実現される様子を確認する．

第7章では，本論文のまとめとして全体の総括を行い，今後の課題や展望について説明する．

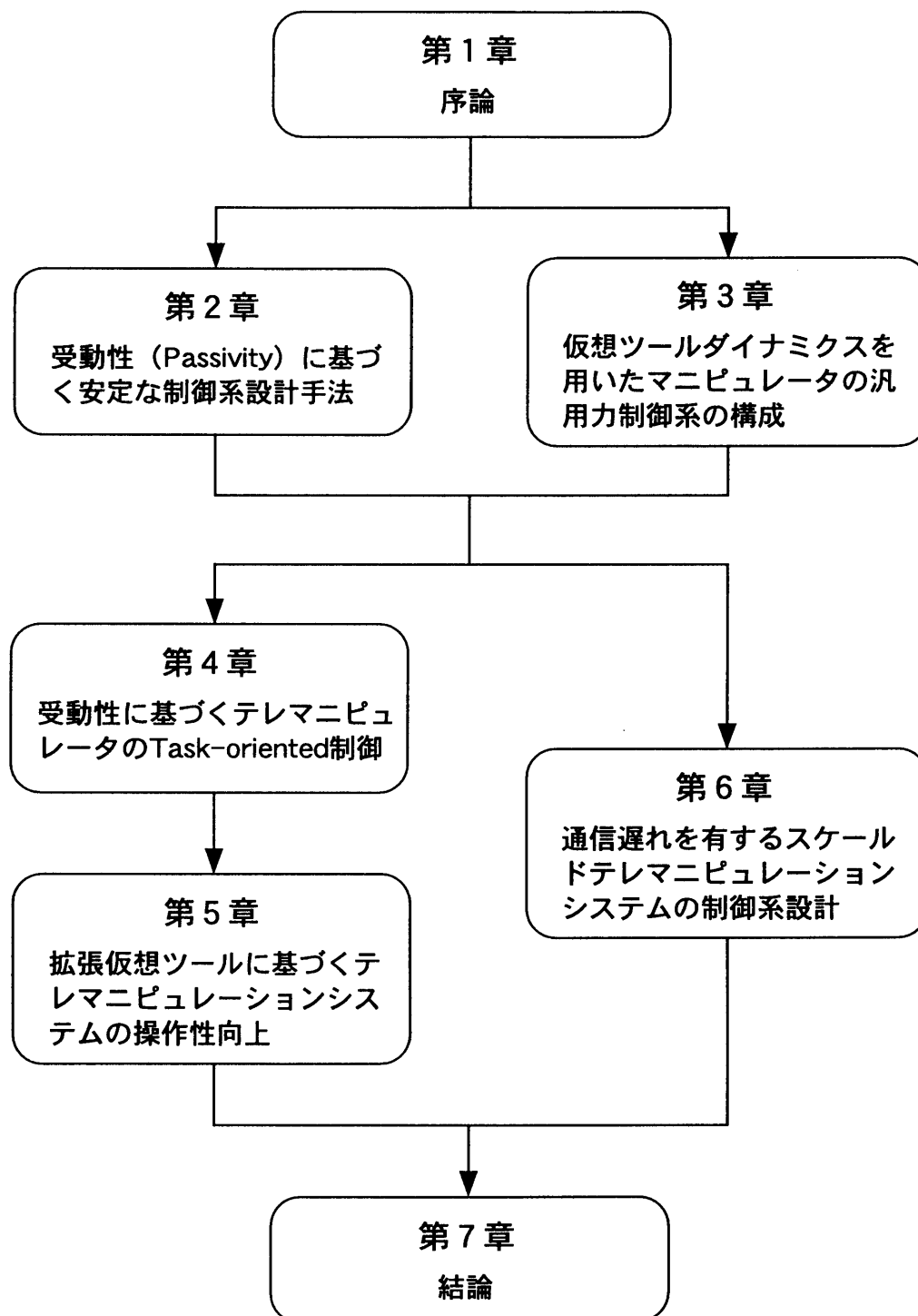


図 1.12: 本論文の構成

第2章 受動性 (Passivity) に基づく 安定な制御系設計手法

制御工学において、構成するシステムの安定性は制御系設計時に考慮すべき最も重要な課題の一つとなっており、高性能な制御系を如何にして安定に実現するかが多くの研究者の興味の対象となってきた。テレマニピュレーションシステムのような遠隔操作システムの制御系設計においても安定性問題は重要視され、従来より多くの研究者によってシステムの安定性解析が行われてきた。しかし、従来まで議論されてきた安定性解析は、その多くがマニピュレータの制御系のみを考えたシステムの部分安定性に関するものであった。現実には、人間や環境の特性がシステム中に挿入され閉ループ系を構成するため、作業時のシステム全体の安定性については、部分安定性からだけでは十分な保証が行われぬ。このようなシステムでは本来、部分安定性だけでなく人間や環境を含めたシステム全体としての安定性も解析の一環として十分議論されるべきである。

近年、Andersonら^{[31][32]}やColgateら^[33]によって、このようなシステム全体の安定性解析には受動性に基づく手法が有効であることが報告された。受動性の概念自体は決して新しいものではないが、電気工学における受動回路網理論のように複雑なシステムをネットワーク結合で表現することができ、人間-機械系のように非線形ブロックを含んだシステムの安定性解析にも非常に有効な手段となることが分かってきたため、新しい安定性解析手法として注目されている。本研究では、システムの安定性を部分安定性と受動性の両方の観点から解析し、受動的な人間（オペレータ）や環境に対して、その特性によらず安定に作業を行なえる実用テレマニピュレーションシステムを構成することを目的とする。本章では、制御系の安定性を解析する際の準備として、受動性に基づく安定性解析の手法について解説する。まず最初に、部分安定性のみを考慮した従来の安定性解析の問題点について簡単にまとめておく。次に、システムのネットワーク表記と受動性の概念について説明する。最後に、テレマニピュレーションシステムの安定性解析への適用法について解説し、受動性解析に有効ないくつかのツールについて、簡単なシステムの特性解析例を示しながら説明する。

2.1 システムの部分安定性と人間-機械系の安定性

テレマニピュレーションシステムは、オペレータ・マスターマニピュレータ・通信部・スレーブマニピュレータ・作業環境という5つのブロックから構成されている。(図2.1) 従来より、実用遠隔操作システムの構築を目指して、制御性能の追求とともに安定性に関する解析も多く行われてきた。しかし、その多くはオペレータや環境の特性を考慮せずにテレマニピュレータの制御系のみ安定性を解析したものであり、それらの研究ではマスターマニピュレータとスレーブマニピュレータという二つのマニピュレータ間での運動や力応答の収束性に安定性解析の焦点が置かれていた。現実には、オペレータや作業環境の特性が作業時のシステム特性に含まれるため、遠隔操作システムのような人間-機械協調システムの安定性は、従来のように部分安定性からだけでは十分な保証が行えない。すなわち、図2.2に示すように、オペレータや作業環境はシステムのダイナミクスの中にループを形成する形で挿入されるため、テレマニピュレータ部の部分安定性からだけではこれらのループ特性まで含めた全体の安定性の解析ができず、不安定な振動の励起やエネルギーの増大を招くなど重大な問題に直面することも多かった。

従来の研究の中には、環境や人間の特性を仮定して、システム全体の安定性解析にその特性を取り入れようとしたものもいくつか存在したが、それらの解析中ではオペレータ及び環境のダイナミクスやゲインが数式として陽に表現されてしまっていた[27][29]。しかし、オペレータや作業環境の特性は一般的には非線形で、パラメータの同定は難しく、異なる環境やオペレータに対してはパラメータを同定しなおす必要があった。また、同定した特性が実際と異なる場合には、それが不安定な挙動を招く原因となり得ることは十分に予想される。

近年、AndersonらやColgateらによって有効性が示された受動性に基づく安定性解析の手法は、これらの人間-機械系のような非線形特性を含んだシステムの安定性問題に対する解決法として注目されている。次節以降、受動性の概念及び受動性に基づく安定性の解析手法について解説していく。

2.2 受動性に基づくシステムの安定性解析

2.2.1 機械システムと電気システムの等価性

機械系のような力学的システムや制御系の多くが、電氣的なシステムを用いて等価な形で表現できることは、良く知られた周知の事実である。例えば、図2.3のよ

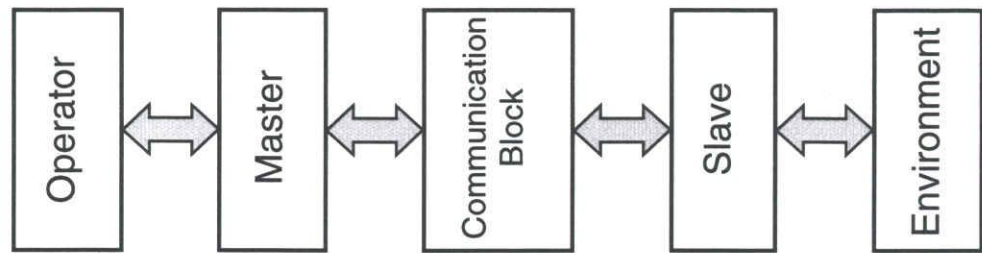


図 2.1: テレマニピュレーションシステムの構成要素

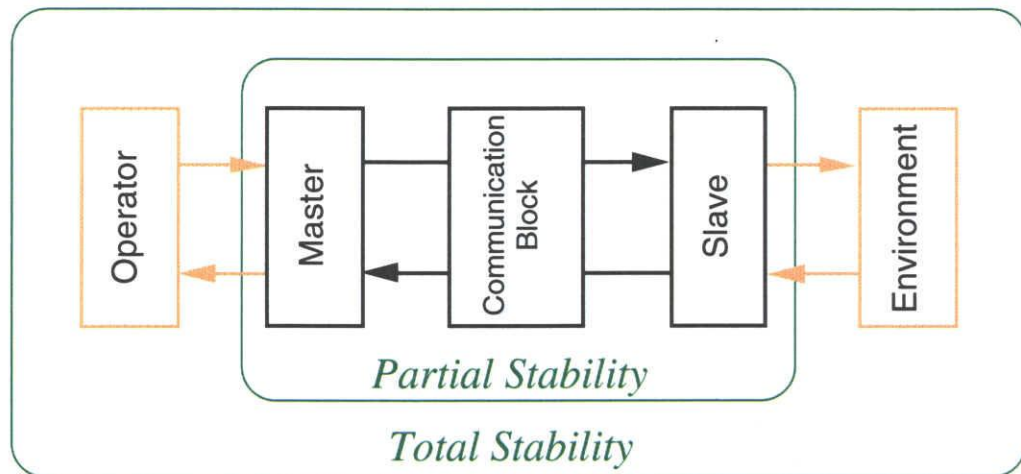


図 2.2: テレマニピュレーションシステムの部分安定性

うな Mass-Spring-Damper 系は、いくつかの素子を用いて図 2.4 のような等価回路として表すことができ、慣性はコイルとして、ダンパー特性は抵抗として、バネ特性はコンデンサとしてそれぞれ表現される。また、外部環境は独立電源や負荷として表現できる。そのため、機械システムと等価な電気回路を構成して特性シミュレーションや解析を行うなど、現在までにこの等価性の利点が応用された例は多い。

受動性に基づく安定性解析手法は、電気工学における受動回路網理論の特性解析の手法からヒントを得たもので、電気系と同じようにシステムのパワーやエネルギーを定義し、システム間でのそれらの伝達・伝播特性を求めることによって系の安定性を解析するものである。次に、受動性の概念と利用法について説明する。

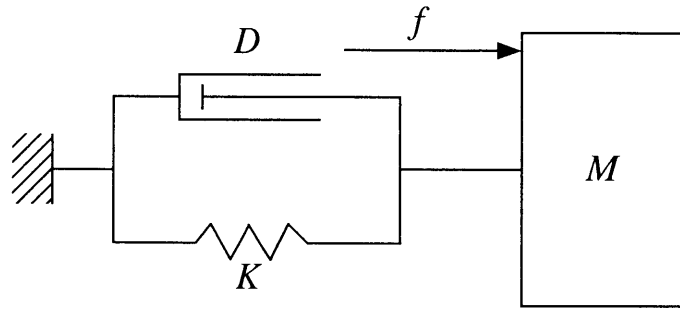


図 2.3: Mass-Spring-Damper 系

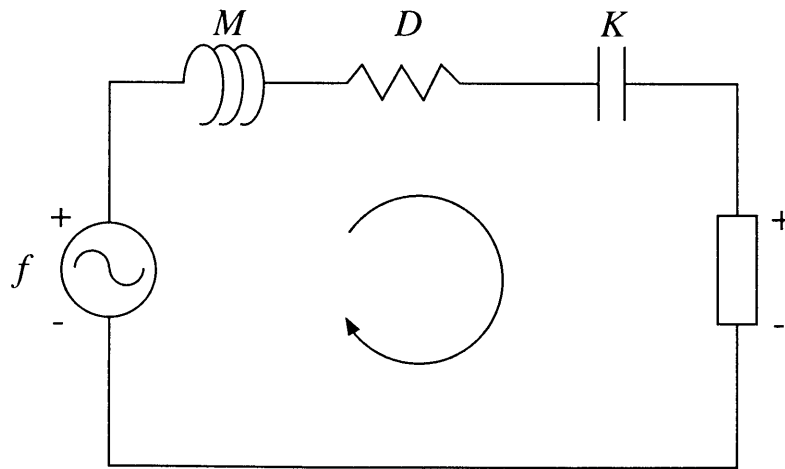


図 2.4: Mass-Spring-Damper 系の等価回路

2.2.2 受動性 (Passivity) の定義

システムの受動性は、人間や環境などの非線形ブロックを含んだシステム全体の安定性を考える上で、非常に有用なツールである。そのため、遠隔操作システムなどの人間-機械系協調システムを安定に設計する際の重要な指針となり得る。以下、システムの受動性の概念について説明する。

受動性に基づく安定性解析の基本的なアプローチは、前述のように、電気工学における受動回路網の特性解析からきており、機械システムにおけるパワーやエネルギーの伝達・伝播特性の概念を数学的に記述したものである。受動性を用いてシステムの特性解析を行う場合には、システムは図 2.5 のような回路網モデルを用いて表現される。システムの受動性解析は、このような回路網モデルに基づいているため、元のシステムの安定性を維持したままで他のシステムとの接続を自由に行うことができ、複雑で大規模なシステムの特性解析を行う場合にも非常に便利なツールとなる。

最初に、システム間のパワーやエネルギーの流れを調べるために用いられる、いくつかの概念について説明しておく。まず、システムに流入するパワー P を入力ベクトル u と出力ベクトル v のスカラー積を用いて定義する。一般に、電気システムではシステムに流入する電流を入力、その際に端子間に生ずる電圧を出力としてパワー P が定義される。同様に、機械システムの場合はシステムに入力される速度 \dot{x} とシステム間に発生する力 f によって物理的な意味でのパワー P が表される。ただし、入出力変数 u, v として必ずしも速度と力を選ぶ必要はなく、パワー P が物理的な意味でのパワーと一致する必要はない。また、下に有界なエネルギー関数を E 、負でないパワー損失を P_{diss} と定義する。この E と P_{diss} についても、必ずしも物理的な意味を持つ必要はない。

システムの受動性は、これらの定義を用いて以下のように定義される。

システムの受動性

システムに加えられるパワーが、システム内にエネルギーとして蓄積されるか、又はシステム内で消費される時、そのシステムは外部からの入力に対して受動的である。

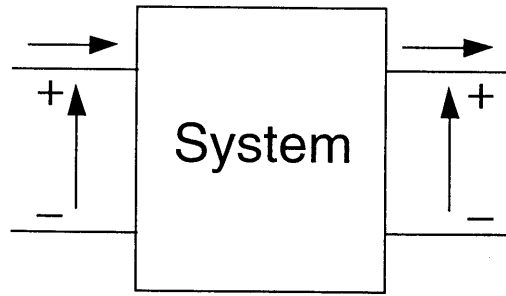


図 2.5: 回路網モデル

つまり，次の式が成り立つときシステムは受動的であると呼ばれる．

$$\begin{aligned}
 P &= u^T v \\
 &= \frac{dE}{dt} + P_{diss}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

このことは，受動的なシステムによって外部に供給されるエネルギーが，常にエネルギーの初期値で制限されていることを示している．

$$\begin{aligned}
 \int_0^\tau P dt &= \int_0^\tau u^T v dt \\
 &= E(\tau) - E(0) + \int_0^\tau P_{diss} dt \\
 &\geq -E(0) = const.
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

ここで， τ は任意の時刻を表している．

もし，パワーの損失が常にゼロであれば，システムは無損失であるといわれる．また，パワー損失が正で，蓄積エネルギーが lower bound に達しない場合は，システムは厳密な意味で受動的であるといわれる．後節の例題によって示されるように，システムに蓄積されるエネルギーをリアプノフ関数として用いると，安定性に関する解析が容易に行える．この解析により，外界からの入力がない場合には，エネルギー授受の観点から受動的なシステムは安定であり，また，厳密な意味で受動的なシステムは漸近安定であることがわかる．ここで説明した受動性の概念は物理学的な知見に基づいており，同じ次元の任意の入出力変数を持つシステムにも容易に適用が可能である．

2.3 受動性に基づく安定な人間-機械協調システムの設計

テレマニピュレーションシステムのような人間-機械協調システムの場合，受動性に基づいた制御戦略によって，任意の受動的な環境に対する安定なマニピュレーションが可能となる．そして，操作状況が変化する場合や未知環境に対して作業する場合にとりわけ有効である．ここでは，受動性に基づく制御系設計をテレマニピュレーションシステムに適用する方法について説明する．

2.3.1 システムのネットワーク表現

受動性に基づいてテレマニピュレーションシステムなどの機械系の安定性を解析する場合には，図 2.5 の回路網モデルを，図 2.6 のようなポートモデルで表現する．受動性に関する議論は，多自由度やマルチポートの場合にも拡張できるが，ここでは，システムの受動性について理解しやすくするため，単純な 2 ポートモデルの場合について考える．前節の議論においては，パワー P がシステムに流入する際に正となるように定義した．しかし，一般的なポートモデルには複数のポートが存在するため，ここではパワー P は左から右へと流れるものとし，左から流れ込むパワー及び右側へと流出するパワーを正となるように定義する．一般のシステムは，図 2.7 に示すようにサブシステムがいくつか接続されたネットワークモデルとして表現できるため，テレオペレーションシステムの安定性を議論する場合には，2 ポートモデルの連鎖を考え，サブシステム間のパワー P の流れからシステム全体の受動性を判断すればよい．受動的なサブシステムのフィードバックや縦列なネットワーク接続は，全体として受動的なシステムを構成し，それぞれのエネルギーとパワー損失を単純に足し合わせればよい．ため，複雑なシステムに対する解析も比較的容易に行うことができる．

2.3.2 テレマニピュレーションシステムの安定性

オペレータと環境とを含めたテレマニピュレーションシステム全体の安定性を，受動性の観点から考える．マスターマニピュレータとスレーブマニピュレータからなるテレマニピュレータ部を一つのシステムとみなし，図 2.8 のように考えると，テレマニピュレーションシステムはオペレータによって加えられるパワーがマニピュレータによって環境側に伝達されるシステムであることが分かる．

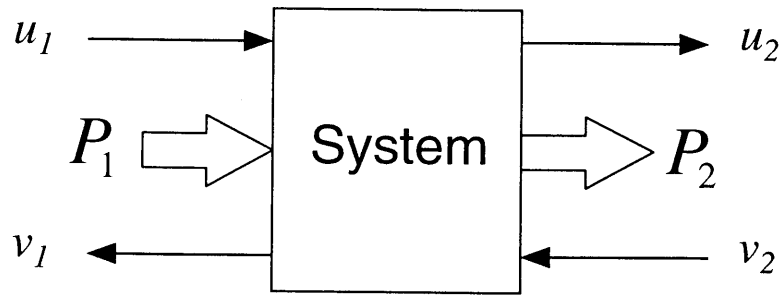


図 2.6: システムの2ポート入出力モデル

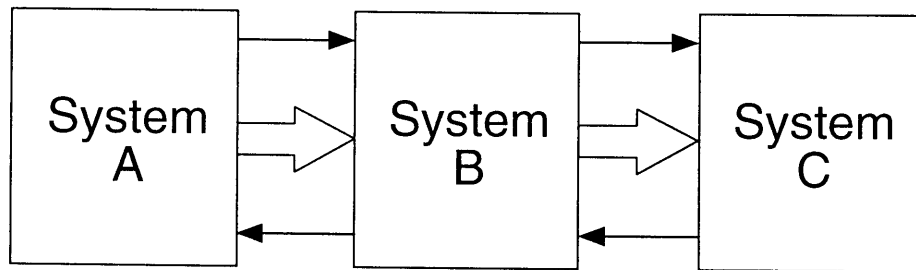


図 2.7: 2ポートモデルのネットワーク接続

一般に、テレマニピュレータのような人間-機械協調システムを用いて作業を行う場合には、オペレータと環境に関して、次に示すような二つの仮定が成り立つことが知られている。[25][31][34][35][36]~[38]

システムの受動性

- 1) オペレータによって加えられる入力是有界で、オペレータはシステムを不安定にするような入力を故意に加えることはない。また、オペレータは、外部からの入力に対して受動的な特性を有する。
- 2) 作業環境は受動的である。

これらは基本的に人間と環境の受動性を仮定したものである。人間の特性は粘弾性モデルやインピーダンスモデルとして知られ、受動性の仮定は妥当であると考えら

れる，例えば，Kazerooniら [36]~[38] は作業時の人間の特性を図 2.9 のようにモデル化して同定を行い，良好な結果を得ている．図中 u_h はオペレータの意志によって発生される力指令（Intentional Force）を表している．また， y_e は拘束によってオペレータに加えられる運動を表している．結果的にオペレータの発生する力 f_h は

$$f_h = u_h - S_h(y_e) \quad (2.3)$$

として与えられる．ここで， S_h はオペレータの特性インピーダンスで，皮膚の部分のインピーダンス IMP_{flesh} と筋肉部のインピーダンス IMP_{muscle} により

$$\frac{1}{S_h} = \frac{1}{IMP_{flesh}} + \frac{1}{IMP_{muscle}} \quad (2.4)$$

と表される．また，オペレータの入力はシステム全体の運動目標値となるため，オペレータの意志によってシステムを不安定にすることも可能である．そのため，上記のような入力に関する仮定が設けられているのである．これは，制御系の部分安定性を解析する際に，システムの目標入力をゼロにするのと同様の仮定である．また，受動性の仮定より，作業環境に関しては，入力を加えるとそれに対して反力が戻ってくるか，もしくは運動が生じるようなものを想定しているが，実際には入力を判断して故意に位相を反転させる等の極端な環境でなければ，多くの環境に対して広義の意味での受動性が成り立つものと考えられる．¹

このような仮定の下で，制御されるテレマニピュレータ部がオペレータと環境に対して受動的に制御されていれば，加えられたパワーよりも大きなパワーを外部に対して発生せず，そのエネルギーがシステム内部に蓄えられるか消費されるため，システム全体として不安定な挙動の原因となるエネルギーの増大を招くことはなく，安定なテレマニピュレーションシステムが得られることが知られている．[34][25][31][35][19]．受動性に基づく安定性解析は，受動的な環境に対しオペレータが加えるパワーを有界な状態で伝達するための十分条件であると考えられることができる．次節では，簡単な特性に対する受動性の解析例を示し，受動性解析におけるいくつかの有効なツールについて説明する．

¹ オペレータに関する受動性はあくまでの通常作業時（定常作業時）のもので，突然のアクシデント等により受動性の仮定が満たされない状況も考え得る．しかし，本論文で構成するシステムは，安全性を考慮して人間からの指令が無ければ動作しないように設計され，また，マニピュレータ系の受動性を保証しているため，非常時にはオペレータが手を放すか操作用グリップを強く握ってしまうかすることにより，不安定な挙動を発生させないようにすることが可能である．

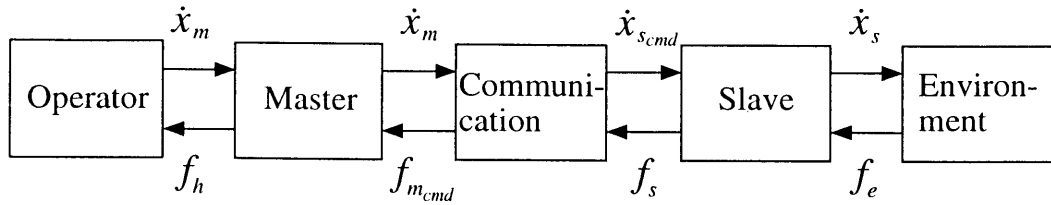


図 2.8: 一般的なテレマニピュレーションシステムのポートモデル

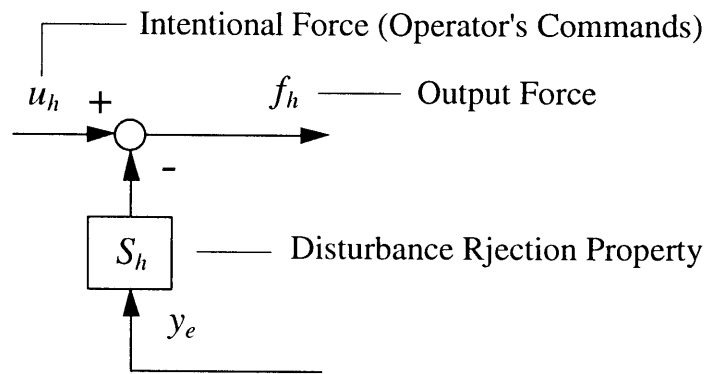


図 2.9: Kazerooni らによって同定された人間の特性モデル

2.4 受動性解析手法

システムの受動性は、システム間のパワーの流れやシステムに蓄積されるエネルギーを解析することで調べることができる。ここでは、受動性解析手法の内のいくつかを紹介する。以下の解析では、適用例として図 2.3 に示した Mass-Spring-Damper 系の受動性について記述する。ここでは、図のようなインピーダンス特性が人間と環境の間に存在するような場合について考える。外力 f は人間及び環境からシステムに加えられるものとする、図のインピーダンス特性は、

$$M\ddot{x} + D\dot{x} + Kx = f_h - f_e \quad (2.5)$$

のように表せる。ここで、 f_h は人間がシステムに加える方向の力、 f_e はシステムが環境に加える力を表している。以降、上式の特性について受動性を解析していく。

2.4.1 リアプノフ関数を用いたシステムのエネルギー解析

最初に、システムに貯えられるエネルギーからシステムの安定性を解析する手法について説明する。ただし、人間や環境には受動性の仮定が成り立つことから、ここでの解析では、人間及び環境は例えばインピーダンスのような特性を持ち、エネルギーは特性に含まれるダンパー成分によって吸収されているものとして取り扱う。

まず、ここでの解析に必要なテレゲンの定理について紹介しておく。テレゲンの定理は、良く知られるキルヒホッフの法則から直接導かれる定理で、線形／非線形、能動／受動、時変／時不変を問わず任意の集中定数回路網に対して成立する。

テレゲンの定理

図 2.10 のような集中定数回路網に対して、枝電圧 v_k / 枝電流 i_k とそれらの基準方向とを定める。 v_k, i_k がキルヒホッフの法則（電流及び電圧）を満足するように選ばれていれば、枝路数 b に対して

$$\sum_{k=1}^b v_k i_k = 0 \quad (2.6)$$

が成り立つ。

テレゲンの定理は、エネルギーの観点から見ると、『独立電源によって回路網に供給される電力（エネルギー）の和は、電源以外のすべての枝によって吸収される電力（エネルギー）の総和に等しい。』というエネルギー保存の法則を示している。

式 (2.5) で表されるインピーダンス特性の受動性を解析するために、システムを図 2.4 のような等価回路で表現する。全体を人間／環境／中間部特性の 3 つの部分から構成されているものと考え、それらの内部状態を

$$\boldsymbol{x} = (x_{hK}, v_{hM}, x_{eK}, v_{eM}, \boldsymbol{x}, v) \quad (2.7)$$

と定義する。ここで、添字を付加していない v は式 (2.5) のインピーダンス特性中の質点 M の運動（速度）を表しており、等価回路においては中間部の回路に流れる電流に相当している。また、ここでは、人間ブロックに関する特性を添字 h で、環境ブロックに関する特性を添字 e で表現し、中間のインピーダンス特性部と区別しておく。さらに、2 つ目の添字 M, D, K によって人間や環境の特性中に含まれる等

価なインピーダンス特性を表現する． x はバネ特性に相当する要素に生じる変位で $v = \dot{x}$ と定義される．これは，等価回路中のコンデンサに貯えられる電荷に相当している．今，リアプノフ関数の候補として，システムのエネルギーに相当する

$$V(\boldsymbol{x}) = \frac{1}{2} (\langle x_{hK}, x_{hK} \rangle + \langle v_{hM}, v_{hM} \rangle + \langle x_{eK}, x_{eK} \rangle + \langle v_{eM}, v_{eM} \rangle + v^T M v + x^T K x) \quad (2.8)$$

を仮定する．ただし，ここでは人間や環境の特性を陽に表すことはせずダンピング特性による受動性のみを仮定して扱うこととし，人間や環境の特性については Anderson ら [31] の手法にならって規格化したネットワークモデル (Passive Hilbert network with Identity-valued Dynamic Element) を用いる．すなわち，人間及び環境の特性を単位行列として取り扱う．ただし，人間や環境の特性中に含まれる各要素が持つエネルギーは，等価なバネや慣性要素が持つエネルギーを総合したものととして，特別な内積記号 \langle, \rangle を使って区別しておくことにする．関数 $V(\boldsymbol{x})$ を微分すると，

$$\begin{aligned} \dot{V}(\boldsymbol{x}) &= \langle x_{hK}, v_{hK} \rangle + \langle v_{hM}, \dot{v}_{hM} \rangle + \langle x_{eK}, v_{eK} \rangle + \langle v_{eM}, \dot{v}_{eM} \rangle \\ &\quad + v^T M \dot{v} + x^T K v \\ &= \langle x_{hK}, v_{hK} \rangle + \langle v_{hM}, \dot{v}_{hM} \rangle + \langle x_{eK}, v_{eK} \rangle + \langle v_{eM}, \dot{v}_{eM} \rangle \\ &\quad + v^T M \dot{v} + (x^T K) v \\ &= \langle f_{hK}, v_{hK} \rangle + \langle v_{hM}, f_{hM} \rangle + \langle f_{eK}, v_{eK} \rangle + \langle v_{eM}, f_{eM} \rangle \\ &\quad + v^T f_M + f_K^T v \end{aligned} \quad (2.9)$$

となる．テレゲンの定理から，システム内のパワーには，

$$[P_{op}] + v^T f_M + v^T f_D + v^T f_K + [P_{env}] = 0 \quad (2.10)$$

が成り立つ．ただし， $[P_{op}], [P_{env}]$ はオペレータ及び環境内のパワーの総和を表す．

$$\begin{aligned} [P_{op}] &= \langle f_{hM}, v_{hM} \rangle + \langle f_{hD}, v_{hD} \rangle + \langle f_{hK}, v_{hK} \rangle \\ [P_{env}] &= \langle f_{eM}, v_{eM} \rangle + \langle f_{eD}, v_{eD} \rangle + \langle f_{eK}, v_{eK} \rangle \end{aligned} \quad (2.11)$$

式 (2.10) を用いると、オペレータと環境の受動性の仮定の下では、 $\dot{V}(\mathbf{x})$ は、

$$\begin{aligned}\dot{V}(\mathbf{x}) &= -\langle f_{hD}, v_{hD} \rangle - v^T f_D - \langle f_{eD}, v_{eD} \rangle \\ &\leq -v^T f_D\end{aligned}\tag{2.12}$$

となりエネルギーが押さえられるので、システムが受動性の観点から安定であることが確認できる。

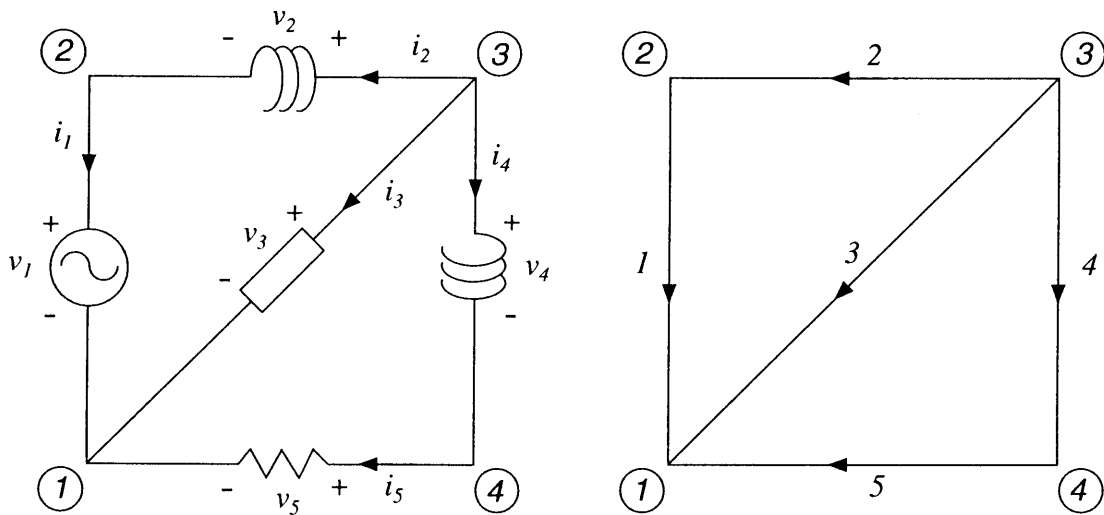


図 2.10: テレゲンの定理

2.4.2 積分不等式を用いたシステムのエネルギー解析

次に、積分不等式を用いてシステムに貯えられるエネルギーを解析する手法について説明する。式 (2.2) に示したように、システムの入出力に着目すると、受動性が成り立つための必要十分条件は積分不等式で表される。例えば、式 (2.5) で表されるインピーダンス特性が受動的であるための必要十分条件は、システムに貯えられるエネルギーが、

$$\int_0^T (\dot{x}^T f_h - \dot{x}^T f_e) dt \geq -\gamma\tag{2.13}$$

を満たすような正の定数 γ が任意の時間 T に対して存在することである。式 (2.13) を整理すると、

$$\int_0^T \{\dot{x}^T (f_h - f_e)\} dt \geq -\gamma \quad (2.14)$$

と表せるが、 $D + D^T > 0$ であれば、 γ が存在することは良く知られているため、インピーダンス特性の受動性が証明される。(証明は、例えば文献 [39] などを参照されたし。)

2.4.3 スキャッタリング行列 (散乱行列) を用いたシステムのパワー伝達解析

2ポートモデルの信号伝播特性の解析手法として有用なものに、スキャッタリング行列 (散乱行列) がある。スキャッタリング行列は、電気回路網理論において波の伝播特性を解析する手法として、インピーダンス行列やアドミッタンス行列などと同様にしばしば用いられる。

図 2.11 のように線路を通して回路に信号が加わるとき、伝送線路には入射波及び反射波が生じることが知られている。この現象は、端子対での電圧・電流を入射波・反射波に分解して表現することで、図 2.12 のような集中定数回路網にも適用することができる。それらの入出力波の信号間の関係を解析し、回路の特性を記述するための特性行列がスキャッタリング行列である。

図 2.11 中の左側ポートの端子をそれぞれ $1, 1'$ 、右側ポートの端子を $2, 2'$ と表記するものとし、各端子の入射電圧を V_{1s}, V_{2s} 、入射電流を I_{1s}, I_{2s} と定義する。また、入射波と逆方向に進行 (伝播) する反射電圧を V_{1r}, V_{2r} 、反射電流を I_{1r}, I_{2r} と定義する。今、 $V_{2s} = 0$ の場合を考えると、反射波は、

$$V_{1r'} = \rho_1 V_{1s} \quad (2.15)$$

のように表される。ただし、 ρ_1 は端子対 $1, 1'$ における電圧反射係数である。ここで、 V_{2s} が入射したとすると、その透過波が回路を通して線路を左方向へと伝播し、実際の V_{1r} は、 $V_{1r'}$ とこの透過波の和として表される。同様に、 V_{2r} は $V_{2r'}$ と V_{1s} の透過波の和として表される。各端子対における入射波と反射波の関係を表す式をまとめ

ると,

$$\begin{bmatrix} V_{1r} \\ V_{2r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1s} \\ V_{2s} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

のような形となる. この係数行列 S はスキュタリング行列 (散乱行列) と呼ばれ, Z 行列や Y 行列と同様に回路の信号伝達特性を表現するものとして回路特性の解析に用いられている.

$$S_{11} = \left. \frac{V_{1r}}{V_{1s}} \right|_{V_{2s}=0} \quad (2.17)$$

$$S_{22} = \left. \frac{V_{2r}}{V_{2s}} \right|_{V_{1s}=0} \quad (2.18)$$

は各端子対における電圧反射係数を表している. また,

$$S_{12} = \left. \frac{V_{1r}}{V_{2s}} \right|_{V_{1s}=0} \quad (2.19)$$

$$S_{21} = \left. \frac{V_{2r}}{V_{1s}} \right|_{V_{2s}=0} \quad (2.20)$$

は, 入射波に対する透過波の割り合いを表す係数で電圧透過係数と呼ばれる. 相反定理の成り立つ受動回路の場合には, 一般に

$$S_{12} = S_{21} \quad (2.21)$$

である. 入射電圧及び反射電圧をポートモデルの電圧・電流を用いて表すと,

$$V_{1s} = \frac{V_1 + I_1}{2} \quad (2.22)$$

$$V_{1r} = \frac{V_1 - I_1}{2} \quad (2.23)$$

$$V_{2s} = \frac{V_2 + I_2}{2} \quad (2.24)$$

$$V_{2r} = \frac{V_2 - I_2}{2} \quad (2.25)$$

となり, 電流の方向に注意してこれらの関係を利用すれば, 機械系のスキュタリング行列を容易に求めることができる.

スキヤッタリング行列は，回路網でのパワーの伝達特性を表しているため，その特性を解析することで，回路や機械系の受動性を判断することが可能となる．スキヤッタリング行列を用いた解析において，システムの入動性が成り立つための必要十分条件は，スキヤッタリング行列 S の最大特異値 $\lambda(S)$ が次式の関係を満たすことである．

$$\lambda(S) \leq 1 \quad (2.26)$$

このことはシステム内部で消費されるエネルギーが負にならないことを示している．

式 (2.5) のインピーダンス特性の場合には， \dot{x}, f_h, f_e をラプラス変換したものをそれぞれ I, V_h, V_e とすると，システムの入動性は以下のように表される．

$$\left(Ms + D + K\frac{1}{s} \right) I = V_h - V_e \quad (2.27)$$

また，スキヤッタリング行列の定義より，

$$V_h - I = S_{11}(V_h + I) + S_{12}(V_e - I) \quad (2.28)$$

$$V_e + I = S_{21}(V_h + I) + S_{22}(V_e - I) \quad (2.29)$$

これらの式より，スキヤッタリング行列を求めると，

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Ms+D+K/s}{Ms+D+K/s+2} & \frac{2}{Ms+D+K/s+2} \\ \frac{2}{Ms+D+K/s+2} & \frac{Ms+D+K/s}{Ms+D+K/s+2} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

となる．最大特異値 λ を求めるために， $S^T S$ の固有値を計算すると，

$$\lambda(S) = \frac{|(Ms + D + K/s) \pm 2|}{|(Ms + D + K/s) + 2|} \leq 1 \quad (2.31)$$

となり，式 (2.5) のインピーダンス特性は受動的であることが分かる．

2.5 まとめ

システムの安定性問題は，高性能化問題とともに実用的なシステムを構成する際の大きな課題であり，ロボット工学や制御工学において重要な位置を占めてきた．テ

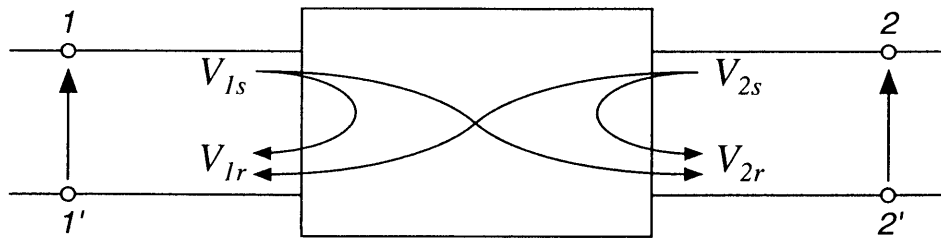


図 2.11: 線路に生じる入射波と反射波

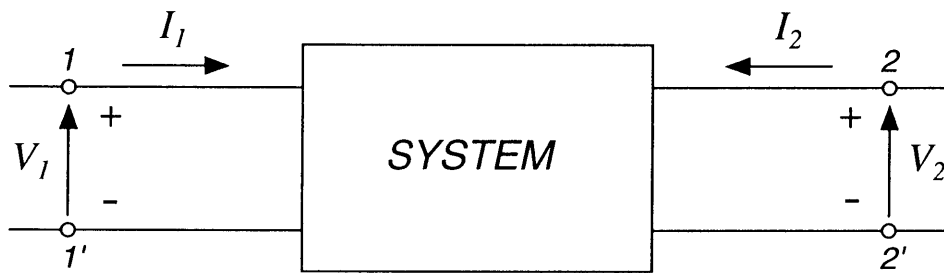


図 2.12: 集中定数回路

レマニピュレーションシステム等，人間がロボットと直接干渉して作業を行う人間－機械協調システムにおいては，特に作業時のシステムの安定性が重要視され，従来も多く研究者によってシステム安定性解析が行われてきた．しかし，これまで解析されてきたような部分安定性の手法からだけでは，人間－機械系のような非線形で未知の特性を含むシステム全体の安定性を保証することが難しい．そのため，不安定な振動の励起やエネルギーの増大を招くなど重大な問題に直面することも多かった．また，作業によって作業環境やオペレータなどの特性が変化することを考慮すると，異なる作業状況に対しても制御系を変更することなく，安定に作業を行なえるシステムの構築法が必要となってくるであろう．

近年注目されてきた受動性に基づく手法は，このような人間－機械系協調システムの安定性問題に対する有効な解析手段を与えるものである．本章では，受動性に基づく人間－機械系の安定性解析手法について解説した．まず最初に，部分安定性のみを考慮した従来の安定性解析の問題点について簡単にまとめた．次に，電気回路網理論で議論されてきた受動性の概念について説明し，電気系と機械系の等価性に基づいて，機械システムや制御系をネットワークモデルとして表現する手法につ

いて解説した。そして、システムに貯えられるエネルギーやシステム間のパワー伝達の観点からシステムの受動性を解析し、テレマニピュレーションシステム等の人間-機械系の安定性を保証する方法について説明した。最後に、受動性解析に有効なツールとして、

- リアプノフ関数に基づくシステムのエネルギー解析
- 積分不等式に基づくシステムのエネルギー解析
- スキャッタリング行列（散乱行列）に基づくシステムのパワー伝播解析

の3つについて、簡単なインピーダンス特性の安定性（受動性）を解析しながら紹介した。本論文では、ここで説明した受動性の概念に基づいて制御系を構成し、オペレータや環境が受動的であるかぎり、それらの特性によらず安定に作業の行える実用的なテレマニピュレーションシステムを構築することを目標とする。

第3章 仮想ツールダイナミクスを用いたマニピュレータの汎用力制御系の構成

テレマニピュレーションシステムも含め、人間や環境との干渉を伴う複雑な作業を行わせるためのマニピュレーションシステムを構築する場合には、マニピュレータと外部環境との間の機械的な干渉力を考慮した制御を行う必要がある。次章以降で論じられるテレマニピュレーションシステムの Task-oriented 制御系では、仮想ツールダイナミクスの概念に基づいてマニピュレータの汎用力制御系を構成し、システムの操作性向上に応用している。本章では、それに先立ち、提案する仮想ツールの概念及び仮想ツールに基づく力制御系の構成法について説明する。最初にマニピュレータの力制御について考察し、これまでの力制御法の問題点を指摘して、特殊なツールをエンドエフェクタとして用いることなく様々な作業が可能な汎用力制御ロボットの必要性について述べる。次に、提案する仮想ツールダイナミクスの概念を定義し、仮想ツール特性に基づく汎用力制御系の構成法について説明する。最後に、マニピュレータを用いた力制御実験の結果を示し、提案する力制御手法の有効性を確認する。

3.1 マニピュレータの力制御（従来手法とその問題点）

近年のロボット技術の急速な発展とともに、ロボットマニピュレータは様々な分野で用いられるようになった。しかし、実用化されているほとんどの産業用ロボットマニピュレータでは、簡単な位置制御系を用いてサーボ系が構成されている。そのため、マニピュレータのエンドエフェクタと作業環境が機械的に干渉するような一般的な作業を行う場合には、位置制御系のサーボゲインを下げることにより、エンドエフェクタの見かけの剛性を下げたり、機械的コンプライアンスを備えた特殊なツールをエンドエフェクタとして用いたりして、作業環境とマニピュレータとの機械的な干渉を制御し、マニピュレータや作業環境に過大な力が働かないようにす

る工夫がなされてきた。しかし、サーボ剛性を小さくするとロボットの位置決め精度が低下し、また機械的・機構的に外部環境との干渉を制御しようとする、作業できる姿勢が制限されるなど問題点が多かった。これらの問題点を解決すべく、最近では、コンピュータ制御技術を利用してマニピュレータと外部環境との干渉を直接制御しようとする、各種の力制御手法が提案されている。ここでは、特殊なツールを用いることなく、様々な作業が可能な汎用力制御系の構築に関して考察を行う。

コンピュータ制御を利用して、エンドエフェクタと作業環境との干渉を伴うような複雑な作業をマニピュレータに行わせるためには、両者間の機械的な干渉力を考慮して制御系を構成する必要がある。このような干渉を伴う作業を容易に実現でき、また多種多様な作業に対応可能な汎用力制御器を実現することを考えると、次に示すようないくつかの問題点が生じてくる。一つは、目的とする作業が与えられた場合に、それを実現し得る力制御戦略をいかに決定し、力制御系として設計／実現するかという問題である。これは、マニピュレータのエンドエフェクタ（あるいはそれが把持している物体）に外力が加わった際のマニピュレータの運動の記述問題である。言い換えると、力制御系における座標系選択と運動記述の問題であるといえる。もう一つは、力制御系を構成した場合の系全体の安定性の問題である。後者の安定性問題については、前章で説明した受動性 (Passivity) の概念が有効である。つまり、マニピュレータを、外界に対して受動的な特性を持つように制御することによって、系全体の安定性を保証することが可能である。この問題は Colgate, Hogan らによって議論されており、受動性が安定性を保証する鍵となることが示されている^[33]。これに対し、前者の座標系選択／運動記述問題については、力制御において基本的かつ重要な問題でありながら、従来あまり議論されずに力制御系が構成されてきた。一般に、ロボットなどの機械系では、座標系（一般化座標系）が与えられると、その座標系に対する力（一般化力）を求めることができるが、機械系に働く力が与えられても、その運動は座標系が与えられないと唯一に決まらないのである。座標系と運動の関係については、次節で詳しく議論する。

マニピュレータの力制御に関しては、これまでも、例えば以下のような代表的な制御方式が提案されてきた。

- 位置と力のハイブリッド制御
- スティフネス制御
- ダンピング制御
- インピーダンス制御

位置と力のハイブリッド制御などでは、環境との干渉力を直接制御するのに対し、ステイフネス制御、ダンピング制御、インピーダンス制御などに代表されるコンプライアンス制御法では力と運動の関係が制御系として記述される。一般に、位置と力のハイブリッド制御では、作業空間を環境に拘束される拘束空間とそれに直交する運動空間とに分割する。そして、拘束空間では作業環境との間に生ずる力及びモーメントを、また、運動空間ではマニピュレータ手先の位置及び姿勢を制御するように制御系が構成される。しかし、ハイブリッド制御に見られるような空間の分割手法は、暗にベクトルの直交性を仮定したものであり、このような手法で制御系を構成した場合、J.Duffy が指摘するように、長さの単位や基準座標の選び方によって直交性が成立しなくなるため、矛盾が生じてしまう^[42]。また、直交補空間の概念は、本来同一のベクトル空間において定義されるものであるため、運動の空間と力／モーメントの空間とを選択行列によって補空間の関係に結び付けること自体が誤りである。吉川らが提案している動的ハイブリッド制御系は、マニピュレータの手先拘束作業に必要な座標系を拘束条件に基づいて選定しており、矛盾なく制御系が構成されているが、一般の拘束超平面の記述は複雑なものになってしまう^[43]。一方、マニピュレータのステイフネス制御^[45]、ダンピング制御^[47]、インピーダンス制御^[46]など、力と運動の関係を制御するコンプライアンス制御系では、物体の運動は任意の点回りの並進運動と回転運動によって記述されることから、ある点回りの並進運動に対するコンプライアンスと回転運動に対するコンプライアンスに着目して制御系を構成することが多い。しかし、一般の多自由度のマニピュレータの場合には、回転運動に関するコンプライアンスの実現は複雑で理解しにくく、また、与えられた作業環境からの力に対してマニピュレータ手先の目標運動を記述する場合に、ある点回りの並進運動に対するコンプライアンスと回転運動に対するコンプライアンスで十分であるという保証はない。環境との干渉をとまなう一般的な作業を実現するため、より直感的で矛盾なく力制御系を構成できる新しい手法が必要とされている。

本章では、そのような外部との干渉を伴う一般の作業を実現する際の、マニピュレータの力制御における前述の様な問題に対する1つの解法として、我々がこれまで提案してきた仮想ツールダイナミクスに基づく力制御系設計法について説明する^{[19][20][21]}。仮想ツールに基づく手法では、作業に適した座標系を機械系として陽に表現して力制御系に導入することができる。また、それによって容易に矛盾なく力制御系を構成することが可能である。

3.2 仮想ツールダイナミクス

本節では、前述した力制御系設計時の諸問題を解決する一つの方法として、仮想ツールダイナミクスの概念を提案し、それをを用いて作業を機械系で表現することで環境との干渉を容易に実現できる汎用力制御系を構成する。まず最初に、力制御系と座標系の関係について考察し、力制御系において座標系の果たす役割とその重要性について論ずる。次に、仮想ツールダイナミクスの概念を導入し、汎用力制御系を設計する。

3.2.1 力制御と座標系

マニピュレータを用いて力制御を行う際、その座標系の選択は非常に重要である。通常の機械系では、剛体に生ずる運動は、剛体に作用する外力と作用点・剛体の質量分布・拘束条件などにより決定されるが、マニピュレータの力制御系の場合には外力に対する運動を記述して制御を行うため、同じ力が与えられても、力制御に用いる座標系の選び方によって結果が大きく異なってきてしまうからである。一般に、力制御系に用いる座標系が定めれば、加えられた外力に対するエンドエフェクタ（もしくはそれが把持する物体）の運動は一意に決定される。しかし、物体に加わる力が与えられたとしても、座標系が与えられなければ、運動は一意には定まらないのである。

例として、図 3.1 のような剛体の運動を考えよう。今、この剛体に対して図のように二つの異なる座標系 A, B を設定し、それぞれの座標系の原点を回転中心に選んだとしよう。剛体の運動は、その剛体上の任意の点回りの回転運動とその点における並進運動とに分けて考えられるため、剛体の運動を記述するという意味では両座標系 A, B は等価である。しかし、ここで、この剛体に対して同じ F という力が加わったとし、その際の剛体の運動を考えると、それぞれの座標系に対して剛体が異なる運動をすることは明らかである。このように、回転運動を含んだ剛体の運動を考える場合には、剛体に働く力が与えられても、その座標系によって、剛体の運動は全く異なったものになるのである。

さらに、もう一つの興味深い例を挙げておこう。図 3.2 に示すような平面の倣い作業を考えよう。ただし、物体は平面に沿って横方向に運動するものとし、また、物体底面には床面との間の摩擦力が働くものとする。今、この系に対し、次に示す三種類の異なる座標系（ここでは回転中心とする）を設定し、力制御系を構成した場合を考える。

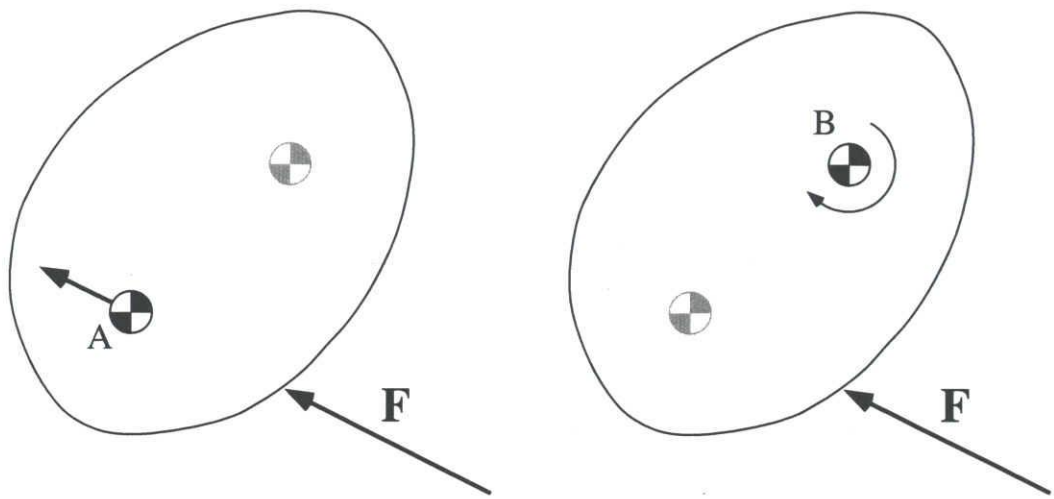


図 3.1: 力制御と座標系

- (a) 物体の上部
- (b) 物体の下方
- (c) 物体の下端

ここで、図のように床面との拘束を保ちながら物体を右方向に移動させるような状況を想定する。(a)のように回転中心を物体の上方に設定した場合、摩擦力によって回転軸には時計回り（物体を倒す方向）のモーメントが働き、物体の運動は不安定となり、場合によっては物体は転倒してしまう。

しかし、(b)のように回転中心が床面より下方にある場合は、発生するモーメントが復元力として作用し、物体の姿勢を安定に保ちながら運動を行うことができる。さらに、(c)のような場合を考えると、摩擦力の作用線は回転中心を通るため、回転方向に対しては摩擦力の影響を受けなくなることが予想される。(c)の場合がこの作業には最も適した座標系であろうということが分かる。

以上の例からも分かるように、力制御に用いる座標系の選択は、力制御の結果に大きく影響するのである。

3.2.2 仮想ツールダイナミクスとは

前節で述べたように、制御系に用いる座標系は、力制御の結果に大きく影響する。これまでに提案されてきた力制御系は、座標系に関する議論があまりなされておら

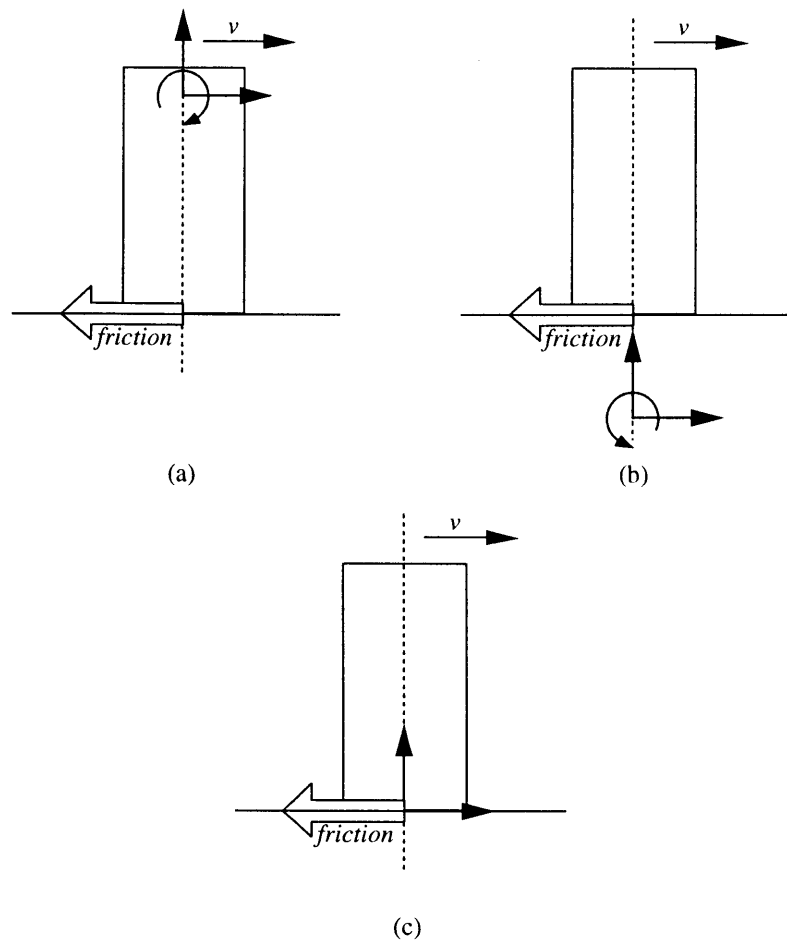


図 3.2: 座標系と物体の運動

ず^{（後注参照）}，一般の作業に対する記述が複雑で，直感的にわかりにくいものであった．また，その制御系の実現も難しい場合が多かった．

我々は，このような力制御問題の解決法として仮想ツールダイナミクス概念を定義し，仮想ツール特性に基づく新しい力制御系の構成法を提案してきた．仮想ツールとは，作業に適した望ましい運動特性を記述するための機構モデルで，マニピュレータのエンドエフェクタ又はそれが把持する物体（以下，単にエンドエフェクタと記述）に対してコンピュータ制御技術を用いて仮想的に取り付ける道具のような機械構造である．マニピュレータのエンドエフェクタに対して定義される仮想ツールダイナミクスの概念図を図3.3に示す．本手法では，作業環境中に仮想ツールのベースフレームを定義し，マニピュレータのエンドエフェクタが，あたかもある種の機械系リンク構造によって，環境に固定されていると考えるのである．つまり，外力

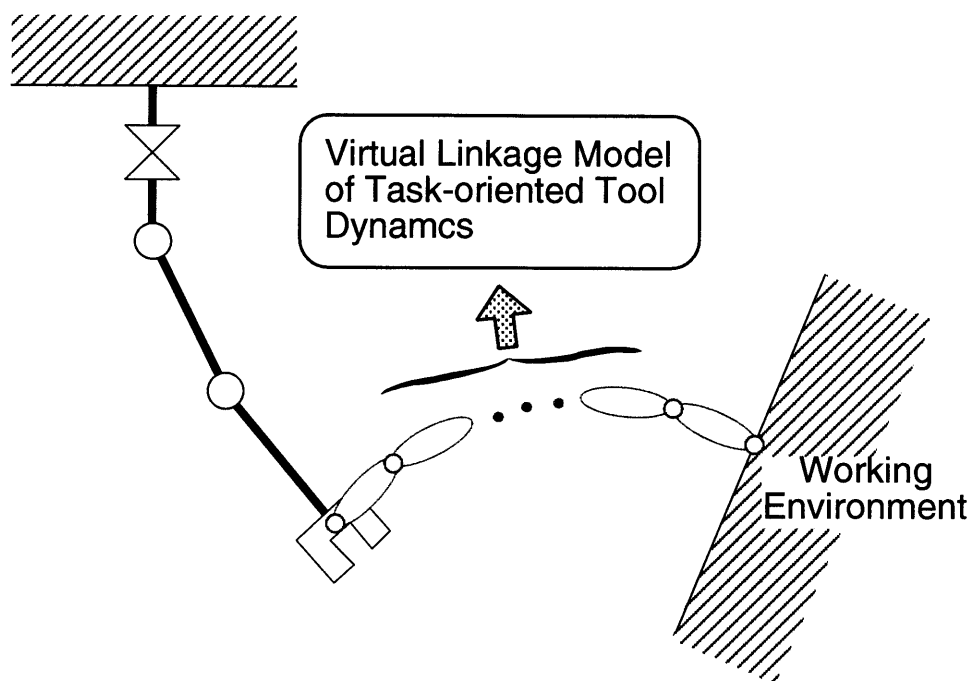


図 3.3: 仮想ツールダイナミクス概念図

に対するエンドエフェクタの運動を記述し制御するために、エンドエフェクタが回転機構やスライド機構などの要素から構成された道具のようなメカニズムによって支持されていると考えるのである。このように、仮想ツールに基づく力制御系の設計手法は、作業に適した道具のようなハードウェアデバイスの特性を、コンピュータ制御技術と力制御技術を用いてソフトウェアで実現したものであるとすることができる。

仮想ツールダイナミクスの一つの例を図 3.4 に示す。図 3.4 は図 3.2 で説明した壁面の倣い作業を行うための仮想ツールの一設計例を示したもので、マニピュレータのエンドエフェクタで把持した物体に対し、リンク機構が仮想的に取り付けられている。ここでは、簡単のため、倣い作業を紙面内の 3 自由度のみに限定し、3 リンク機構からなる仮想ツールを示した。図中、 x_1 は横方向の位置を決定するスライド機構、 x_2 は縦方向の並進バネ機構、 x_3 は把持物体の下端に接続された回転方向のバネ機構である。このように、仮想ツールは直感的な機械系の機構モデルを仮想的に表現したものである。次節では、仮想ツールを構成する機械要素について定義し、仮想ツールに基づく力制御系の設計の利点についてまとめる。

注) 仮想ツールダイナミクスに基づく制御系は，作業に適した特性を機械系で表現してシステムに持たせるもので，作業座標系設計の観点から見ると高瀬らの作業座標系の研究^[48]と同じであると言えるが，高瀬等の研究は座標系の選び方に重点を置いたもので，動特性などの運動特性については言及していない．我々が提案してきた仮想ツールに基づく手法では，周波数特性などの動特性までを考慮した力制御系の設計も可能である．

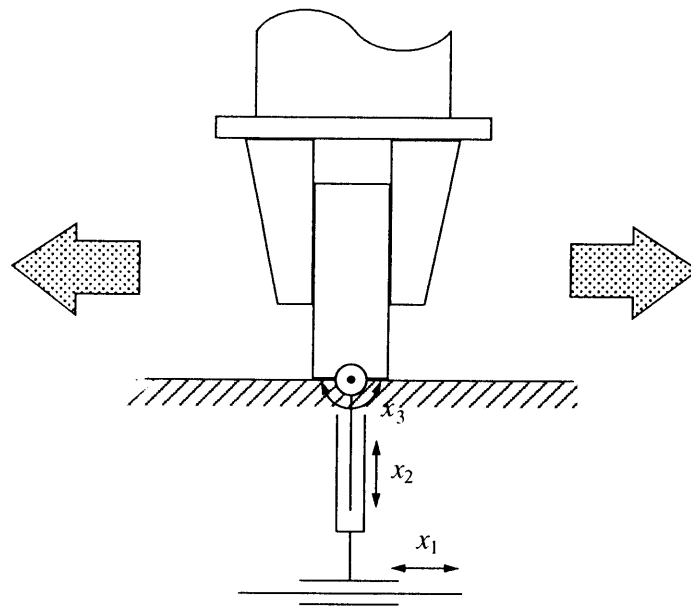


図 3.4: 仮想ツールの設計例（壁面の倣い作業）

3.2.3 仮想ツールダイナミクスの特徴とその利点

前述のように，仮想ツールは，外力に対するマニピュレータの運動を機械系のリンク機構として記述するものである．従って仮想ツールは，機構学的な対偶によって連結された個々の単順な機械要素の組み合わせとして表現できる．そのため，これまで蓄積されてきた機械系の設計ノウハウを利用して，直感的な特性設計が可能である．仮想ツールは力制御における座標系の関係を表すだけでなく，動特性をも表現するモデルであるため，外力に対する動力学的な運動表現ができるのが大きな特徴である．

仮想ツールを構成する基本要素は，大きく次の二種類に分けられる．

- 位置決め要素

これは，図 3.5 に示すような，回転または並進（スライド）の対偶によって結合された位置決め要素である．この要素によって，回転及び並進方向の位置が制御される．

- コンプライアンス要素

図 3.6 等のように，回転または並進対偶によって結合された要素で，回転方向及び並進方向に対して，バネ特性／ダンピング特性／インピーダンス特性などのコンプライアンス特性を持っている．この要素によって，力やモーメント及び外力に対する運動が制御される．

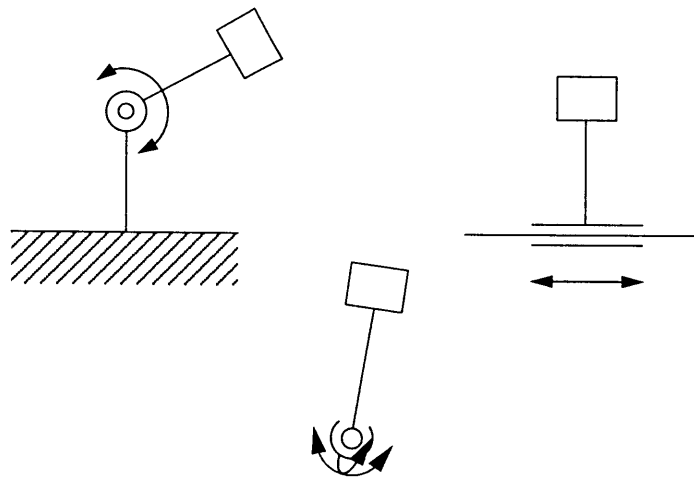


図 3.5: 位置決め要素

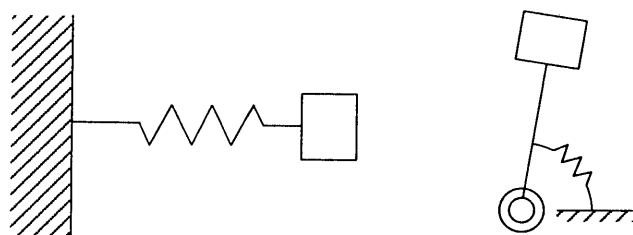


図 3.6: コンプライアンス要素

仮想ツール の概念を 導入し、力制御系の設計を行うことによる利点をまとめると以下のようになる。

- 1) これまで蓄積されてきた機械系の設計ノウハウを利用して、作業に適した特性を仮想ツールとして直感的に設計できる。また、設計された仮想ツールダイナミクスにより、加えられた外力とエンドエフェクタの運動との関係を直接に表現できる。
- 2) 外力に対するエンドエフェクタの運動と座標系との関係を、設計した仮想ツールを利用して、制御系の中に自然にかつ陽に導入できる。
- 3) 仮想ツールは動特性をも表現するモデルであるため、外力に対する動力学的な運動表現ができ、動特性を考慮した設計が行える。
- 4) 受動的な仮想ツールを用い、そのモデルに基づいた適切なコンプライアンス制御を行うことで、安定な制御系が構成できる。

3.2.4 仮想ツールの設計及び設計例

実際の仮想ツールの設計は次の手順で行う。まず最初に、与えられた作業に対して、作業目的の達成が支援されるように、かつ安定に作業を行えるように仮想ツール特性を設計する。ここで、系が安定となるように、外力の働く方向には受動的となるように機構が選ばなければならない。逆に、作業をするのに必要な機構を受動性が満たされるように表現できれば、それを基に安定な制御系を構成できる。次に、仮想ツールの一般化座標系を作業座標系として、設計した機構に基づくコンプライアンス制御系を構成する。

仮想ツールに基づく制御系の設計手順についての詳細は次節で述べることにして、ここでは、いくつかの作業例に対して仮想ツールの設計例を示しておく。

(1) 箱積み作業

作業の一つとして，図 3.7 の様な箱積み作業を考える．この作業の場合，箱を底面と側面に対してそれぞれ押し付ける必要がある．この押し付けを実現する仮想ツールの一例は図 3.8 のように表現できる．

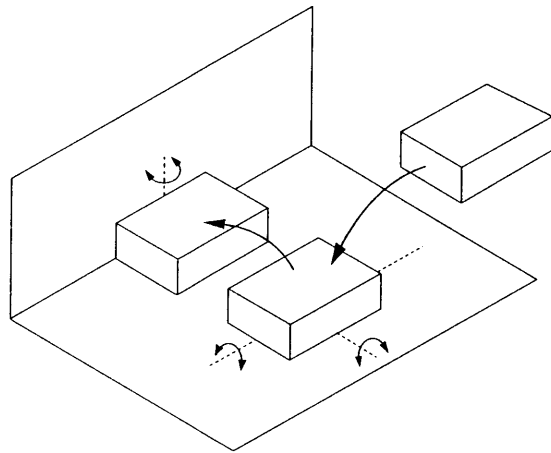


図 3.7: 箱積み作業

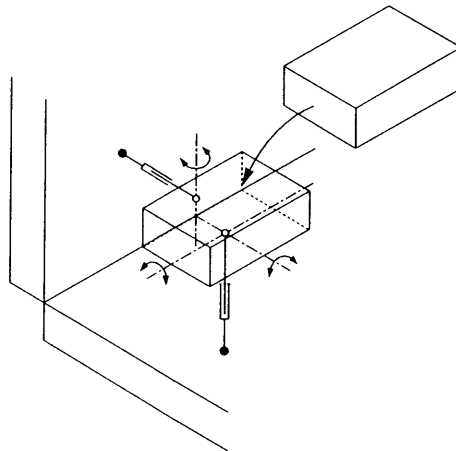


図 3.8: 箱積み作業の仮想ツール

(2) 球面のならい作業

図3.9のような、半径 r の球を想定し、その表面をマニピュレータにならわせる作業を考える。このような作業は、従来の位置と力のハイブリッド制御系でも取りあげられているが、デカルト空間上での拘束空間や運動拘束空間の記述はとても複雑なものになってしまう。この作業の目的は、ツールを球面上に拘束して中心方向の力を制御し、球面上を自由に運動させることであるから、極座標系を基に機構を設計し、仮想ツールで表現すると図3.10のようになる。

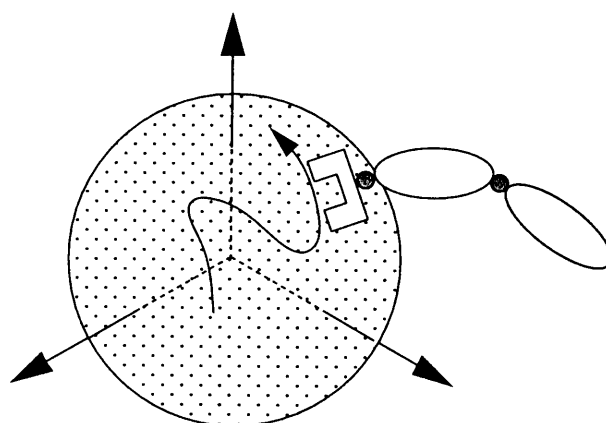


図 3.9: 球面の倣い作業

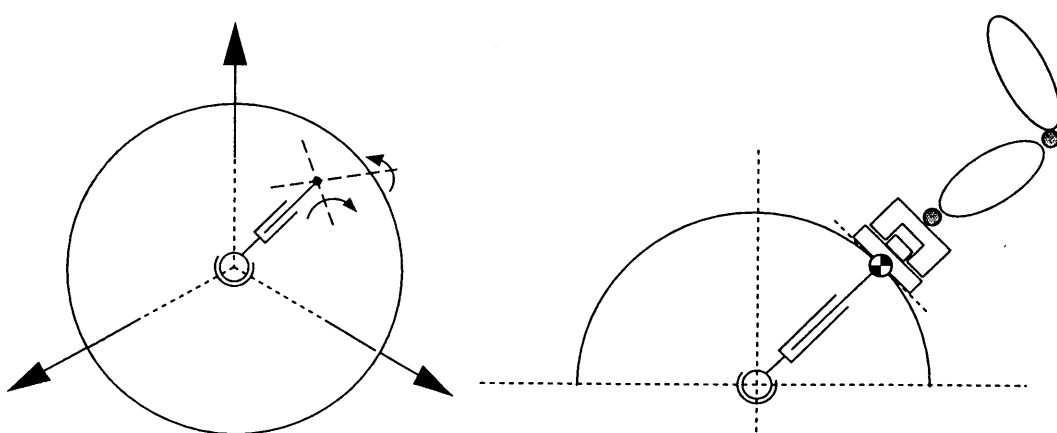


図 3.10: 球面倣いの仮想ツール

(3) 直交しない2平面への拘束作業

最後に、明らかに座標系の直交性が成立しない例を挙げよう。図3.11のように、直交していない二平面へツールの先端を押し付けることを考える。この作業は、(1)の場合と同様に二平面拘束の問題であるが、拘束される平面どうしが直交していないため、デカルト空間では座標系の設定が難しい。しかし、仮想ツールを用いて、各拘束面に対して別々に機構を設計することによって、二つの平面の法線方向の力を陽に制御することができる。この作業に対する仮想ツールの一例を図3.12に示す。

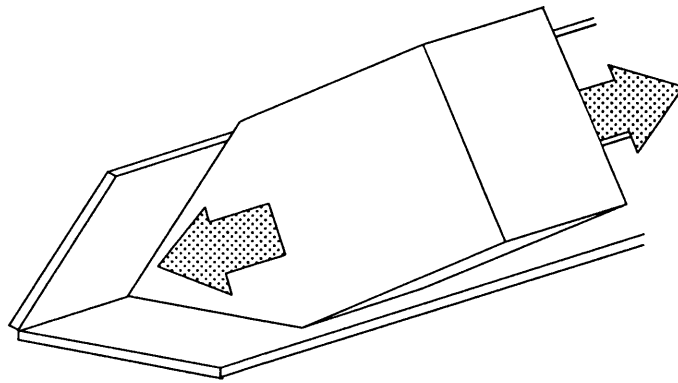


図 3.11: 直交しない二平面への拘束

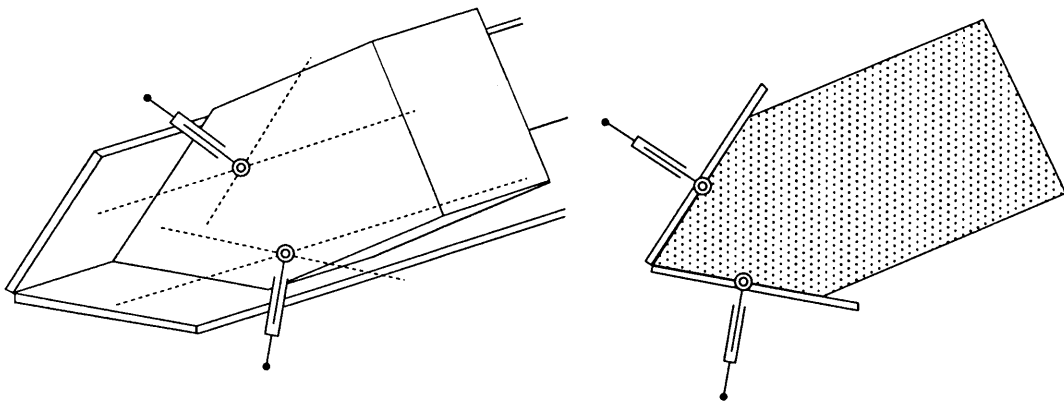


図 3.12: 二面拘束の仮想ツール

3.3 仮想ツールに基づく汎用力制御系の設計

前節では、環境との干渉を伴うような力制御問題において、仮想ツールの概念を導入することで力制御における座標系を陽に表現する方法を提案した。本節では、仮想ツールに基づく力制御器を実際にマニピュレータで実現するための、仮想内部モデル追従制御系を用いた制御系の設計手法について説明する。

3.3.1 制御系の設計手順

ここでは、与えられた作業に適するように設計された仮想ツールの特性を、実際のマニピュレータを持たせるための力制御系の設計を行う。外力が作用した場合の仮想ツールの各構成要素の運動を考慮して、制御は次のアルゴリズムに従って行うことにする。

- 1) 仮想ツールの各構成要素（仮想ツールの各関節）に対し、仮想ツール座標系（一般化座標系）を定める。
- 2) マニピュレータに作用する外力を仮想メカニズム座標系で表現し、各構成要素に作用する力（一般化力）を求める。
- 3) 個々の機構のモデルの特性に基づいて、コンプライアンス制御及び位置制御に関する特性計算を行い、仮想ツール全体としての運動を求める。
- 4) マニピュレータが、仮想ツールの運動と同一の運動をするように制御を行う。

3.3.2 マニピュレータの汎用力制御系の実現

仮想ツールの基本構成要素の一つであるコンプライアンス要素（力制御要素）を実現する方法には何種類かあるが、本研究では、図3.13に示すようなインピーダンスモデルを用いることにする。また、マニピュレータの運動がインピーダンスモデルと同一の運動を行うように制御系を構成する方法は、これまでいろいろと提案されており、本研究では、小菅等が提案した仮想内部モデル追従制御系^{[10][11]}を用いることにする。これは、追従すべき運動モデルに対してセンサからのフィードバックを行い、制御系に希望の動特性を持たせる制御系である。このモデルは仮想内部モデル(V.I.M.)と呼ばれる。以下、仮想内部モデル追従制御系について説明する。

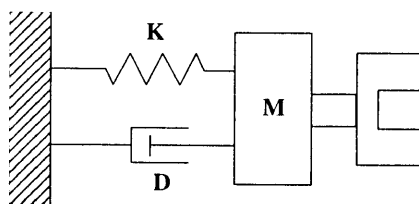


図 3.13: インピーダンスモデル

仮想ツール座標系

図 3.14 のようにマニピュレータに把持された物体に対して仮想ツール特性を考える。そして、ここでは簡単のためマニピュレータは冗長性を持たないものとし、仮想ツールの各関節の変位を $x = [x_1, \dots, x_6]$ と置く。前で述べたように、仮想ツールは物体の位置／姿勢を一意に決定するような機構を持つので、 x は物体の運動を表現する一般化座標として用いることができる。以下、一般化座標 x を仮想ツール座標系と呼ぶ。

物体の位置／姿勢はマニピュレータの関節変位を用いても表わすことができるので、マニピュレータの関節変位 θ と仮想ツールの関節変位の関係は次式のように表わすことができる。

$$x = T(\theta) \tag{3.1}$$

マニピュレータの運動方程式とその線形化

はじめに、非線形フィードバックを用いて、マニピュレータの線形化を行う。ここでは、簡単のためマニピュレータの自由度を 6 自由度とし、マニピュレータは冗長性を持たないものと仮定する。マニピュレータの運動方程式は、次式で記述される。

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V\dot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau + \tau_d \tag{3.2}$$

ここで、

θ : 6×1 関節変位ベクトル

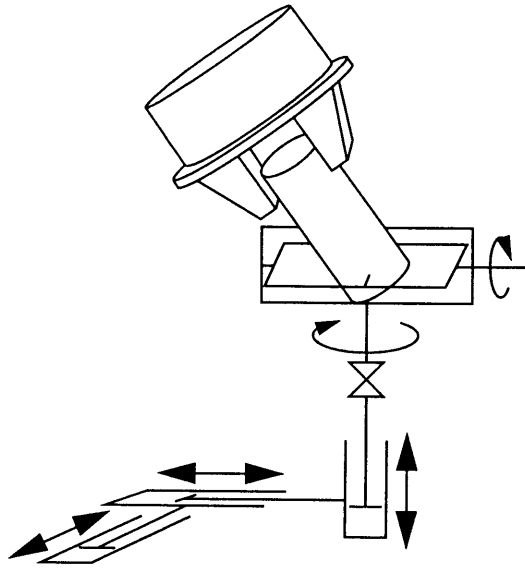


図 3.14: 仮想ツール座標系

- $M(\theta)$: 6×6 正定対称な慣性行列
- V : 6×6 粘性係数行列
- $C(\theta, \dot{\theta})$: 6×1 コリオリ力, 向心力を表すベクトル
- $G(\theta)$: 6×1 重力項を表すベクトル
- τ : 6×1 関節入力ベクトル
- τ_d : 6×1 外力に相当する関節入力ベクトル

である.

前節で述べたように仮想ツール座標系 $x \in R^6$ と関節変位ベクトル θ との関係は式 (3.1) のように表わすことができるので, 式 (3.1) を用いて, 式 (3.2) を書き換えると,

$$M(\theta)J^{-1}(\theta)\{\ddot{x} - \dot{J}(\theta)\dot{\theta}\} + V\dot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau - J^T(\theta)f \quad (3.3)$$

となる. ただし, $J(\theta)$ は, 次式で定義されるヤコビ行列を表し, 作業空間内では逆行列 J^{-1} が存在すると仮定する.

$$J(\theta) \equiv \frac{\partial T(\theta)}{\partial \theta} \in R^{6 \times 6} \quad (3.4)$$

また、 f は、エンドエフェクタに加わる力/モーメントを、仮想ツールの座標系に作用する等価な力/モーメントに変換した一般化力であり、次式のように定義する。

$$f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

ここで、非線形フィードバックとして

$$\tau = M(\theta)J_c^{-1}(\theta)\{u - \dot{J}_c(\theta)\dot{\theta}\} + V_c\dot{\theta} + C_c(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + J_c^T(\theta)f \quad (3.6)$$

を考える。 u はシステムへの新たなる入力であり、添字 c は同定されたシステムへのパラメータを用いた計算値であることを示している。このような非線形フィードバックを行うことにより、マニピュレータは絶対座標系で以下のように線形化される。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I_6 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I_6 \end{bmatrix} u \quad (3.7)$$

一般に同定されたパラメータの誤差などがあるために式(3.6)を正確に計算することはできない。しかし適当な制御則を選択することで、このような誤差の影響を軽減することができる。また、ダイレクトドライブマニピュレータなど、負荷変動や外乱などの影響が大きい場合には、 H_∞ 制御などのロバスト制御系を用いることも可能である。(ロバスト制御系の設計については、後章の油圧マニピュレータの制御系設計において説明する。)

制御系の設計

作業に適した仮想ツールの運動を実現するために、仮想ツール座標系において位置決め要素及びコンプライアンス要素の特性を次式で表すことにする。

$$M_m\Delta\ddot{x} + D_m\Delta\dot{x} + K_m\Delta x = S(f - f_d) \quad (3.8)$$

ここで、 f はマニピュレータのリストに取り付けられたセンサにより検出される力/モーメントを仮想ツール座標系で表したものである。 f_d は、仮想ツールの各関節

に発生させるべき一般化力であり, S は, 要素が 1 または 0 の対角行列で, それに対応する要素が 1 の場合は, コンプライアンス要素を表し, 0 の場合は, 位置決め要素を表す. 仮想ツールの運動は, 仮想ツールに対する目標軌道 x_d を用いて次式のように表せる.

$$x_m = x_d + \Delta x \quad (3.9)$$

ただし, x_m は修正された目標軌道である. この式 (3.8) と式 (3.9) で表される仮想ツールモデルを制御系に導入することにより, マニピュレータが仮想ツール座標系で発生する力/モーメント f_d を平衡点とする一種のインピーダンス制御が実現される.

コンプライアンス要素を適切に配置することによって, ロボット・システムに多少の幾何学的な誤差が存在しても, 対象物や作業環境に対して過大な力を加えることなく, 作業を行うことが可能となる. また, 式 (3.8) は以下の形に書き換えることができる.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_m \\ \dot{x}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I_6 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ \dot{x}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I_6 \end{bmatrix} u_m \quad (3.10)$$

ただし,

$$u_m = \ddot{x}_d - M_m^{-1} D_m (\dot{x}_m - \dot{x}_d) - M_m^{-1} K_m (\dot{x}_m - \dot{x}_d) - M_m^{-1} S (f - f_d) \quad (3.11)$$

この式 (3.10) はマニピュレータに対して目標軌道を生成する参照モデル (V. I. M.) であり, x_m は仮想目標軌道と呼ばれている.

最後に, マニピュレータを仮想目標軌道 x_m に追従させるための制御則を導出する. 式 (3.10) と式 (3.7) の差をとり, 次式の誤差システムを考える.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I_6 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I_6 \end{bmatrix} \hat{u} \quad (3.12)$$

ただし,

$$\begin{aligned} e &\equiv x_m - x \\ \hat{u} &= u_m - u \end{aligned} \quad (3.13)$$

この場合，式 (3.12) の誤差システムを安定化することで，軌道追従型の制御系が構成できる．そのような制御則の一つは，次式で与えられる．

$$\hat{u} = K_1 e + K_2 \dot{e} + K_3 \int_0^t e dt \quad (3.14)$$

したがって，システムへの制御入力は，

$$u = u_m - \hat{u} \quad (3.15)$$

と計算される．この u より，式 (3.6) を用いて，実際のマニピュレータへの入力は計算される．仮想ツールを用いた力制御系の構成を図 3.15 に示す．(ただし，V.I.M. のモデル部には仮想ツールのモデルを含んでいる．) また，制御するマニピュレータによっては，マニピュレータの各関節に対して，制御系を直接構成したほうが良い場合がある．この場合の，仮想内部モデルに基づく制御系を図 3.16 に示す．

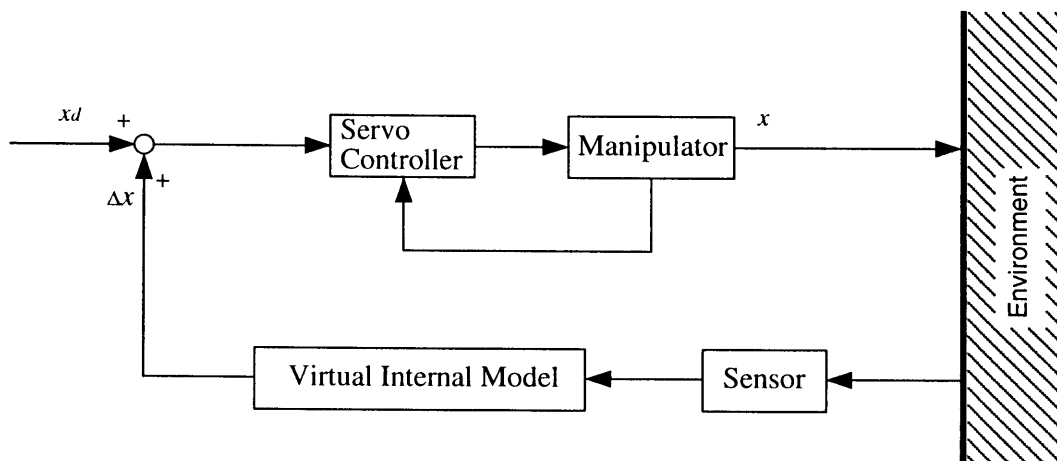


図 3.15: 仮想ツールを用いた力制御系の構成

3.4 実験

本論文では，前述の仮想ツール特性を利用して，遠隔操作システムの操作性改善を行っている．ここでは，仮想ツールに基づく力制御系の有効性を確認するために，単体のマニピュレータを用いて力制御実験を行い，その結果を示す．システムの構

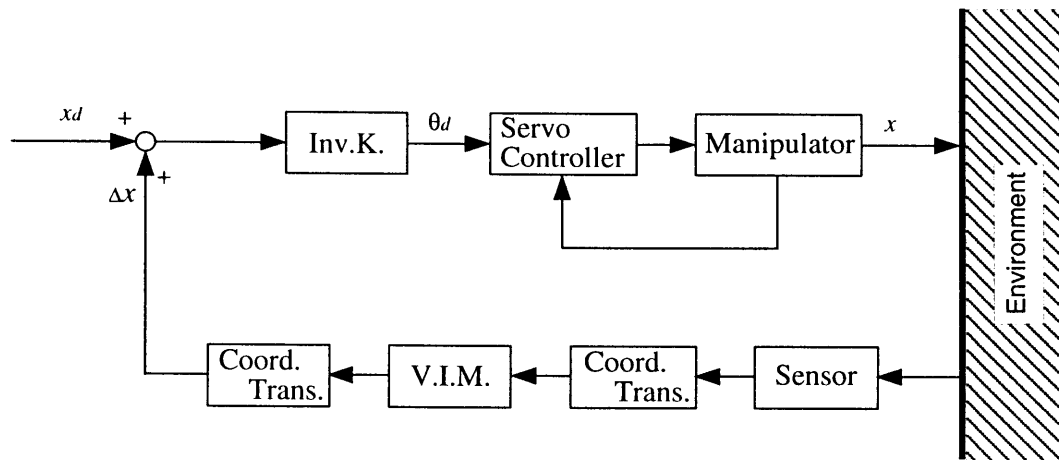


図 3.16: 関節ベースの仮想内部モデル追従制御系

成にあたっては、マニピュレータは多関節型6自由度の電動マニピュレータを用いることとし、マニピュレータのリストに取り付けた6軸力/トルクセンサで、エンドエフェクタに加わる力を測定して制御に利用した。

実験では、図 3.17 に示すように、円筒面への倣い作業を想定し、図 3.18 に示すような仮想ツールを設計しマニピュレータで実現した。そして、実際に、この仮想ツールの特性を利用して円筒面への倣い作業を実行した。ここで、仮想ツールに基づく制御系が有効に働いていることを確認するために、作業環境としては、設計時と異なる曲率を持った曲面（正確な円筒面ではないことに注意）を使用し、設計時からずらした位置に設置して実験を行った。

図 3.19 から図 3.21 に実験結果を示す。実験は6自由度の仮想ツールを用いて行われたが、円筒面の倣い作業は後章の遠隔操作システムの実験においても議論されるため、ここでは倣い作業の様子が分かるように特徴的な自由度の結果を抜き出して紹介する。本実験では、仮想ツール座標 θ_1 を位置制御して横方向に曲面の倣いを行った。その時のエンドエフェクタの先端の動きを、図 3.19 に示す。これは、実際にマニピュレータが倣った曲面の形状を表している。今回の実験では仮想ツールの設計時と異なる曲面を倣わせているにもかかわらず、仮想ツールの特性に支援されてマニピュレータは曲面から離れることなく正確に倣い作業を実行した。図 3.20 に、仮想ツール中の半径方向のコンプライアンス要素 r の動き及びその時の環境からの反力を示す。ここで、 r 方向の運動は仮想ツールの設計値からのずれ Δr として表されている。正確な倣いを実現するため、仮想ツールに基づく力制御系が有効に働い

て、位置の誤差 (20mm 程度) を吸収しているのが分かる。また、図 3.21 は、 θ_2 方向の運動と環境から受けたモーメントを示している。同様に、倣い面の角度のずれ (0.06rad 程度) を仮想ツールが吸収している様子が分かる。本実験では、構成した制御系によりが仮想ツールの特性が実現できることを確認した。また、作業に適した仮想ツールを設計することで、環境の誤差をコンプライアンス制御系で吸収でき、仮想ツール特性が作業に対して有効に働くことを確認した。

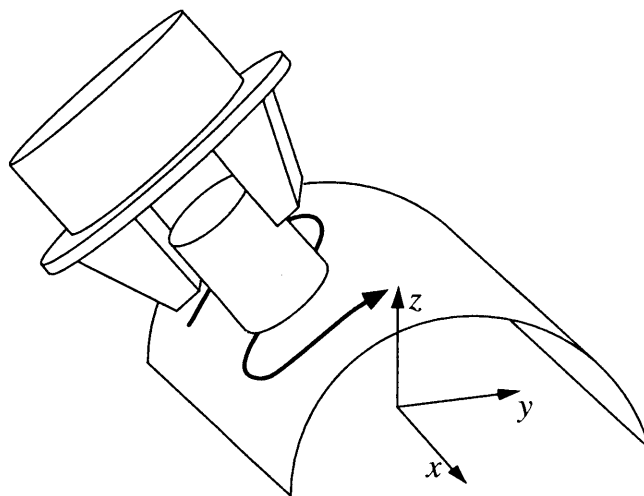


図 3.17: 円筒面の倣い作業

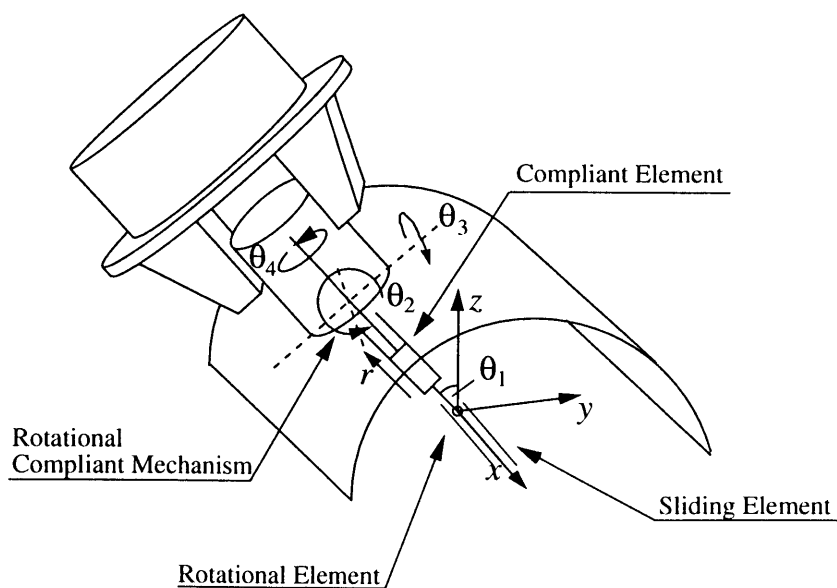


図 3.18: 円筒面の倣いを実現する仮想ツール

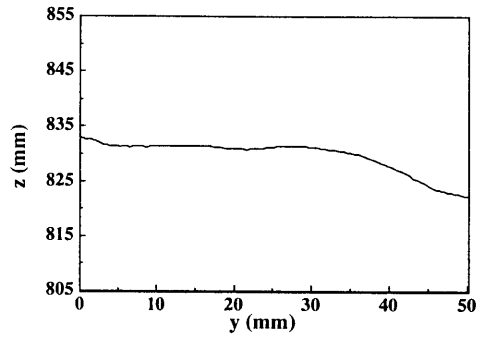


図 3.19: 実験結果 1 倣い作業時のエンドエフェクタ先端の動き

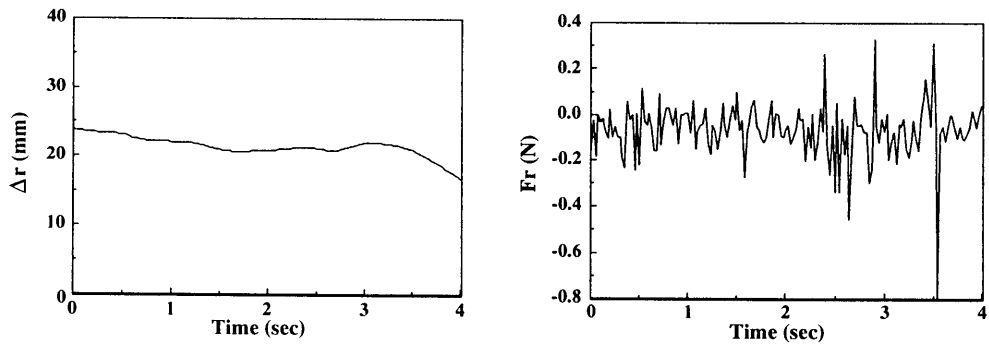


図 3.20: 実験結果 2 r 方向の運動及び環境から受けた力 (仮想ツールが半径方向の位置誤差を吸収している様子)

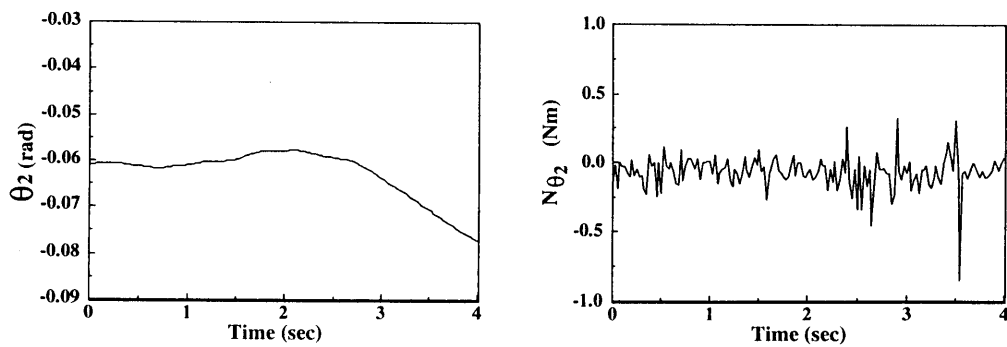


図 3.21: 実験結果 3 θ_2 方向の運動及び環境から受けたモーメント (仮想ツールが倣い面の角度誤差を吸収している様子)

3.5 まとめ

ロボットと作業環境との機械的な干渉をどのように制御するかという問題は、ロボットを用いて一般的な作業を行う場合に避けて通れない重要な問題である。このような、環境との干渉を伴う作業では、両者間の機械的な干渉力を考慮して制御系全体を設計しなければならない。そのためには、与えられた作業に対して力制御戦略をいかに決定し、また、外力に対するマニピュレータのエンドエフェクタの運動をいかに記述するかが重要となる。従来も力制御に関する様々な研究が行われてきたが、位置と力のハイブリッド制御に代表される多くの研究は、J.Duffyが指摘するように座標系の直交性を暗に仮定しており、力制御系もその仮定の元に成り立っていた。しかし、一般に環境との干渉を伴う作業においては、直交性が仮定できない場合も多く、長さの単位や基準座標の選び方によっても直交性が成り立たなくなってしまうため、エンドエフェクタの位置と姿勢を制御する必要のある一般の6自由度マニピュレータ制御には適用しにくい。

本章では、ロボットマニピュレータの力制御に関する諸問題について考察し、これらの問題の一つの解決法として仮想ツールを用いたマニピュレータの力制御系の設計法について説明した。まず最初に、力制御と座標系との関係に着目して力制御において座標系が果たす役割について考察した。ここでは、力制御において、用いる座標系を定めれば外力に対する物体の運動が一意に決定されるが、外力が与えられたとしても座標系が与えられなければ、運動は一意には定まらないことを示した。座標系の選び方によって物体の運動が変化する様子を例題により紹介し、作業に適した座標系が力制御にとって有効に働くことを示した。次に、提案する仮想ツールダイナミクス概念について説明した。仮想ツールはマニピュレータ手先の運動特性を記述するための機構モデルである。仮想ツールを用いると、与えられた作業に対し機構モデルとして座標系を陽に定義することが可能であるため、これまで蓄積されてきた機械系の設計のノウハウを利用して、より直感的に矛盾無く力制御戦略を決定できる。また、仮想ツールは動的なパラメータを含む動力学モデルであるため、周波数特性などの動特性を考慮した設計が可能であるという利点がある。次に、この仮想ツールの特性をマニピュレータで実現するための力制御系の構成について説明した。まず、仮想ツールに基づく力制御系の設計手順を示し、次に仮想内部モデル(V.I.M)追従制御の手法を利用したマニピュレータの制御系設計を行った。最後に、提案した仮想ツールに基づく力制御系の有効性を確認するため、円筒面の倣い作業を例に取り挙げ、マニピュレータを用いて力制御実験を行った。作業環境として設計時と異なる曲面を用いて作業を行ったが、仮想ツール特性として設計され

たコンプライアンス要素がその誤差を上手く吸収し、倣いが正確に行われるようすが確認できた。

次章で提案するテレマニピュレータの Task-oriented (タスク指向型) 制御では、オペレータを含む人間・機械系に仮想ツールの概念を適用することを考える。この Task-oriented 制御は、作業に適した道具のような特性を仮想ツールダイナミクスとして設計し、マニピュレータにその特性を持たせることによって、システムの操作性を改善しようとするものである。

第4章 受動性に基づくテレマニピュレータのTask-oriented制御 ～仮想ツールを用いたシステムの操作性向上～

テレマニピュレータのような遠隔操作型のシステムを用いて作業を行う場合、その指令塔となるオペレータには、非定常な作業を正確にかつ安全に遂行することが要求される。そのため、このようなシステムでは操作に熟練を要し、オペレータには相応の訓練期間が必要であった。本研究では、オペレータの作業を支援することで作業時の負担を軽減し、より実用的な遠隔操作システムを実現することを目指す。そのためには、システムは安定でしかも操作のしやすいものでなければならないため、本章では、前章で論じた作業に適した仮想ツールの特性を利用し、その特性をテレマニピュレータに持たせることで、道具を扱うような自然な感覚で作業の行えるシステムを構築することを考える。まず最初に、実用遠隔操作システムに必要な要素に関してもう一度まとめておく。次に、従来の制御方針であるマスタースレーブ系の理想応答の問題点を指摘し、提案するTask-oriented制御系の設計方針について説明する。次に、遠隔操作を考慮して半自律化された仮想ツール特性を定義し、第2章で説明された受動性の条件を満足するようにTask-oriented制御系を構成する。また、最近のマクロ・マイクロマニピュレーションシステムの需要に対応すべく、任意にパワースケーリングを行えるよう制御系を拡張する。最後に、遠隔操作実験を行って、提案するTask-oriented制御系の有効性を検証する。

4.1 実用遠隔操作システムの実現を目指して

ロボットマニピュレータを介して間接的に作業を行うテレマニピュレーションシステムでは、これまで工場などで実用化されてきた産業用ロボット単体での繰り返し作業とは異なり、人間に与える負担や作業効率、安全性など様々な問題に対して特別の注意を払わなければならない。実用的なシステムを構築するためには、どの

ような観点からその特性を考えていけば良いのであろうか？ ここでは、本研究でのアプローチを紹介する前に、テレマニピュレーションシステム設計時に考慮しなければならない、いくつかの重要な課題についてまとめておくことにする。本研究は、これらの重要な要素をふまえながら新しい遠隔操作システムの在り方を提案するものである。

操作性・臨場感向上問題

テレマニピュレーションシステム等の人間－機械系協調システムは、人間からの直接指令に基づいて、より複雑で非定常な作業を可能とするものであるが、一般に、作業時のオペレータの負担は人間自身が直接作業を行うのに比べて大きい。特にオペレータと作業環境とが離れた場所に存在するテレマニピュレーションシステムでは、スレーブ側の作業情報が適切な形でオペレータに提示されなければ、オペレータにとっては暗闇の中で手探りで作業しているに等しい。オペレータに如何に上手く環境側の状況を認識させ、如何に上手くマニピュレータと一体感を持って作業を行わせるかが、実用的なシステム構築の鍵となってくる。この操作性向上問題に対しては、バイラテラルフィードバックを始めとする多くの研究がなされているが、本研究では人間と道具との関わり合いをヒントに従来とは異なる観点から新しい遠隔操作システムを構成していく。

安定性問題

制御工学では、構成した制御系の安定性は重要な問題として必ず議論される。遠隔操作システムの制御系設計においても安定性問題は重要視され、従来より多くの研究者によってテレマニピュレータの安定性解析が行われてきた。しかし、これまで議論されてきた安定性解析は、そのほとんどが系としてマニピュレータのみを考えたシステムの部分安定性に関するものであった。現実には、人間や環境の特性が閉ループ系の中に含まれるため、部分安定性を保証しただけの従来の制御系では、作業時に不安定な挙動が現れることがあった。近年、人間－機械系の安定性解析には受動性に基づく手法が有効であることが報告され、新しい安定性解析手法として注目されている。本研究では、受動性に基づく解析により、オペレータや環境の特性によらず安定に作業を行なえるシステムを構築していく。

安全性問題

ロボットの実用化の歴史は、ロボットと人間とを隔離するところから始まったと言っても過言ではない。実際に、機械部品などの自動化工場では、人体に危害が加わらないようにロボットの作業範囲に人間が侵入できないよう配慮され、安全性が確保されている。しかし、子供の頃、だれもがSF小説や漫画を読みふけり未来のロボットに思いを馳せたように、これらはロボットの実用化のほんの一つの方向性でしかないのではないだろうか。近年になってロボットと人間との関係が見直されつつあり、人間と接触することを想定した人間-機械協調システムが注目されている。テレマニピュレータなどの人間-機械協調システムが、これまでのような閉じた空間だけでなく、真の意味で実用化されるためにも、人間との協調を考慮したシステムへの安全性への配慮は最も重要な課題のひとつであると言える。

パワースケーリング問題

近年の医療技術やマイクロ技術の進歩に伴って、マスターとスレーブでスケールの異なる新しいテレマニピュレーションシステムが遠隔医療やマイクロマシン等の組み立てに応用されようとしている。これらは、マクロマイクロマニピュレータ、もしくはスケールドテレ、マニピュレータと呼ばれ、遠隔操作システムにおける近年の重要な研究領域の一つとなっている。図 4.1 に概念図を示す。マクロマイクロシステムでは、マスタースレーブ間の力と運動の応答を自由にスケールする技術が要求される。しかし、一般には、マスタースレーブ系に対してパワーのスケールを行うとシステムの安定性が害されることが知られており、システムの安定性を保ちながら、実用的なマクロマイクロシステムを実現することが近年の大きな課題である。

通信遅れの補償問題

近年、遠隔医療やネットワークロボティクス等の需要が高まってきている。しかし、テレマニピュレーションシステムでは、マスタースレーブ間の距離が離れるにつれて両者間の情報伝達に要する時間も増加してしまう。一般に、このような通信遅れ（無駄時間）は閉ループ系の安定性を悪化させることが知られており、システムの通信遅れが無視できない場合には遅れの分を考慮した制御系設計が必要となる。本研究では、近年提案されたスキッタリング変換の手法を用いることにより通信部の遅れを補償し、通信遅れのある場合でも安定にパワースケーリングの行えるテ

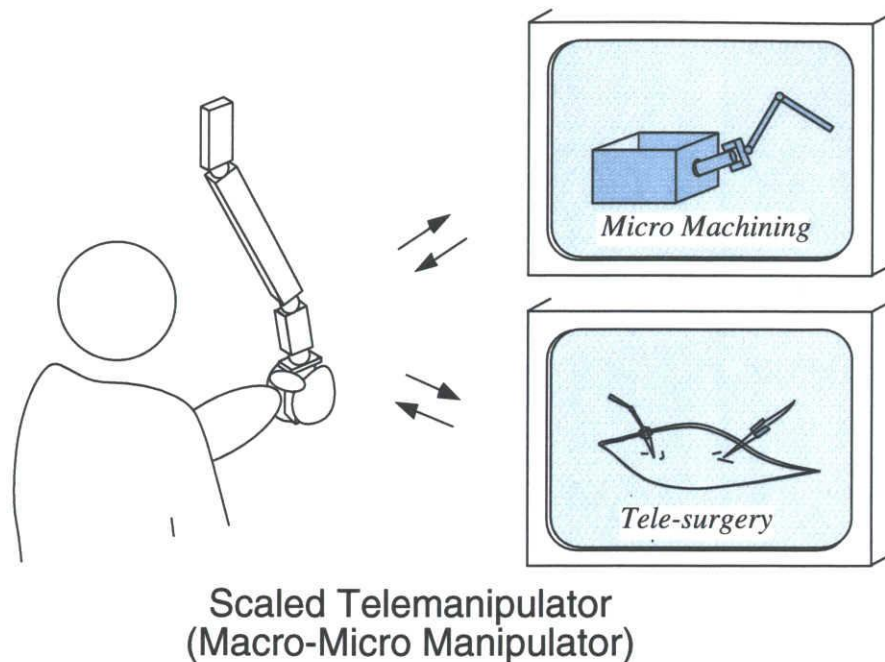


図 4.1: マクロマイクロマニピュレーションシステム

レマニピュレーションシステムを構築する。ただし、本章では無駄時間が無視できる場合の高性能なシステムの構築について議論し、この問題については後章にて取り扱うことにする。

4.2 遠隔操作システムにおけるシステムの理想応答とその問題点

テレマニピュレーションシステムは、オペレータが作業の指令を直接与えることができ、未知環境での非定常な作業も行えるため、多くの分野に応用されている。本節では、遠隔操作システムに関する従来の研究のいくつかを紹介し、これまでのマスタースレーブ系の制御系が目標としてきた理想応答の問題点について論じる。

遠隔操作システムの開発の歴史は古く、機械式のマニピュレータに始まり現在に至るまで、作業の臨場感を向上させるために多くの制御法が提案されてきた。中でも一般的に良く知られているのが、バイラテラルフィードバックと呼ばれる技術である。図 4.2 に示すように、バイラテラルフィードバックはマスタースレーブ間で双方向に情報伝達を行う制御手法である。バイラテラルフィードバック制御では、ス

スレーブマニピュレータは、オペレータによって操作されるマスターマニピュレータの運動に追従するように制御される。また、マスターマニピュレータは、スレーブマニピュレータが環境から受ける反力をオペレータに対してフィードバックするように制御される。オペレータはリモートサイトの作業情報を得ながら指令を与えることができるため、バイラテラルフィードバック技術を用いることにより、作業の臨場感を向上させることができる。しかし、理想的なバイラテラルフィードバック系の構成は難しく、より高性能なバイラテラルフィードバック系の実現を目指して、多くの研究が行われてきた。小菅ら^{[10][13]}は仮想内部モデル追従制御系により、仕事に適した特性をマスターとスレーブの間に仮想内部モデルとして持たせてインピーダンス制御系を構成し、システムの操作感を向上する方法を提案した。JPL^[22]では、マスターとスレーブの間にインピーダンス特性を持たせることにより、システムの安定性を向上させる方法 (Shared Compliant Control) を提案した^(後注1参照)。また、館ら^[23]は、マスタースレーブ制御系の分類を行い、作業に臨場感を持たせるために、インピーダンス制御型マスタースレーブマニピュレーションシステムを提案した。Rajuら^[30]やHannafordら^[27]は、オペレータや環境の特性をモデル化しマスタースレーブ系全体の安定性解析を行った。また、横小路ら^[25]は、介在インピーダンスモデルを用いて安定に制御系を構成する方法を提案した^(後注2参照)。

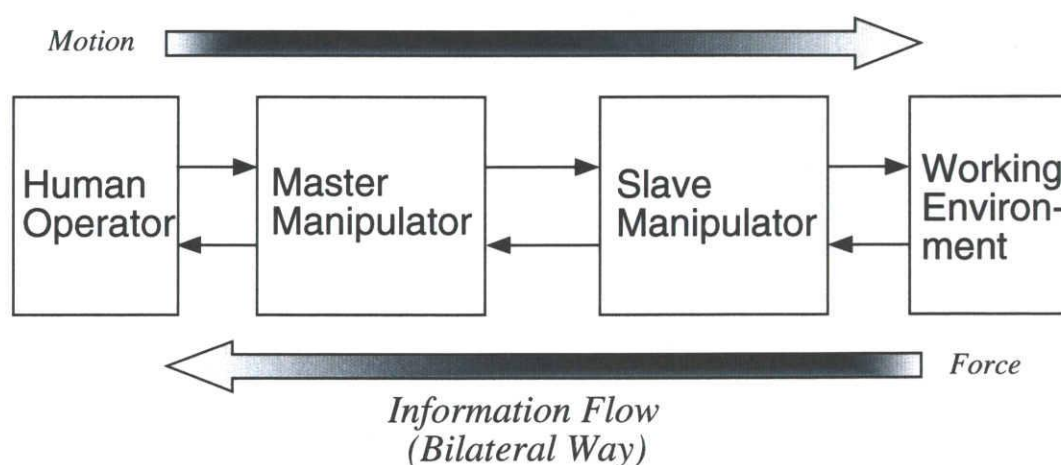


図 4.2: バイラテラルフィードバック技術

しかし、理想的なバイラテラルフィードバック系の構成を目指した多くの研究には大きな問題点が存在する。Dudragneら^[34]や館ら、横小路らなど、これまでの多くの研究では、マスタースレーブシステムの理想応答が定義され、理想応答を実

現することが、すなわち理想的なバイラテラルフィードバック系の実現に繋がると考えられてきた。マスタースレーブ系における理想応答とは、オペレータがあたかも直接に対象物を扱っているかのような感覚で作業を行うことができるようなマスタースレーブ系の応答のことである。マスタースレーブ系の理想応答は、一般には次に示すような2つの条件によって定義される。

マスタースレーブ系の理想応答

- 1) マスターマニピュレータとスレーブマニピュレータの位置の応答（運動）が、扱う対象物によらず常に一致する。
- 2) マスタースレーブ系の力の応答、すなわち、オペレータの加える操作力とスレーブマニピュレータの作業力が扱う対象物によらず常に一致する。

これらの条件が同時に満たされる時、マスタースレーブ系の理想応答は達成されるのである。しかし、図4.3に示すように、実際に理想応答を実現するためには、オペレータと環境との間に存在するマスターマニピュレータとスレーブマニピュレータの持つ実ダイナミクスの影響を完全に打ち消して、オペレータにテレマニピュレータを介さずに対象物を直接操っている感覚を与えなければならない。言い換えると、マスターマニピュレータがあたかも質量の無い理想的な剛体のロッドで、スレーブマニピュレータと結ばれている状態を作り出さなければならない。実ダイナミクスの影響を完全に打ち消すのは非常に困難で、マスタースレーブ系の位置と力の応答を同時に一致させるためには、制御系のゲインを無限大にするなどの手段をとる必要がある。そのため、完全な理想応答の実現は極めて難しい。また、たとえ理想応答を実現したとしても、遠隔での作業であることに変わりはなく、素手で直接作業を行っている感覚は得られないであろう。また、理想応答は作業の臨場感の向上のみに重点を置いており、オペレータの負担自体は軽減されず、熟練者以外の操作は難しい。

そこで、本論文では、実現不可能な理想応答を追求するのではなく、マスタースレーブ系の持つダイナミクスを作業に生かすことでオペレータの負担を軽減し、システムの操作性を向上することを考える。次節では、提案する Task-oriented 制御系の概念について説明し、作業を安全確実に行える遠隔操作システムの構成手法について論じる。

(注1, 2) JPLで提案している Shared Compliant Control はマスタースレーブ間にインピーダンス特性を持たせて安定性を向上するもので、小菅らが過去に提案

した仮想内部モデルを用いた方法^[10]や Task-oriented 制御^[13]と等価である。また、横小路らが提案している介在インピーダンスモデルは、マスターマニピュレータとスレーブマニピュレータの外力に対する運動の関係を記述するもので、運動記述の観点から見ると仮想内部モデルと等価である。本論文で提案する Task-oriented 制御系は、仮想内部モデルに基づく方法を拡張したもので、Shared Compliant Control や旧 Task-oriented 制御がマスタースレーブ間にインピーダンス特性を持たせるのに対し、本システムでは、マスタースレーブ系が外部から見た時に1つのインピーダンス特性を持つように設計するものである。

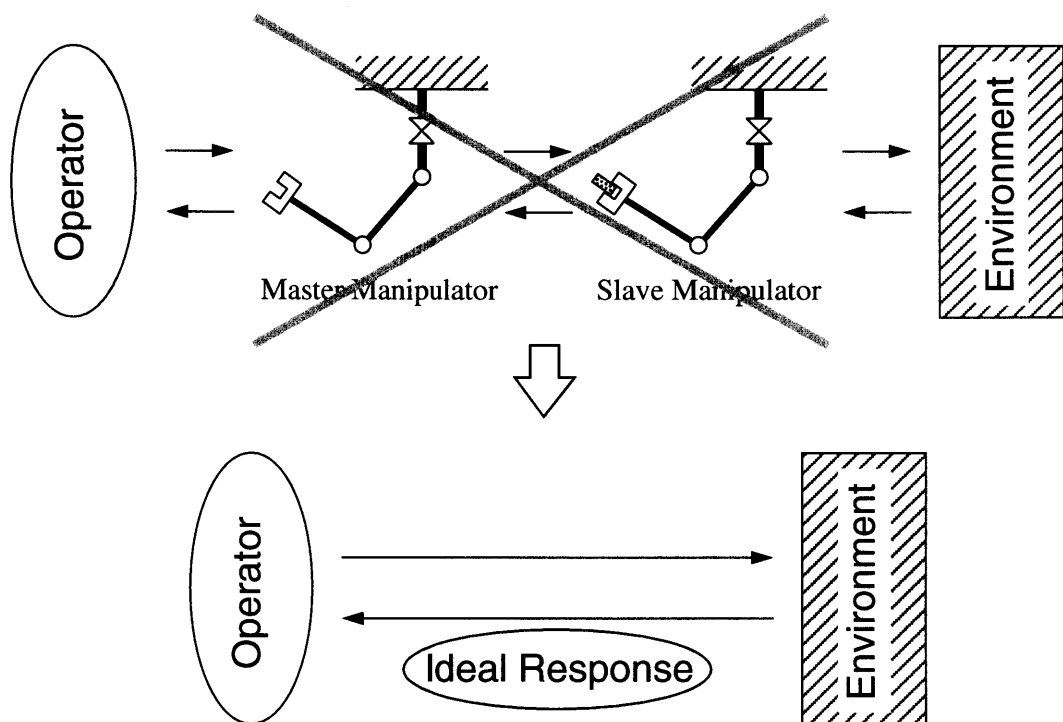


図 4.3: マスタースレーブ系の理想応答

4.3 半自律化仮想ツールを用いたテレマニピュレータの Task-oriented 制御

提案する手法では、作業に適した特性を仮想ツールとしてモデル化し、マスタースレーブ系にその特性を持たせることで、オペレータを支援して安全確実に作業を行える遠隔操作システムを構成することを目的としている。すなわち、マスタース

レーブ系全体を一つの道具の様にみなして制御することで、我々が普段鉛筆やてこなどの道具を使用するような自然な感覚で操作でき、作業を安全確実に行える遠隔操作システムを構成することを考える。本節では、提案する Task-oriented 制御のアプローチについて説明する。また、テレマニピュレータに持たせる特性として、人間・機械協調システムの安全性を考慮して半自律化された仮想ツール特性について説明する。

4.3.1 Task-oriented 制御とは

前述のように、テレマニピュレータの持つ実ダイナミクスの影響を完全に打ち消すことは不可能であるため、これまで遠隔操作システムの目標とされてきたマスターレーブ系の理想応答の実現は極めて困難なものであった。本論文で提案するシステムは、テレマニピュレータの特性を打ち消すのではなく、逆にその特性をシステムの操作性改善に利用しようとするものである。

実用遠隔操作システムに要求される、操作性・安全性・安定性などの課題に対応するためには、どのような制御戦略を用いてシステムを制御すれば良いのであろうか？本研究では、そのヒントを人間と道具との関係から得ている。我々人間は、自らの生活を便利にするために様々な道具を作り出してきた。そして、日常生活において、作業を簡略化するため、あるいは、自己の持つ能力を拡大するため、多くの道具を利用している。図 4.4 は、釘抜き作業を行っている様子を示す。この作業の場合、道具の助けを借りることで、力の拡大と運動方向の変換とを同時に行い、少ない労力で効率的に作業を行うことができる。

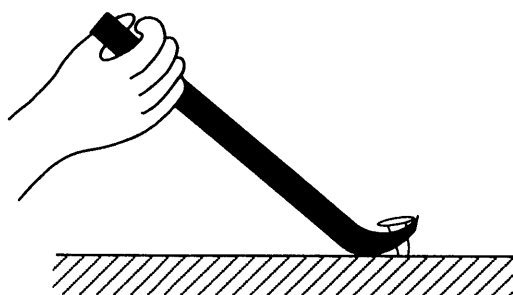


図 4.4: 道具を使った作業（釘抜き）

容易に想像がつくように、我々が普段使っている道具はそれぞれに作業に適した特

性を持っている。そのため、特に意識しなくても上手く作業を行うことができるのである。操作性だけでなく、安定性や安全性の観点から考えても、人と道具との関係は人間－機械系の一つのあり方を示してくれている。我々は、特性の異なる様々な道具を日常的に使用しているが、特に安定性を意識することなく作業が行えている。また、ほとんどの道具は使用を誤らない限り安全に作業を遂行できる。日常的な道具は、あくまでも指令塔である人間を中心として設計され、人間の意志に従って受動的に運動するように設計されているからである。(たとえ、作業時にパワーが増幅される場合であっても、指令源が人間であり、人間の操作力に応じた有限の増幅がなされている限り、広義の意味で受動的であるといえる。) このように考えると、図 4.5 のような人間－道具－環境システムにおいて、人間と道具との関係はとても理想的なものであると言えそうである。

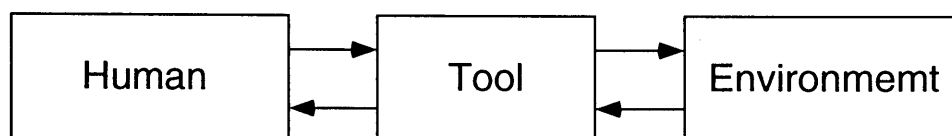


図 4.5: 人間－道具－環境系

そこで本研究では、図 4.6 のような人間－ロボット－環境系においても、このような理想的な関係の実現を目標とすることにする。すなわち、提案する手法では、図 4.7 のようにマスタースレーブ系が作業に適した一つの道具のような特性を持つようにシステムを制御し、その特性を作業に生かすことで操作性の向上を図る。作業に適した特性の表現には、前章で説明した仮想ツールダイナミクス概念を拡張して用いることにし、システムの安全性を考慮して人間主体の新しい半自律化の前提を定め、半自律化仮想ツールとして定式化する。また、システムがオペレータと環境に対して受動的となるようにシステムを制御し、安定なテレマニピュレーション

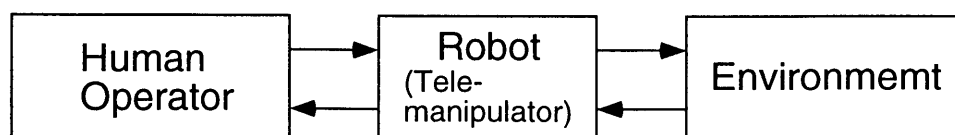


図 4.6: 人間－ロボット－環境系

ンシステムを構築する。この制御系を作業に適した特性設計を行うという意味で、Task-oriented（タスク指向型）制御系と呼ぶ。次節では、Task-oriented 制御系に用いる半自律化仮想ツール特性について説明する。

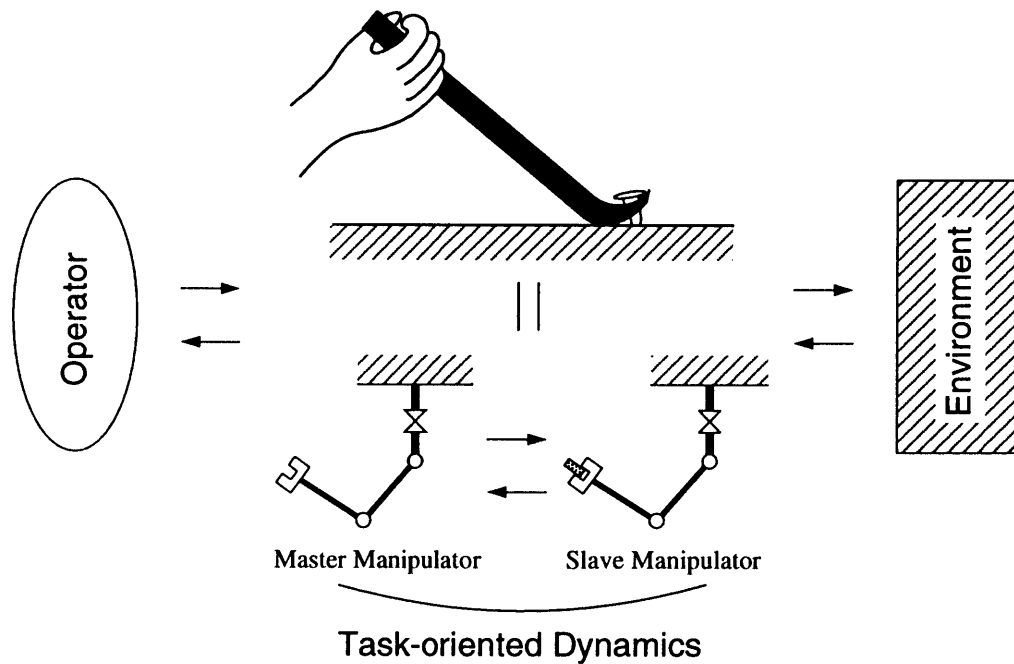


図 4.7: テレマニピュレータの Task-oriented 制御法

4.3.2 半自律化仮想ツールに基づくテレマニピュレーションシステムの操作性向上

本節では、まず最初にテレマニピュレータなどの人間-機械系システムでの使用を前提に、オペレータを支援するためのシステムの特長について考察する。そして、人間と道具との理想的な関係を実現するための安全な半自律化仮想ツールを定義する。

補助機能によるオペレータ支援

本研究では、仮想ツールを用いてマスタースレーブ系に対して積極的に道具のような特性を持たせることを考えていく。遠隔操作システムを人間とロボットとの協調システムとみなした場合、効率良く作業を行うためには例えばどのような特性をシステムに持たせれば良いのであろうか？

一般に、遠隔操作システムを用いて作業を行う際には、オペレータは作業環境から離れてモニタ等を見ながら作業を行うことが多い。このような状況下では、オペレータが作業の進行状況やスレーブマニピュレータのエンドエフェクタの正確な位置を把握するのは非常に困難である。そのため、リモートサイト（スレーブ側）での観測から得た情報を利用して、オペレータを補佐するような補助機構を持つ必要がある。オペレータに対する作業支援には様々な方向性が考えられるが、以下にそのいくつかの例を挙げておく

（例1）位置の支援

オペレータは、遠隔地から間接的に作業を行わなければならない。スレーブ側の正確な現在位置を把握できない。ゆえに、そのままでは部品の組付けやピンの挿入などの細かい作業が困難である。このような作業では、オペレータがおおよその位置まで部品を持って行けば、正確な位置はスレーブ側で調節してくれるような機構が必要となる。

（例2）力の支援（力制御と力増幅）

遠隔操作システムを用いたほとんどの作業は、作業環境との干渉を伴う。グラインダなどによる作業など直接的な力制御を必要とするものは勿論、例1で挙げた部品の組付けなどに関しても刻々と変化する干渉力を制御しなければならない。オペレータにとって、離れた場所から微妙な力加減をするのは困難で、スレーブ側でこれを支援しなければならない。また、人間の力には限界があるため、スレーブマニピュレータを用いて重い物体を操作する場合には、オペレータの操作力をスレーブ側で増幅して作業を行う必要がある。

（例3）作業スキルの支援（座標系及び力／運動の支援）

機械部品の組付けなどの複雑な作業を行う場合には、干渉力と運動とを同時に調整しなければならない。従って、オペレータにとっての負担も大きい。また、壁面の倣い作業などでは、オペレータがいちいち壁面に合わせて角度調節をしていたのでは、作業の効率も低下してしまう。作業の特性が既知の場合には、作業を効率化するためのスキル（こつ）のようなものをオペレータの支援機構として考えることもできる。また、オペレータとロボットとの作業分担により作業を効率化することも可能である。

提案する Task-oriented 制御では、第3章で説明した仮想ツールに基づく力制御系設計の利点を生かし、これらのオペレータ支援機構を仮想ツールダイナミクスとし

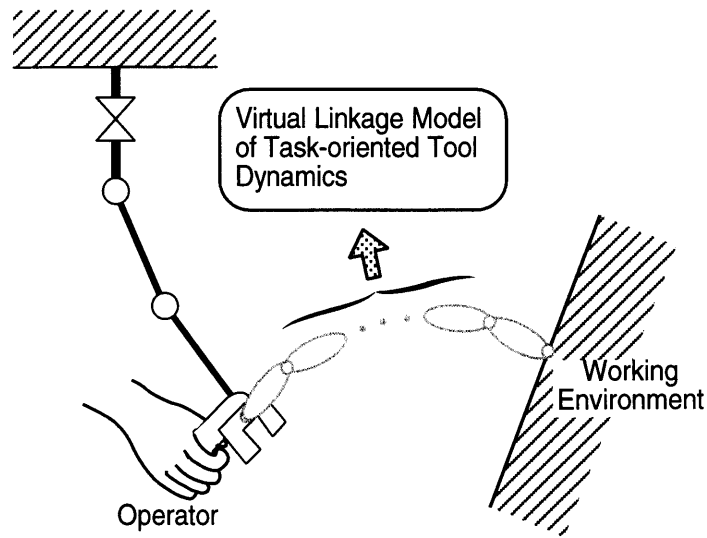


図 4.8: 人間-機械系のための仮想ツールダイナミクス

て実現する．オペレータは，この特性の助けをかりて道具を使っているような自然な感覚で作業を行えるのである．

半自律化仮想ツールダイナミクス

ここでは，テレマニピュレータなどの人間-機械系システムでの使用を考慮して，半自律化仮想ツールダイナミクスを定義する．図 4.8 に人間-機械系のための仮想ツールのリンクモデルを示す．仮想ツールにはオペレータの操作点が追加され，オペレータからの操作力と環境からの反力の両方が作用するようになっている．提案する Task-oriented 制御では，オペレータを支援する道具のような特性を，オペレータや作業環境との干渉を考慮して仮想ツールとして表現し，マスタースレーブ系で実現する．本システムでは，作業目的にあった特性（Task-oriented なツール特性）を設計し，実現すべき受動的な仮想ツールを次式のようにモデル化する．

$$M_r \Delta \ddot{x}_r + D_r \Delta \dot{x}_r + K_r \Delta x_r = f_h - f_e \quad (4.1)$$

$$\Delta x_r = x_r - x_{r_0} \quad (4.2)$$

x_r は仮想ツールの変位を表す $n \times 1$ 一般化座標ベクトルで， x_{r_0} は仮想ツール上の特徴点を表す．また， $n \times n$ 行列 M_r, D_r, K_r は仮想ツールの特性を示すインピーダン

スパラメータである。また、 f_h はオペレータがマスターマニピュレータに対して加える操作力をあらわす $n \times 1$ 一般化力ベクトルで、 f_e は同様にスレーブマニピュレータが環境に与える力を一般化座標系で表したものである。

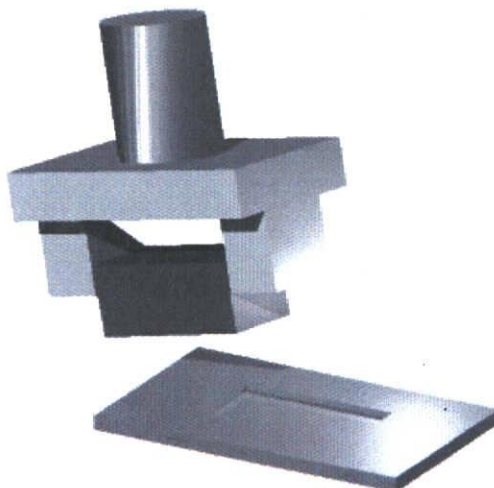


図 4.9: 機械部品の組み付け作業

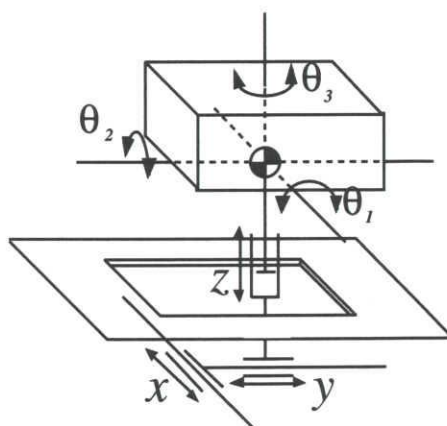


図 4.10: 機械部品組み付けのための仮想ツール

ここで、2つの作業に対して仮想ツールの設計例を示しておこう。一つめは、図 4.9 に示すような機械部品の組み付け作業の例である。この作業の目的は、直方体の機械部品をプレートのかぼみにはめ込むことである。このような作業に対しては、挿入動作の支援及び穴の位置の支援を行える図 4.10 のような仮想ツール特性が有効である。部品底面に取り付けた仮想的なバネ特性 x, y, z が部品の位置合わせとプレートへの押し付けを支援する。また、RCC(Remote Center Compliance^[51]) のような

特性を持つ回転のコンプライアンス機構 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ により、くぼみへの部品の挿入スキルが支援される。

また、もう一つの例として図 4.11 のような倣い作業を考える。これは、グラインド作業などマニピュレータによって円筒状の壁面を倣わせる作業を表している。このような作業を実現するため、一例として図 4.12 のような仮想ツール特性を考える。この仮想ツールのベース部分のリンク機構は円筒座標系で構成され、把持物体（ツール）先端に取りつけた回転方向のコンプライアンス要素 ($\theta_2, \theta_3, \theta_4$) と円筒中心に向かうバネ機構 (r)・中心回りの回転機構 (θ_1)・スライド機構 (x) などにより、円筒面への物体の押し付けと自由な倣いが実現される。尚、仮想ツールの設計及び利点等に関しては、第 3 章を参考にされたい。



図 4.11: 円筒面の倣い作業

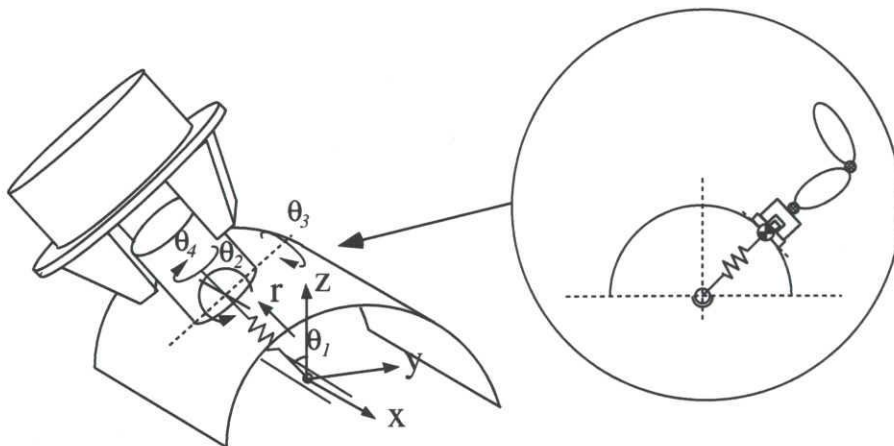


図 4.12: 円筒面の倣い作業のための仮想ツール

我々は、これまで、仮想ツールダイナミクスを用いて遠隔作業実験を行ってその

有効性を確認してきたが、一般の複雑な作業を行う場合には、多自由度仮想ツールの全自由度をオペレータが把握し自在に操るのは困難で、非効率的であることが分かってきた。そこで、作業をオペレータの担当する部分とロボットの担当する部分とに分割し、半自律的に作業を行えるよう仮想ツールの概念を拡張する。半自律化の手法はこれまでもいくつか提案されてきたが、従来の手法は、図4.13に示すように、自律的に運動しようとするロボットに対して、人間が補正を加えるというものであった。このような半自律システムでは、プログラムに従って動作しようとするロボットと、それを補正しようとする人間の意志とが競合してしまい、実際には上手く機能しないものが多かった。つまり、ロボットにとっては人間からの入力の外乱となってしまう、逆に人間側から見るとロボットの運動が外乱となってしまう両者の協調が上手くいかなくなっていたのである。また、このようなシステムでは、ロボットが人間の意志によらずに運動するため、緊急時の安全性に問題がある。実際、近年名古屋空港で起きた中華航空機の墜落事故は、中途半端な半自律化により引き起こされたものであった。そこで、我々は、完全な機能だけをロボットに担当させ、人間とロボットの作業を分担してロボットと人間との競合を避けることで安全な半自律システムを構成する。提案するシステムでは、次の二つの新しい半自律化の前提に従って仮想ツールの半自律化を行う。

- システムは、オペレータや作業環境など外部からの入力が無ければ動作しないものとする。
- 完全な機能のみをロボットの自律機能とする。また、ロボット側の自律部分と人間の操作する他律部分（以後は、マニュアルモードと記述する）とを完全に分割し、ロボットと人間とが互いに競合しないようにする。

本手法では、このような前提に基づき、仮想ツール座標を自律モードに属する部分とマニュアルモードに属する部分とに分割する。

a) 自律モード

このモードでは、仮想ツールの運動は、外界からの情報により自動的に制御されるものとする。

b) マニュアルモード

このモードでは、オペレータは自由に仮想ツールを操ることができ、外界の情報がバイラテラルフィードバックされるものとする。

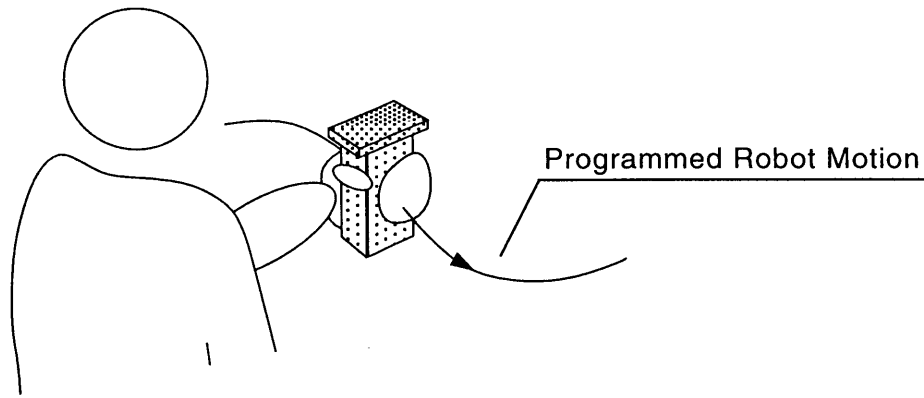


図 4.13: 従来の半自律システム

前述の部品の組み付け作業の場合，例えば， (x, y, z) をマニュアルモード， $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ を自律モードとすることができる．これにより，オペレータは部品挿入時の姿勢変化をあまり意識することなく作業が行える．また，円筒倣いの場合には， (x, θ_1, r) をマニュアルモード， $(\theta_2, \theta_3, \theta_4)$ を自律モードに設定することで，円筒面の倣いが効率的に行える．

半自律化仮想ツールダイナミクスは，以下のようにモデル化される．

$$M_r \Delta \ddot{x}_r + D_r \Delta \dot{x}_r + K_r (I - \zeta) \Delta x_r = \zeta f_h - f_e \quad (4.3)$$

$$\Delta x_r = x_r - x_{r_0} \quad (4.4)$$

ここで， ζ は自律モードを選択するための $n \times n$ 対角行列で，その対角要素は 1 または 0 の値をとる．このシステムでは，自律モードにおいては仮想ツールは，ツール上に設定されたある特徴点 x_{r_0} 周りにインピーダンス制御されるものとした．この特性をテレマニピュレータで実現することが，Task-oriented 制御の目標である．

4.4 テレマニピュレータの Task-oriented 制御系の実現

ここでは，本章で提案する，仮想ツールに基づく Task-oriented 制御系を構成し，受動性の観点からシステムの安定性について検証する．また，近年のマクロマイクロシステムの需要に対応するため，Task-oriented 制御系をスケールドテレマニピュレーションシステムへと拡張する．

4.4.1 テレマニピュレータのダイナミクス

Task-oriented 制御系の構成にあたって、まず最初に、テレマニピュレータのダイナミクスをまとめて記述しておく。テレマニピュレータシステムの概略図を図 4.14 に示す。良く知られているように、マスターマニピュレータとスレーブマニピュレータのダイナミクスは次式で表される。

Master Manipulator :

$$M_m \ddot{x}_m + G_m(x_m, \dot{x}_m) = u_m + f_h \quad (4.5)$$

Slave Manipulator :

$$M_s \ddot{x}_s + G_s(x_s, \dot{x}_s) = u_s - f_e \quad (4.6)$$

ここで、 $n \times 1$ ベクトル x_m, x_s はそれぞれマスターマニピュレータとスレーブマニピュレータの位置・姿勢を表す一般化座標である。 M_m, M_s はマニピュレータの慣性行列を、 G_m, G_s はコリオリ力・遠心力等の影響によるマニピュレータの非線形項を表している。また、 u_m, u_s はマニピュレータへの一般化入力を表している。 f_h は、前述のようにオペレータがマスターマニピュレータに対して加える操作力を一般化座標系で表したもので、 f_e はスレーブマニピュレータが環境に与える力を一般化座標系で表したものである。

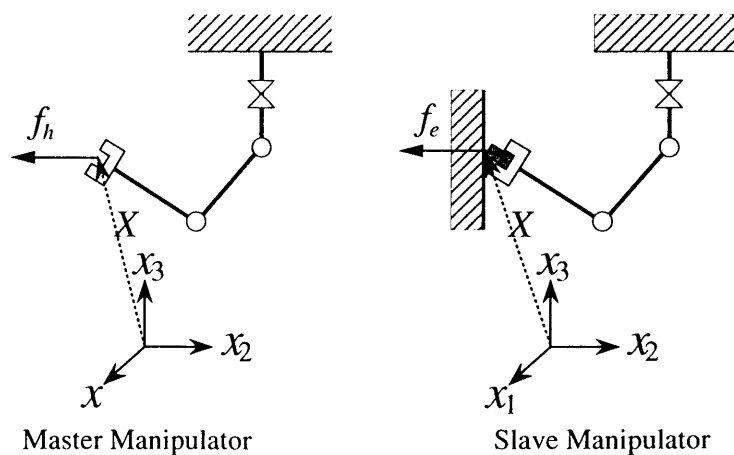


図 4.14: テレマニピュレーションシステムの概略

4.4.2 Task-oriented 制御系の構成と部分安定性

この節では、マスタースレーブ間の通信伝達系に通信遅れが無いものとして制御系を構成する。伝達系に通信遅れを含まない場合には、マスター側とスレーブ側の情報を直接相手側に受け渡すことができるため、より高性能な運動制御が行える。

Task-oriented 制御の目標ダイナミクス

Task-oriented 制御では、マスターとスレーブの運動を一致させ、半自律化仮想ツールの特性をシステム全体として実現することを目指す。すなわち、以下のダイナミクスを実現することがシステムの目標である。

$$M_r \Delta \ddot{x}_r + D_r \Delta \dot{x}_r + K_r (I - \zeta) \Delta x_r = \zeta f_h - f_e \quad (4.7)$$

$$\Delta x_r = x_r - x_{r0} \quad (4.8)$$

$$x_m = x_s = x_r \quad (4.9)$$

Task-oriented 制御則

提案する Task-oriented 制御では、テレマニピュレータに仮想ツールの特性を持たせるために、マスターとスレーブの各マニピュレータを適当な制御則によって次式のように制御するものとする。

Master Manipulator :

$$M_1 \Delta \ddot{x}_m + D_1 \Delta \dot{x}_m + K_1 (I - \zeta) \Delta x_m = \zeta f_h - f_e - F_c \quad (4.10)$$

$$\Delta x_m = x_m - x_{m0} \quad (4.11)$$

Slave Manipulator :

$$M_2 \Delta \ddot{x}_s + D_2 \Delta \dot{x}_s + K_2 (I - \zeta) \Delta x_s = \zeta f_h - f_e + F_c \quad (4.12)$$

$$\Delta x_s = x_s - x_{s0} \quad (4.13)$$

ここで、マスターマニピュレータとスレーブマニピュレータの運動特性が、仮想ツールと同一になるように、 $M_1 = M_2 = M_r, D_1 = D_2 = D_r, K_1 = K_2 = K_r$ の式が成り立つようにパラメータを定める。また、 x_{m0} 及び x_{s0} は自律モードの特徴点で、仮想

ツールのそれと一致するように選ばれる.

$$x_{m0} = x_{s0} = x_{r0} \quad (4.14)$$

また, $n \times n$ ベクトル F_c は, マスターマニピュレータの運動とスレーブマニピュレータの運動を一致させるための制御入力で,

$$F_c = D_c \dot{e}_{ms} + K_c e_{ms} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} e_{ms} &= \Delta x_m - \Delta x_s \\ &= x_m - x_s \end{aligned} \quad (4.16)$$

である.

マスターマニピュレータとスレーブマニピュレータをそれぞれ式 (4.10), (4.12) のように制御するための手法としては, システムに応じて, 非線形フィードバックや仮想内部モデル追従制御系, H_∞ 制御などを用いることができる. 例えば, 非線形フィードバックに基づくマニピュレータの制御入力は以下のように表される.

$$\begin{aligned} u_m &= M_m M_r^{-1} \{-D_r \dot{x}_m - K_r(I - \zeta)(x_m - x_{m0}) + \zeta f_h - f_e - F_c\} \\ &\quad + G_m(x_m, \dot{x}_m) - f_h \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} u_s &= M_s M_r^{-1} \{-D_r \dot{x}_s - K_r(I - \zeta)(x_s - x_{s0}) + \zeta f_h - f_e + F_c\} \\ &\quad + G_s(x_s, \dot{x}_s) + f_e \end{aligned} \quad (4.18)$$

システムの部分安定性

ここでは, システムの部分安定性について解析を行い, 前述の制御則によりマスターとスレーブの運動が一致し, システム全体として仮想ツールの特性が実現されることを示す.

まず, 式 (4.10), (4.12) を辺々足し合わせると,

$$M_r(\Delta \ddot{x}_m + \Delta \ddot{x}_s) + D_r(\Delta \dot{x}_m + \Delta \dot{x}_s) + K_r(I - \zeta)(\Delta x_m + \Delta x_s) = 2(\zeta f_h - f_e) \quad (4.19)$$

となる. ここで, マスタースレーブ系の運動誤差 e_{ms} の挙動を調べるために, 式

(4.10) から式 (4.12) を引くと,

$$M_r \ddot{e}_{ms} + D_r \dot{e}_{ms} + K_r(I - \zeta)e_{ms} = -2F_c \quad (4.20)$$

となる. ここに式 (4.15) の F_c を代入し移項すると,

$$M_r \ddot{e}_{ms} + (D_r + 2D_c)\dot{e}_{ms} + \{K_r(I - \zeta) + 2K_c\} e_{ms} = 0 \quad (4.21)$$

が得られる. この式から明らかなように, 係数行列 D_c, K_c を適当に設計することで (4.21) 式は安定となり, e_{ms} は漸近的にゼロに収束する. ゆえに, マスタースレーブ系への入力 (f_h, f_e) に拘らず, 定常状態では $x_m = x_s = x_r$ となる. この時, 式 (4.19) は式 (4.7)~式 (4.9) で表される目標仮想ツールの特性と等しくなり, 前述の仕事に適したツール特性が実現できることが分かる. マスターとスレーブの運動誤差は, 式 (4.20) から分かるように $F_c = 0$ であっても漸近的にゼロに収束するが, F_c を用いることで目標とする仮想ツールのパラメータ M_r, D_r, K_r によらず誤差の収束性を高めることが可能である.

4.4.3 受動性に基づくシステムの安定性解析

次に, オペレータと環境とを含めたシステム全体の安定性を, 受動性の観点から考える. 遠隔操作システムは, オペレータ・作業環境・マスターマニピュレータ及びスレーブマニピュレータから成るテレマニピュレータ部の3つの部分で構成される. 前述のようにオペレータと環境の受動性の仮定の下に, テレマニピュレータ部がオペレータと環境に対して受動的な特性を持つように制御されていれば, 不安定な挙動の原因となるエネルギーの増大を招くことはなく, システムが安定になることが知られている. ここでは, 提案するテレマニピュレーションシステムの受動性について解析を行う. 提案するシステムに加わる力と運動の関係を図 4.15 に示す. また, 図 4.16 に制御系の等価回路を示す. システムに加わる入力と出ていく出力との関係から, 提案するシステムの受動性が成り立つ必要十分条件は, 次の式が成り立つような正の定数 γ が任意の時間 T に対して存在することである.

$$\int_0^T \{(\zeta f_h - f_e)^T \cdot \Delta \dot{x}_m - (f_e - \zeta f_h)^T \cdot \Delta \dot{x}_s\} dt \geq -\gamma \quad (4.22)$$

この不等式の左辺を整理すると,

$$\int_0^T \{(\zeta f_h - f_e)^T \cdot (\Delta \dot{x}_m + \Delta \dot{x}_s)\} dt = \int_0^T \Delta F^T \cdot \dot{X}_{ms} dt \quad (4.23)$$

となる. ここで,

$$\Delta F = \zeta f_h - f_e \quad (4.24)$$

$$X_{ms} = \Delta x_m + \Delta x_s \quad (4.25)$$

と置いた. 提案するシステムの受動性は (4.23) 式が下に有界であることを示すことで証明される. ΔF と \dot{X}_{ms} の関係は, 前述の式 (4.19) から分かるように, 次式で表される.

$$\frac{1}{2} \{M_r \ddot{X}_{ms} + D_r \dot{X}_{ms} + K_r (I - \zeta) X_{ms}\} = \Delta F \quad (4.26)$$

ここで, 良く知られているように, $D_r + D_r^T > 0$ であれば, 式 (4.26) の入力 ΔF と出力 \dot{X}_{ms} の間には次の関係が成り立つ. (証明は例えば参考文献 [39])

$$\int_0^T \Delta F^T \cdot \dot{X}_{ms} dt > -\gamma_0 \quad (4.27)$$

以上で, 正の定数 γ_0 が存在することが分かり, 提案するシステムが受動性の必要十分条件を満たすことが証明された. よって, 各マニピュレータが式 (4.10)(4.12) の特性を持つように制御されている限り, 安定なテレマニピュレータシステムが得られることがわかる.

テレマニピュレータの入出力関係から散乱行列 (Scattering Matrix) を求め, その最大特異値を調べることによっても, 同様にシステム全体の受動性を証明することが可能である [25]. ここでは, 提案するテレマニピュレーションシステムの散乱行列を求め, それを用いてシステムが受動的であることを示す. ここでは, 記述を簡単化するため, 自律モードに属する 1 自由度系について受動性の解析結果を紹介する.

提案するテレマニピュレーションシステムのダイナミクスを s 領域で表すと以下のようになる.

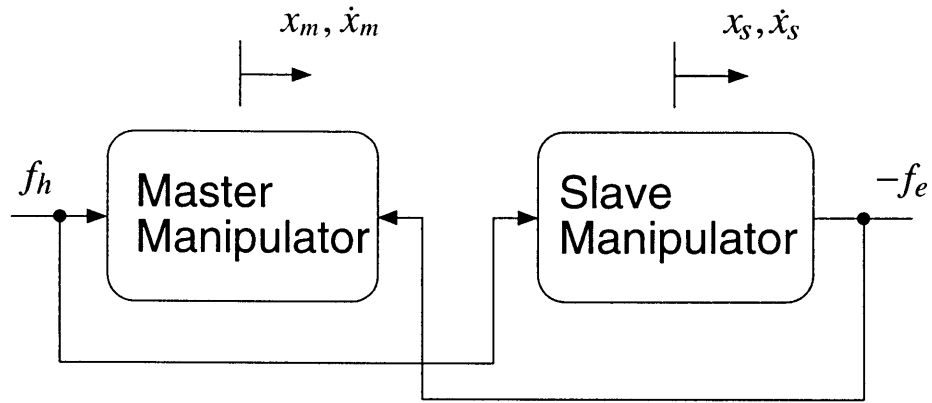


図 4.15: マスタースレーブ系の力と速度の関係

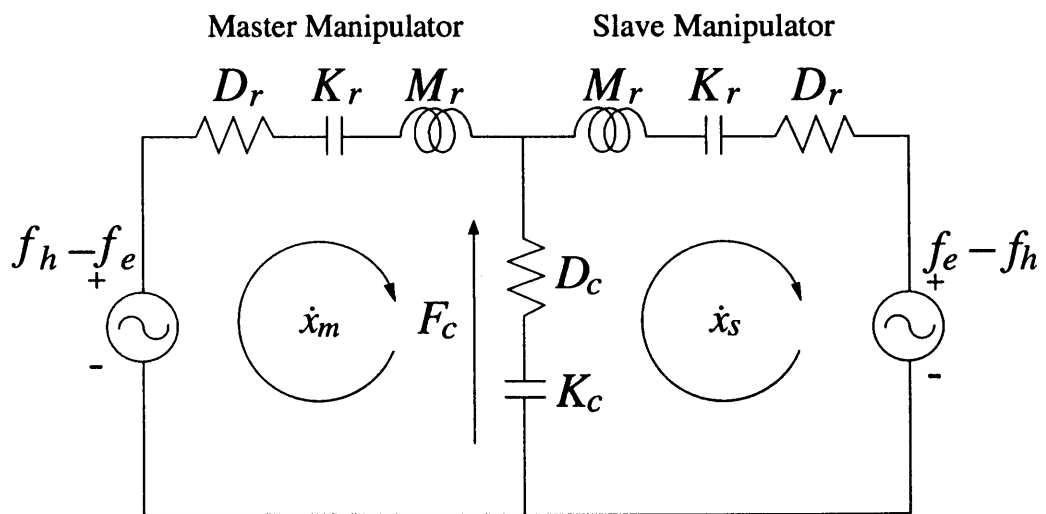


図 4.16: システムの等価回路

Master Manipulator

$$(M_r s + D_r + \frac{K_r}{s})I_m = V_m - V_s - (D_c + \frac{K_c}{s})(I_m - I_s) \quad (4.28)$$

Slave Manipulator

$$(M_r s + D_r + \frac{K_r}{s})I_s = V_m - V_s + (D_c + \frac{K_c}{s})(I_m - I_s) \quad (4.29)$$

ここで、 V_m, V_s はそれぞれオペレータの操作力と環境との間の作業力を表している。また、 I_m, I_s はマスターとスレーブ各々の運動速度を表している。テレマニピュレーションシステムをオペレータ・作業環境・テレマニピュレータという3つの部分に分けた場合、散乱行列 S は以下のように定義される。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_m - I_m \\ V_s + I_s \end{bmatrix} &= S \begin{bmatrix} V_m + I_m \\ V_s - I_s \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m + I_m \\ V_s - I_s \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.30)$$

式(4.28),(4.29)を用いて上式から散乱行列 S を求めると、

$$s_{11} = s_{22} = \frac{M_r s + D_r + \frac{K_r}{s}}{M_r s + D_r + \frac{K_r}{s} + 2} \quad (4.31)$$

$$s_{12} = s_{21} = \frac{2}{M_r s + D_r + \frac{K_r}{s} + 2} \quad (4.32)$$

となる。

システムのパワー消費の立場から見ると、散乱行列 S の最大特異値 λ が $\lambda \leq 1$ を満たす時、システム全体は受動的であるといえる。(この式はシステム内部で消費されるエネルギーが負にならないことを示している。) 実際に最大特異値 λ を求めるために $S^T S$ の固有値を計算すると、

$$\lambda = \frac{|(M_r s + D_r + \frac{K_r}{s}) \pm 2|}{|(M_r s + D_r + \frac{K_r}{s}) + 2|} \leq 1 \quad (4.33)$$

となり，最大特異値が前述の条件を満たすことが分かる．よって，システムを不安定にするようなエネルギーの増大が起こることはなく，システムは受動性の観点から安定であることが証明された．

4.4.4 力と運動のスケーリング（パワースケーリング）問題への拡張

近年のマイクロ分野の技術の進歩に伴い，マスターとスレーブでスケールの異なるマクロ・マイクロマニピュレーションシステムの需要が高まってきており，テレサージャリーやマイクロマシンの組立てなどへの応用が期待されている．本節では，システム全体の安定性を保ちながら，マスタースレーブ間で運動や作業力などを自由にスケーリング可能な，実用的なテレマニピュレーションシステムの構成を目的とし，Task-oriented 制御系を拡張する．

スケーリングを考慮したシステムの目標運動特性

テレマニピュレーションシステムの力と運動のスケーリングを実現するため，提案する手法では s_f, s_m という2つのスケーリングファクタを導入する． s_f と s_m はマスターとスレーブの力や運動を関係づけるためのスカラー量である．本論文で提案する制御系の目標は，スケーリングファクタ s_m によって，次式のようにマスター側の運動の比率をスレーブ側の運動に対して自由に規定できるようにすることである．

$$\dot{x}_m = s_m \dot{x}_s \quad (4.34)$$

また，同様に，スケーリングファクタ s_f によって，オペレータの操作力とスレーブマニピュレータの作業力の比率を規定することを目標とする．そのため，式(4.7)～式(4.9)の半自律化仮想ツールの特性を次式のように拡張する．

$$M_r \Delta \ddot{x}_r + D_r \Delta \dot{x}_r + K_r (I - \zeta) \Delta x_r = \zeta f_h - s_f f_e \quad (4.35)$$

$$\Delta x_r = x_r - x_{r0} \quad (4.36)$$

$$x_m = s_m x_s = x_r \quad (4.37)$$

本手法では，理想応答のように力の応答を完全に一致させるのではなく，間に仮想ツールの特性が介入することに注意しなければならない．以下，この特性を実現するための制御系の拡張を行う．

スケーリングを考慮した Task-oriented 制御系

力と運動のスケーリング（パワースケーリング）を実現するため，Task-oriented 制御則は以下のように修正される．

Master Manipulator :

$$M_r \Delta \ddot{x}_m + D_r \Delta \dot{x}_m + K_r (I - \zeta) \Delta x_m = \zeta f_h - s_f f_e - F_c \quad (4.38)$$

$$\Delta x_m = x_m - x_{m0} \quad (4.39)$$

Slave Manipulator :

$$s_m \{ M_r \Delta \ddot{x}_s + D_r \Delta \dot{x}_s + K_r (I - \zeta) \Delta x_s \} = \zeta f_h - s_f f_e + F_c \quad (4.40)$$

$$\Delta x_s = x_s - x_{s0} \quad (4.41)$$

また，仮想ツールの特徴点及び F_c はスケーリングファクタ s_m を用いて

$$x_{m0} = s_m x_{s0} = x_{r0} \quad (4.42)$$

$$F_c = D_c \dot{e}_{ms} + K_c e_{ms} \quad (4.43)$$

$$\begin{aligned} e_{ms} &= \Delta x_m - s_m \Delta x_s \\ &= x_m - s_m x_s \end{aligned} \quad (4.44)$$

と修正される．

ここで，式 (4.38) ， (4.40) から誤差方程式を求めると，

$$M_r \ddot{e}_{ms} + (D_r + 2D_c) \dot{e}_{ms} + \{ K_r (I - \zeta) + 2K_c \} e_{ms} = 0 \quad (4.45)$$

となる．また，式 (4.38) ， (4.40) の足し合わせにより，

$$\begin{aligned} M_r (\Delta \ddot{x}_m + s_m \Delta \ddot{x}_s) + D_r (\Delta \dot{x}_m + s_m \Delta \dot{x}_s) + (I - \zeta) K_r (\Delta x_m + s_m \Delta x_s) \\ = 2(\zeta f_h - s_f f_e) \end{aligned} \quad (4.46)$$

となる．明らかに，適切な係数行列 D_c, K_c によって e_{ms} は漸近的にゼロに収束し，マスタースレーブ系への入力 (f_h, f_e) に拘らず， $x_m = s_m x_s = x_r$ の運動のスケーリング目標が達成される．その結果，式 (4.46) は力のスケーリングを考慮した目標

仮想ツール特性と一致する。ゆえに、本制御系によりスケーリングファクタによって規定した通りの特性が実現できることが分かる。

尚、非線形フィードバックに基づくマニピュレータの制御入力は以下のように表される。

$$u_m = M_m M_r^{-1} \{-D_r \dot{x}_m - K_r(I - \zeta)(x_m - x_{m0}) + \zeta f_h - s_f f_e - F_c\} + G_m(x_m, \dot{x}_m) - f_h \quad (4.47)$$

$$u_s = M_s M_r^{-1} \{-D_r \dot{x}_s - K_r(I - \zeta)(x_s - x_{s0}) + (\zeta f_h - s_f f_e + F_c)/s_m\} + G_s(x_s, \dot{x}_s) + f_e \quad (4.48)$$

システムの安定性解析

前に述べたように、従来より、バイラテラルに構成されたテレマニピュレーションシステムに対してパワースケーリングを行うと、システムの受動性の条件が満たされず、安定性を阻害して不安定な挙動を招く原因となると考えられてきた。ここでは、修正された Task-oriented 制御系の安定性解析を行い、本制御系を用いることでシステムの安定性を害することなくパワースケーリングが行えることを示す。

修正された Task-oriented 制御系は図 4.17 のように表される。提案する制御系のパワースケーリングは、スレーブ側のみで行う形式を採っているのが一つの特徴である。そのため、本システムではスケーリング部をテレマニピュレータ部から作業環境側へと分離することができる。そこで、提案するシステム全体の受動性を調べるために、便宜上、式 (4.38) と式 (4.40) に対して中間変数 $x_{s1}, x_{s2}, f_{e1}, f_{e2}$ を用いて、次のようにテレマニピュレータ部からスケーリング部を分割する。

$$M_r \Delta \ddot{x}_m + D_r \Delta \dot{x}_m + K_r(I - \zeta) \Delta x_m = \zeta f_h - f_{e1} - F_c \quad (4.49)$$

$$M_r \Delta \ddot{x}_{s1} + D_r \Delta \dot{x}_{s1} + K_r(I - \zeta) \Delta x_{s1} = \zeta f_h - f_{e1} + F_c \quad (4.50)$$

$$\Delta x_{s1} = s_m \Delta x_{s2} \quad (4.51)$$

$$f_{e1} = s_f f_{e2} \quad (4.52)$$

その結果、システムは図 4.18 のように表される。ここで、分割したスケーリング部と作業環境部とをまとめて仮想的に環境ブロックとみなすことにする。もし、図 4.18 で便宜上構成した仮想的な環境ブロックに対して受動性の仮定が満足され、スケーリング部を除いたテレマニピュレータ部がオペレータと仮想的な環境ブロックに対

して受動的であれば、オペレータの加えたパワーが無限に増幅されることは無く、システムは受動性の観点から安定であるといえる。

受動性の定義より、仮想的な環境ブロックが受動的であるための必要十分条件は、次式が成り立つような正の定数 γ_1 が任意の時刻 T に対して存在することである。

$$\int_0^T f_{e_1}^T \cdot \Delta \dot{x}_{s_1} dt \geq -\gamma_1 \quad (4.53)$$

実際、環境の受動性の仮定から、実際の作業環境に対しては

$$\int_0^T f_{e_2}^T \cdot \Delta \dot{x}_{s_2} dt \geq -\gamma_2 \quad (4.54)$$

が成り立つため、

$$\begin{aligned} \int_0^T f_{e_1}^T \cdot \Delta \dot{x}_{s_1} dt &= \int_0^T s_f f_{e_2}^T \cdot s_m \Delta \dot{x}_{s_2} dt \\ &= s_f s_m \int_0^T f_{e_2}^T \cdot \Delta \dot{x}_{s_2} dt \\ &\geq -s_f s_m \gamma_2 \quad , \quad s_f s_m \gamma \geq 0 \end{aligned} \quad (4.55)$$

となり、仮想的な環境ブロックは受動的であることがわかる。よって、図 4.18 のテレマニピュレータ部が受動的に制御されていれば、系全体の安定性が保証される。テレマニピュレータ部の受動性は前節と同様に証明されるため、以上で、提案するシステムが受動性の必要十分条件を満たすことが証明された。本システムでは、スレーブ側のみでパワースケールリングを行っており、また、スケールリングファクタ s_m, s_f が正のスカラー量である限り、作業環境の受動的な位相特性を害することはないため、システムの安定性が保たれるのである。よって、各マニピュレータが式 (4.38)(4.40) の特性を持つように制御されている限り、安定なテレマニピュレーションシステムが得られることがわかる。

最後に、図 4.18 で仮想的に構成した環境ブロックの内部には、不安定なモードが発生しないことを示す。人間の受動性の仮定及び発生するパワーの有限性から、作業中にテレマニピュレータに加えられるパワーは有界であることが分かる。また、スケールリング部を分割したテレマニピュレータが受動的であることは、環境ブロックに伝達されるパワーが有界であることを示している。また、スケールリング部は作業環境の受動性や位相特性を害することなく、スケールリング部で増幅されるパワーも有界である。そのため、BIBO の観点から環境ブロックには不安定なモードが存

在しないことが分かる．そのため，スケーリングファクタ s_m, s_f が正のスカラー量である限り，提案するシステムでは不安定な挙動をひき起こすエネルギーの増大を招くことはなく，全体として安定なパワースケーリングシステムを構成することができる．

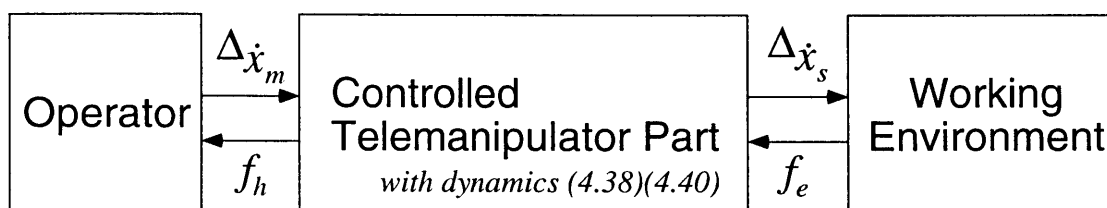


図 4.17: 提案するスケールドテレマニピュレーションシステム

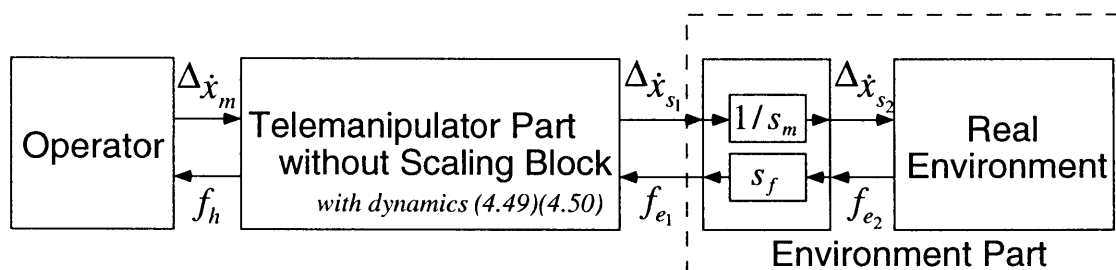


図 4.18: スケーリング部を分割したテレマニピュレーションシステム

4.5 実験

ここでは，テレマニピュレータの Task-oriented 制御系を実際のマスタースレーブ系に適用して作業実験を行い，提案するシステムの有効性を検証する．まず最初に，実験に用いたシステムの構成について説明し，そして，半自律化及びスケーリングに関する三種類の実験の結果を示す．

4.5.1 実験システム

実験では、多関節型6自由度のマニピュレータ2台を用いてテレマニピュレータを構成した。図4.19の写真は実験で用いられたテレマニピュレータである(注1)。マニピュレータの各関節は減速器を介してDCサーボモータにより駆動され、モータ部の光学式エンコーダにより関節の回転角度を測定した。また、各マニピュレータのリスト部に取り付けた6軸力/トルクセンサによりオペレータの操作力及び環境との間の干渉力を測定して制御に使用した。マニピュレータの運動制御には、モータの減速比が高く負荷変動の影響を受けにくいことを考慮して、前章で説明した仮想内部モデル追従制御系を基本とするモデルベースの制御系を使用した。

マニピュレータの実時間制御にはリアルタイムオペレーティングシステムであるVxWorksを使用し、将来の複数台ロボットへの適用やロボット間のコミュニケーションを考慮して特殊な制御システムを構成したので、簡単にシステムの概略について説明しておく。テレマニピュレータの制御用計算機システムの構成を図4.20に示す。本システムでは、VMEバス上に接続された3枚のCPUボードを制御用として使用した。1枚はマスターマニピュレータの制御用で、もう1枚はスレーブマニピュレータ用である。また、信号の入出力用のボードが各CPUボードと組にしてVMEバス上に接続された。これらのマスター側及びスレーブ側のコントローラは、VMEバスの特性を生かして完全に独立した構成をとっている。残る1枚は各マニピュレータ間の相互通信管理用で、共有メモリを利用してマニピュレータ間の通信要求やデータの受け渡しを行っている。本章の実験では、マニピュレータ間のデータや指令の受け渡しにのみを行ったが、第6章では通信遅れを擬似的に作り出すのに使われる。本システムでは、ロボット台数が更に増えた場合でも、制御用CPUボードと入出力ボードを組みにして追加することで容易にシステムの拡張が行えるのが大きな特徴である。

実時間制御用ソフトウェアは、リアルタイムOSであるVxWorksの使用を前提として、C言語とVxWorksのライブラリを用いて開発された。各マニピュレータの制御システムの概要を図4.21に示す。図4.21に示すように、システムは、以下の3つのモジュールから構成される。

- (1) シェル
- (2) 割込処理モジュール

¹ 本実験では、用いられた2台のマニピュレータは基本的に同構造のものであるが、マニピュレータの手先の位置・姿勢を規定できるものであれば異構造のものを使用することも可能である。



図 4.19: 実験用 6 自由度テレマニピュレータ

(3) 制御用計算処理モジュール

以下に各モジュールの概要を説明する。

(1) シェル

シェルは VxWorks システムの一部として機能しており、プログラムの CPU ボードへのダウンロードや実験データの収集、マニピュレータへの目標指令の入力等に用いられる。VxWorks では、プログラム中の関数を直接実行できる機能を有するため、オペレータから制御用計算処理ルーチンなどへの指示、要求は端末を介してシェルにより対話的に処理される。なお、本システムではシェルタスクの優先度は低く設

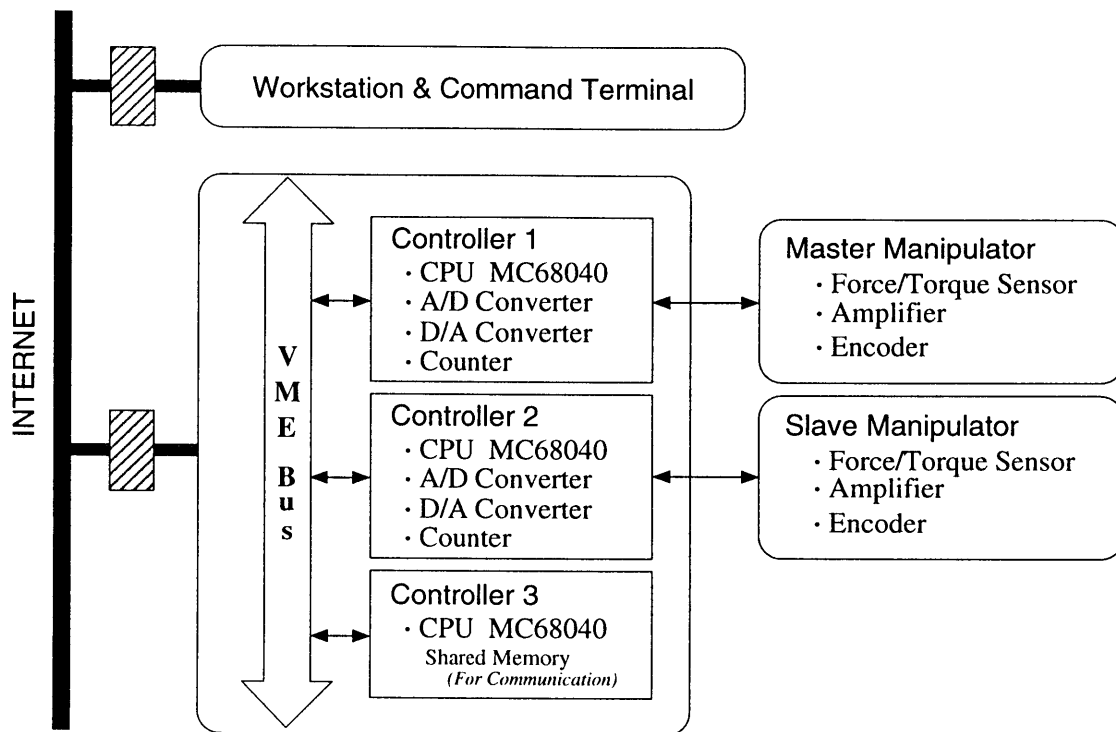


図 4.20: 制御用計算機システム

定され、制御用の計算処理が優先して実行される。

(2) 割り込み処理モジュール

リアルタイム制御を行うには一定のサンプリング周期で計算を行うことが必要である。本システムではタイマ割り込を用いてCPUの負荷状態に関わりなく定期的に制御用計算処理モジュールを起動している。タイマはOSによって監視され、割り込み処理モジュールが自動的に呼び出される。

(3) 制御用計算処理ルーチン

割り込みモジュールから送られるセマフォと呼ばれる同期信号により、制御用計算処理モジュールはタイマと同期して実行される。本モジュールでは、マニピュレータとの間の情報の入出力、他マニピュレータとの通信処理、制御アルゴリズムに関する計算処理などが行われる。

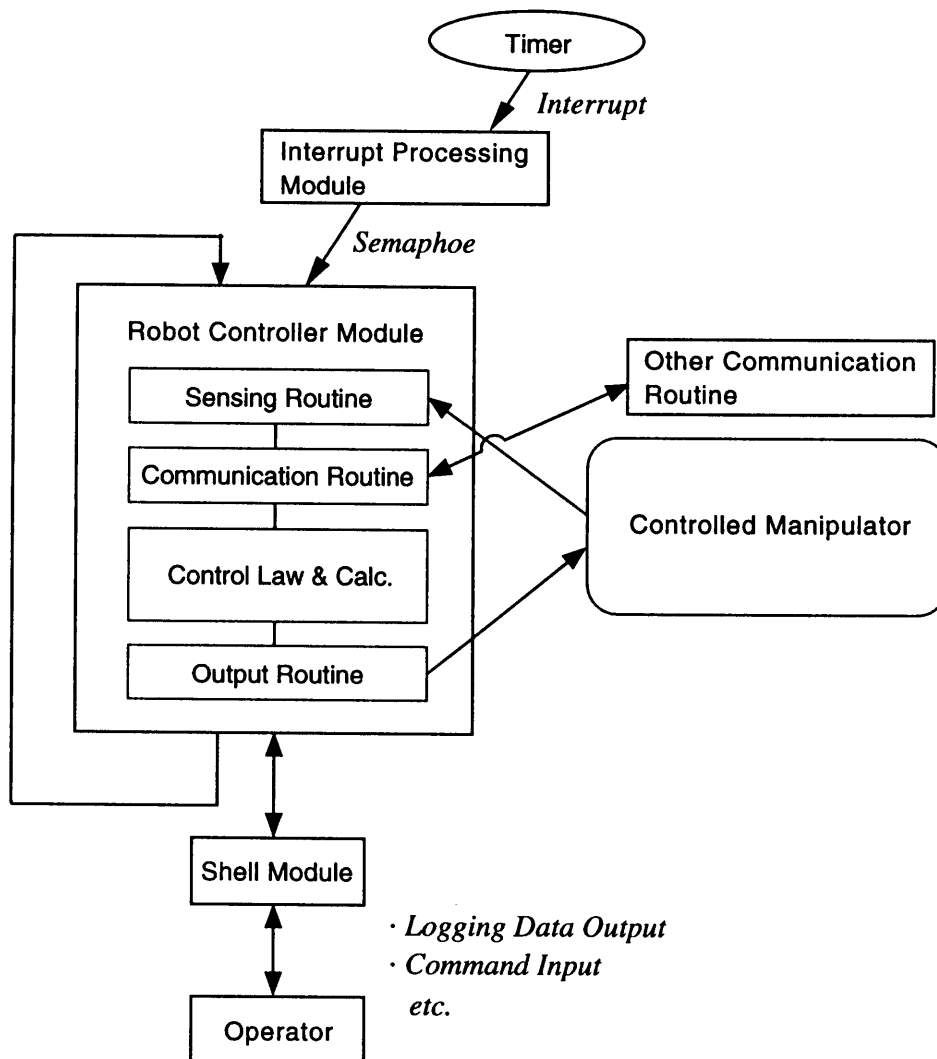


図 4.21: マニピュレータ制御プログラムの構造

4.5.2 実験1 半自律化仮想ツールを用いた円筒面の倣い作業

本章で提案した半自律化仮想ツールに基づく Task-oriented 制御系が有効に働くことを確認するため、まず最初に、半自律化仮想ツールの項で説明した円筒面の倣い作業を例にとり作業実験を行った。設計された半自律化仮想ツール特性を図 4.22 に示す。円筒座標系で構成されたリンク機構とマニピュレータ先端の倣い機構により、円筒面の自由な倣いが実現される。図中に示したように (x, θ_1, r) をマニュアルモード、 $(\theta_2, \theta_3, \theta_4)$ を自律モードとすることで、円筒面の倣いが効率的に行えるよう特性が設計された。図 4.23 に作業の様子を示す。マニピュレータの可動範囲が狭いため、 x 方向を固定し、残りの 5 自由度の仮想ツールをマニピュレータに持たせて実験を行った。尚、ここでは力と運動のスケーリングは行われていない。

図 4.24 及び図 4.25 に結果を示す。図 4.24 はマニュアルモードに属する仮想ツール座標の挙動を表している。左側のグラフは各マニピュレータの運動 x_m, x_s を、右側が力の応答 f_h, f_e をそれぞれ表している。また、図 4.25 は同様に自律モードの挙動を示している。作業は、オペレータの操作により、仮想ツールの助けを借りながら容易に行われた。実験開始後、約 2 秒後にオペレータの操作によってエンドエフェクタが円筒面と接触し、その後は、仮想ツール特性によって力情報に基づいて倣いが補正され、作業が正確に行われている様子が分かる。これにより、作業に適した仮想ツールの特性がシステムの操作性改善に有効であることが確認できる。また、システムが受動性を満たすように設計されているため、堅い円筒面に押し付けているにもかかわらず、不安定な振動が一切現れていない。受動性に基づく安定性解析が人間-機械系システムの設計に有効であることが確認できる。

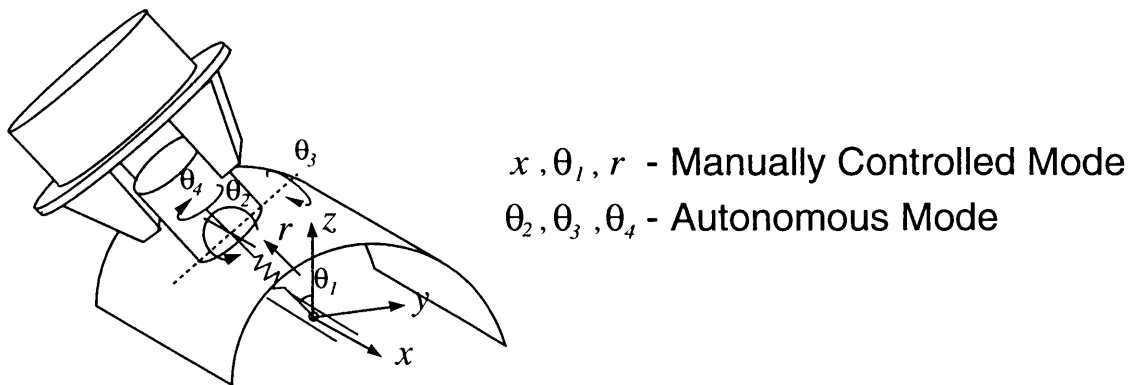


図 4.22: 円筒倣いのための半自律化仮想ツール特性

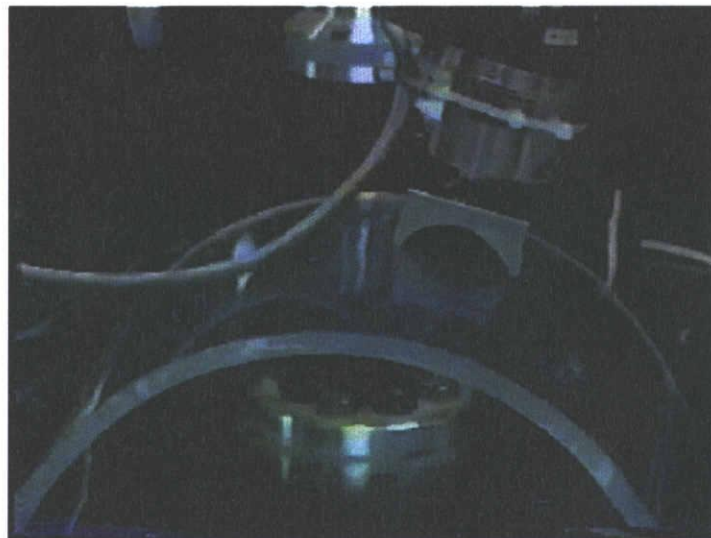
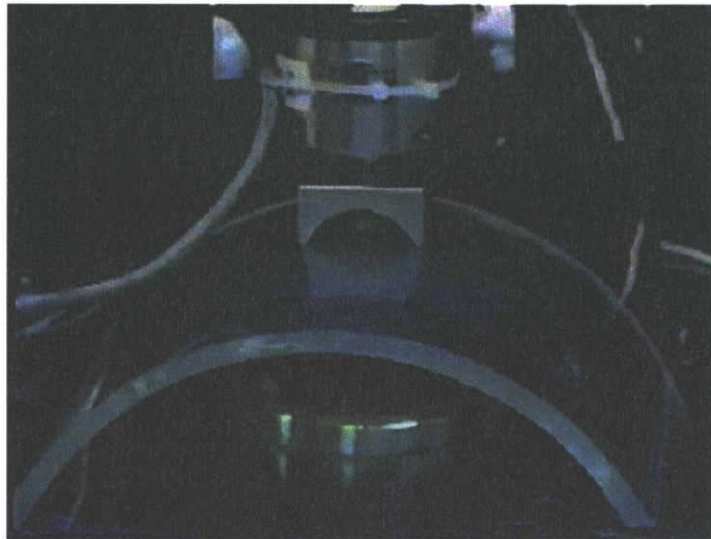
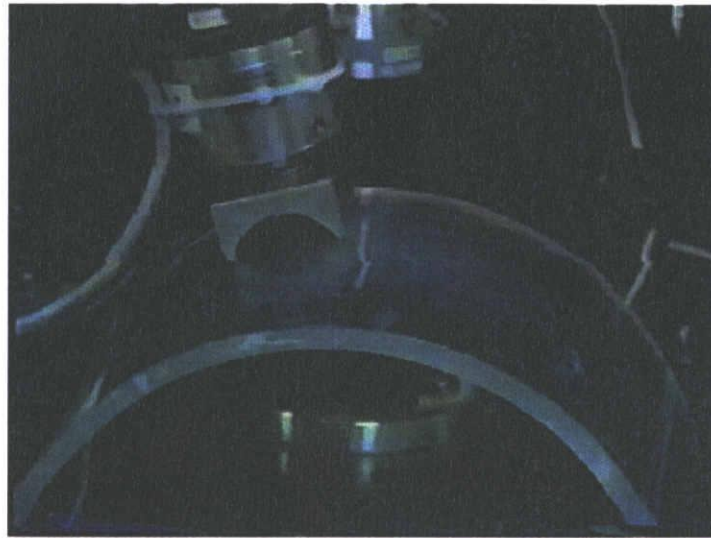
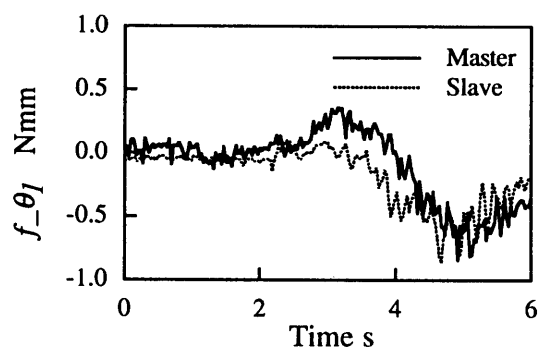
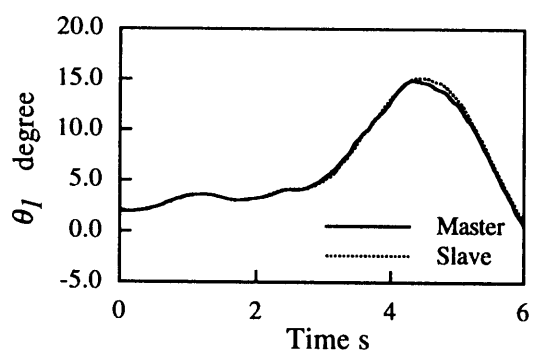
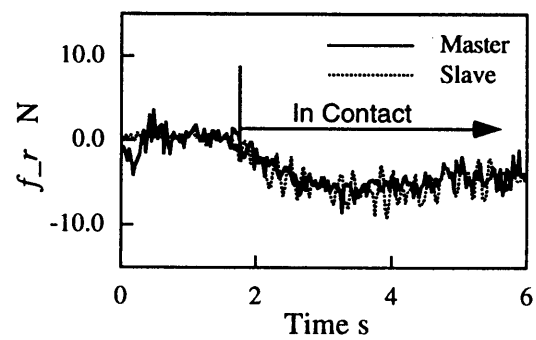
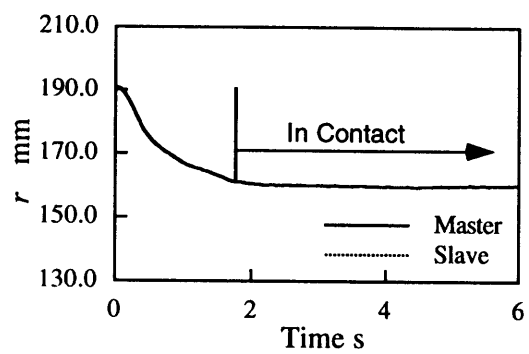


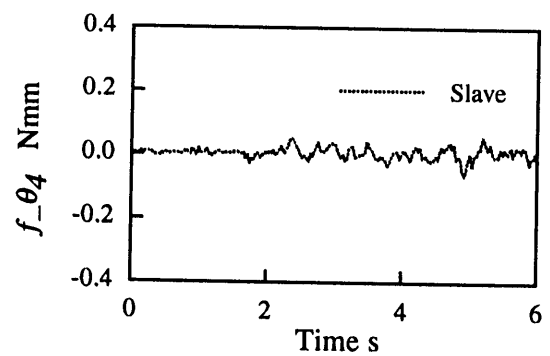
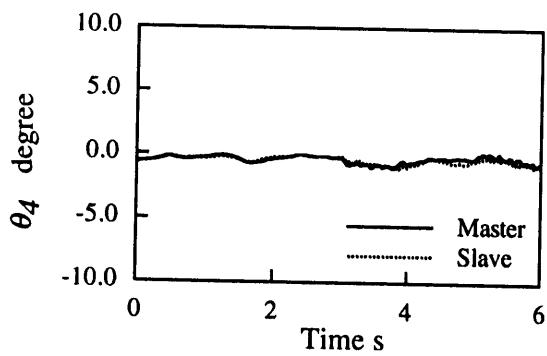
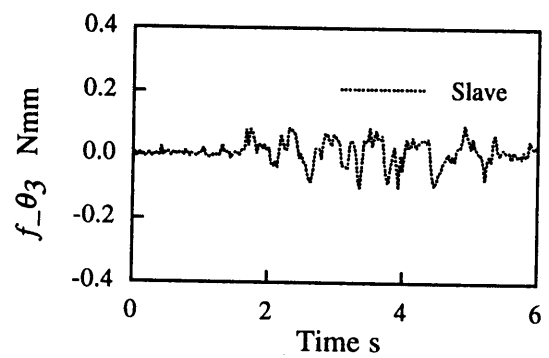
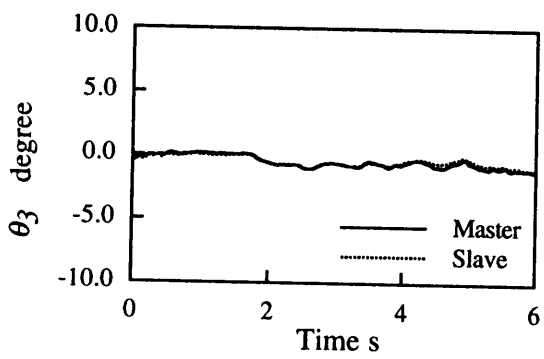
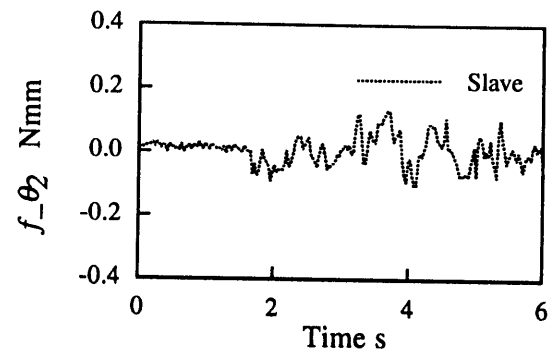
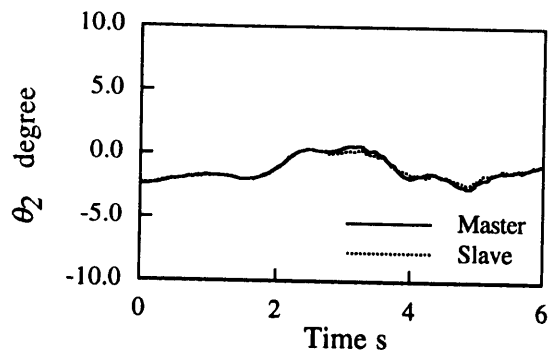
図 4.23: 円筒面の倣い作業の様子 (写真)



(a) Motions of Manipulators

(b) Applied Forces

図 4.24: 実験結果 (円筒面の倣い作業 / マニュアルモード)



(a) Motions of Manipulators

(b) Applied Forces

図 4.25: 実験結果 (円筒面の倣い作業 / 自律モード)

4.5.3 実験2 仮想環境を用いたスケーリング実験

マスタースレーブ間のスケールの比率が大きい場合には、そのスケールに見合った定格を持つセンサ類を使用すべきであるが、今回の実験装置はマスター用／スレーブ用共に同定格のセンサを用いているため、センサの分解能の違いやノイズの影響により、スケーリングファクタを大きく設定した場合の特性については正確な測定ができない。本システムは、将来マクロマイクロマニピュレーションなどへも応用されることを前提としているため、スケーリングした環境においても同等の性能が得られることを確認する必要がある。そのため、ここでは仮想環境をコンピュータ内に構築して特徴的なスケーリングファクタについて提案するシステムの有効性を調べる実験を行った。実験は図4.26のようなシステムを用いて、簡単のため1自由度で行った。図に示すように、マスターマニピュレータとして実マニピュレータを用い、スケーリングされるスレーブマニピュレータのモデルと仮想環境とをコンピュータ内に構築した。実験ではマスタースレーブ系1自由度仮想ツール特性（ここでは単にインピーダンス特性とした）を持つように制御し、ばね・ダンパモデルで表現された仮想的な壁（仮想環境）に対して拘束させた。ここでは、スケーリングファクタとして表4.5.3に示す3種類に対する実験結果を示す。

図4.27から図4.29は、表4.5.3の各スケーリングファクタに対応した実験結果を示している。オペレータはマスターマニピュレータを操作し、仮想環境に対してスレーブ側を各2回ずつ拘束させている。左側のグラフはマスターとスレーブの運動を、右側は操作力 f_h と作業力 f_e をそれぞれ表している。結果を評価しやすくするため、各グラフの縦軸の目盛はマスター側とスレーブ側でスケーリング倍だけ変更してあることに注意されたい。これらのグラフから、力と運動が自由にスケーリングでき、設計通りのスケーリングが実現されているのが分かる。また、壁面への拘束時に不安定な振動が現れることはなかった。提案した制御系の有効性が確認できる。

表 4.1: スケーリングパラメータ

	s_m	s_f	Scaling
CASE 1	0.5	2.0	$\dot{x}_m = 0.5\dot{x}_s, f_h = 2.0f_e$
CASE 2	2.0	0.5	$\dot{x}_m = 2.0\dot{x}_s, f_h = 0.5f_e$
CASE 3	1000	1000	$\dot{x}_m = 1000\dot{x}_s, f_h = 1000f_e$

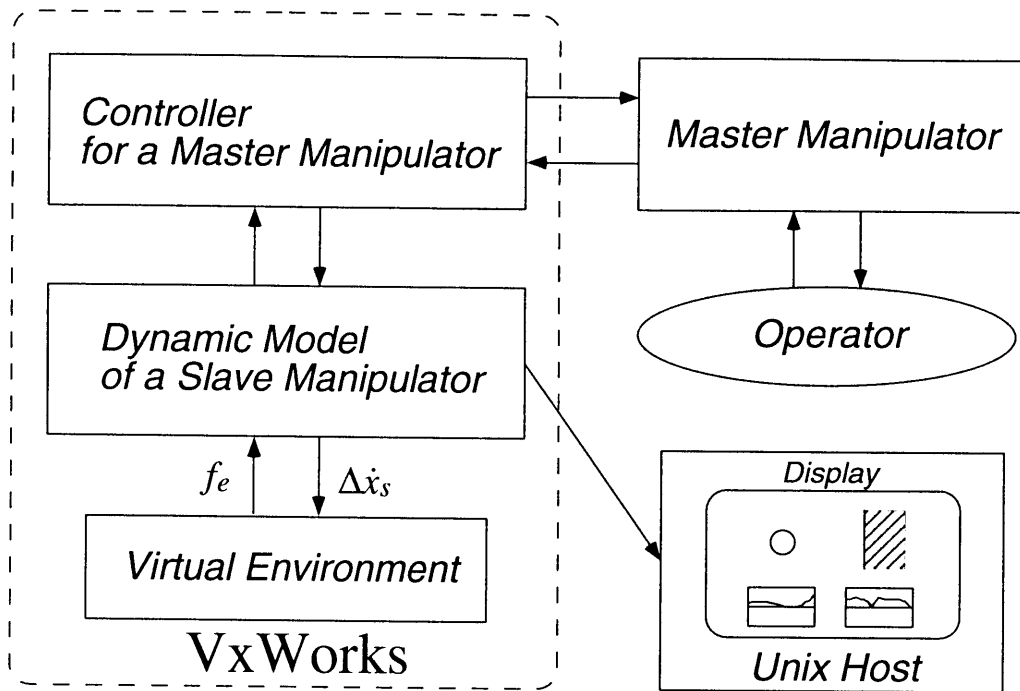


図 4.26: 仮想環境及びスレーブマニピュレータのモデルを用いた実験システム

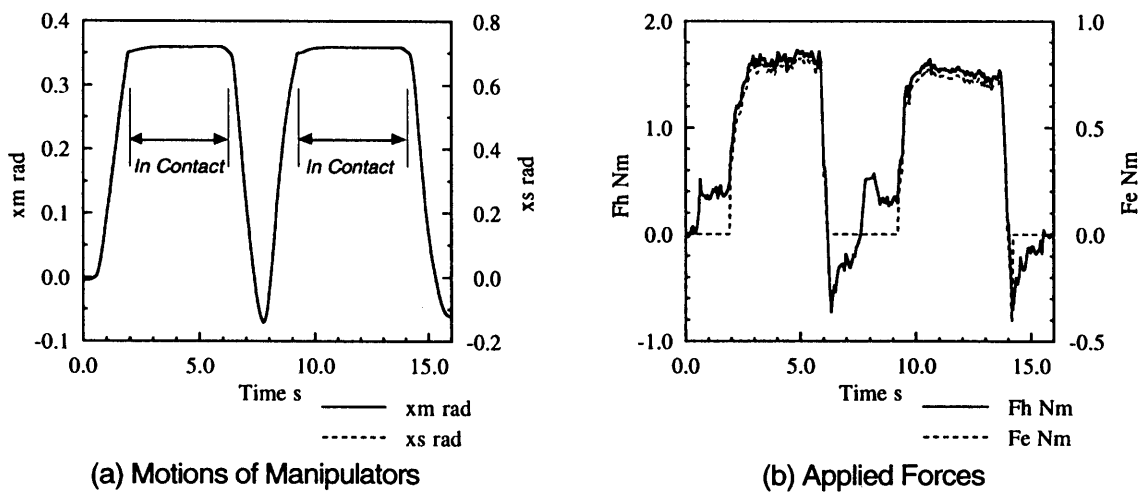


図 4.27: スケーリング実験 (case 1)

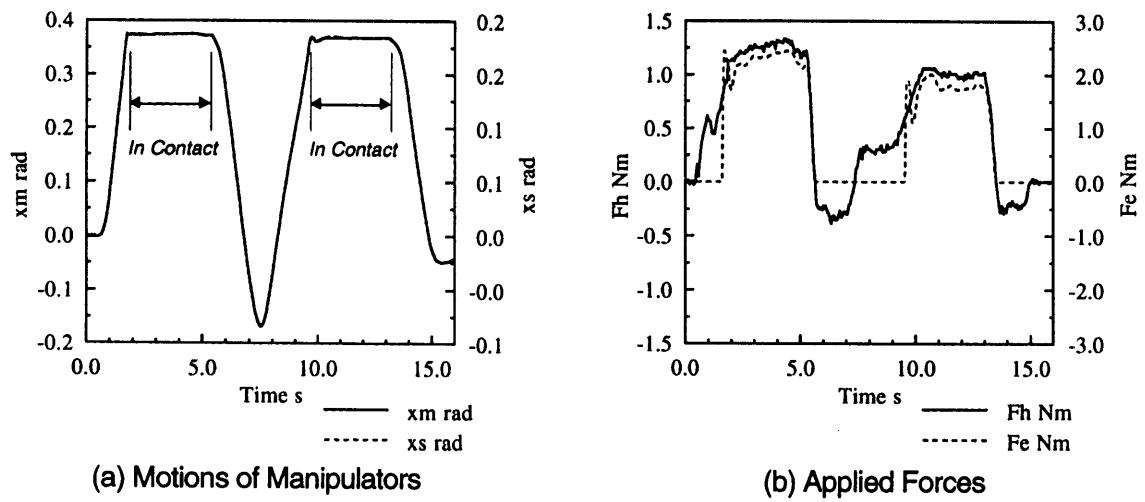


図 4.28: スケーリング実験 (case 2)

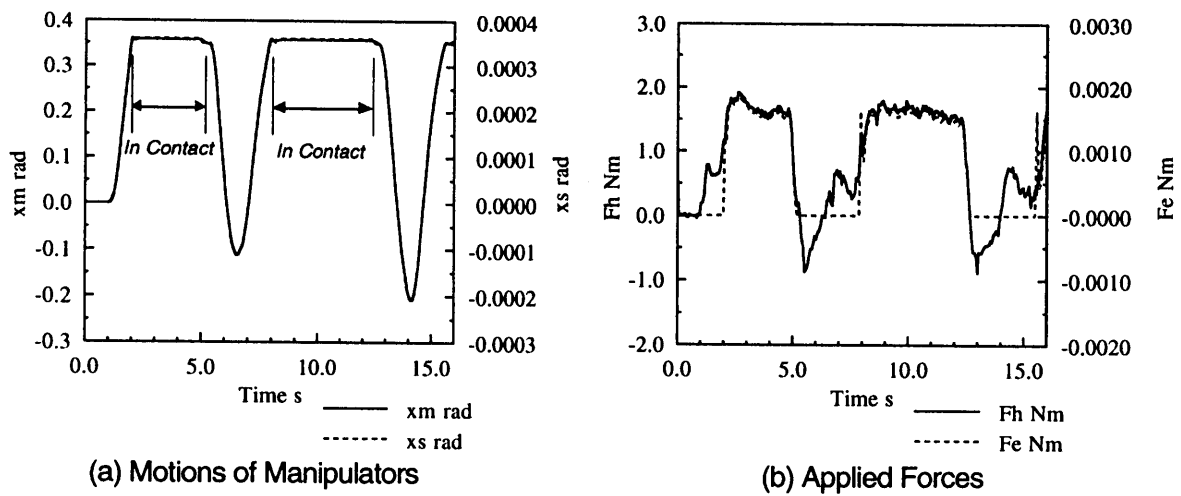


図 4.29: スケーリング実験 (case 3)

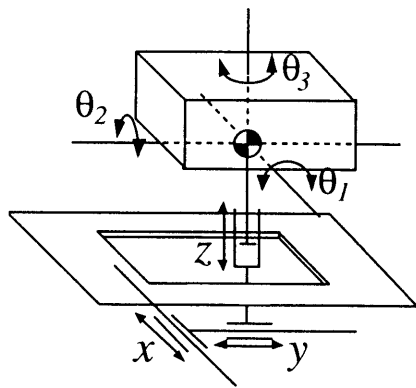
4.5.4 実験3 実環境を用いたスケーリング実験（機械部品の組み付け作業）

最後に、スケーリングを行った場合でも設計した仮想ツールの操作性が実現されることを確認するため、前述の機械部品の組み付け作業を例に採り、実環境でのスケーリング実験を行った。実験に用いた半自律化仮想ツールの特性を図4.30に示す。ここで、 (x, y, z) はマニュアルモード、 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ は自律モードである。また、実験に用いたスケーリングファクタは、

$$s_m = s_f = 2.0 \quad (4.56)$$

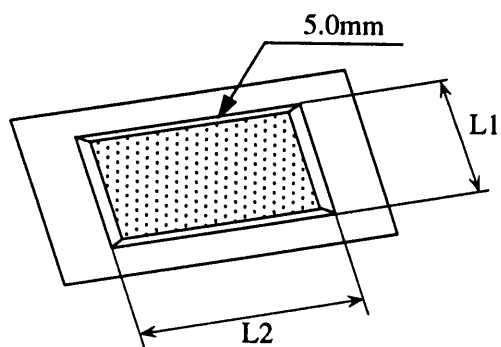
である。

図4.31に部品の組み付け実験の詳細を示す。また、図4.32に機械部品の組み付けの様子を示す。実験では、オペレータがマスターマニピュレータを操作して部品を動かす、プレートのくぼみに部品を組み付けた。図4.33、図4.34に組付け時の部品の運動と力の変化の様子を示す。図4.33はマニュアルモードの応答を、図4.34は自律モードの応答をそれぞれ表している。実験開始後、約2～3秒後に部品の接触が始まりオペレータによって組み付け作業が実行された。オペレータは、くぼみのおおよその位置しか指定できないにもかかわらず、設計した仮想ツール特性に支援され、部品の位置と姿勢が補正されて組み付けがうまく行われているのが分かる。スケーリングの結果を評価しやすくするため前実験と同様に各グラフの目盛を変更してあるが、設計どおりのスケーリングが得られている。数秒後には組み付けが完了しているが、作業の間、振動的な挙動は現われていない。提案したTask-oriented制御系が有効に働いているのが確認できる。



x, y, z - Manually Controlled Mode
 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ - Autonomous Mode

図 4.30: 機械部品組み付けのための半自律化仮想ツール



$L1 = 35.00\text{mm}$, clearance 0.05mm
 $L2 = 94.60\text{mm}$, clearance 0.20mm

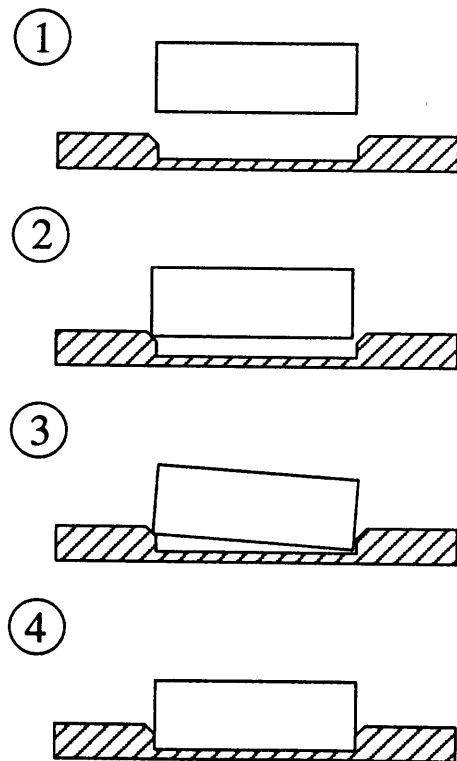


図 4.31: 組み付け実験の概要

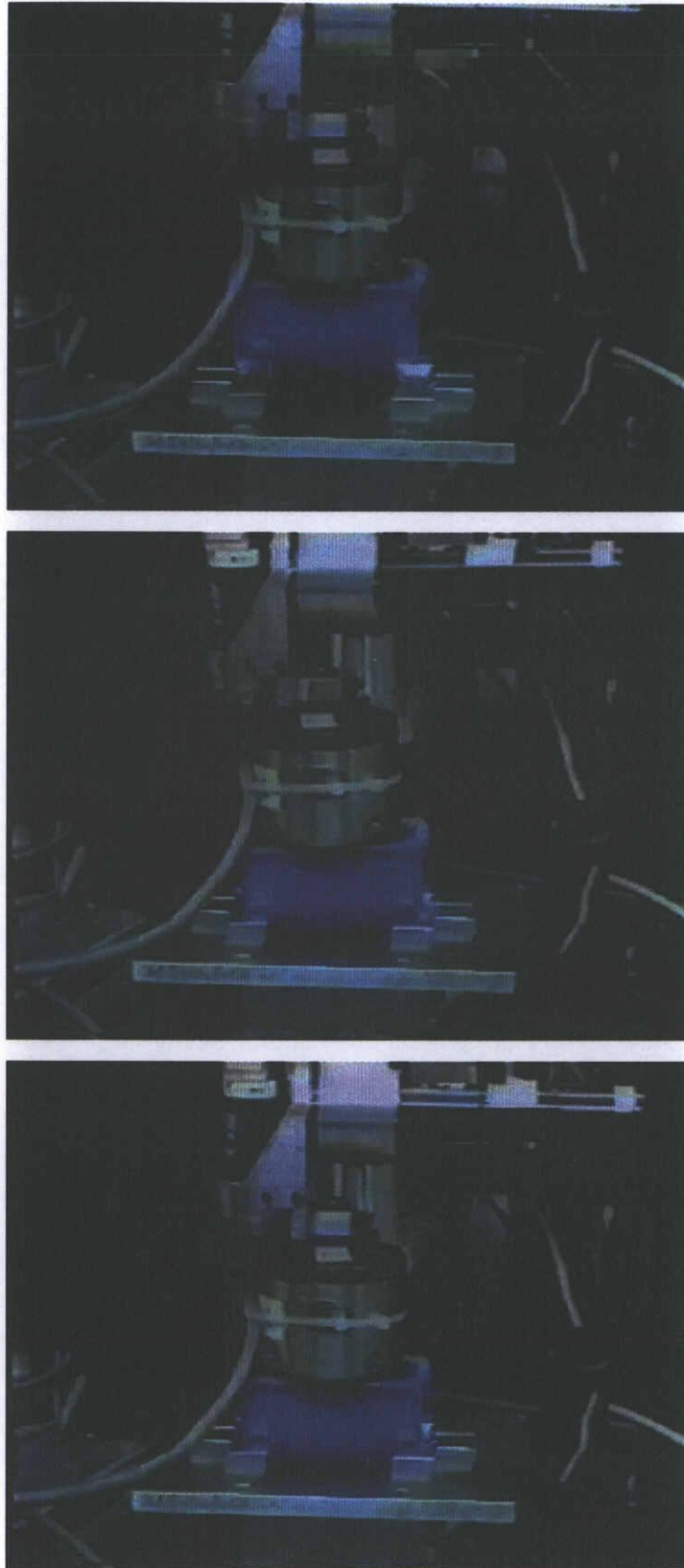


図 4.32: 部品組み付けの様子 (写真)

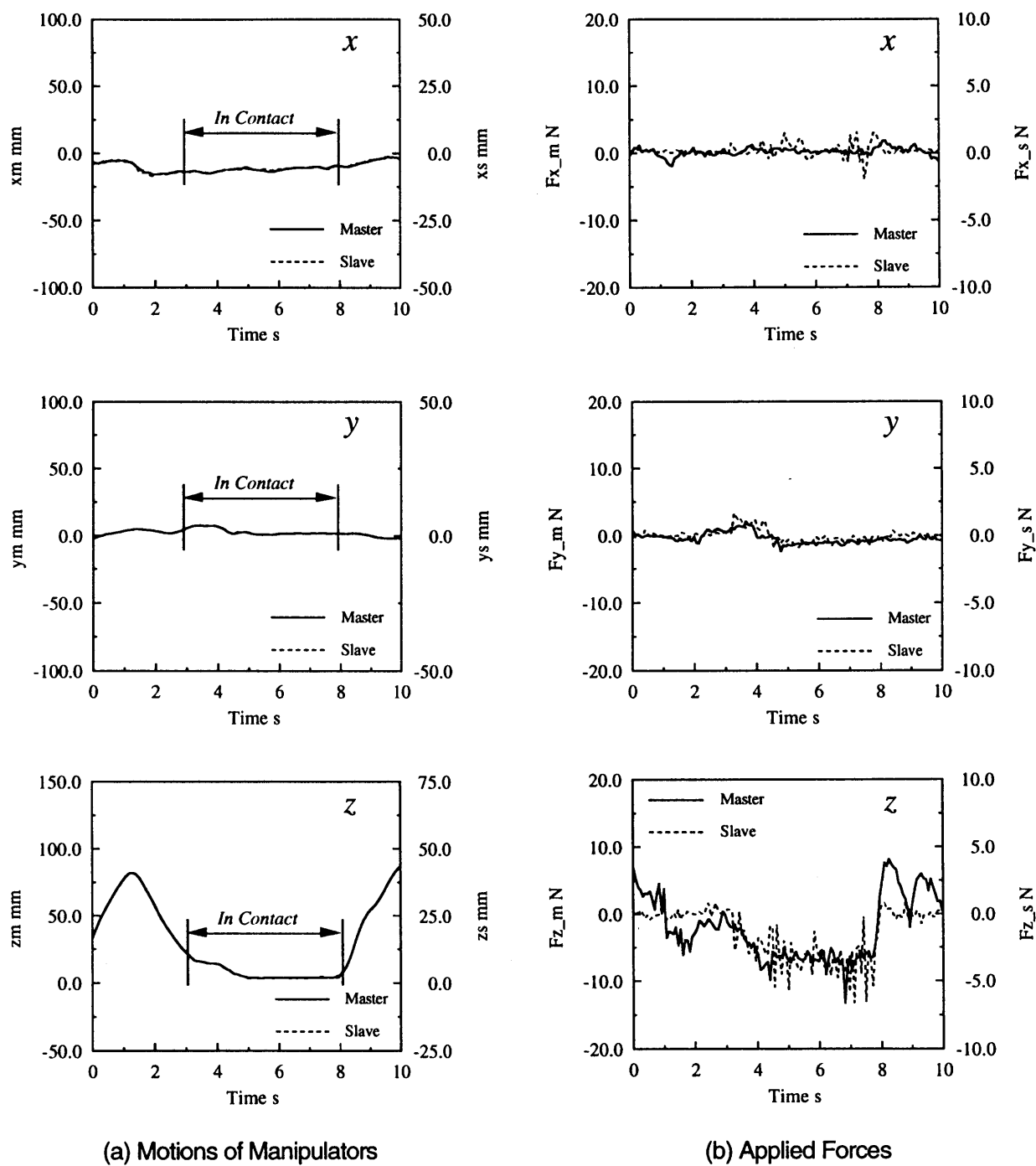
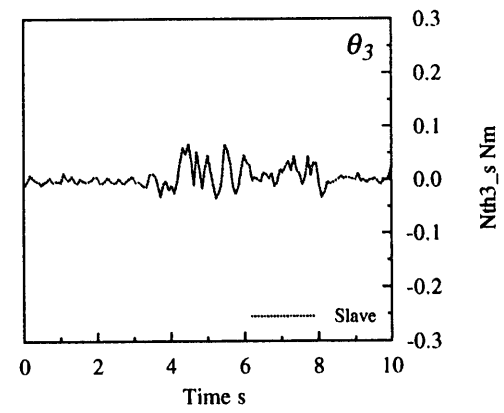
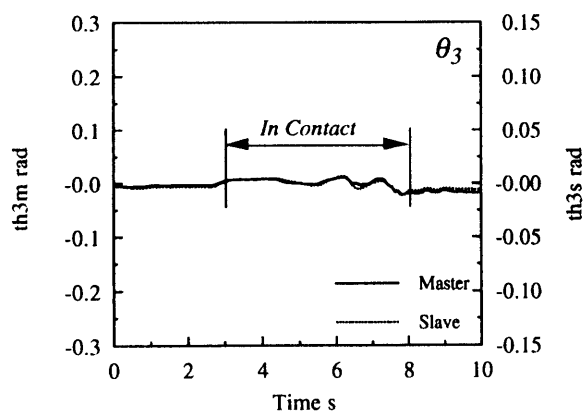
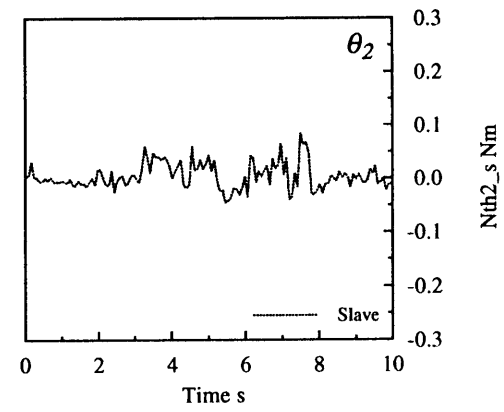
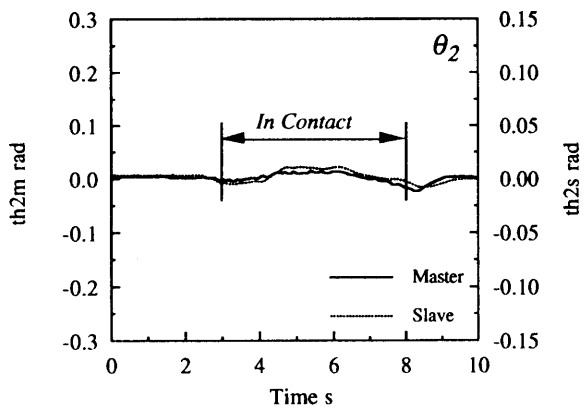
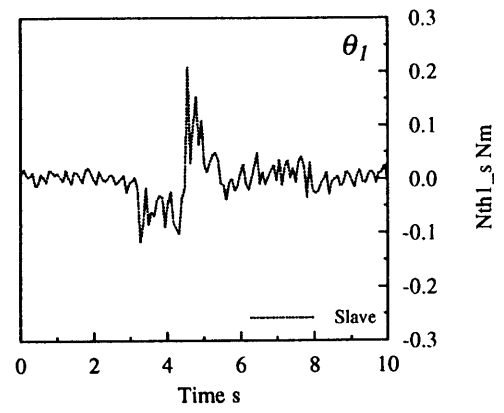
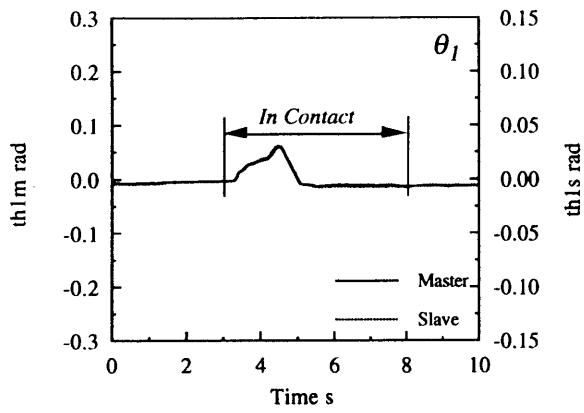


図 4.33: 実験結果 (機械部品の組み付け作業 / マニュアルモード)



(a) Motions of Manipulators

(b) Applied Forces

図 4.34: 実験結果 (機械部品の組み付け作業/自律モード)

4.6 まとめ

遠隔で作業を行うテレマニピュレーションシステムにおいて、指令塔となるオペレータには非定常な作業を正確にかつ安全に遂行することが要求される。そのため、操作に熟練を要し、オペレータの負担はとても大きなものであった。そこで、従来の多くの研究では、理想的なバイラテラルフィードバック系を構成することで作業の臨場感を向上し、システムの特性を改善することを目指してきた。しかし、マスタースレーブ系の理想応答を実現するためにはシステムの持つ特性を完全に打ち消さねばならず、完全な理想応答の実現は不可能なものであった。これに対し、本研究は、システムの特性を打ち消そうとするのではなく、逆にその特性を作業に利用しようという立場にある。本章では、仮想ツール特性を利用してオペレータの作業を支援することで、作業時の負担を軽減し、より実用的な遠隔操作システムを実現することを目的とし、半自律化仮想ツールに基づく Task-oriented 制御系を構成した。

本章では、まず最初に、従来の制御目標であったマスタースレーブ系の理想応答の問題点を指摘し、これと対比して提案する Task-oriented 制御系のコンセプトを示した。次に、システムに持たせる Task-oriented な道具の特性を表現するための半自律化仮想ツール特性の概念について説明した。この半自律化仮想ツールの概念は、システムの操作性と安全性を改善するために、新しい半自律化の前提に基づいて仮想ツールを半自律化したもので、ロボットと人間が協調して作業を行う場合の両者間の理想的な関係の一つの枠組みを提案するものである。次に、この半自律化仮想ツールの特性をテレマニピュレーションシステムに持たせるための Task-oriented 制御系を構成した。そして、構成した制御系は部分安定性と受動性を満たし、Task-oriented 制御系によって安定なシステムを実現できることを示した。また、近年のマクロマイクロマニピュレーションシステムへの需要を考慮し、システムの安定性を保ちながら、マスタースレーブ系の力と運動を自由にスケールリングできるよう Task-oriented 制御系の拡張を行った。最後に、三種類の作業実験を行い、提案した Task-oriented 制御系によってシステムの操作性が大幅に改善されることを確認した。また、力と運動のスケールリングが希望通りに実現できることを確認した。そして、提案するシステムでは、堅い壁に拘束した場合でも不安定な振動が発生せず、受動性に基づく安定性解析が人間-機械系システムにとって有効であることが確認された。

第5章 拡張仮想ツールに基づくテレマニピュレーションシステムの操作性向上

作業の臨場感の向上及びシステムの操作性向上は、オペレータが指令塔となって作業の成否を左右する遠隔操作システムにおいては、最も重要な課題の一つである。我々は、前章でマスタースレーブ系の理想応答に代わるものとして、半自律化仮想ツールダイナミクスに基づいたテレマニピュレータの Task-oriented 制御系を構成し、遠隔操作システムにおける人間とロボットの協調関係の一つの在り方を提案した。Task-oriented 制御は、システム全体を作業に適した道具の特性を持つように制御することで自然な感覚で作業を行えるシステムを実現するものであった。我々は現在、これまでの暗黙の常識となってきたマスタースレーブ系の特性を見直し、Task-oriented 制御の手法を更に追求することで、より自由で柔軟な特性をシステムに持たせ作業性の高いシステムを実現することを目指している。本章では、仮想ツールダイナミクスの概念をもう少し広く捉えてマスタースレーブ系の特性を総合的に取り扱い、拡張仮想ツールに基づく Task-oriented 制御としてシステムの拡張を行う。まず最初に、これまでのテレマニピュレータの特性と問題点について従来の手法とは全く異なる新しい観点から論じる。そして、システムに対し、より柔軟な特性を持たせ操作性や作業特性を向上させるため、日常の道具の特性と対比しながら本システムでのアプローチについて説明する。次に、提案する拡張仮想ツールの概念を定義し、拡張仮想ツールに基づいたテレマニピュレーションシステムの特徴や利点、応用法について説明する。そして、前章の Task-oriented 制御系を拡張する形で制御系を構成し、実験により、システムの有効性を検証する。

5.1 従来のテレマニピュレーションシステムの特性と問題点

従来のほとんどのテレマニピュレーションシステムは、理想的なバイラテラルフィードバック系の構成を目的とし、マスタースレーブ系の理想応答の実現を目指してきた。それに対して、Task-oriented 制御では、逆にシステムに対して道具のような特性を与え、人間と受動的な道具の間にあるような理想的な協調関係を実現しようという立場にあり、作業に適した仮想ツールの特性を用いることでシステムの操作性が大幅に向上されることを確認してきた。ここでは、もう少し異なる観点から従来のマスタースレーブ系の特性について考察し、発想の転換によって、オペレータを支援する仮想ツール特性の設計の自由度を増し、システムの操作性や作業特性を更に向上させることができないかを検討する。

テレマニピュレーションシステムは、本来、図 5.1 に示すように、

- オペレータ及びマスターマニピュレータの存在する操作側環境
- スレーブマニピュレータや作業環境のおかれる遠隔環境（リモートサイト）

という二つの環境ブロックから構成されている。操作側環境と遠隔環境側は互いに離れた場所に存在するため、設置状況に応じてオペレータは直接もしくはモニタディスプレイなどで遠隔環境側の状況を監視しながら作業を行う。これまでのテレマニピュレーションシステムでは、より多くの情報をオペレータに伝達して操作感を向上しようと、バイラテラルフィードバック制御系を構成するのが普通であった。ところが、すべての作業情報をオペレータ側と環境側とで共有することができれば、操作側環境と遠隔環境とを同一視することができ遠隔であることを意識しなくても作業を行えるであろうという認識から、このようなテレマニピュレーションシステムではマスターマニピュレータとスレーブマニピュレータの特性を完全に一致させることが暗黙の常識となってきた。つまり、図 5.2 のように、本来二つあるマニピュレータをあたかも一つのマニピュレータのように見せかけることが大前提となってきたのである。この点に関しては、理想応答を目指した従来のシステムだけでなく、前章で提案した Task-oriented 制御系においても同じであった。そのため、仮想ツールの特性設計はマニピュレータの自由度の範囲内で行わなければならない、操作性や作業特性を独立に考えることが難しかった。

我々は、前章で、仮想ツールの半自律化によりこの問題点を改善しようと試みてきたが、テレマニピュレーションシステムには本来二つのマニピュレータが存在す

るのであるから、これを生かして、より柔軟なシステム設計を行うことができないであろうか？ 例えば、それぞれのローカル環境内での情報を利用して、操作環境側のマニピュレータの特性をオペレータの操作性改善に使用し、遠隔環境側の特性を作業性の向上に使用するなど、システム全体として作業に適した特性を持たせることも可能ではないだろうか？ つまり、マスターマニピュレータとスレーブマニピュレータとが別々の異なる特性を持っていたとしても、それらが全体として上手く機能し得る特性を持つならば、システムの性能をより向上させることができるのではないだろうか？ 本章では、このような観点からシステムの操作性について考察し、システムに内在する冗長性に着目して Task-oriented 制御系の拡張を行う。次節では、日常使用している道具の特性について考察し、これらの道具のような特性を実現するために、システムに内在する冗長性を利用する一つのアプローチについて説明する。

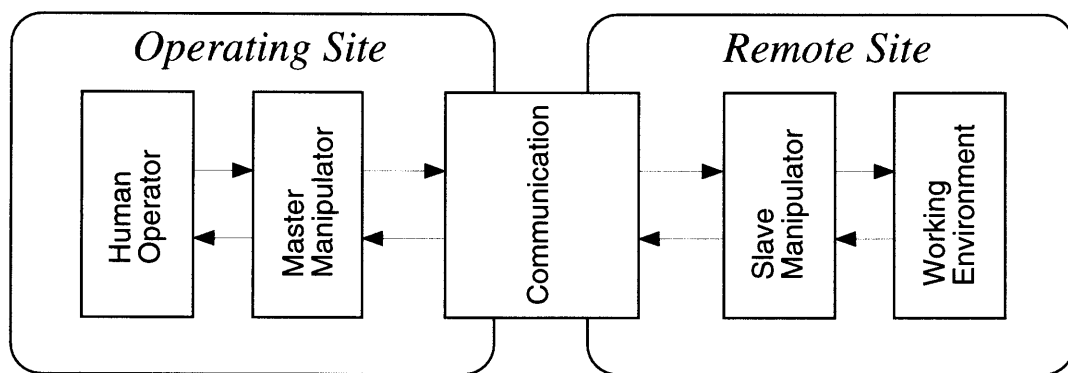


図 5.1: テレマニピュレーションシステムの構成

5.2 道具の持つ自由度とシステムに内在する冗長性の利用

ここでは、日常我々が使用している道具の特性について考察し、テレマニピュレーションシステムに内在する冗長性に着目してそれをシステムの操作性改善に利用することを考える。

まず最初に、道具の特性について考えよう。これまで提案してきた仮想ツール特性は道具のような特性をシステムに持たせることを目的としてきたが、実際には、マニピュレータの自由度によって拘束されるために、外力に対する道具の運動特性し

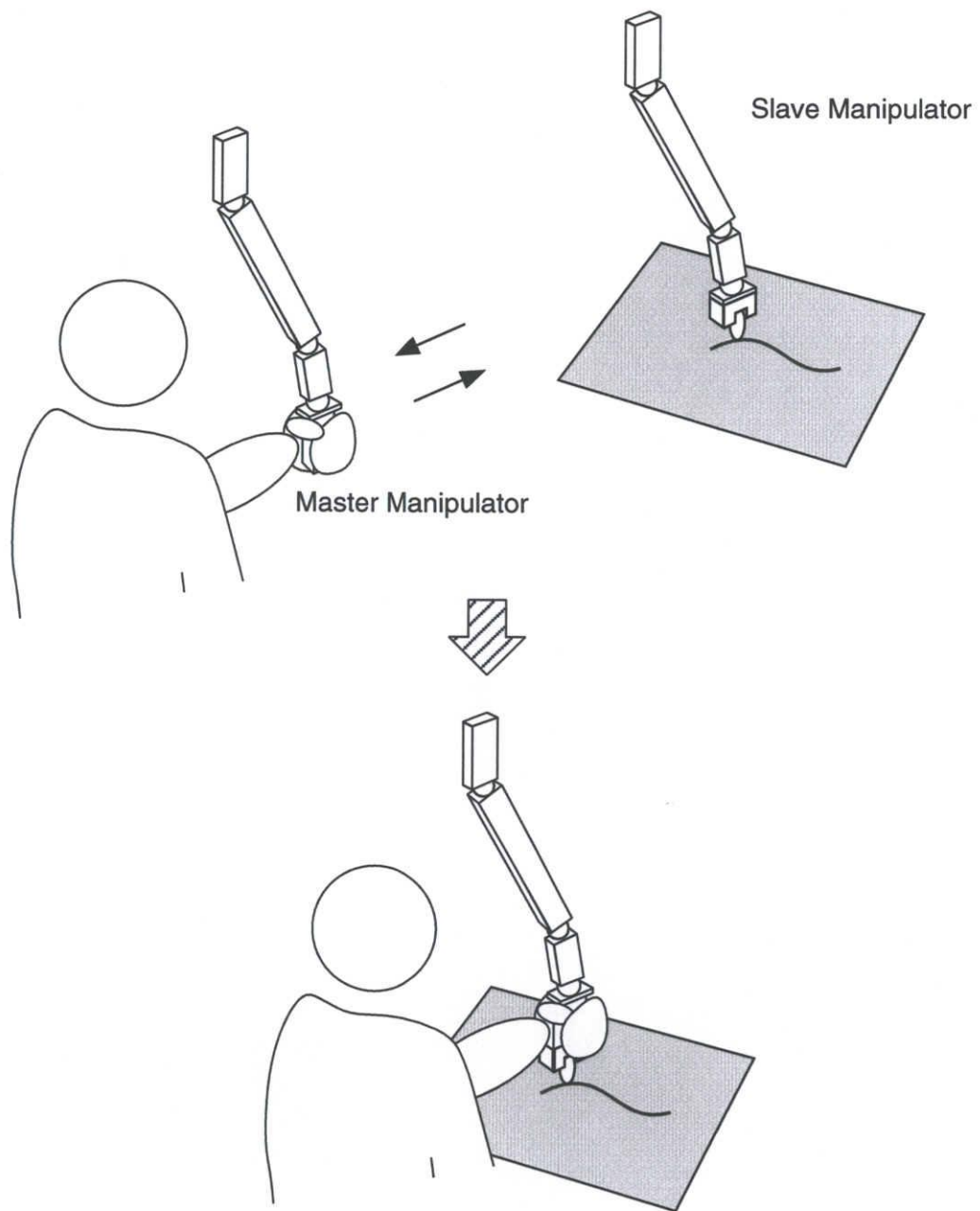


図 5.2: 従来のテレマニピュレーションシステムの目標

か実現することができなかった。そのため、例えば一般の6自由度のマニピュレータであれば、外力に対するエンドエフェクタの望ましい位置や姿勢の変化を仮想ツールとして表現することにすべての自由度を使い切ってしまうていた。つまり、マニピュレータのエンドエフェクタをオペレータが握っている道具の一部だと考えると、仮想ツール特性は正確には道具の特性そのものではなく、その道具の使い方（作業に適した道具の動かし方や作業のこつ）を表現するためのオペレータの支援機構であると捉えることもできる。しかし、実世界の道具の場合には、道具自体が作業に有効な特性を有していたり、道具の位置姿勢を表す6自由度の他に道具自身にも作業に適した自由度（機構）が存在していたりする場合が多い。実際の例を挙げて考えてみよう。図5.3はどこの家庭にも置いてあるような普通の掃除機である。ここでは、特に、人が持って作業を行う柄から先の部分に着目してみよう。人間が立ったままの姿勢で楽に作業を行えるように、掃除機のヘッド部には2自由度の回転機構が取り付けられており、この首振り機構が床面の自由な倣いを実現している。つまり、掃除機の柄の部分には、3次元空間上で位置／姿勢を表す6自由度に加えて、ヘッド部に自律化された2自由度を持つため、全体では8自由度が存在することになる。また、操作点と作業点（環境との間の干渉力の作用点）とが異なる位置に設定され、両者の間で運動や力の変換が行われている。道具の使い方だけでなく、このような作業に適した道具の特性そのものもシステムに持たせることができれば、より自由で柔軟な仮想ツールの特性設計が可能となるはずである。本章では、このような観点から仮想ツールの概念を拡張し、システムの操作性及び作業性改善法について検討する。

では、実際にそのような道具の特性をシステムに持たせることは可能なのだろうか？ 次に、テレマニピュレーションシステムの持つ自由度について考察し、多自由度仮想ツールの実現の可能性について検討する。前述のように、本来、テレマニピュレーションシステムにはマスターマニピュレータとスレーブマニピュレータという2つのマニピュレータが存在する。遠隔操作時には、マスターマニピュレータ先端の操作点に加えられたオペレータからの指令は、通信部によりスレーブマニピュレータに伝達され、作用点を介して間接的に作業が行われる。このような運動伝達を考慮し、また、操作環境側に置かれたマスターマニピュレータと遠隔環境側のスレーブマニピュレータの特性とを別々のものと考え、システムにはマスターマニピュレータとスレーブマニピュレータの持つそれぞれの自由度を足し合わせただけの自由度が存在することになる。つまり、図5.4に示すように、マスターマニピュレータ及びスレーブマニピュレータの自由度をそれぞれ n_m, n_s とすると、オペレー

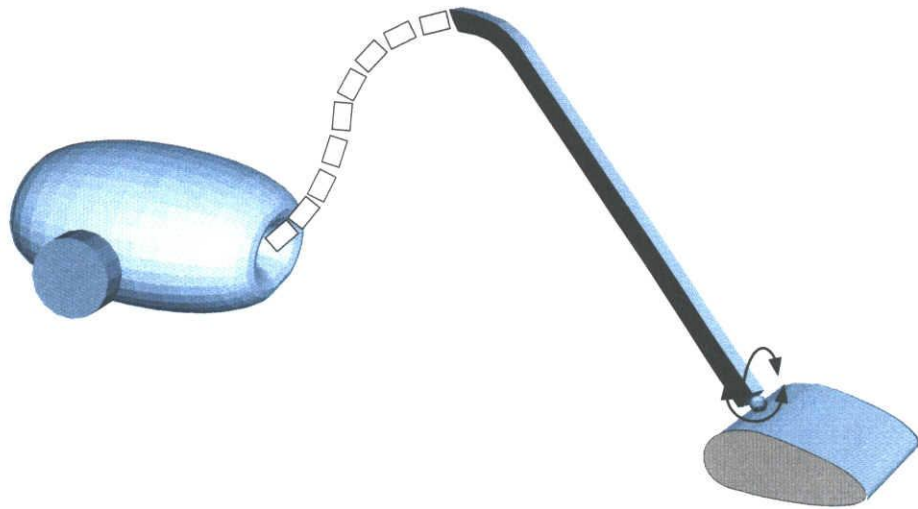


図 5.3: 道具の持つ自由度 (掃除機の柄)

タから作業環境までの間には $n_m + n_s$ の自由度が存在することになる。そのため、システム全体としてある種の道具の特性を実現することを考えた場合、本来、システムは作業に対して冗長自由度を持つ可能性がある。にもかかわらず、これまでのテレマニピュレーションシステムでは、これらの自由度はすべてマスタースレーブ間の情報伝達（運動伝達等）に利用され、マスターマニピュレータとスレーブマニピュレータの運動特性を合わせるために用いられてしまっていた。しかし、オペレータの負担軽減や作業の自律化の観点から見ると、必ずしもマスターとスレーブの特性を完全に同一にする必要はない。人間-機械系の協調の面から考えても、オペレータが作業に必要な全自由度を操作する必要はなく、従来マスタースレーブ間の伝達に使用されていた自由度から冗長自由度が発生する。また、作業に必要な自由度がスレーブマニピュレータの自由度よりも少ない場合にも冗長性が生まれてくる。更に、マニピュレータ自体が冗長自由度を持つ場合やマニピュレータの手先に取り付けるハンドなどの特性まで総合的に考えると、もっと多くの自由度が存在することになる。よって、作業に必要な自由度を n_{task} 、情報伝達に必要な自由度を n_{com} としてシステム全体の冗長自由度数を求めると、 $n_m + n_s - (n_{task} + n_{com})$ となる。本手法では、この $n_m + n_s - (n_{task} + n_{com})$ 自由度を冗長なものとして取り扱い、システムの操作性向上に利用することを考える。

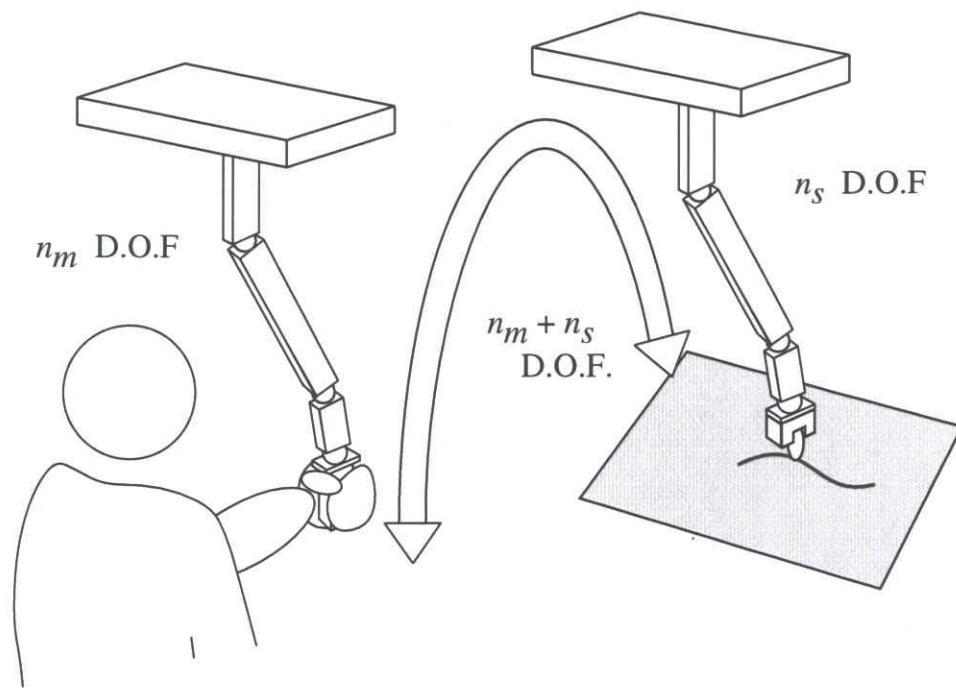


図 5.4: テレマニピュレーションシステムに内在する冗長性

5.3 拡張仮想ツールダイナミクス

ここでは、システムに内在する冗長性を利用して、より柔軟な特性設計を行えるように仮想ツールの概念を拡張し、拡張仮想ツール特性の概念を定義する。そして、これまでの仮想ツール特性では実現できない、拡張仮想ツールの特徴的な利用法について説明する。

拡張仮想ツールは、システムに内在する冗長性を考慮して仮想ツールの概念を拡張したものである。図 5.5 に、拡張仮想ツールの概念図を示す。図中 (a) のように、従来の仮想ツールが二つのマニピュレータに同一の特性を持たせることを前提としていたのに対し、(b) の拡張仮想ツールでは、各マニピュレータの特性を総合したものが一つの道具の特性になるようにシステムの特性を設計するものである。(b) のリンクモデルが示すように、拡張仮想ツールでは、一般にオペレータ側の操作点と環境側の作業点が別々に設定され、その間を連結する作業に適した道具のような特性が仮想的な機械構造で表現される。拡張仮想ツールは、仮想ツールを含有する形で特性を拡張したもので、冗長性を考えない場合には従来の仮想ツールの概念と一

致する(注1)。

前述のようにマニピュレータ自体に冗長性を持つ場合やマニピュレータの手先にハンドなどの付加機構を有する場合には、より柔軟な特性設計が可能であるが、今回のシステムでは簡単のためマニピュレータ自体には冗長性が無いものとし、マニピュレータのみの特性を扱うものとする。本論文では、目標とする受動的な拡張仮想ツールのダイナミクスを次式のような形で表現する。

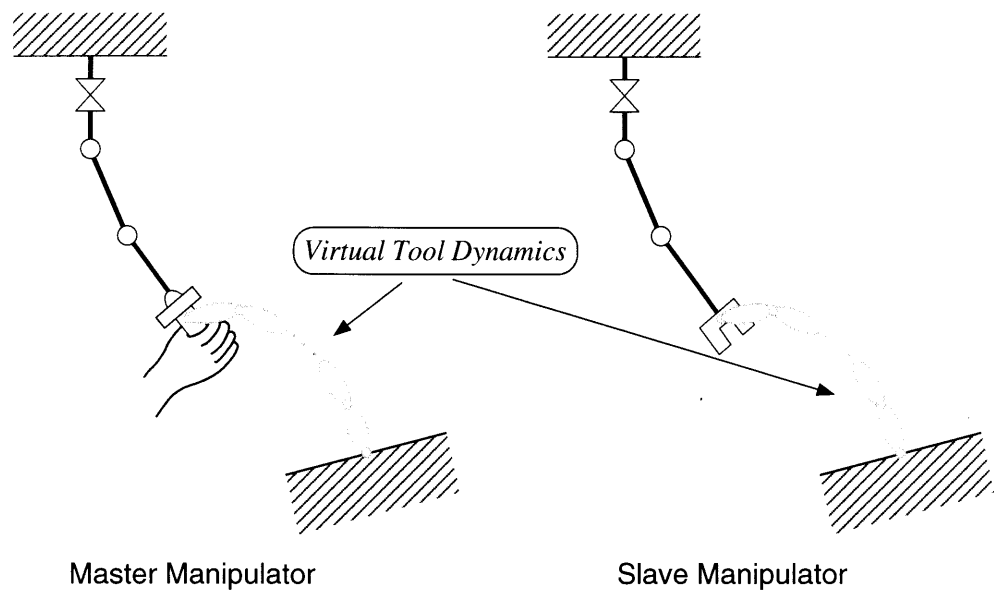
$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} M_c & 0 & 0 \\ 0 & M_{m_r} & 0 \\ 0 & 0 & M_{s_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \ddot{x}_c \\ \Delta \ddot{x}_{m_r} \\ \Delta \ddot{x}_{s_r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_c & 0 & 0 \\ 0 & D_{m_r} & 0 \\ 0 & 0 & D_{s_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_c \\ \Delta \dot{x}_{m_r} \\ \Delta \dot{x}_{s_r} \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} K_c & 0 & 0 \\ 0 & K_{m_r} & 0 \\ 0 & 0 & K_{s_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_c \\ \Delta x_{m_r} \\ \Delta x_{s_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{hc} \\ f_{hr} \\ 0 \end{bmatrix} - s_f \begin{bmatrix} f_{ec} \\ 0 \\ f_{e_r}/s_m \end{bmatrix} \quad (5.1)
 \end{aligned}$$

$$\dot{x}_{m_c} = s_m \dot{x}_{s_c} \quad (5.2)$$

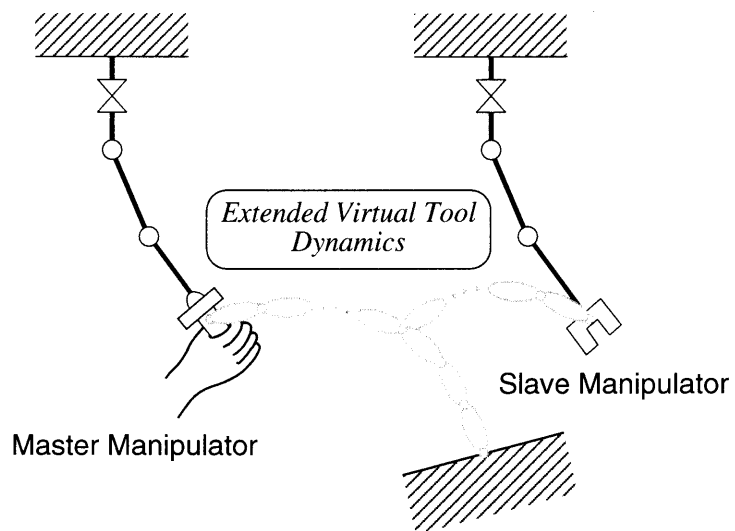
ここで、 x は仮想ツールの変位を表す一般化座標、 f_h はオペレータの操作力を、 f_e はスレーブマニピュレータが環境に加える力を一般化座標で表わしたものである。 M, D, K は仮想ツールの特性パラメータである。尚、添字 m 及び s は各々マスター側/スレーブ側の特性であることを示し、添字 r (redundancy)は冗長性を利用している部分の特性を、 c (common)はマスター側とスレーブ側で共通する部分(運動伝達部)の特性を示す。式中の s_m, s_f は前章で説明した力と運動をスケールリングするためのスカラー量である。また、ここでは半自律化の前提によりオペレータ側冗長部分とスレーブ側自律部分の特性が互いに競合しないよう独立に設計するものとし、競合部分の特性成分を0と置いている。

拡張仮想ツールの具体的な設計例を示そう。ここでは、設計イメージを捉えやすくするため、図5.6のような紙面内での3自由度の円筒面の倣い作業を考える。こ

¹ただし、今回用いた式(5.1)のダイナミクスでは、これまで構築してきたTask-oriented制御系との整合性を保つために、半自律化の実現方法が従来と少し異なっている。今回のシステムでは、モードを決定する選択行列は用いられず、仮想ツールのパラメータと冗長部分の利用により半自律化が実現される。



(a) 従来の仮想ツールのリンクモデル



(b) 拡張仮想ツールのリンクモデル

図 5.5: 拡張仮想ツールの概念図

で設計する拡張仮想ツールのイメージは、図5.7のようなものである。この仮想ツールは前述の掃除機の柄と似たような特性を持ち、柄の先端部分に1自由度の回転部分を有している。平面内でのツールの位置を決定する3自由度と合わせて、合計で4自由度の仮想ツールである。柄の先端部分の回転特性により、作業環境からの拘束状況に関係なくオペレータ側の可操作性が高い状態に保たれるため、広い範囲で自由に円筒面を扱うことができる。また、マスタースレーブ間が仮想的なリンクによって結ばれているため、相手側の位置を把握しやすいという利点もある。(マスターマニピュレータとスレーブマニピュレータが離れて設置されている場合には、図5.8のように、モニタディスプレイ内のスクリーン座標系との関係を考慮し、スケーリングファクタや仮想ツールのリンクパラメータを上手く設定することで、同様の作業感覚を得ることができる。) この仮想ツールを実現するためのマスターマニピュレータ及びスレーブマニピュレータの特性は、例えば図5.9のように表現できる。ここでは平面内の運動のみを考えているため、各マニピュレータの自由度は $n_m = n_s = 3$ である。従って、それぞれのツール特性も3自由度となる。これらの自由度の内、 q_1 及び q_2 がマスタースレーブ間での共通部分となり、全体の6 ($= n_m + n_s = 3 + 3$) 自由度からこの ($n_{comm} =$) 2自由度が差し引かれて、結果としての拡張仮想ツールは4自由度となっているのである。

拡張仮想ツールには例えば次のような特徴的な利用法が考えられる。

- 半自律化による操作性・作業特性の向上
オペレータ操作部・自律機能部を分割することにより、オペレータの負担を軽減し作業効率を向上することが可能である。
- 冗長性を利用したオペレータ側の操作性向上
マスター側の冗長自由度を利用して、作業環境からの拘束によって失われる仮想ツールの操作性を補い、可操作性等を考慮した設計が行える。(前述の掃除機の柄の先端に取り付けられた2自由度がこの利用法に相当する。)
- リンク特性を用いた運動変換
マスタースレーブ間の特性を利用してリンク機構などの仮想的な運動特性を持たせることができるため、掃除機の柄のように、マスタースレーブ間での運動の変換等を行うことができる。(部分的な運動のスケーリングなど)
- 冗長部分のインテリジェントなジョイスティックとしての利用
マスター側の冗長性を利用して、オペレータの意図や作業情報を伝達することができる。例えば、準静的な範囲であれば、ジョイスティックからの入力によ

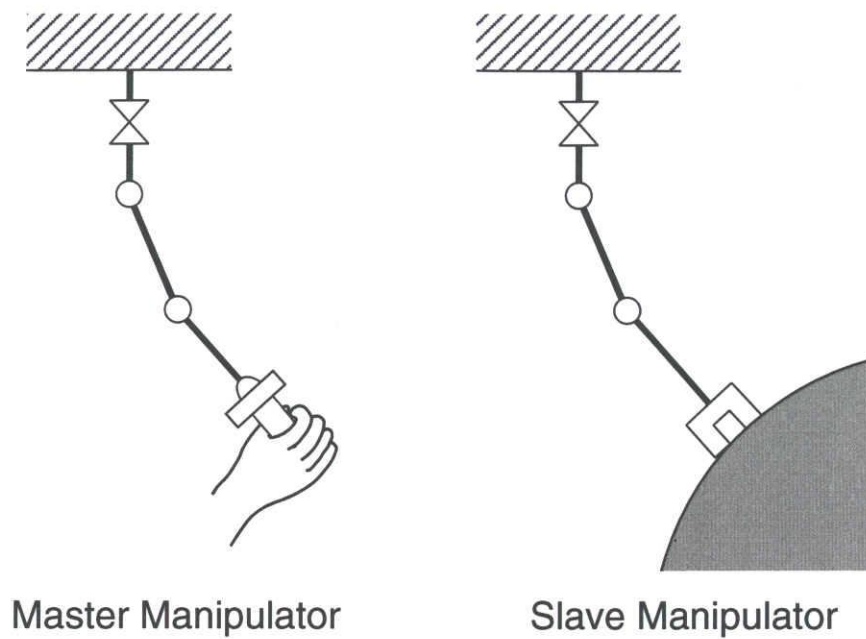


図 5.6: 円筒面の倣い作業

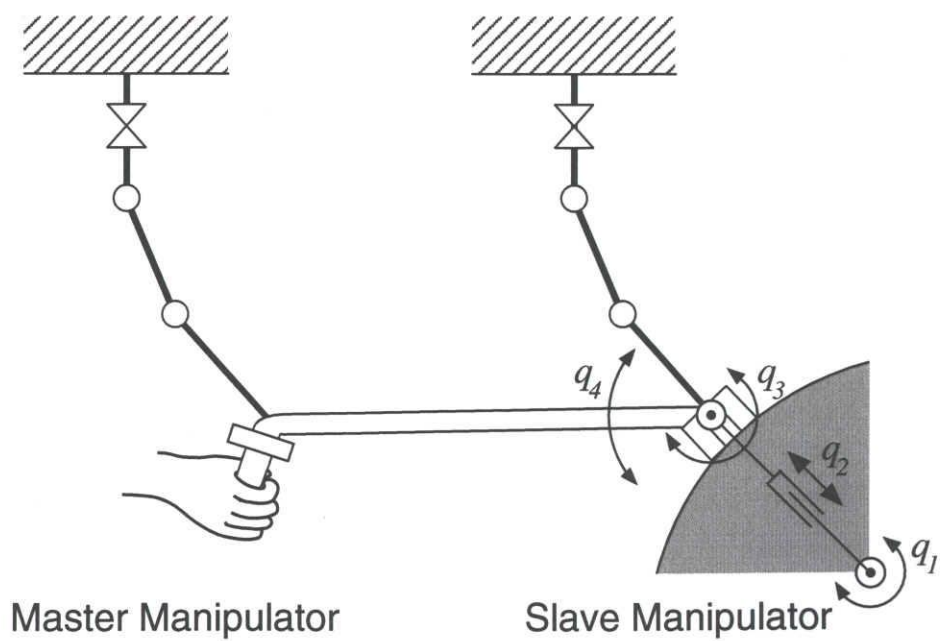


図 5.7: 拡張仮想ツールによる作業イメージ

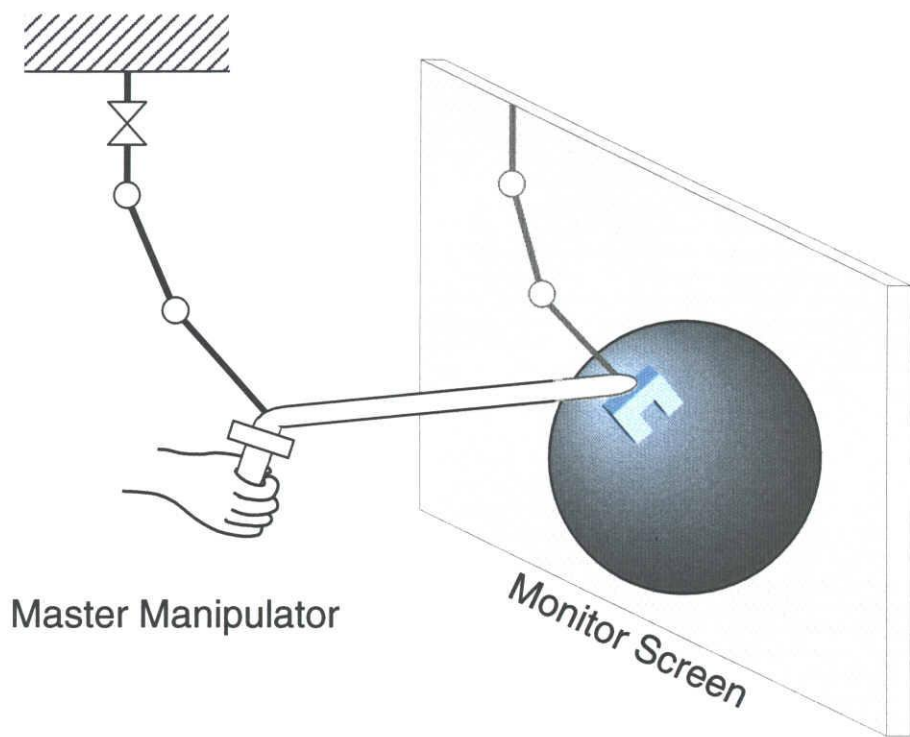


図 5.8: モニタを介した拡張仮想ツールによる作業イメージ

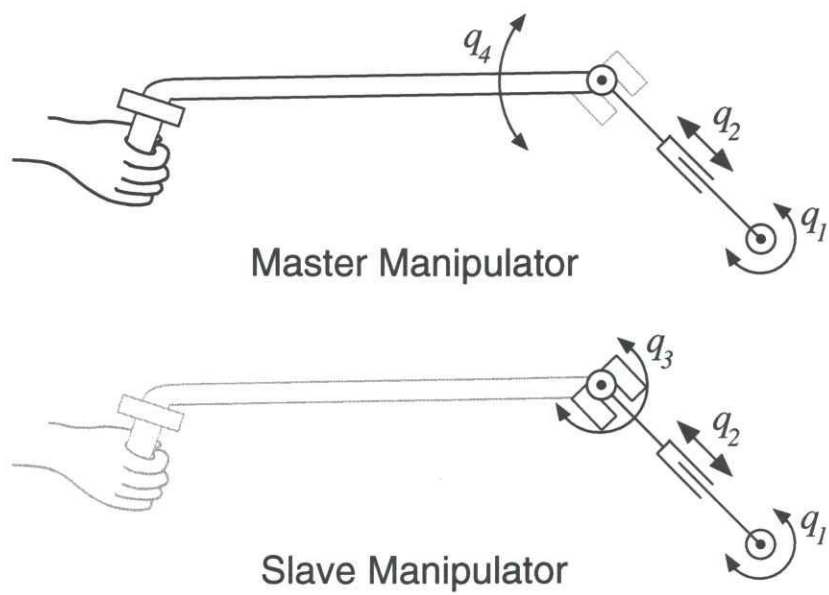


図 5.9: 円筒面の倣い作業を実現するマスタースレーブ系のツール特性

り，仮想ツールの特性を変化させたり，山北ら [52] のように作業対象に応じてインピーダンス特性を変化させたりすることができる．拡張仮想ツールでは，このジョイスティックの特性をツール特性に取り込むことができるため，仮想ツールの設計次第では，作業を行う動作の一環として自然な形で指令を与えることができるのが特徴である．(図 5.10)

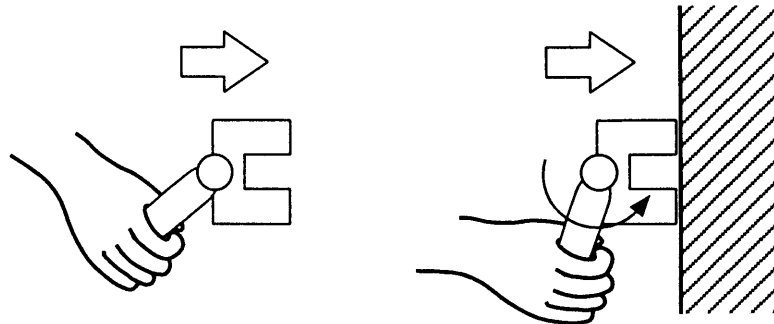


図 5.10: インテリジェントなジョイスティック

5.4 拡張仮想ツールのための Task-oriented 制御系の実現

ここでは，式 (5.1) (5.2) の拡張仮想ツールダイナミクスの特性をテレマニピュレータに持たせることを目的とし，Task-oriented 制御系の拡張を行う．

5.4.1 Task-oriented 制御系の構成

ここでは前章と同様，マスタースレーブ間の通信伝達系に通信遅れが無いものとして制御系を構成する．提案する Task-oriented 制御では，テレマニピュレータに仮想ツールの特性を持たせるために，マスターとスレーブの各マニピュレータを適切な制御則によって次式のように制御するものとする．

Master Manipulator :

$$\begin{aligned}
& \left[\begin{array}{c|c} M_c & 0 \\ \hline 0 & M_{m_r} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \Delta \ddot{x}_{m_c} \\ \Delta \ddot{x}_{m_r} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c|c} D_c & 0 \\ \hline 0 & D_{m_r} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \Delta \dot{x}_{m_c} \\ \Delta \dot{x}_{m_r} \end{array} \right] \\
& + \left[\begin{array}{c|c} K_c & 0 \\ \hline 0 & K_{m_r} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \Delta x_{m_c} \\ \Delta x_{m_r} \end{array} \right] = \begin{bmatrix} f_{h_c} \\ f_{h_r} \end{bmatrix} - s_f \begin{bmatrix} f_{e_c} \\ 0 \end{bmatrix} - F_c \quad (5.3)
\end{aligned}$$

Slave Manipulator :

$$\begin{aligned}
s_m \left\{ \left[\begin{array}{c|c} M_c & 0 \\ \hline 0 & M_{s_r} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \Delta \ddot{x}_{s_c} \\ \Delta \ddot{x}_{s_r} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c|c} D_c & 0 \\ \hline 0 & D_{s_r} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \Delta \dot{x}_{s_c} \\ \Delta \dot{x}_{s_r} \end{array} \right] \right. \\
& \left. + \left[\begin{array}{c|c} K_c & 0 \\ \hline 0 & K_{s_r} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \Delta x_{s_c} \\ \Delta x_{s_r} \end{array} \right] \right\} = \begin{bmatrix} f_{h_c} \\ 0 \end{bmatrix} - s_f \begin{bmatrix} f_{e_c} \\ f_{e_r} \end{bmatrix} + F_c \quad (5.4)
\end{aligned}$$

ただし,

$$\Delta x_{m_c} = x_{m_c} - x_{m_c0}$$

$$\Delta x_{m_r} = x_{m_r} - x_{m_r0}$$

$$\Delta x_{s_c} = x_{s_c} - x_{s_c0}$$

$$\Delta x_{s_r} = x_{s_r} - x_{s_r0}$$

$$x_{m_c0} = s_m x_{s_c0}$$

である。また、 F_c は、共通特性部のマスターマニピュレータの運動とスレーブマニピュレータの運動を一致させるための制御入力で、

$$F_c = D_{ctrl} \dot{e}_c + K_{ctrl} e_c \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned}
e_c &= \Delta x_{m_c} - s_m \Delta x_{s_c} \\
&= x_{m_c} - s_m x_{s_c} \quad (5.6)
\end{aligned}$$

と定義される。

5.4.2 システムの部分安定性

ここでは、システムの部分安定性について解析を行い、前述の制御則によりマスターとスレーブの運動が一致し、システム全体として仮想ツールの特性が実現されることを示す。

まず、式 (5.3) , (5.4) の共通部分の特性を辺々足し合わせると、

$$M_c(\Delta\ddot{x}_{m_c} + s_m\Delta\ddot{x}_{s_c}) + D_r(\Delta\dot{x}_{m_c} + s_m\Delta\dot{x}_{s_c}) + K_r(\Delta x_{m_c} + s_m\Delta x_{s_c}) = 2(f_{h_c} - s_f f_{e_c}) \quad (5.7)$$

となる。また、式 (5.3) から式 (5.4) を引くと、

$$M_c\ddot{e}_c + D_c\dot{e}_c + K_c e_c = -2F_c \quad (5.8)$$

となる。ここに式 (5.5) の F_c を代入し移項すると、

$$M_c\ddot{e}_c + (D_c + 2D_{ctrl})\dot{e}_c + \{K_c + 2K_{ctrl}\} e_c = 0 \quad (5.9)$$

が得られる。

4章での解析と同様、係数行列 D_{ctrl} , K_{ctrl} を適当に設計することで (5.9) 式は安定となり、 e_c は漸近的にゼロに収束する。ゆえに、定常状態では $x_{m_c} = s_m x_{s_c} = x_c$ となる。よって、各マニピュレータが前述の特性を持つように制御されている限り、システム全体として、拡張仮想ツールの特性が実現されることが分かる。

5.4.3 システムの受動性

拡張仮想ツールのための Task-oriented 制御系は、マスターとスレーブで一般に力の作用点が異なることを除けば4章で説明した制御系とほぼ同じ構造をしており、半自律化及び受動性を考慮して、マスター側冗長部分とスレーブ側冗長部分とが互いに独立となるように制御されている。そのため、制御則内で用いている仮想ツールの一般化座標系に対して、環境や人間の受動性の仮定が保存されることが確認できれば、システムの実動性は前章と同様にして証明が可能である。ここでは、提案する Task-oriented 制御系において、力の作用点が異なっても、オペレータや環境の実動性が保存されることを示そう。

オペレータ側と環境側はほぼ同様に取り扱えるので、ここでは環境側の受動性の

保存について考察する．今，環境からの反力の作用点を E と置き，座標系 E で表した環境からの外力とスレーブ側エンドエフェクタの運動とをそれぞれ ${}^E f_e$, ${}^E \Delta \dot{x}_s$ とする．環境側の受動性の仮定から，任意の T に対して正の定数 γ が存在して，

$$\int_0^T {}^E f_e^T \cdot {}^E \Delta \dot{x}_s dt \geq -\gamma \quad (5.10)$$

が成り立つ．実際に仮想ツールに加わるパワーは ${}^E f_e^T \cdot {}^E \Delta \dot{x}_s$ であるが，ヤコビ行列の定義，

$$J^T {}^E f_e = f_e \quad (5.11)$$

$${}^E \Delta \dot{x}_s = J \Delta \dot{x}_s \quad (5.12)$$

もしくは，仮想仕事の原理から仮想ツールの一般化座標 Δx_s と一般化力 f_e との関係を求めると，

$${}^E f_e^T \cdot {}^E \Delta \dot{x}_s = f_e^T \cdot \Delta \dot{x}_s \quad (5.13)$$

となり，一般化座標系で表現した場合にも環境の受動性が保存されることが分かる．また，スレーブマニピュレータの運動及び力は，共通部分 $\Delta \dot{x}_{s_c}$ と冗長利用部分 $\Delta \dot{x}_{s_r}$ へと分割されるが，本制御系ではこれらは独立となるように設計され，かつスレーブ側の力が共通部分を介してマスター側冗長部分に伝達されることはないため，システムの受動性も容易に示すことができる．

5.5 実験

ここでは，拡張仮想ツールに基づく Task-oriented 制御系を実際のマスタースレーブ系に適用し，提案するシステムの有効性を検証する．この章では他の章と異なるシステムに制御系を適用しているため，まず最初に，本研究で用いたシステムについて説明し，油圧マニピュレータに仮想ツール特性を持たせるためのロバストな制御系について説明する．次に，いくつかの実験結果を示し，システムの有効性を検討する．

5.5.1 実験システム

実験では、多関節型7自由度の油圧式マニピュレータをマスターマニピュレータとして用いた。そして、スレーブマニピュレータのモデルと仮想的な作業環境のモデルをコンピュータ内部に構築し、作業は仮想環境に対して行った。図5.11の写真は実験で使用されたマスターマニピュレータである。マスターマニピュレータは各関節に取り付けられた油圧揺動モータにより駆動され、モータ部のポテンショメータにより関節の回転角度を測定した。また、マスターマニピュレータのリスト部に取り付けた6軸力/トルクセンサによりオペレータの操作力を測定して制御に使用した。マニピュレータは7つの自由度を有するが、この実験ではその内の1自由度(肘の姿勢に相当する)を固定し、通常の6自由度マニピュレータとして使用した。

制御システムの全体図を図5.12に示す。マニピュレータの実時間制御は、PentiumProプロセッサを搭載したAT互換機を用いて直接行った。プログラムはWindows NT4.0上で作成・実行され、図5.13に示すようにメニュー機能や各種入出力機能などを利用して、直感的な操作が行えるように構成されている。また、仮想環境及び作業状況の提示用としてPentiumプロセッサを搭載したAT互換機をもう1台使用した。仮想環境のグラフィックモデルはWindowsNT4.0上でOpenGLを用いて作成し、動力学モデルに基づいて計算された結果をリアルタイムで表示するシステムを構成した。(図5.14)

5.5.2 H_{∞} 関節分散型制御を用いた油圧式マニピュレータのロバストな特性制御系の構成

本研究で提案するTask-oriented制御では、いかにロバストな特性制御を行えるかが、システムの性能向上に大きく影響してくる。制御性能も良く、負荷の変動が影響しにくい減速器付きの電動マニピュレータの場合ならともかく、本実験で使用したような油圧式マニピュレータは基本的に直接駆動式で負荷変動の影響が大きく、油の圧縮性や油圧回路などの動特性を考慮するとマニピュレータの運動方程式はとても複雑になってしまう。そのため、負荷変動などの外乱の影響を受けにくく、ロバストにツール特性を実現できる高性能な運動制御系が必要とされる。ここでは、このようなシステムでも、ロバストな運動制御系の構成によって、仮想ツールの特性を高精度に実現できることを示すため、実験で構成した制御系について説明しておく。

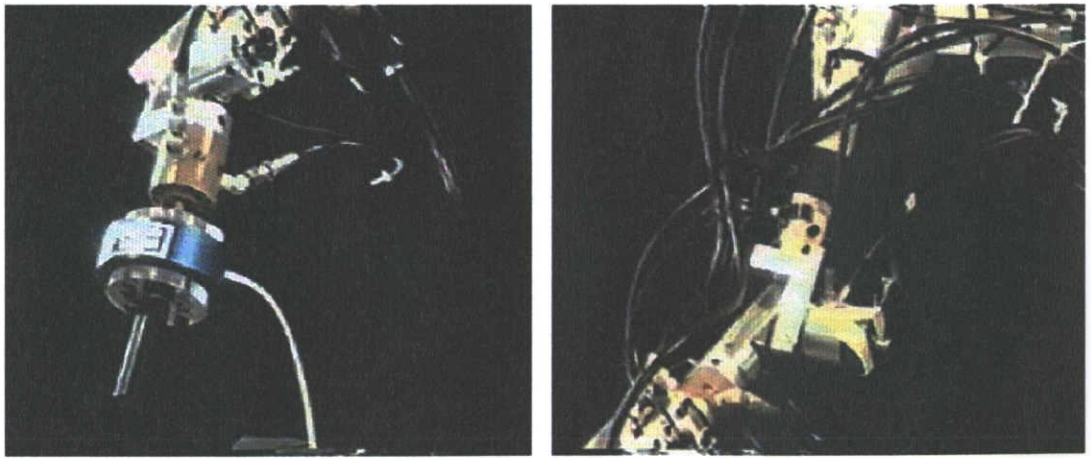


図 5.11: 実験用油圧マスターマニピュレータ

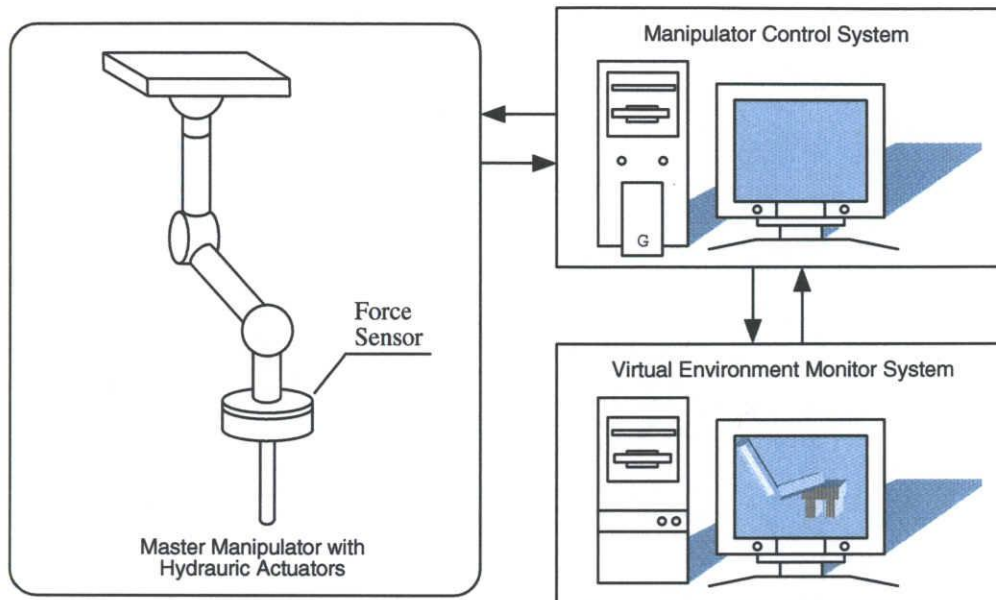


図 5.12: 制御システム

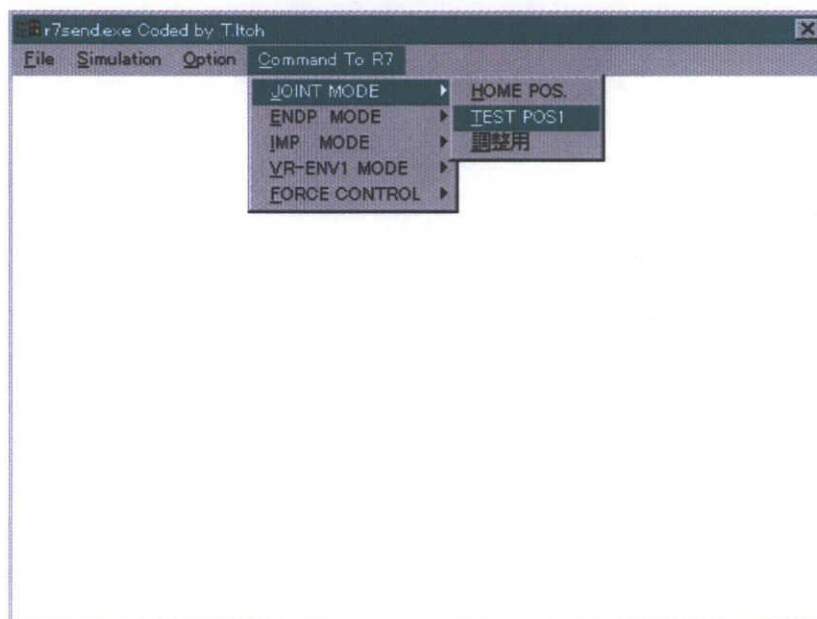


図 5.13: リアルタイム制御プログラム

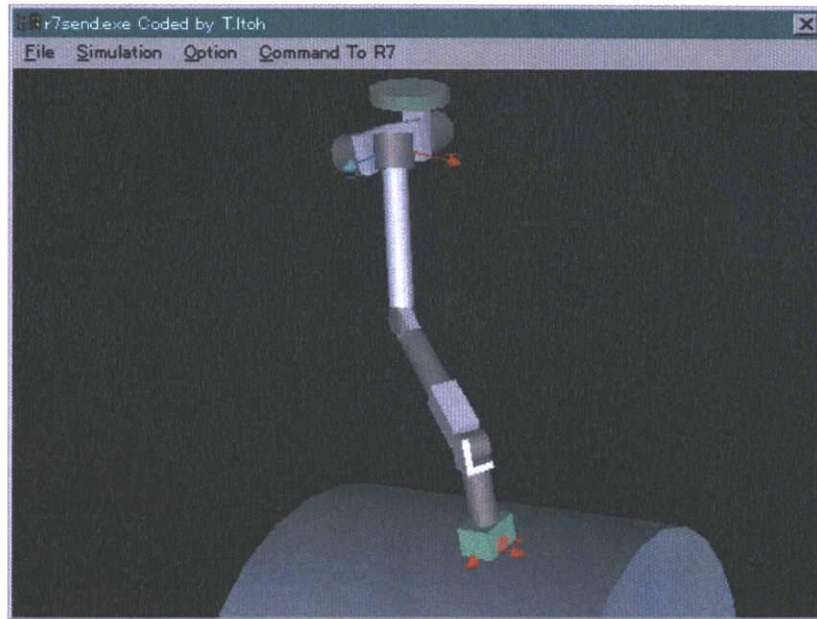


図 5.14: 仮想環境提示システム

油圧駆動系の動力学モデルの導出

まず最初に、制御対象である油圧駆動系の伝達関数を導出する。制御対象は、図 5.15 に示すように、サーボ増幅器／サーボ弁／油圧揺動モータ／慣性負荷によって構成される。今回のマニピュレータはシングル／ダブルの二種類の揺動モータを使用している。図 5.16 はサーボ弁の主要弁であるスプール弁とシングルベーン型揺動モータの結合系を模式的に示したものである。以下、シングルベーン型を例に取り、制御対象の基礎方程式を導く。

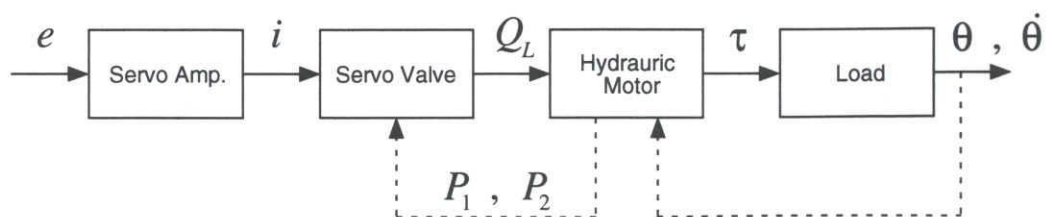


図 5.15: 油圧、マニピュレータの関節駆動系

サーボアンプへの入力電圧を e 、出力電流を i とすると、サーボアンプの入出力特

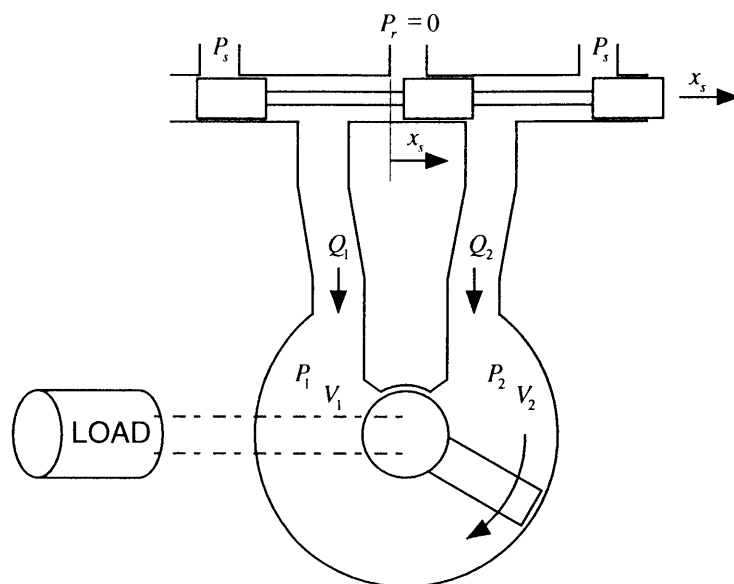


図 5.16: スプール弁・油圧モータ系模式図

性は次式で表される.

$$i = \begin{cases} K_a \cdot e & \text{if } |e| \leq e_{sat} \\ \text{sgn}(e) \cdot i_{max} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.14)$$

ここで, K_a はサーボ増幅ゲイン, e_{sat}, i_{max} は飽和入力電圧及び飽和電流であり, $\text{sgn}(\cdot)$ は符号関数である. また, サーボ弁の動特性は, 二次遅れ系で近似すると次式で表される.

$$\ddot{x}_s + 2\zeta\omega_v\dot{x}_s + \omega_s^2 x_s = \xi\omega_v^2 i \quad (5.15)$$

ここで, x_s はスプール変位, ζ, ω_v はそれぞれサーボ弁の減衰係数, 固有振動数, ξ は電流-スプール変位変換係数である. ただし, $\xi = 1$ として, 改めて x_s を仮想スプール変位とみなし, 以後 ξ は省略する. スプール弁は, 対称でラップ量は零とし, 排油ポート側圧力を零と仮定すると, 仮想スプール変位 x_s に対しサーボ弁流量は次

の静特性式で与えられるものとする。

$$\begin{cases} Q_1 = \operatorname{sgn}(P_s - P_1) C_d x_s \sqrt{2|P_s - P_1|} \\ Q_2 = \operatorname{sgn}(-P_2) C_d x_s \sqrt{2|-P_2|} & \text{if } x_s \geq 0, \\ \\ Q_1 = \operatorname{sgn}(-P_1) C_d |x_s| \sqrt{2|-P_1|} \\ Q_2 = \operatorname{sgn}(P_s - P_2) C_d |x_s| \sqrt{2|P_s - P_2|} & \text{if } x_s < 0 \end{cases} \quad (5.16)$$

ここで $Q_i, P_i (i = 1, 2)$ はサーボ弁出力ポート i 側の流量及び圧力, P_s は供給圧力, C_d は流量係数である。また, 油圧モータ内の作動油の圧縮性を考慮した流量の連続の式は

$$\begin{cases} \frac{V_1 \dot{P}_1}{\kappa} = Q_1 - \dot{V}_1 - Q_e \\ \frac{V_2 \dot{P}_2}{\kappa} = Q_2 - \dot{V}_2 + Q_e \end{cases} \quad (5.17)$$

と表される。 $V_i (i = 1, 2)$ は i 側弁出力ポート部からの油圧モータ室を含む油圧の全容積, κ は作動油の圧縮性の流路壁の弾性を含めた等価体積弾性係数, Q_e は油圧モータ内の 1 側から 2 側への漏れ流量である。

$$\begin{cases} V_1 = V_{10} + D_v \theta \\ V_2 = V_{20} - D_v \theta \end{cases} \quad (5.18)$$

$$Q_e = K_e (P_1 - P_2) \quad (5.19)$$

ここで, V_{i0} は油圧モータ回転角 $\theta = 0 [\text{rad}]$ における V_i の値, D_v は油圧モータの単位ラジアン当たりの押しわけ容積, K_e は油圧モータの内部漏れ係数である。また, 油圧モータの発生トルク τ は, 次式で与えられる。

$$\tau = D_v (P_1 - P_2) \quad (5.20)$$

アームの運動方程式は,

$$\begin{aligned} \tau &= M\ddot{\theta} + \mu\dot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) \\ h(\theta, \dot{\theta}) &= g(\theta) - \tau_f \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) - \tau_c \end{aligned} \quad (5.21)$$

と記述される。ここで, M は慣性モーメント, θ はモータの回転角, μ は粘性摩擦係

数, $g(\theta)$ は重力項, τ_f はクーロン摩擦トルク, τ_c は外乱トルクを表す. また, $h(\theta, \dot{\theta})$ は重力項, クーロン摩擦トルク等の非線型項をまとめたものである. 以上が, 関節駆動系の基礎方程式である. 以下, 動作点周りで線形化を行い, 伝達関数を導く.

サーボ流量特性は, 準定常状態 (即ち $P_s = P_1 + P_2$) を仮定することにより以下のように簡単化される.

$$\begin{aligned} Q_L &= \text{sgn}(P_s + P_L)C_d x_s \sqrt{|P_s + P_L|} \quad , \quad (x_s \geq 0) \\ Q_L &= \text{sgn}(P_s - P_L)C_d x_s \sqrt{|P_s - P_L|} \quad , \quad (x_s < 0) \end{aligned} \quad (5.22)$$

Q_L, P_L はそれぞれ負荷流量, 負荷圧力であり,

$$\begin{aligned} Q_L &= (Q_1 - Q_2)/2 \\ P_L &= P_1 - P_2 \end{aligned} \quad (5.23)$$

と定義される. また, $V_1 = V_2 = V_T/2$ (V_T はサーボモータ内総容積) と仮定すれば, 流量連続式は以下のように簡単化される.

$$C_p \dot{P}_L = Q_L - K_e P_L - D_v \dot{\theta} \quad (5.24)$$

ここで, $C_p = V_T/4\kappa$ である. 次に, サーボ増幅器特性及び弁流量特性を線形化すると,

$$\begin{aligned} \Delta i &= K_a \Delta P_L \\ \Delta Q_L &= K_x \Delta x_s - K_p \Delta P_L \\ K_x &= \frac{\partial Q_L}{\partial x_s} = \begin{cases} \text{sgn}(P_s + P_{L0})C_d \sqrt{|P_s + P_{L0}|} & , \text{if } x_s \geq 0 \\ \text{sgn}(P_s - P_{L0})C_d \sqrt{|P_s - P_{L0}|} & , \text{if } x_s < 0 \end{cases} \\ k_p &= -\frac{\partial Q_L}{\partial P_L} = \begin{cases} \frac{Q_{L0}}{2(P_s + P_{L0})} & , \text{if } x_s \geq 0 \\ \frac{Q_{L0}}{2(P_s - P_{L0})} & , \text{if } x_s < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5.25)$$

ここで, P_{L0}, Q_{L0} は動作点の P_L, Q_L であり, Δ を付した量は動作点からの微小変化量を表す. さらにアームの運動方程式はクーロン摩擦と外乱トルクを無視すれば次式のように線形化される.

$$\Delta \tau = M \Delta \ddot{\theta} + \mu \Delta \dot{\theta} + K_b \Delta \theta \quad (5.26)$$

$$K_b = \frac{\partial g(\theta)}{\partial \theta} \quad (5.27)$$

結局，制御対象の線形状態空間モデルは次式のように表すことができる．

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (5.28)$$

ここで，

$$\begin{aligned} x &= [\Delta x_s \quad \Delta \dot{x}_s \quad \Delta P_L \quad \Delta \theta \quad \Delta \dot{\theta}]^T \\ u &= \Delta e \\ y &= \Delta \theta \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_v^2 & -2\zeta_v\omega_v & 0 & 0 & 0 \\ K_x/C_p & 0 & -K_{pe}/C_p & 0 & -D_v/C_p \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & D_v/M & -K_b/M & -\mu/M \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} 0 \\ \xi K_a \omega_v^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ c &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0] \\ K_{pe} &= k_p + K_e \end{aligned}$$

である．

これらの状態空間表現より， u から y への開ループ伝達関数を求めると，

$$G(s) = c[sI - A]^{-1} = G_v(s)G_o(s) \quad (5.29)$$

$$G_o(s) = \frac{K_G}{s^3 + a_0s^2 + a_1s + a_2} \quad (5.30)$$

$$G_v(s) = \frac{\omega_v^2}{s^2 + 2\zeta_v\omega_v s + \omega_v^2} \quad (5.31)$$

ここで、 $G_v(s)$ はサーボ弁動特性を表す.

$$\begin{aligned}
 K_G &= \frac{K_a k_x D_v}{C_p M} \\
 a_0 &= \frac{\mu}{M} + \frac{K_{pe}}{C_p} \\
 a_1 &= \frac{K_{pe} \mu}{C_p M} + \frac{D_v^2}{C_p M} + \frac{K_b}{M} \\
 a_2 &= \frac{K_b K_{pe}}{C_p M}
 \end{aligned}$$

ただし、今回の制御系設計では、サーボ弁のカットオフ周波数が十分高く $G_v(s) \simeq 1$ と仮定し、 $G_s(s) = G_0(s)$ として扱うものとする.

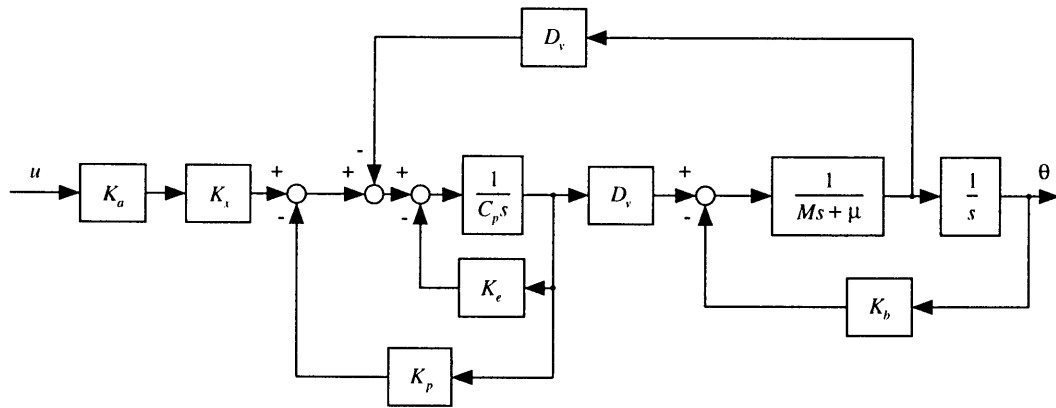


図 5.17: 油圧駆動系のブロック線図

H_∞ コントローラによるロバストな運動制御系の構成

本研究では、直接駆動型油圧マニピュレータを用いて正確な特性制御を実現するため、前述の油圧駆動系を H_∞ 制御理論の混合感度問題にあてはめ、マニピュレータの姿勢や外力などの影響を受けにくいロバストな運動制御系を構成した。ただし、今回の実験用マニピュレータのような多自由度マニピュレータでは、手先座標系でロバストな運動制御系を構成しようとすると計算が複雑となり、また、関節にはトルクセンサがなく位置情報しか使用できないこともあって外力の補償が難しい。そのため、今回は各関節ごとにロバストな加速度サーボ系を設計し、結果としてロボット手先の運動を正確に実現する関節分散型の制御系を構成することを目標とした。 H_∞ 制御理論は近年様々な問題に適用され一般的なものとなってきているので、ここでは、混合感度法による問題設定と加速度サーボ系の簡単な説明をするにとどめ

ておく。

・ロバスト安定性

前述の油圧駆動系のモデルはある特定の条件下で理論的に導出されたモデルであり、マニピュレータの姿勢による変動分などの不確定な要素を含んでいる。このようなモデルは、公称モデル（ノミナルモデル）と呼ばれている。高精度で安定な制御系を構成するためには、モデル化誤差の影響を考慮し、変動したモデルに対しても閉ループ系の安定性が保証されるように、ロバスト安定な制御系を設計しなければならない。 H_∞ 制御ではこれらの不確定要素を変動モデルとして取り扱う。本システムでは、次式で表される乗法変動モデルを用いて制御対象を表現する。

$$\begin{aligned}\tilde{P}(s) &= [I + \Delta_m(s)]P(s) \\ &= P(s) + \Delta_m(s)P(s)\end{aligned}\tag{5.32}$$

ここで、 P は公称モデル、 \tilde{P} は変動モデルで、上式から分かるように Δ_m はモデルの相対変動分を表している。また、変動分 Δ_m は安定で、かつその大きさは既知のスカラー関数のゲインによって抑えられるものとする。

$$\bar{\sigma}\{\Delta_m(j\omega)\} \leq |W_m(j\omega)|\tag{5.33}$$

図 5.18(a) の系において×印と××印の点でを切り離し、 a 点から b 点までの伝達関数を計算すると

$$b = -(I + KP)^{-1}KPa\tag{5.34}$$

となり、(b)のように等価変換できる。ここで、

$$T(s) = (I + PK)^{-1}PK = P(I + PK)^{-1}K\tag{5.35}$$

は、相補感度関数と呼ばれる。 $\Delta_m(s), T(s)$ が安定であれば、スモールゲイン定理により

$$\|-\Delta_m(s)T(s)\|_\infty < 1\tag{5.36}$$

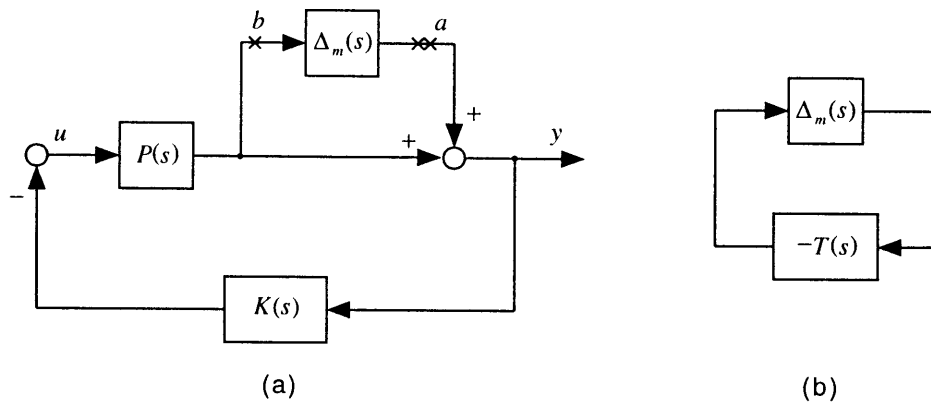


図 5.18: 乗法変動とロバスト安定性

がロバスト安定条件となることが分かる。また,

$$\begin{aligned}
 \bar{\sigma}\{-\Delta_m(j\omega)T(j\omega)\} &\leq \bar{\sigma}\{-\Delta_m(j\omega)\}\{T(j\omega)\} \\
 &\leq |W_m(j\omega)| \cdot \bar{\sigma}\{T(j\omega)\} \\
 &\leq \bar{\sigma}\{W_m(j\omega)T(j\omega)\} < 1
 \end{aligned}
 \tag{5.37}$$

であるから, ロバスト安定条件は以下のように表される.

$$\|W_m(s)T(s)\|_\infty < 1
 \tag{5.38}$$

・ H_∞ 制御理論と混合感度問題

フィードバック制御系を定義しやすくするため, 系を図 5.19(a) のように書き直す. ここで, r は目標入力, z, e は制御偏差である. 制御目的は, ロバスト安定で, しかも制御偏差の少ない制御系の設計である. この制御系において, r から e への伝達関数

$$S(s) = (I + PK)^{-1}
 \tag{5.39}$$

は感度関数と呼ばれ、感度が低ければ一般に制御偏差が小さくなる。そこで、重み $W_s(s)$ を用いて、できる限り小さい γ に対して

$$\|W_s(s)S(s)\|_\infty < \gamma \quad (5.40)$$

もしくは、ノルムの公式を用いて規格化した

$$\|W_s(s)S(s)/\gamma\|_\infty < 1 \quad (5.41)$$

を満たすような制御器を構成することを設計目標として定める。ただし、ロバスト安定性の条件から式 (5.38) をみたす必要がある。しかし、感度関数と相補感度関数の間には、常に

$$S + T = I \quad (5.42)$$

の関係が成り立ち、これらを同時に小さくするのは相反する要求である。現実には、感度関数の重み W_s は低周波帯域で大きくとればよく、制御対象の不確かさを反映する $W_m(s)$ は高周波帯域で大きい。よって、低周波帯域で $S(s)$ を、高周波帯域で $T(s)$ をそれぞれ小さくするという設計指針が導かれる。このような問題を混合感度問題という。等価的な外乱を一つにまとめて定式化するため、図 5.19(b) のように、変数 $w (= -r)$, $z = [z_1 z_2]$ を定義すると、

$$z = \begin{bmatrix} W_s S / \gamma \\ -W_m T \end{bmatrix} w \quad (5.43)$$

となり、

$$\dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u \quad (5.44)$$

$$z = C_1 x + D_{11} w + D_{12} u \quad (5.45)$$

$$y = C_2 x + D_{21} w + D_{22} u \quad (5.46)$$

- z : m 次元制御量 (制御出力)
- u : p 次元操作量 (制御入力)
- y : q 次元観測量 (観測出力)
- w : r 次元外乱入力
- x : n 次元状態変数

で表される一般化プラントに対して,

$$\|G_{zw}\|_{\infty} = \left\| \begin{array}{c} W_s S / \gamma \\ -W_m T \end{array} \right\|_{\infty} < 1 \quad (5.47)$$

を満たすようなコントローラを設計する H_{∞} 制御問題として定式化される。

ただし, H_{∞} 制御問題 (リカッチ方程式) が解を持つためには,

- A1) (A, B_2) は可安定, (A, C_2) は可検出
- A2) $m > p$ で $D_{12}(m \times p)$ は列フルランク
- A3) $q \leq r$ で $D_{12}(m \times p)$ は列フルランク
- A4) $\text{rank} \begin{bmatrix} A - j\omega I & B_2 \\ C_1 & D_{12} \end{bmatrix} = n + m_2$
- A5) $\text{rank} \begin{bmatrix} A - j\omega I & B_1 \\ C_2 & D_{21} \end{bmatrix} = n + p_2$

の可解条件を満たさなければならないが, 今回の制御対象は A2 の条件を満たさないため, 一般化プラントを図 5.20 のように修正して扱う. ϵ は微少な値である. このような微小出力を追加することでとなり可解条件が満たされるようになる.

実際の制御器設計には, コンピュータ援用制御系設計ソフトウェアである MATLAB を利用した. MATLAB Robust Control Toolbox を用いると, γ イタレーションにより最適な制御器を簡単な手順で設計することができる. マニピュレータの各軸ごとに姿勢の変化などに伴うプラント特性の変動分を導出し, 何回かの試行錯誤により二種類の重み関数を設定し, 制御器を設計した.

・ 加速度コントローラ

上記の手順で求められた制御器を用いて加速度制御系を構成すると, 図 5.21 のようになる. ここで, 目標加速度 $\ddot{\theta}_d$ から関節角度 θ への伝達関数を求めると,

$$\frac{\theta}{\ddot{\theta}_d} = \frac{P(s)K(s)}{1 + P(s)K(s)s^2} = T(s) \frac{1}{s^2} \quad (5.48)$$

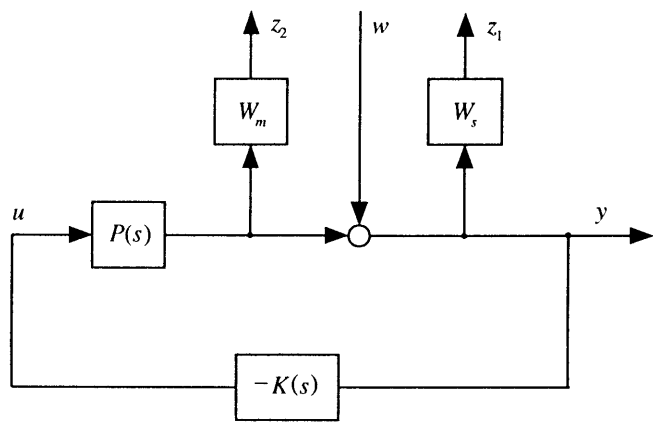


図 5.19: 混合感度問題

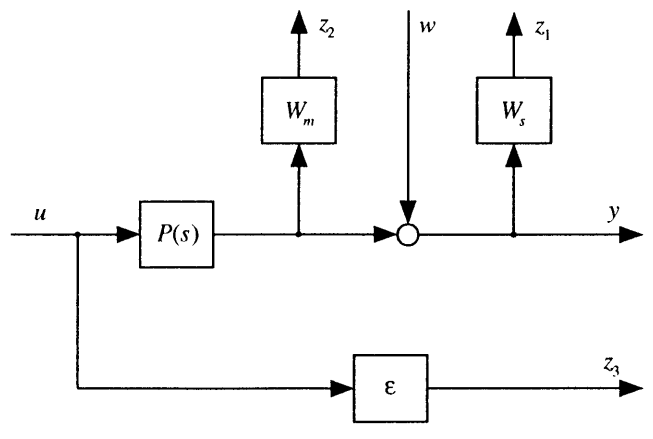


図 5.20: 修正した一般化プラント

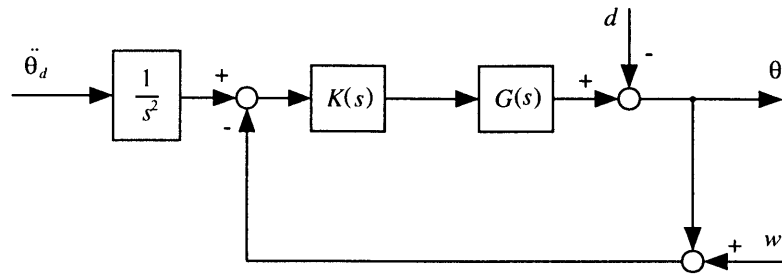


図 5.21: 加速度コントローラ

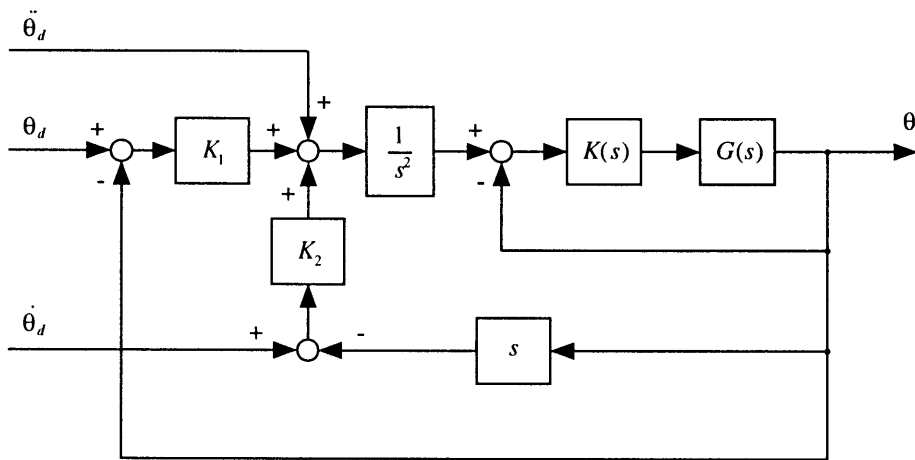


図 5.22: 関節の運動制御系

が得られ、 $T(s) = 1$ を満たす帯域ではロバストな加速度コントローラが実現される。運動制御系は、図 5.22 のように構成される。 K_1, K_2 によって積分器（フィードバックループ）を付加することになるので、ゲインの設定時には全体の特性について注意が必要であるが、実際にマニピュレータに適用する際の調整に用いることができる。この制御系は図 5.23 のように等価変換することで、位置センサしか持たないシステムにも容易に適用可能である。また、多自由度マニピュレータの手先の運動制御は、例えば図 5.24 のような制御系を構成して運動学的な変換を行うことにより実現される。

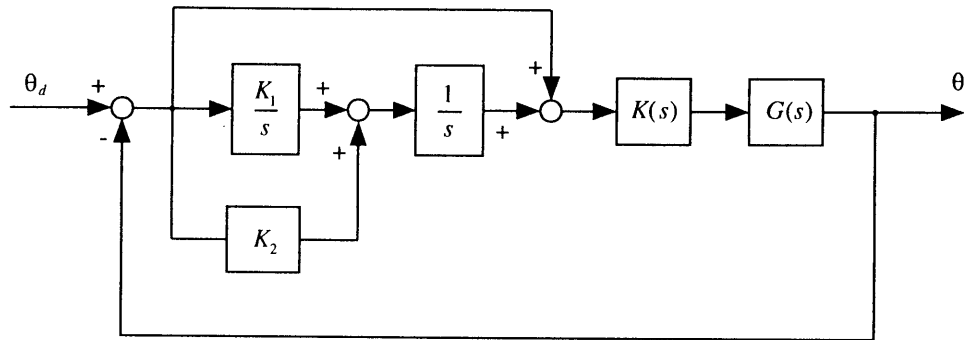


図 5.23: 位置情報のみを使用した等価な運動制御系

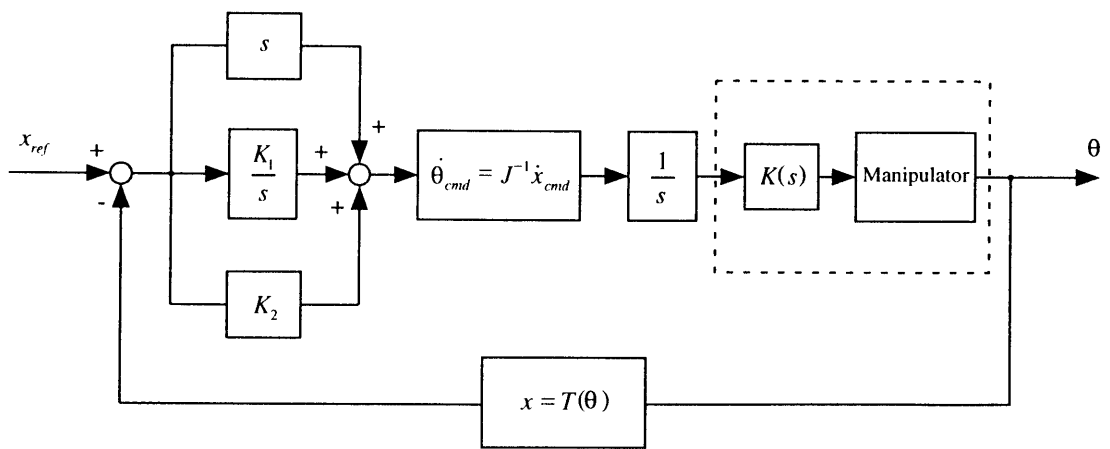


図 5.24: 手先座標系ベースの運動制御

5.5.3 実験 1 拡張仮想ツールを用いた壁面の倣い作業

本章で提案した拡張仮想ツールに基づく Task-oriented 制御系が有効に働くことを確認するため、まず最初に、壁面の倣い作業を例にとり作業実験を行った。設計された拡張仮想ツール特性を図 5.25 に示す。ツール自体に倣いを補助する 3 自由度の回転特性を持ち、冗長性を利用した合計 9 自由度の仮想ツール特性である。基本的な機構は掃除機の柄の場合とよく似ており、ツールの持つ 3 自由度の回転特性はオペレータの操作性向上に利用され、スレーブ側エンドエフェクタの位置やその時の拘束状態に制限されずに、図 5.26 のように広い範囲での自由な操作が可能となる。図 5.27 が実験に用いた作業環境のモデルである。

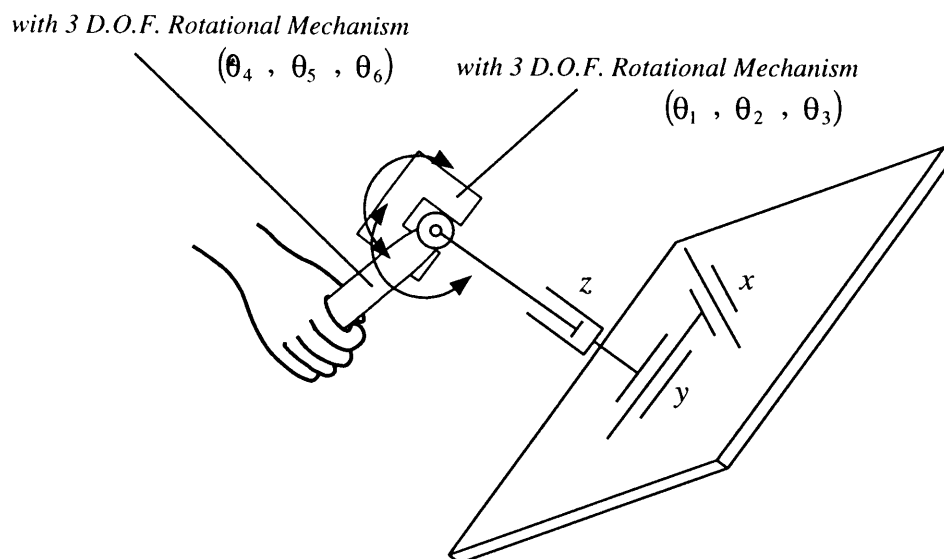


図 5.25: 壁面倣いに用いられた拡張仮想ツール

図 5.28 に作業時のマニピュレータ（仮想ツール）の運動を、図 5.29 にシステムに加えられた外力（オペレータの操作力及び環境との間の作業力）をそれぞれ示す。尚、図中、上段の 3 つのグラフはマスタースレーブ間の共通部分を、中段の 3 つのグラフはスレーブ側特性を、下段のグラフはオペレータ側冗長部分の特性を表している。オペレータの操作により作業開始 2 秒後に壁面とツールとが接触し、壁面の倣いが実行された。図 5.31 は、この時の仮想ツール先端の運動（位置の変化）を壁面座標系で表したものである。実験によって、オペレータ側の冗長部分の 3 自由度の回転特性により、操作性が大幅に向上することが確認できた。これらのグラフからも、仮想ツール先端の拘束状態によってオペレータの姿勢が制限されず、拘束状

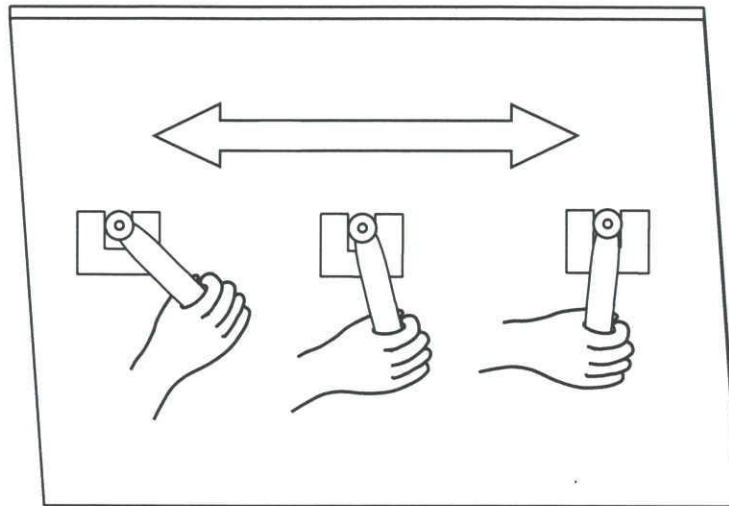


図 5.26: 設計された拡張仮想ツールの操作性



図 5.27: 壁面倣いの作業環境モデル

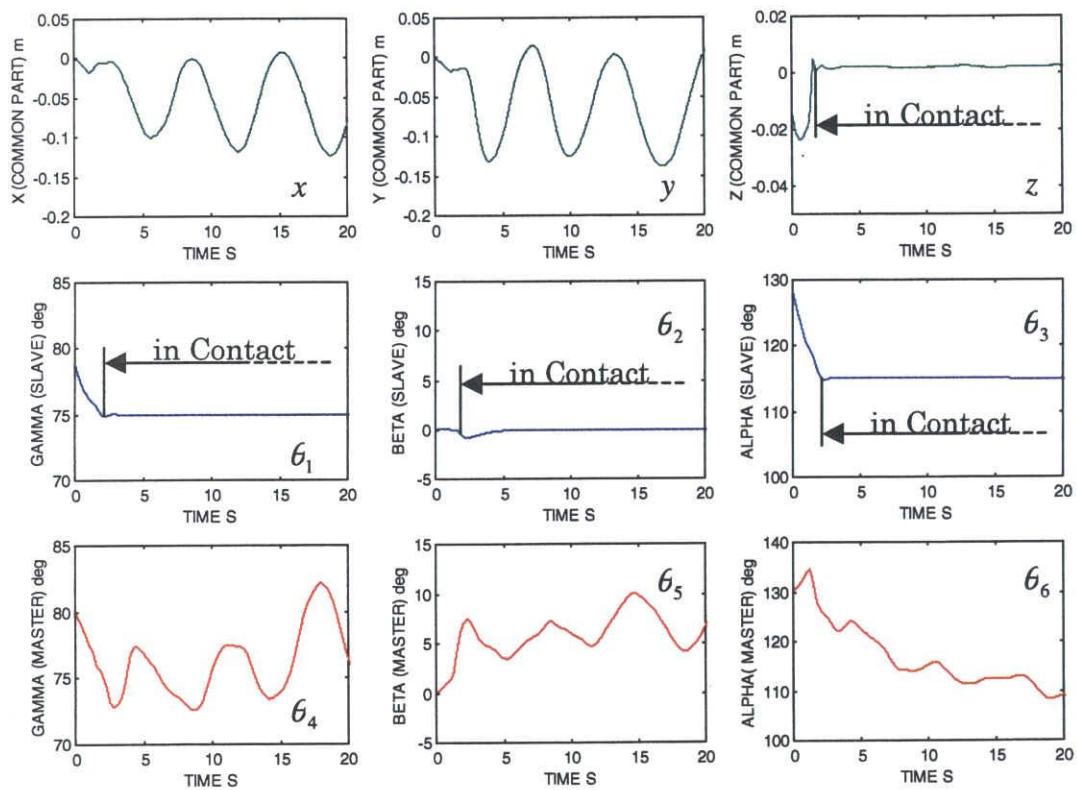
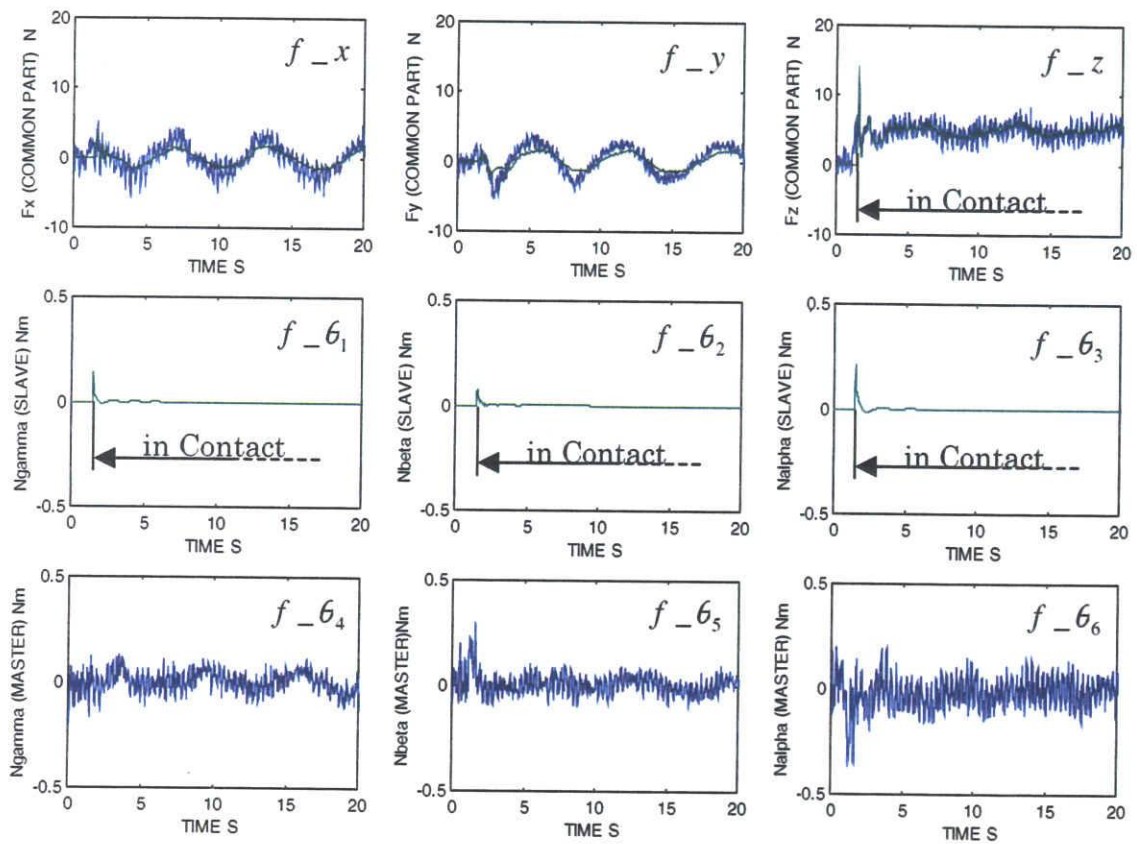


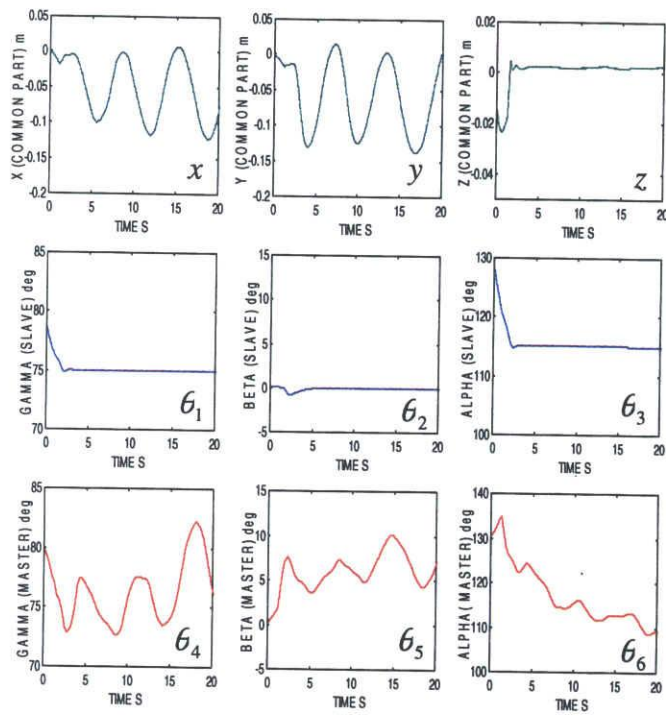
図 5.28: 実験結果 (壁面の倣い作業/仮想ツールの運動)



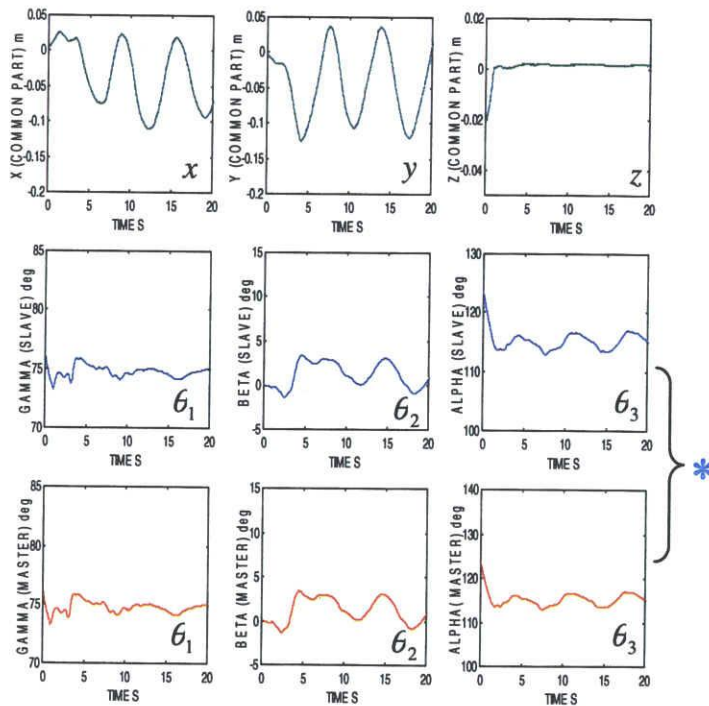
— ; オペレータの操作力
 — ; 環境に作用する力

図 5.29: 実験結果 (壁面の微い作業/仮想ツールに加わった外力)

(a) 拡張仮想ツール



(b) 仮想ツール



* ; 実際にはこれらは同一の自由度である。

図 5.30: 半自律化されていない仮想ツール特性を用いた倣い作業 (ツールの運動)

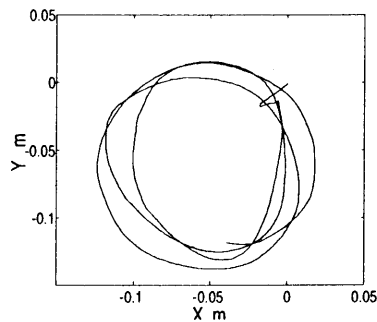


図 5.31: 拘束作業時の壁面座標系での仮想ツールの自由な運動の様子

態を意識することなく自由な操作が行えているのがわかる。また、図のようにオペレータが自由な動きをしているにもかかわらず、壁面との拘束がきちんと維持されているのが分かる。また、システムの受動性が満足されているため、作業の間、不安定な挙動が現れていないことが確認できる。比較のため、半自律化されていない仮想ツール特性を使用して同様の作業を行った時の結果（ツールの運動）を図 5.30 に示す。拡張仮想ツールでの作業と異なり、オペレータの運動に影響されて、均一な拘束状態が維持できなくなってしまうのが分かる。（前章の方法で半自律化を行った場合には均一の拘束状態を維持できるようになるが、仮想ツール先端の拘束状態によってオペレータの姿勢が制限される。）

5.5.4 実験 2 拡張仮想ツールのインテリジェントなジョイスティックとしての利用例

次に、拡張仮想ツールの冗長特性を、インテリジェントなジョイスティックとして応用した例を示す。ここでは、例として仮想ツールの特性を作業時に準静的に変化させて、2つの異なる壁面への機械部品の押し当て作業を行った。3章の力制御系の構成の項で説明したように、このような押し当て作業では、拘束面に近いところに回転中心を設定することで作業の効率や壁面への拘束性が向上する。本実験では、順に拘束面を変更しながら作業を行う状況を想定し、ジョイスティックの倒し方によって、オペレータが押し当てようとしている壁面側に拡張仮想ツールの回転中心を変更するように設定した。図 5.32 に実験に使用した仮想環境と、使用した拡

張仮想ツール特性の概要を示す。

作業時の機械部品の拘束の様子（ツールの運動）を図 5.33 に示す。実験では、 x - y 平面、 x - z 平面、 x - y 平面の順で押し当てを行った。ここでは、簡単のため、ジョイスティックのひねり角がある閾値を超えた場合に、回転中心を部品の中心から壁面側へと移動させるように設定した。グラフから、拡張仮想ツールの特性変化によって、異なる壁面への拘束が効率的に行われているのが分かる。本実験では取り扱わなかったが、本来、拡張仮想ツールには、ジョイスティックへの入力も作業の一環として自然な形でツール特性に取り込めるという利点がある。ジョイスティック特性と仮想ツール特性との相関関係をどのように設定すれば最適な作業性が得られるのか、今後、総合的な拡張仮想ツールの特性設計について突き詰めていく必要があると思われる。

5.6 まとめ

従来のほとんどのテレマニピュレーションシステムでは、マスターマニピュレータとスレーブマニピュレータとが同一の特性を持つように制御することで、スレーブ側の情報をオペレータに最大限に伝達し、それによってマスタースレーブ間で作業情報を完全に共有しようと試みてきた。しかし、本来二つあるマニピュレータを一つのように見せかけようとしても、遠隔作業であることに変わりはなく、作業情報の完全な共有は困難である（後注1参照）。前章で説明した Task-oriented 制御では、作業に適した道具のような特性をシステムに持たせることで遠隔作業からくる作業感覚のずれを吸収し、このような問題を克服しようと試みてきた。しかし、マスターとスレーブの特性を合わせることを前提としていたため、仮想ツールの特性設計はマニピュレータの持つ自由度の範囲内で行わなければならない、操作性や作業特性を独立に考えた柔軟な特性設計が難しかった。

本章では、一般の道具が位置・姿勢を表す6自由度の他に、それ自体にも作業に適した自由度を持っていることにヒントを得て、テレマニピュレータの特性をマスターマニピュレータとスレーブマニピュレータの特性を統合したものとしてトータルに考えることで、より柔軟な特性設計を行えるシステムを構成する手法について議論した。まず最初に、一般の道具の特性について考察し、その特性をテレマニピュレーションシステムで実現するために、システムに内在する冗長性について考察した。次に、従来の仮想ツールの概念を拡張し、仮想ツールを含有する形で拡張仮想ツールの概念を定義した。そして、拡張仮想ツールを用いてマスタースレーブ系の

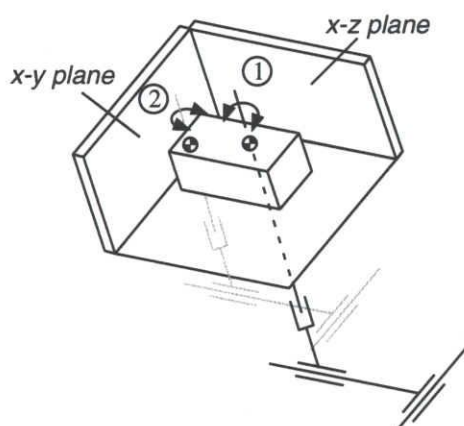
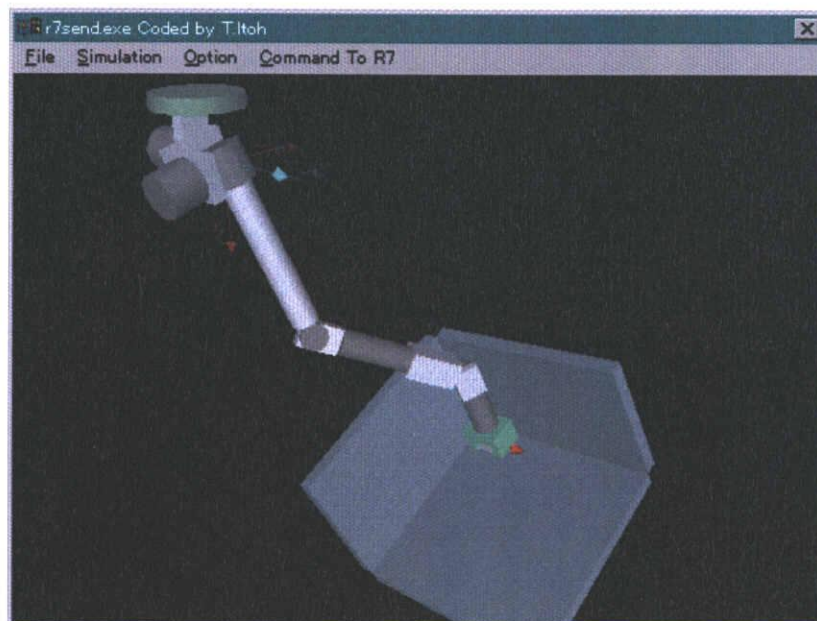


図 5.32: 押し当ての作業環境モデルと使用した拡張仮想ツール

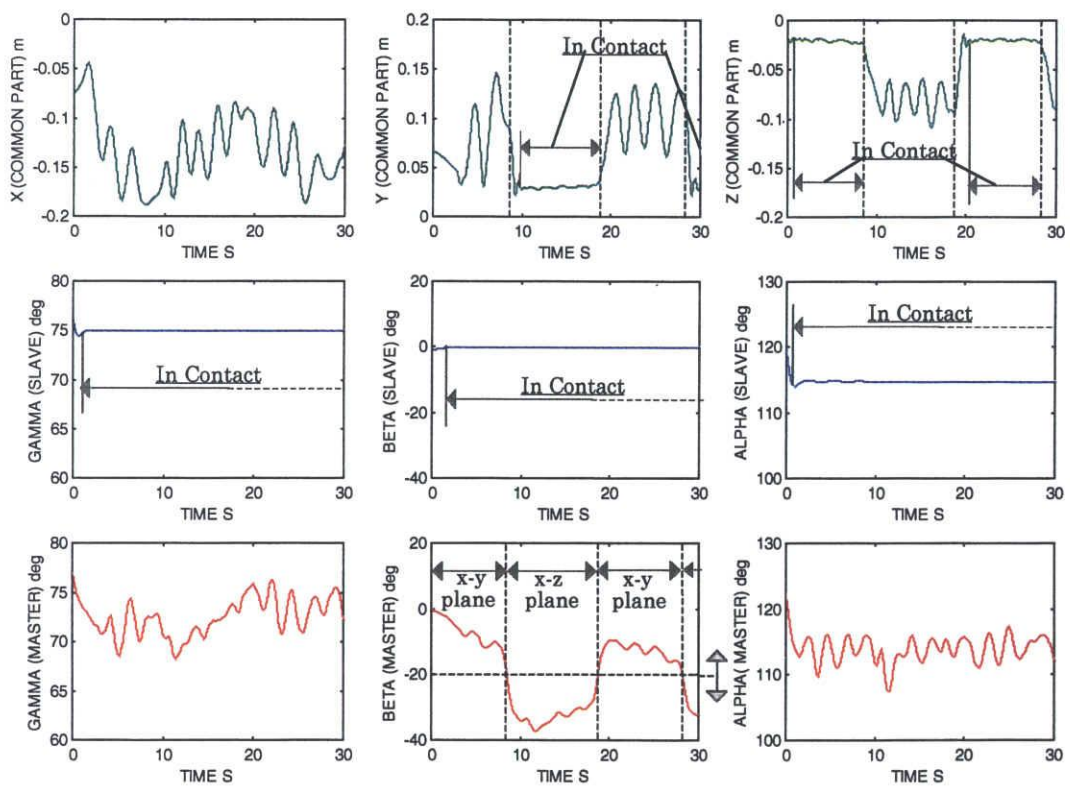


図 5.33: 実験結果 (押し当て作業時の拡張仮想ツールの運動)

特性をトータルに考えることで可能となる特性設計への応用例及び利点についてまとめた。次に、拡張仮想ツール特性実現のため、Task-oriented 制御系の拡張を行い、システムの受動性について解析した(後注2参照)。実験の項では、油圧マニピュレータのロバスト制御系について説明し、拡張仮想ツールを用いた作業実験を行って、システムの有効性を示した。

注1) ただし、今後のテレイグジスタンスなどのVR技術の発展により、将来、作業情報を完全に近い形で共有することも可能となるであろう。そのようなシステムと組み合わせることを考えた場合でも、拡張仮想ツールに基づくシステムではマスタースレーブ系でトータルとして道具の特性を実現でき、オペレータはその特性に支援されながら道具を使っているような自然な感覚で作業を行うことができるため、従来の設計方針に基づくものと比較して、作業の臨場感やシステムの操作性が大幅に向上することが期待される。

注2) 尚、マスター側の冗長部分をインテリジェントなジョイスティックとして用いる場合には、注意が必要である。文中で説明したように準静的範囲で特性変更するための指令用としてフィードフォワード的に使用するのであれば問題はないが、ジョイスティックの特性を用いて閉ループ系を構成するような場合には、それによって安定性が損なわれることがあるため、別途安定性を解析する必要がある。

第6章 通信遅れを有するスケールドテレマニピュレーションシステムの制御系設計

近年のマイクロ分野の技術の進歩に伴い、テレマニピュレーションシステムをテレサージェリーなどの遠隔医療やマイクロマシンの組み立てなどに応用しようとする動きが高まっている。そのため、前述のようにシステム全体の受動性を害さずにスレーブ側の運動と力の倍率を自由に設定できるスケールドテレマニピュレーションシステムの実現が望まれている。また、最近ではインターネット等の高速・広域ネットワークの普及に伴って、ネットワーク技術とロボット技術を融合したネットワークロボティクスも注目されるようになってきた。

しかし、遠隔医療やネットワークロボティクスなど遠隔地での作業を想定したシステムでは、マスターマニピュレータは通信経路を介してスレーブ側と結ばれており、通信部に存在する無駄時間（通信遅れ）は無視できない。一般に、テレマニピュレータのようなシステムでは、通信部に存在する無駄時間が、実用的なシステムを構築する際の大きな障害となることが知られている。第4章及び第5章で提案したTask-oriented制御では、マスタースレーブ間の通信部分には遅れがないか、あるいは無視できるものとして取り扱い、相互の情報伝達によって高性能な制御系を実現してきたが、通信遅れが存在する上記のような応用を考えた場合には相互の情報をリアルタイムに使用することができないため、そのままでは制御系を適用することはできない。また、通信遅れの存在する系に対して、通常のバイラテラルフィードバック系を構成しようとする、無駄時間がループの形でシステム特性中に挿入されることとなり安定な制御系が得られないことが知られている。実際に、無駄時間を含む通信ブロックには受動性が成り立たず、たとえダンパのみを接続した系に対してであっても安定性が補償されないことがSlotineら^[35]によって紹介されている。

通信遅れ問題に対する古典的な対処法としては、ユニラテラル方式を採用し通信遅れを考慮しながらゆっくりと操作を行う等の方法や、通信遅れが大きい場合などはスーパーバイザリ制御（管理制御）によってオペレータの指令をコマンドとしてス

レーブ側に送信するなどの手段がとられてきた。しかし、このような方法はシステムのバンド幅を低下させる結果となり、作業の臨場感を向上させることが難しかった。ところが、近年、Anderson, Spongら^{[31][32]}によって受動性に基づく通信遅れの補償法が提案され、スキッタリング変換と呼ばれる手法により実際の伝送線路の特性を模擬することで、通信部の受動性を補償できることが分かってきた。

そこで本章では、スキッタリング変換の手法と前章までで説明したパワースケーリング手法とを組み合わせ、通信遅れが存在する場合でも安定にパワーをスケールリングでき、遠隔地での使用に耐え得る実用的なスケールドテレマニピュレーションシステムを実現することを考える。まず最初に、遠隔操作システムにおける通信遅れの影響について考察する。次に、スキッタリング変換を用いた通信ブロックの安定化手法について説明する。そして、二つのスケールリングファクタを導入することで、マスターレーブ間の力と運動の応答を自由にスケールリング可能な制御系を構成する。また、このようなスケールリング手法を用いるとシステムの受動性が保証され、受動性の条件を乱すことなく自由にパワースケールリングを行えることを示す。また、実際にテレマニピュレーションシステムを用いて実験を行い、構成したシステムの有効性を確認する。

尚、拡張仮想ツールを用いたTask-oriented制御系において、前述の共通部分特性の制御系を本手法のものと置き換えることにより、拡張仮想ツール特性を通信遅れを有する系に容易に適用することが可能である。ただし、本論文では、無駄時間補償の様子及び効果を理解しやすくするため、通信遅れのある場合の拡張仮想ツール全体の特性についての実験は行わず、拡張仮想ツールの共通部分特性を想定した1自由度系について、無駄時間補償の効果を実験的に検証することにする。

6.1 テレマニピュレーションシステムに存在する通信遅れの影響

テレマニピュレーションシステムのバイラテラルフィードバック系のように複数のロボット間で相互に情報伝達を行っている場合には、通信部に存在する無駄時間がシステム全体の性能や安定性に対して重要な影響を及ぼす。ここでは、通信ブロックに無駄時間が存在する場合の特性について考察し、通信遅れがシステムに与える影響について議論する。

図6.2にテレマニピュレーションシステムのバイラテラルフィードバック系のネットワークモデルを示す。通信遅れが存在する場合には、これまで述べてきたTask-

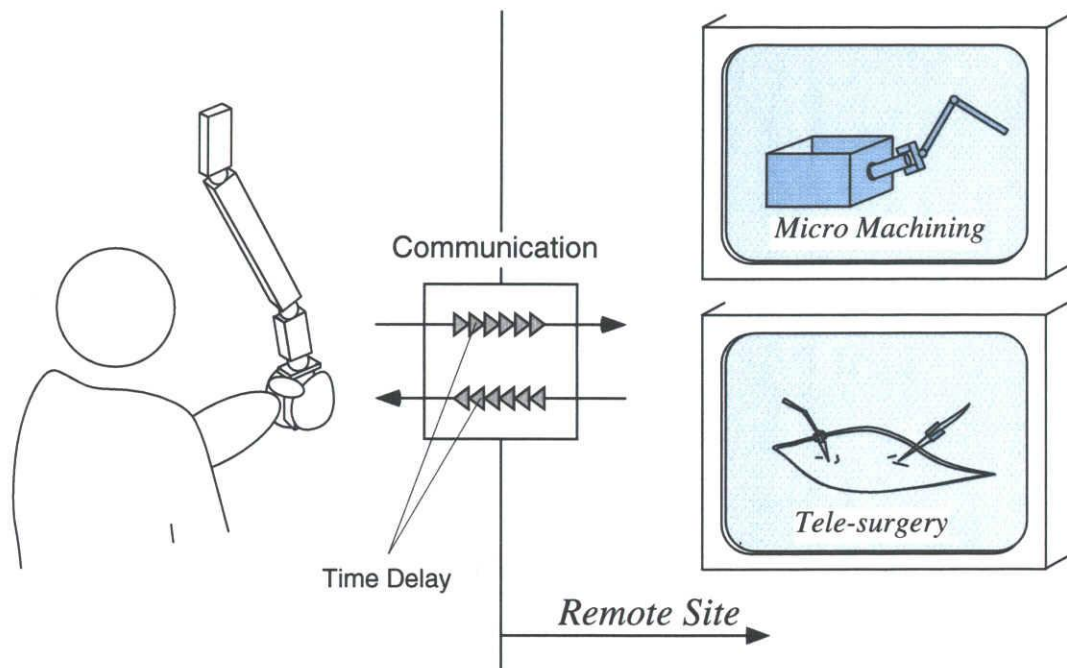


図 6.1: 通信遅れを有するスケールドテレマニピュレーションシステム

oriented 制御のように相互の情報をリアルタイムに使用することができないため，ここでは，各ブロック間の信号伝達を運動と力で表したパワー伝達モデルとして表現してある．ここで， \dot{x}_m はマスターマニピュレータから通信部に送られる速度情報， $\dot{x}_{s_{cmd}}$ はスレーブマニピュレータに実際に伝達される速度情報を表している．また，同様に f_s はスレーブ側から通信部に送られる力情報， $f_{m_{cmd}}$ は実際にマスター側に伝達される力情報である．ここで，図中の 2 ポートモデルで表された通信部の特性について考えてみよう．通信部に無駄時間が存在する場合には，図 6.3 のように信号は相互に遅れて伝達されることとなり，無駄時間を T 秒とすると通信部は次のような特性を持つ．

$$\dot{x}_{s_{cmd}}(t) = \dot{x}_m(t - T) \quad (6.1)$$

$$f_{m_{cmd}}(t) = f_s(t - T) \quad (6.2)$$

このように相互に通信遅れを持つ 2 ポートモデルには受動性が成り立たず，系は不安定な挙動を示すことが知られている．実際，Anderson らや Slotine らによって解

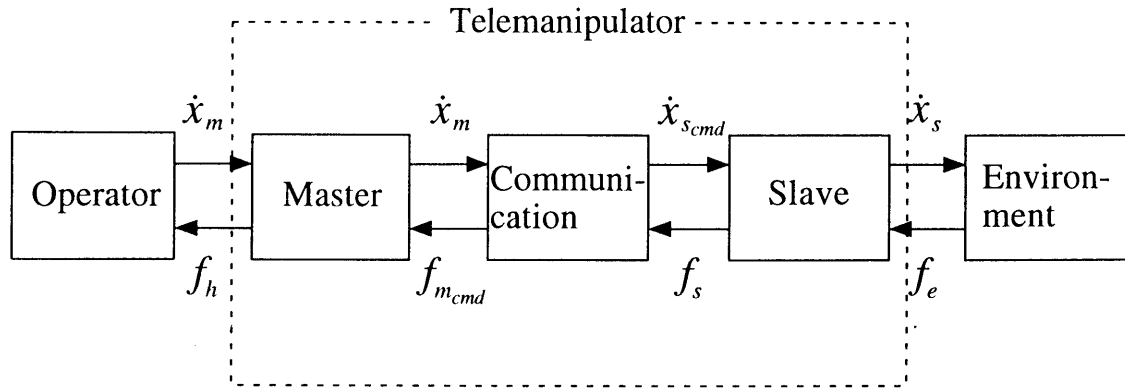


図 6.2: 通信部を含むテレマニピュレーションシステムのネットワークモデル

析されているように，通信部に流入するパワー P は，

$$\begin{aligned}
 P &= \dot{x}_m(t)f_{mcmd}(t) - \dot{x}_{s cmd}(t)f_s(t) \\
 &= \dot{x}_m(t)f_{mcmd}(t) - \dot{x}_{s cmd}(t)f_s(t) - \frac{1}{2}\dot{x}_m(t)^2 + \frac{1}{2}\dot{x}_m(t-T)^2 \\
 &\quad + \frac{d}{dt} \int_{t-T}^t \frac{1}{2}\dot{x}_m(\tau)^2 d\tau \\
 &= f_m(t)^2 - \frac{1}{2}(f_{mcmd} - \dot{x}_m)(t)^2 + \dot{x}_{s cmd}(t)^2 - \frac{1}{2}(f_s + \dot{x}_{s cmd})(t)^2 \\
 &\quad + \frac{d}{dt} \frac{1}{2} \int_{t-T}^t \{ \dot{x}_m(\tau)^2 + f_s(\tau)^2 \} d\tau
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

となり，一般には受動性が成り立たない．Slotineらはシステムが不安となる例として，以下のような興味深い系を紹介している．図 6.4 は通信ブロックに

$$\dot{x}_m(t) = -\frac{1}{B_m} f_{mcmd}(t) \tag{6.4}$$

$$f_s(t) = B_s \dot{x}_{s cmd} \tag{6.5}$$

で表されるダンパー特性を接続した系である．式 (6.1)(6.2) を用いるとシステム全体の特性は，

$$\dot{x}_m(t) = \frac{B_s}{B_m} \dot{x}_m(t-T) \tag{6.6}$$

となり，パワーの流入は，

$$P = -\frac{1}{B_m} f_{mcmd}(t)^2 - B_s \dot{x}_{scmd}(t)^2 \quad (6.7)$$

と求められる．この式から分かるように，系にはもはや受動性は成り立たない．

このように，無駄時間を有する通信ブロックを挿入すると，本来受動的で安定なシステムであっても，マスタースレーブ間の制御ループ中でエネルギーが連続的に生み出され，システムは不安定化されてしまうのである．通信遅れを含むシステムの制御系を設計する際には十分な注意が必要である．

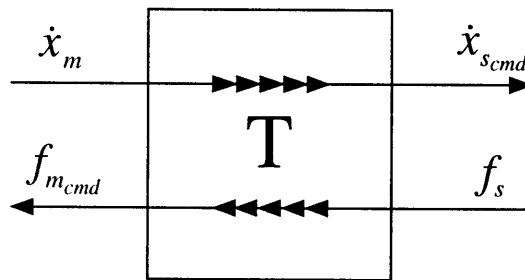


図 6.3: 無駄時間を有する通信部 2 ポートモデルの特性

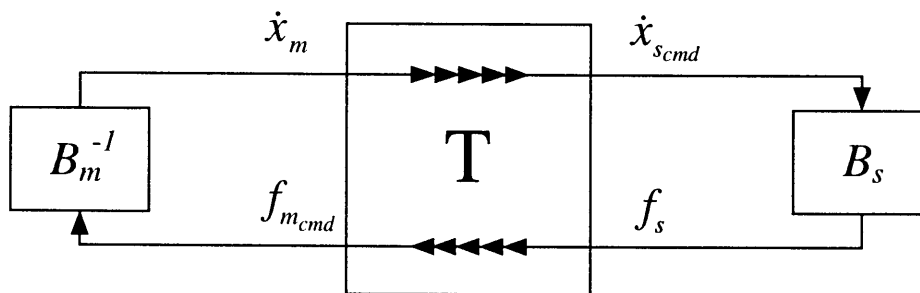


図 6.4: 通信部で接続されたダンパ系

6.2 スキャッタリング変換に基づく無駄時間補償

前述のようにループの形で挿入される通信遅れは，本来受動的なシステムをも不安定化してしまう．Anderson ら^{[31][32]}は，このような通信遅れ問題に対して，スキャッタリング変換を用いて実際の伝送線路の特性を模擬し，信号を復号して伝達することで通信ブロックの安定化を行う手法を提案した．本研究では，スキャッタリング変換の手法と前章までで説明したパワースケーリング手法とを組み合わせ，遠隔地

での使用に耐え得る実用的なスケールドテレマニピュレーションシステムを実現することを考える。ここでは、Andersonらによって提案されたスキッタリング変換の手法について説明する。

スキッタリング変換は、無駄時間が存在する場合でも安定に伝達が行われるという波の伝播特性を模擬したものである。スキッタリング変換に基づく安定化手法では、マスタースレーブ間の情報は、前節のように力と運動速度によって表されるパワーそのものを伝達するのではなく、力と運動を複合して Wave Variable と呼ばれる変数に変換して伝達される。Wave Variable は、力 f と速度 \dot{x} を使って以下のように定義される。

$$u = f + b\dot{x} \quad (6.8)$$

$$v = f - b\dot{x} \quad (6.9)$$

ここで、 u は入力波、 v は出力波を表す。また、 b は伝達線路の特性インピーダンスを表している。テレオペレーションシステムのような 2 ポートモデルの場合には、Wave Variable は

$$u_m = f_{m_{cmd}} + b\dot{x}_m \quad v_m = f_{m_{cmd}} - b\dot{x}_m \quad (6.10)$$

$$u_s = f_s + b\dot{x}_{s_{cmd}} \quad v_m = f_s - b\dot{x}_{s_{cmd}} \quad (6.11)$$

と定義される。今、マスタースレーブ間の通信をこの Wave variable を用いて行うものとする。通信部には無駄時間が存在するため、Wave Variable は次式のように遅れて伝達される。

$$v_m(t) = u_s(t - T) \quad (6.12)$$

$$v_s(t) = u_m(t - T) \quad (6.13)$$

しかし、この場合の通信部に流入するパワー P を計算すると、

$$P = \frac{1}{4b} \left[u_m^2(t) - u_s^2(t - T) + u_s^2(t) - u_m^2(t - T) \right] \quad (6.14)$$

$$\frac{1}{4b} \frac{d}{dt} \left[\int_{t-T}^t \{ u_m^2(\tau) + u_s^2(\tau) \} d\tau \right] \quad (6.15)$$

となり，通信部に蓄積されるエネルギーが T 秒間に入力されたパワーを単純に積分したもので表されることが分かる．このように，Wave Variable を伝達に用いることで，無駄時間が存在する場合でも受動的な通信ブロックが構成される．

テレマニピュレーションシステムにおける入出力波の定義から，マスタースレーブ間の信号の伝達特性が次式のようになるように制御系を構成すれば良いことが分かる．

$$\dot{x}_{s_{cmd}}(t) = \frac{1}{b} f_{m_{cmd}}(t-T) + \dot{x}_m(t-T) - \frac{1}{b} f_s(t) \quad (6.16)$$

$$f_{m_{cmd}}(t) = f_s(t-T) + b\dot{x}_{s_{cmd}}(t-T) - b\dot{x}_m(t) \quad (6.17)$$

上記の式 (6.16)(6.17) には伝送線路自体の通信遅れの特性も含まれているため，実際には，図 6.5 のような通信補償系が構成される．図から分かるように，通信部の補償は，マスタースレーブ間の情報をスキュタリング変換により一旦 Wave Variable へとコーディングし，通信を行った後，相手側で再びデコーディングする形となっている．このスキュタリング変換による手法は，現在のところリアルタイムで無駄時間を補償できる唯一の有効な手段であると考えられ，本章では，このスキュタリング変換を利用して無駄時間補償を行うことにする．

6.3 スケールドテレマニピュレータのための制御系設計

ここでは，通信遅れを有するテレマニピュレーションシステムに対し，力と運動の自由なスケーリングを安定に実現するための制御系を構成する．力と速度を Wave Variable に変換して伝達することと，拡張仮想ツールの共通部分（半自律化の前提に基づき，主としてマニュアルモードに設定される．）の制御に応用することを考慮して，本システムでは次式のようなスケーリングを実現することを目標とする．

$$\dot{x}_m = s_m \dot{x}_s \quad (6.18)$$

$$M_r \ddot{x} + D_r \dot{x} = f_h - s_f f_e \quad (6.19)$$

ここで， s_f, s_m は力と運動のスケーリングファクタである．

最初に，通信部に遅れがない場合を考え，力と運動を自由にスケーリング可能な制御系を構成する．通信遅れの無い場合には，マスタースレーブ間の情報はそのまま

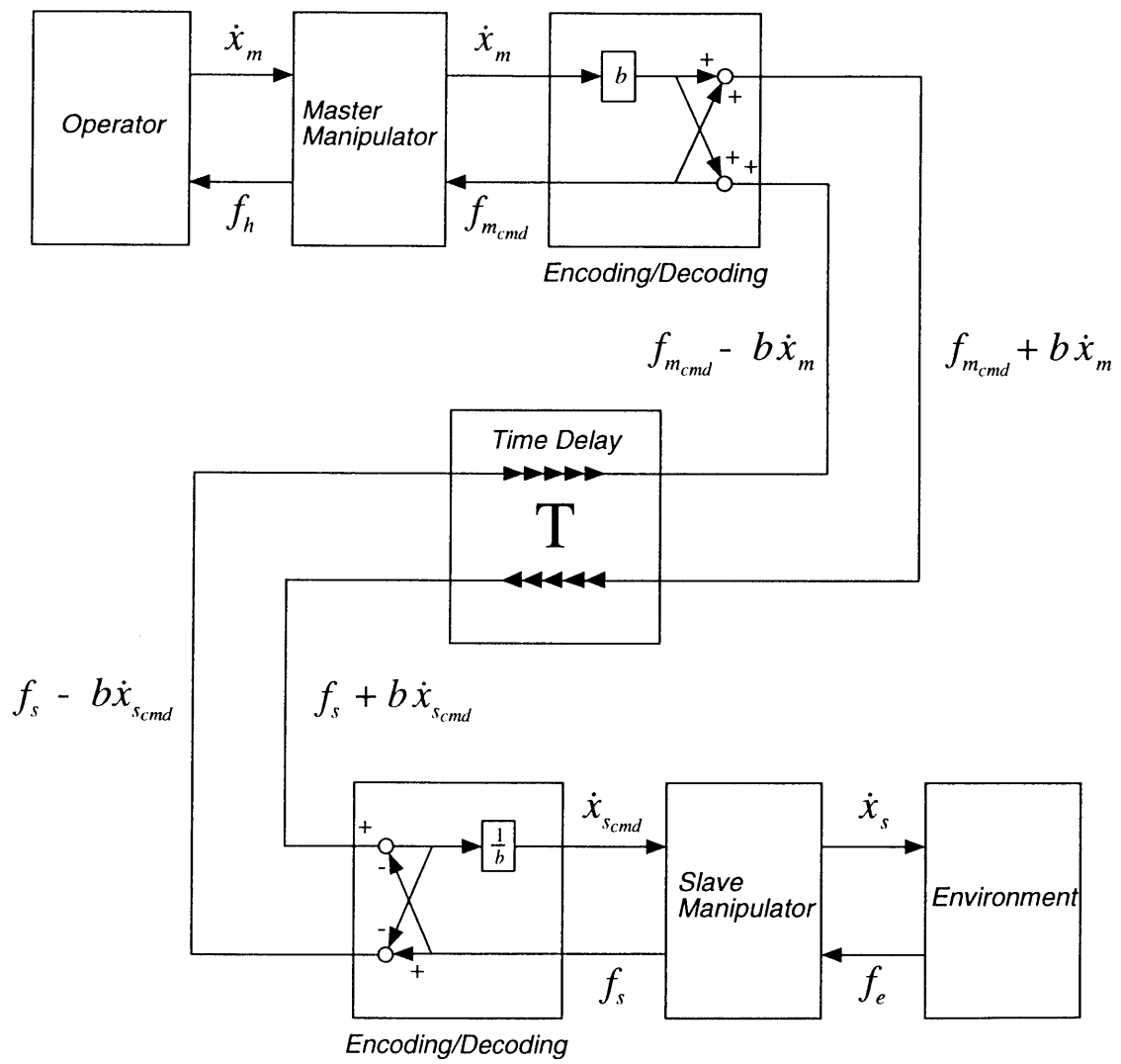


図 6.5: スキャタリング変換に基づく通信遅れ補償

ま伝達され，通信部の特性は次式で表される．

$$\dot{x}_{s_{cmd}}(t) = \dot{x}_m(t) \quad (6.20)$$

$$f_{m_{cmd}}(t) = f_s(t) \quad (6.21)$$

本システムでは，パワースケーリングを実現するため前述の二つのスケーリングファクタを用いて次の様な特性を持つように各マニピュレータを制御する．前章までと同様に，マスタースレーブ間の通信特性の中にスケーリング特性が複雑に入り込まないように，スレーブ側に分割できる形でスケーリングを行っている．

Master Manipulator

$$M\ddot{x}_m + D\dot{x}_m = f_h - f_{m_{cmd}} \quad (6.22)$$

Slave Manipulator

$$s_m\{M\ddot{x}_s + D\dot{x}_s\} = f_s - s_f f_e \quad (6.23)$$

ここで， x_s はスレーブマニピュレータの実際の運動速度， f_s はマスター側に伝達される力情報で，

$$f_s = K_s \int (\dot{x}_{s_{cmd}} - s_m \dot{x}_s) dt + D_s (\dot{x}_{s_{cmd}} - s_m \dot{x}_s) \quad (6.24)$$

のようにスレーブ側へ伝達される目標指令との運動誤差によって表される．マニピュレータへの制御入力として，電動マニピュレータの場合には例えば次のような非線形フィードバックを用いることができる．

Master Manipulator

$$u_m = M_m M^{-1} (-D\dot{x}_m + f_h - f_{m_{cmd}}) + G_m(x_m, \dot{x}_m) - f_h \quad (6.25)$$

Slave Manipulator

$$u_s = M_s M^{-1} \{-D\dot{x}_s + (f_s - s_f f_e)/s_m\} + G_s(x_s, \dot{x}_s) + f_e \quad (6.26)$$

ここで，各マニピュレータをこのように制御した場合のシステムの挙動を解析す

る。まず、式(6.20)(6.21)の仮定の下で式(6.22)と式(6.23)を辺々足し合わせると、

$$M(\ddot{x}_m + s_m \ddot{x}_s) + D(\dot{x}_m + s_m \dot{x}_s) = f_h - s_f f_e \quad (6.27)$$

また、式(6.22)から式(6.23)を引くと、

$$M\ddot{e} + D\dot{e} = f_h + s_f f_e - 2f_s \quad (6.28)$$

$$e = x_m - s_m x_s \quad (6.29)$$

となり、 f_s を代入して整理すると、誤差方程式は

$$M\ddot{e} + (D + 2D_s)\dot{e} + 2K_s e = f_h + s_f f_e \quad (6.30)$$

と表される。 D_s, K_s を適当に設計することで上式は安定となる。 $f_h + s_f f_e$ は有界であるので D_s, K_s を十分大きくとれば、運動誤差が $e = x_m - s_m x_s \simeq 0$ となりマスタースレーブ間の運動のスケーリングを実現することができる。この時、式(6.27)から分かるようにシステムは次のような特性を持つ。

$$2(M\ddot{x} + D\dot{x}) = f_h - s_f f_e \quad (6.31)$$

このシステムでは、外力によってマスターとスレーブの二つのモデルを駆動する形となっているため、システムの目標特性をふまえ、あらかじめ

$$M = \frac{1}{2}M_r \quad , \quad D = \frac{1}{2}D_r \quad (6.32)$$

となるように特性を設定すれば、スレーブマニピュレータ拘束時の力は式(6.19)のようにスケーリングされる。

テレマニピュレーションシステムの通信部に無駄時間が存在する場合には、スキッピング変換によって信号をWave Variable (u_m, v_m, u_s, v_s)に変換し、 \dot{x}_{sd}, f_{md} として次式のように複合された信号を用いる。(図6.5)

$$\dot{x}_{scmd}(t) = \frac{1}{b}\{v_s(t) - f_s(t)\} \quad (6.33)$$

$$f_{m_{cmd}}(t) = v_m(t) + b\dot{x}_m(t) \quad (6.34)$$

$$u_m(t) = b\dot{x}_m(t) + f_{m_{cmd}}(t) \quad (6.35)$$

$$u_s(t) = f_s(t) - b\dot{x}_{s_{cmd}} \quad (6.36)$$

ここで、 b は線路の特性インピーダンスである。これによって、通信遅れ補償系を実際のシステムに適用する際の伝送特性を調整することが可能である。

次に本システムの受動性について解析を行う。従来は、通信遅れを有するマスター・スレーブ系に対して自由なスケーリングを実現しようとするシステム受動性の条件が満たされず、不安定な挙動を招く原因となると考えられてきた。しかし、本章で構成したシステムではスキュアリング変換を用いて通信遅れの補償を行っており、また、第4章及び第5章で説明したようなスレーブ側でのスケーリングを行っているため、安定性を害さずに力と運動の応答を自由にスケーリングすることができる。

実際に、提案するスケーリング手法では、式(6.22)と式(6.23)に対して中間変数 $x_{s_1}, x_{s_2}, f_{e_1}, f_{e_2}$ を用いて等価変換を行うことで、図6.6のようにスケーリング部分を環境側に分離することが可能である。

Master Manipulator

$$\frac{M_r}{2}\ddot{x}_m + \frac{D_r}{2}\dot{x}_m = f_h - f_{m_{cmd}} \quad (6.37)$$

Slave Manipulator

$$\frac{M_r}{2}\ddot{x}_{s_1} + \frac{D_r}{2}\dot{x}_{s_1} = f_s - f_{e_1} \quad (6.38)$$

$$f_s = K_s \int (\dot{x}_{s_{cmd}} - \dot{x}_{s_1}) dt + D_s (\dot{x}_{s_{cmd}} - \dot{x}_{s_1}) \quad (6.39)$$

$$\dot{x}_{s_1} = s_m \dot{x}_{s_2} \quad , \quad f_{e_1} = s_f f_{e_2} \quad (6.40)$$

分離したスケーリング部と環境部をまとめて仮想的に環境ブロックとみなせば、第4章で示したように環境ブロックの受動性の仮定が満たされるため、テレマニピュレータ部が受動的であれば、システム全体として安定性が補償される。

そこで、次に図6.6のテレマニピュレータ部の受動性を示す。スケーリング部を分離したテレマニピュレータ部はマスターマニピュレータ部・通信部・スレーブマニピュレータ部の三つのブロックから構成されているが、このように複数のブロックが縦列結合されたシステムの場合、各々のブロックが受動性の条件を満たしてい

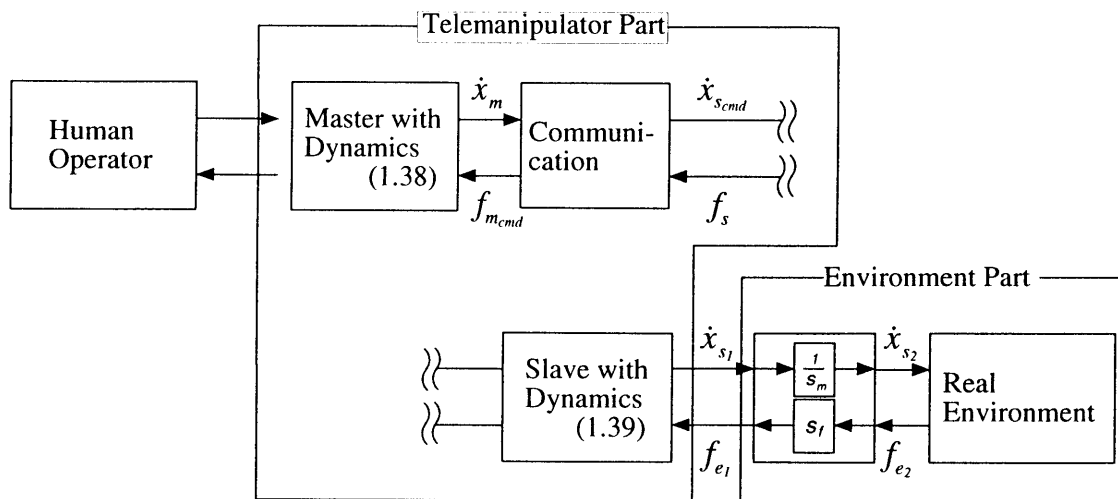


図 6.6: スケーリング部を分割したテレマニピュレーションシステム

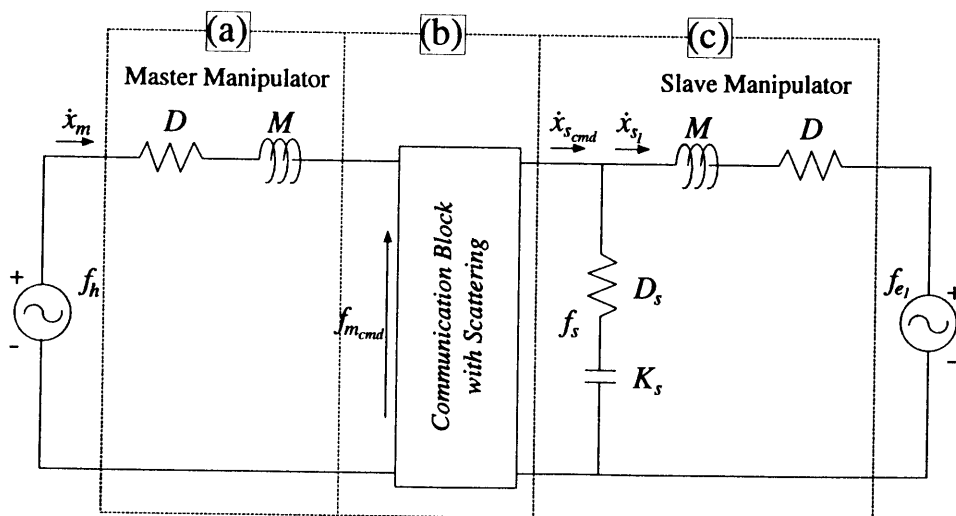


図 6.7: テレマニピュレータ部の等価回路

れば全体として受動的であるとみなすことができる。テレマニピュレータ部を等価回路で表すと図 6.7 のようになる。図に示した (a),(b),(c) の部分がそれぞれのブロックに対応している。(b) の通信部は前述のようにスキュタリング変換によって、ブロックが受動的となることは既に証明されている。また、(a),(c) の受動素子から構成された部分は、明らかに受動的である。よって、(a)(b)(c) は受動的なブロックの結合とみなせ、テレマニピュレータ部は受動的であることがわかる。

以上の解析により、提案するスケーリング手法によってスケーリングされたテレマニピュレーションシステムは受動性の条件を満たすことが証明された。よって、各マニピュレータが式 (6.22)(6.23) の特性を持つようにスケーリングされ制御されている限り、システム全体の受動性を害さずにスレーブ側の運動と力のスケールを自由に設定することができ、安定なテレマニピュレーションシステムが構成できることがわかる。

6.4 実験

提案する手法の有効性を確認するため、実際のテレマニピュレータを用いて実験を行った。本実験で使用したシステムの概略を図 6.8 に示す。実験用マニピュレータは電動式で、第 4 章のシステムと同じ構成であるが、今回の実験は、6 自由度マニピュレータの第 1 軸のみを用いて、1 自由度で行っている。オペレータの操作力及び環境との間の作業力を計測するため、各マニピュレータのリスト部には力覚センサを取り付け、マニピュレータに式 (6.22)(6.23) の特性を持たせるための制御に使用した。第 4 章で説明したように、各マニピュレータは別々のコントローラにより制御され、両コントローラ間の通信を管理する CPU ボードと共有メモリを用いて互いに情報伝達が可能となっている。今回は、通信部の無駄時間を模擬するためコンピュータで擬似的に遅れ T を作り出せるようにして実験を行った。

実験では二つの項目について確認を行った。まず、オペレータがマスターマニピュレータを自由空間で操作し、非拘束状態において運動が設定通りにスケーリングされるかどうかを確認した。次に、オペレータの操作によりスレーブマニピュレータを壁面に拘束させ、安定に力のスケーリングが実現されるかを確認した。実験は、無駄時間の無い場合と無駄時間 T を 0.2 秒、0.8 秒と比較的大きく設定した場合の三種類の場合について行った。

本システムの実験結果を示す前に、比較のために通信遅れを補償しない場合の同条件でのシステムの挙動について紹介しておく。通信遅れが 0.2 秒の場合には、辛

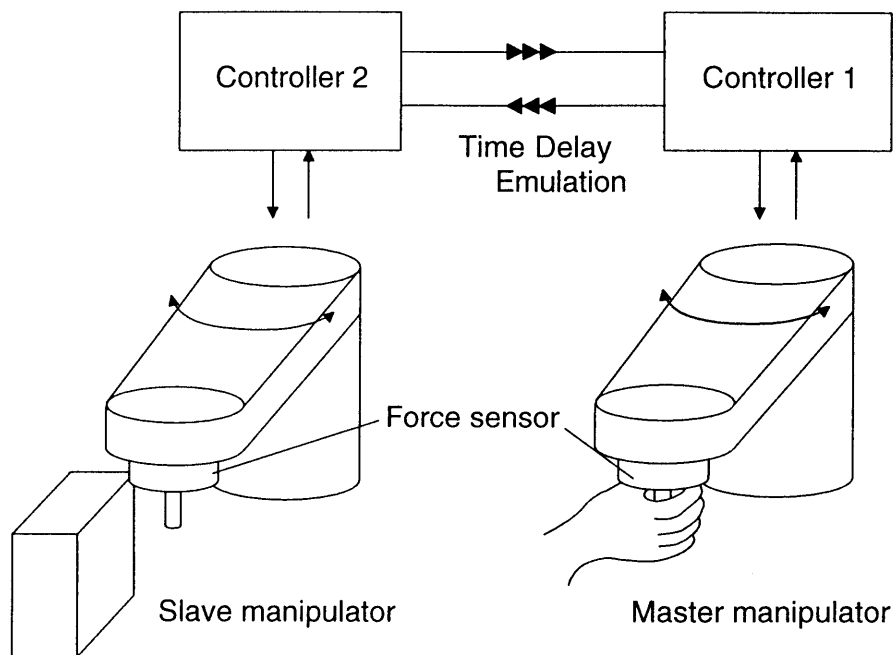


図 6.8: 通信遅れ系実験システム

うじて発散はしないものの、システムが発生するエネルギーにより振動が励起され、オペレータが操作を中止して外力が働かなくなった後も振動が減衰しない状態であった。また、遅れを 0.8 秒にした場合には、マスタースレーブ間の位相のずれが大きくなり、実験開始後 2 秒程度ですぐに発散してしまった。図 6.9 は $T = 0.8$ に設定した時の運動の発散の様子を示している。向かって右側がマスターマニピュレータ、左側がスレーブマニピュレータである。写真から分かるように、マスタースレーブ系はオペレータの操作と全く異なる動きを見せ、マスタースレーブ間で位相遅れが増大して発散してしまっている。危険なため、ここではスレーブマニピュレータの壁面への拘束は行わなかったが、外部から拘束を受けた場合には、更に大きな振動が励起されるものと予想される。

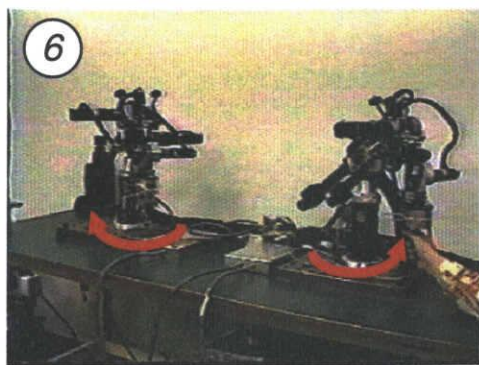
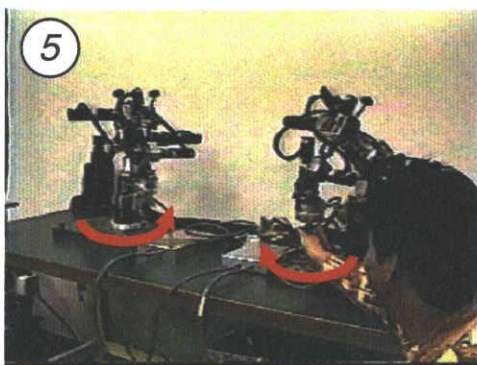
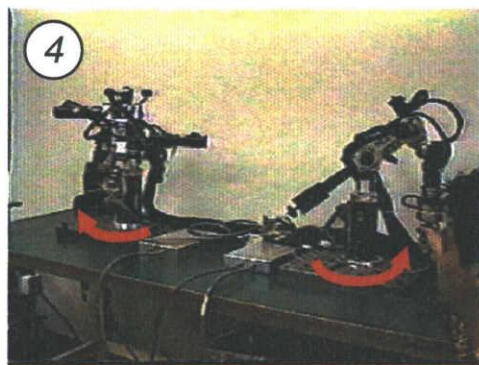


図 6.9: 通信遅れ補償をしない場合のシステムの挙動 ($T = 0.8$)

次に、本章で構成した制御系に関する実験結果を示す。ここでは例としてスケーリングファクタを次のように設定した場合の結果を示す。

$$s_m = s_f = 2.0 \quad (6.41)$$

図 6.10, 図 6.11, 図 6.12 は、それぞれ $T = 0, 0.2, 0.8$ の場合にオペレータがテレマニピュレータを非拘束状態で自由に操作したときの操作力とマニピュレータの運動(速度)を示している。結果を見易くするために、グラフのメモリをスケーリングファクタに合わせてあるが、本制御系により、無駄時間が $T = 0.8$ 秒ある場合でも安定に運動がスケーリングされているのが分かる。

また、図 6.13, 図 6.14, 図 6.15 は、同様に $T = 0, 0.2, 0.8$ のそれぞれの条件下でスレーブマニピュレータを壁面に拘束した時の、マスタースレーブ系の力と運動の応答を表している。 $T = 0.2, 0.8$ のいずれの場合も力のスケーリングが設定通り実現されているのが分かる。また、提案した手法により受動性の条件を満足するようにスケーリングを行っているため、硬い壁に拘束した場合でも振動的な挙動が現れず、安定にパワースケーリングが実現されているのが分かる。

実験では、スケーリングファクタの設定による応答の違いについて確認も行ったが、いずれの場合も良好な結果を得ることができた。最後に、スケーリングファクタを 5 倍に設定した場合の結果 $T = 0, 0.2$ を図 6.16 から図 6.19 に示す。

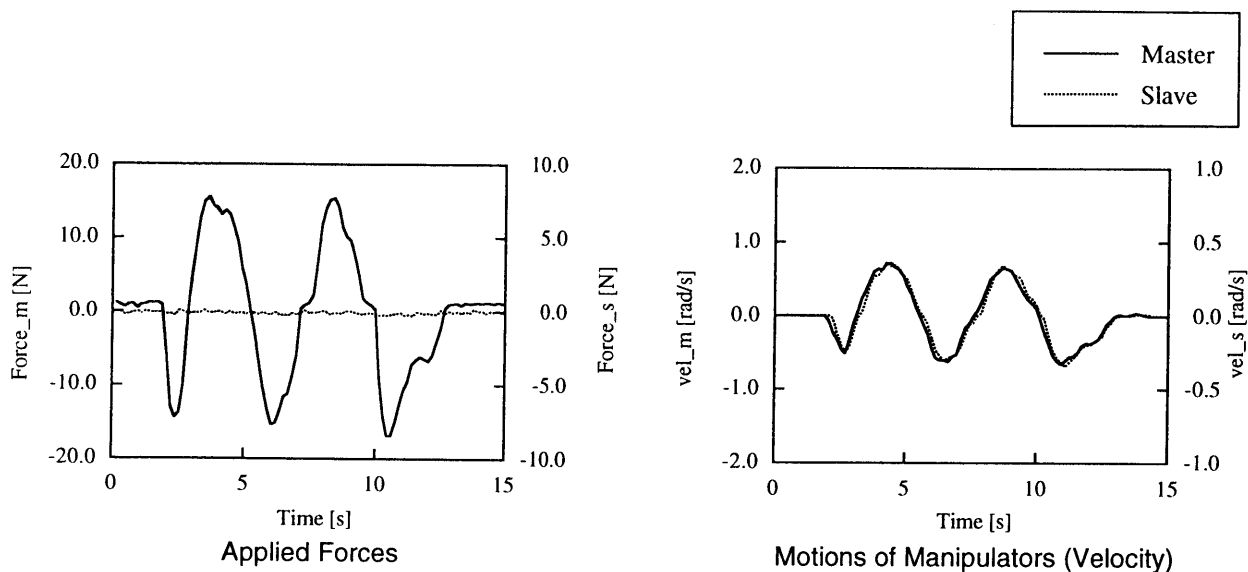


図 6.10: 非拘束時のシステムの挙動 ($T = 0$)

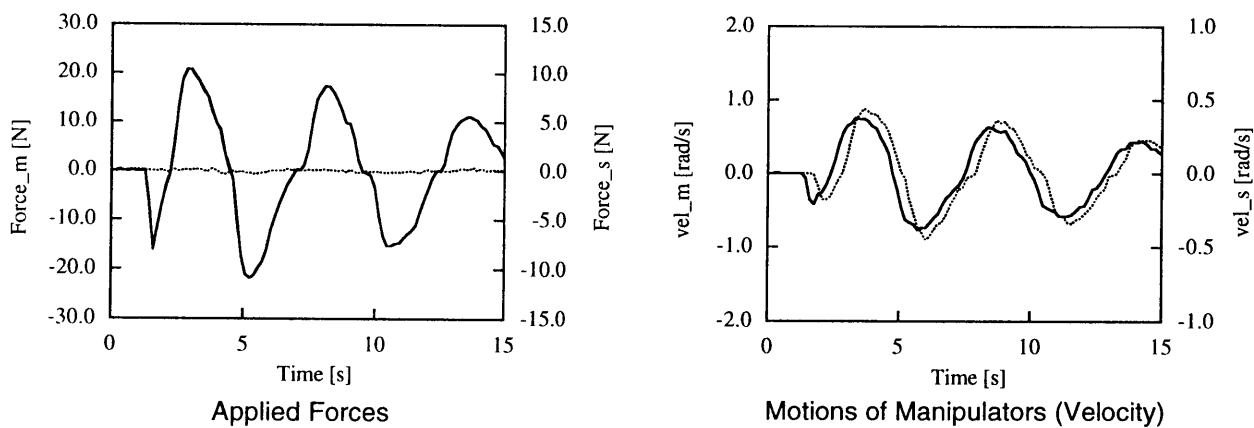


図 6.11: 非拘束時のシステムの挙動 ($T = 0.2$)

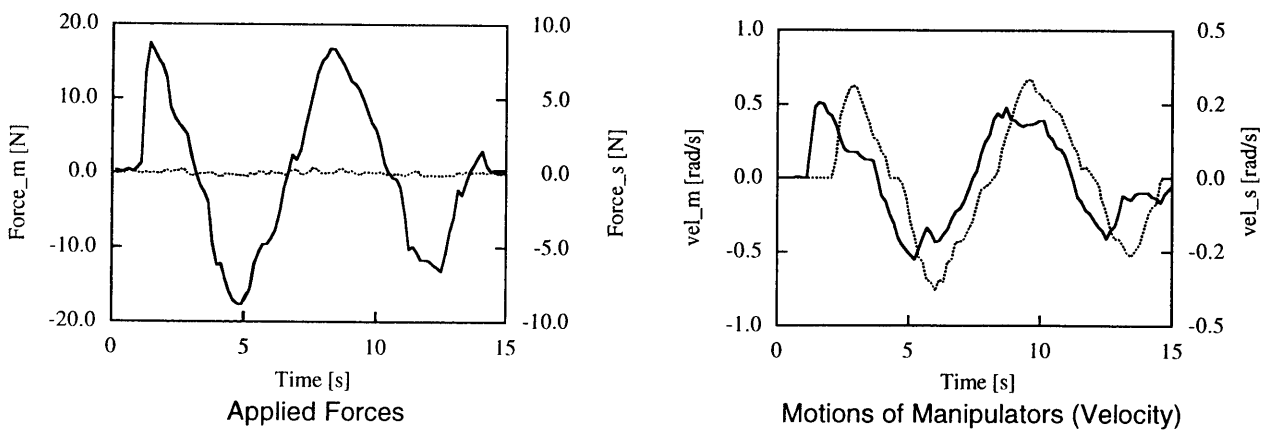


図 6.12: 非拘束時のシステムの挙動 ($T = 0.8$)

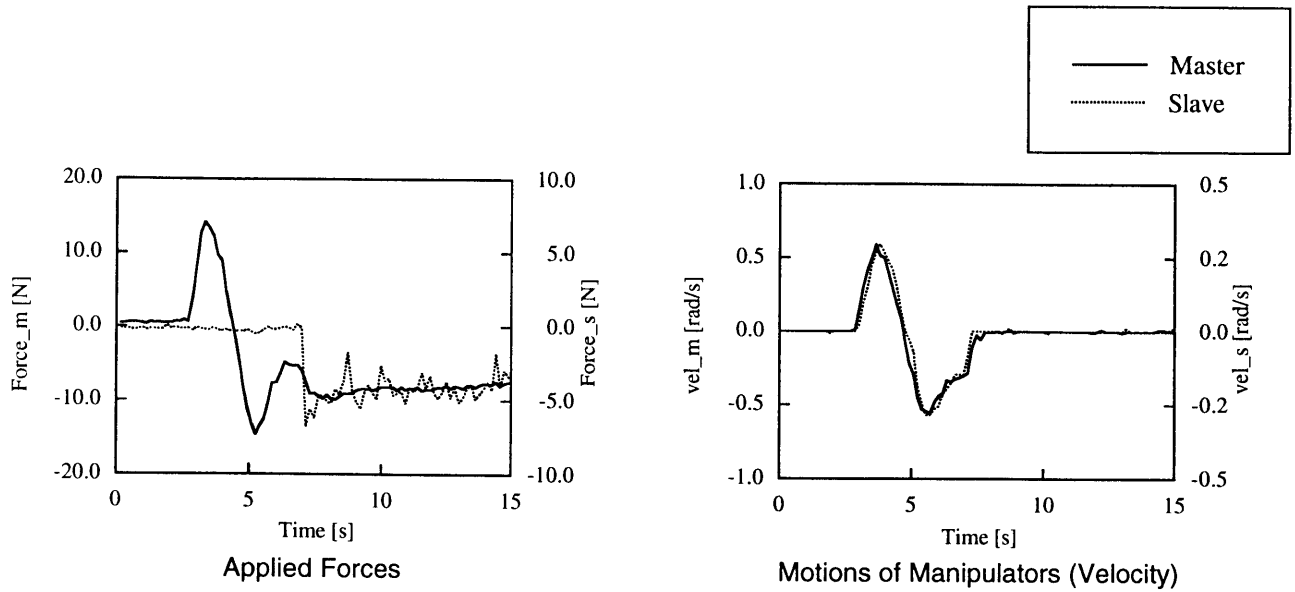


図 6.13: 拘束時のシステムの挙動 ($T = 0$)

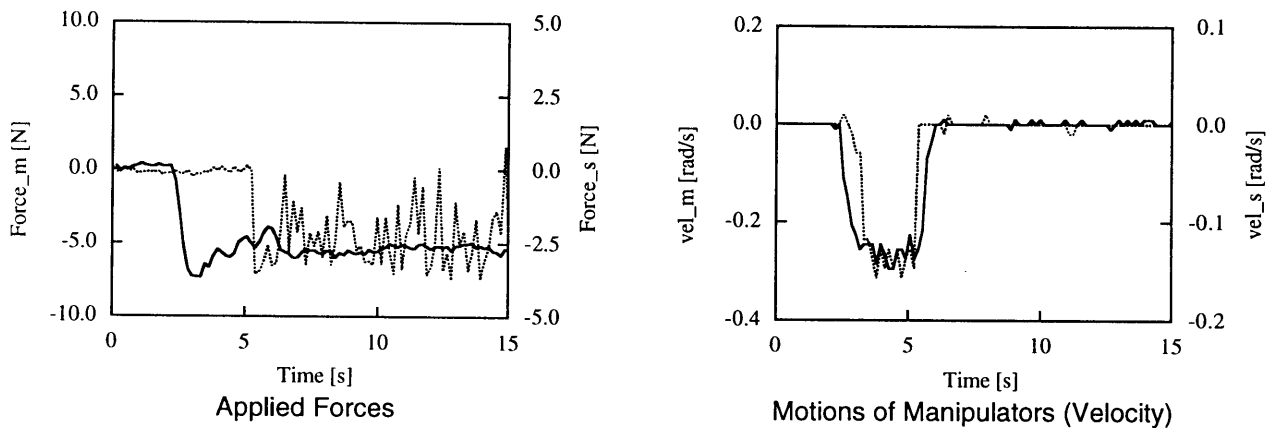


図 6.14: 拘束時のシステムの挙動 ($T = 0.2$)

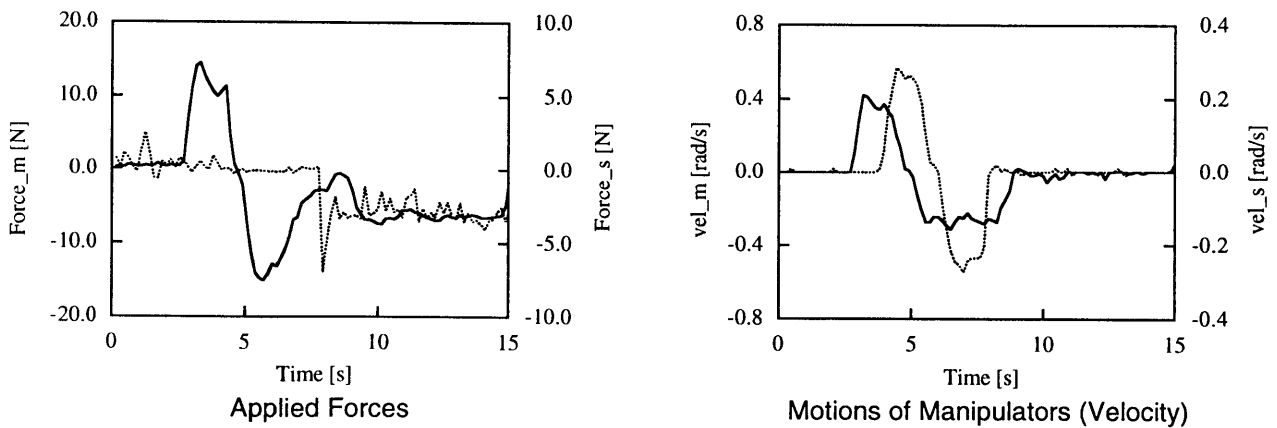


図 6.15: 拘束時のシステムの挙動 ($T = 0.8$)

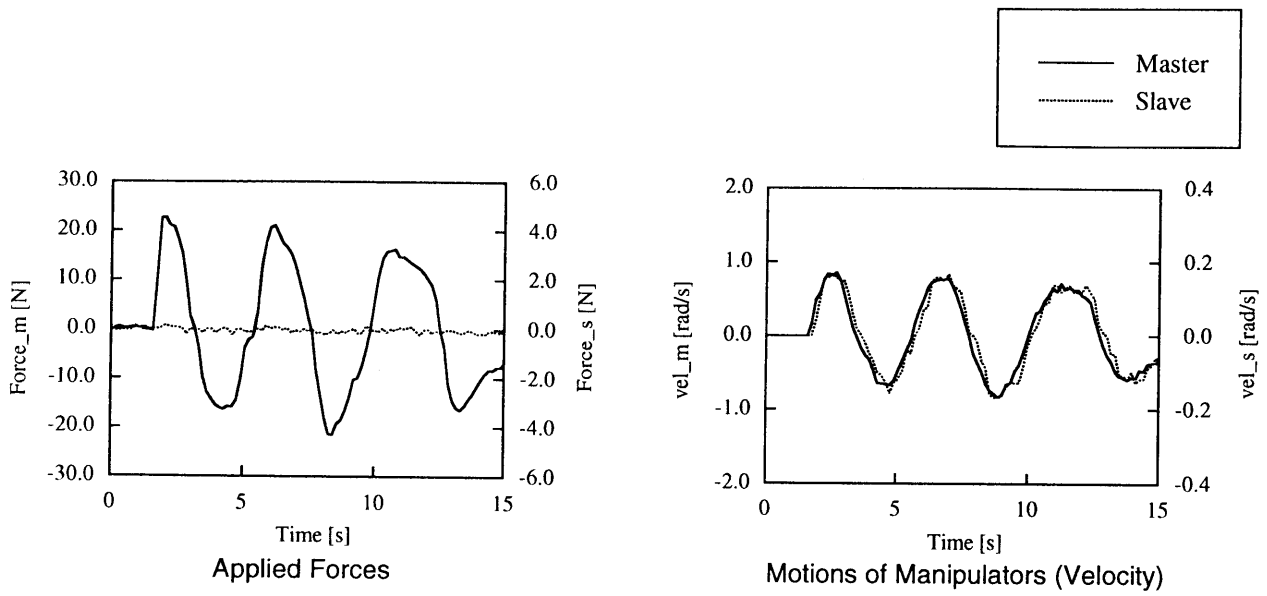


図 6.16: 非拘束時のシステムの挙動 ($T = 0, s_m = s_f = 5$)

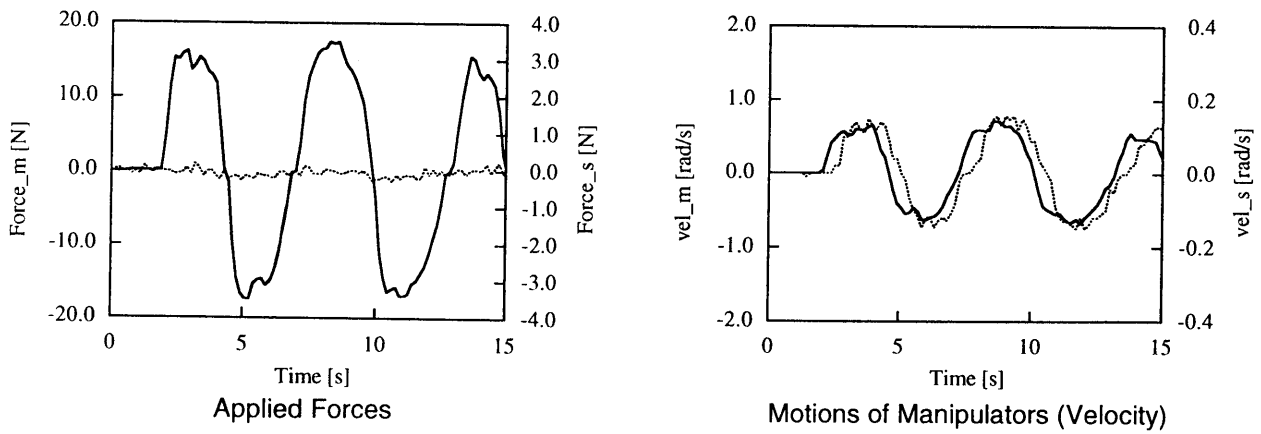


図 6.17: 非拘束時のシステムの挙動 ($T = 0.2, s_m = s_f = 5$)

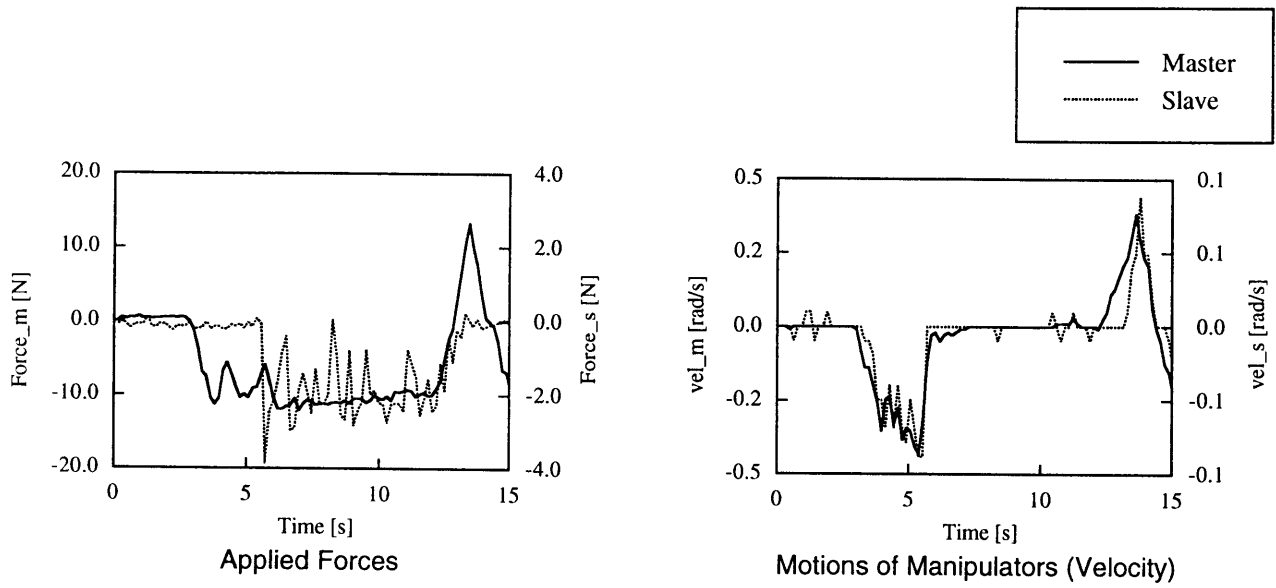


図 6.18: 拘束時のシステムの挙動 ($T = 0, s_m = s_f = 5$)

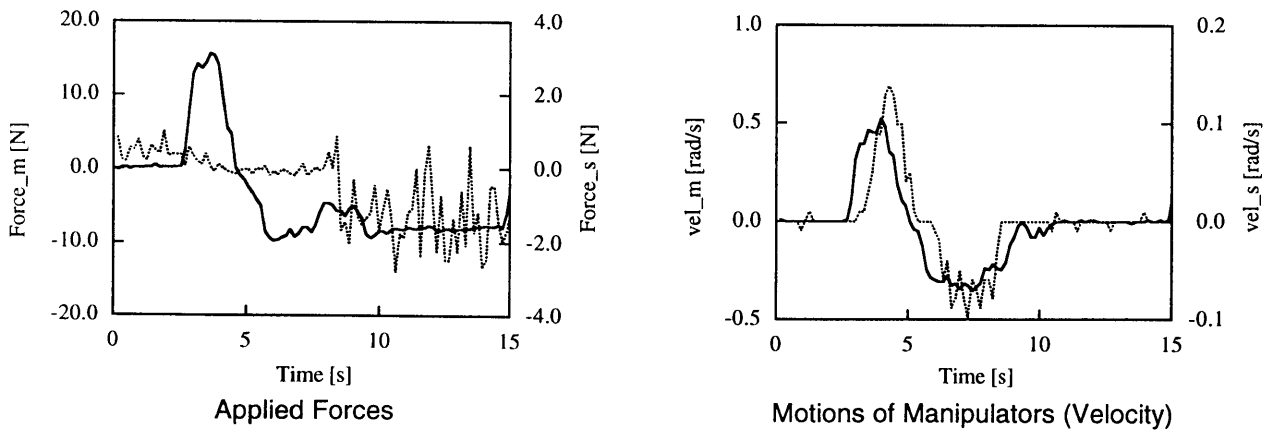


図 6.19: 拘束時のシステムの挙動 ($T = 0.2, s_m = s_f = 5$)

6.5 まとめ

マスターコンピュータが通信経路を介してスレーブ側と結ばれているテレマニピュレーションシステムでは、テレサージェリー等の遠隔地での作業を想定した作業への応用を考えた場合、通信部に存在する無駄時間（通信遅れ）は無視できない。通常のプラントに存在する無駄時間については、例えばスミスの安定化補償器などの手法を用いることができるが、テレマニピュレータのように無駄時間が双方向にしかもループの形でシステムに対して挿入される場合には、システムの特徴がより複雑なものとなり、実用的なシステムを構築する際の大きな障害となってきた。このような通信遅れ問題に対し、古典的には、ユニラテラル方式を採用し、無駄時間が大きい場合には通信遅れ時間を考慮しながらゆっくりと操作を行う等の方法がとられてきたが、システムのバンド幅を低下させる結果となり、作業の臨場感を向上させることが難しかった。

近年、Anderson, Spong ら^{[31][32]}によって受動性に基づく通信遅れの補償法が提案され、スキュッタリング変換と呼ばれる手法により実際の伝送線路の特性を模擬することで、通信部の受動性が保証されることが分かってきた。これにより、リアルタイムに作業を行なえる実用的なシステムを構築できる可能性が見えてきた。

本章では、このスキュッタリング変換の手法と前章までで提案したパワースケーリング手法とを融合し、通信遅れを有する場合でも安定にパワーをスケーリングでき、遠隔地での使用に耐え得る実用的なスケールドテレマニピュレーションシステムを実現することを考えた。まず最初に、遠隔操作システムにおける通信遅れの影響について考察し、Slotine らが示した通信遅れによるシステム不安定化の解析例を紹介した。次に、スキュッタリング変換を用いた通信ブロックの安定化手法について説明した。次に、二つのスケーリングファクタを導入して、マスタースレーブ間の力と運動の応答を自由にスケーリング可能な制御系を構成した。そして、構成したスケーリング手法を用いるとシステムの受動性が保証され、システム全体の受動性の条件を乱すことなく自由にパワースケーリングを行えることを示した。最後に、実機を用いて通信遅れを模擬した実験を行い、システムの有効性を確認した。

尚、本システムではスキュッタリング変換により通信部の補償を行なっているため、通信遅れが大きくなるとシステムのダイナミクスは式(6.31)のような明確な形で表すことはできない。しかし、システムはスケーリング部を含めて受動的になるよう設計されているため、パワースケーリングを行っても不安定な挙動を示すことはない。また、スキュッタリング変換の手法を用いれば通信遅れの大きさにかかわらずシステムの安定性は補償されるが、遅れが例えば1分や1時間など非常に大き

くなった場合には、リアルタイム作業性の観点から考えるとあまり実用的ではない。そうした場合には、マスタースレーブ間の通信にはオペレータの操作から作業情報を抽出した上位のレベルの信号を用いるなど、実作業の細かい指令をローカルなスレーブ側に任せる工夫が必要となってくるであろう。

第7章 結論

本研究では、これまでの遠隔操作システムの目標であった理想応答やマスタースレーブ系の特性を見直し、従来とは異なる観点から新しい実用遠隔操作システムを構築することを目指した。本論文で議論したようなマスタースレーブ系の特性を総合的に捉えていく手法は、従来の手法では実現できなかった柔軟な作業特性をシステムに与えることができ、VR技術やネットワーク技術等の他の技術と統合していくことで、次世代の遠隔操作システムへの足掛かりとなり得る。ここでは、本論文のまとめとして論文中で議論した内容を総括し、今後の課題について説明する。

7.1 本論文のまとめ

理想応答の概念が象徴しているように、従来のマスタースレーブマニピュレータは、作業環境や対象物の特性をオペレータに正確に伝達するための媒介でしかなかった。そのため、マスタースレーブ系の特性を打ち消して、オペレータがあたかも直接に対象物を操っている感覚を実現することが最大の目標であった。また、マスタースレーブという名称からも分かるように、マスターマニピュレータとスレーブマニピュレータが同一の応答を示し、あたかも一つのマニピュレータのような特性を持つように制御するのが、暗黙の常識となってきた。本論文では、人間との協調作業システムとしての遠隔操作システムの特性を見直し、マスタースレーブ系の特性を総合的なものとして捉えることで、より柔軟で実用的な遠隔操作システムを構築していく手法について議論した。

ロボットマニピュレータを介して間接的に作業を行うことを前提としたテレマニピュレーションシステム等の人間-機械協調作業システムでは、これまで工場などで使用されてきた産業用ロボット単体での繰り返し作業とは異なり、人間に与える負担や作業効率、安全性など様々な問題に対して特別の注意を払わなければならない。すなわち、人間と機械との干渉を考慮して、システムの特性を総合的に捉えて設計を行っていかなければならない。本論文では、システムの操作性問題・安定性問題・安全性問題という3つのキーワードを軸に、テレマニピュレーションシステ

ムのための制御系設計手法を構築した。

第1章では、テレマニピュレーションシステムの構成と概要について説明し、実用遠隔操作システムを構築する上で重要な諸課題について解説を行った。また、従来の制御法と比較しながら、提案するテレマニピュレーションシステムでのアプローチについて紹介し、本研究の立場と意義を明らかにした。

第2章では、受動性の観点からテレマニピュレーションシステムの安定性問題にアプローチする方法について議論した。テレマニピュレーションシステムはオペレータや作業環境の特性をループの形で含むため、従来のようなシステムの部分安定性の概念のみでは、作業時の系の安定性を十分に保証できない。この章では、人間や環境といった非線形システムを含む系の安定性解析に有効である『受動性』の概念について説明した。そして、テレマニピュレーションシステムのような人間-機械系の安定性解析に適用する方法について解説を行った。また、システムの受動性解析に必要ないくつかのツールについて、受動性解析例を示しながら紹介した。

第3章では、仮想ツールを用いたマニピュレータの汎用力制御器の構成手法を提案した。テレマニピュレータのように人間や環境との干渉を伴うシステムでは、作業に応じて柔軟な設計が可能な汎用力制御系をいかに設計するかが重要である。ここでは、力制御における座標系の役割について議論し、「仮想ツールダイナミクス」の概念により、作業に適した力制御系を陽に構成する手法について提案した。また、仮想ツールに基づく力制御系設計の有効性を、倣い作業の実験により確認した。

第4章では、仮想ツール特性に基づく実用テレマニピュレータの制御系構成手法について議論した。ここでは、従来の目標であったマスタースレーブ系の理想応答の問題点を指摘し、仮想ツール特性を利用して人間と道具のような理想的な関係の構築を目指す Task-oriented 制御系の設計方針について説明した。そして、新しい半自律化の前提に基づいた半自律化仮想ツールダイナミクスを定義し、その特性をマスタースレーブ系に持たせるための制御系を設計した。次に、構成したシステムの安定性解析を行い、受動的ないかなるオペレータや環境に対しても、受動性の観点からシステムの安定性が保証されることを示した。また、マクロ・マイクロマニピュレーションへの応用を目指し、システムの安定性を害することなく、自由にパワーのスケールリングを行えるように Task-oriented 制御系を拡張を行った。最後に、Task-oriented 制御系を実際のテレマニピュレータに適用して作業実験を行い、提案するシステムの有効性を確認した。

第5章では、従来の手法とは異なる観点からマスタースレーブ系の特性を捉え、テレマニピュレーションシステムの特性を見直して、遠隔操作システムの新しい可能

性について議論した。従来のテレマニピュレーションシステムでは、マスターとスレーブの特性を一致させ、それらが外部から見てあたかも一つのマニピュレータであるように見せかけることが、システム構築時の暗黙の前提となってきた。ここでは、オペレータと環境との間に介在するマスターとスレーブという二つのマニピュレータの特性を総合的に捉えていくことで、より柔軟な遠隔操作システムを構築することを目指した。まず、日常の道具の特性をヒントに、より自由度が高く柔軟な遠隔操作システムの設計するための指針について説明した。そして、テレマニピュレーションシステムに内在する冗長性に着目して、システムの操作性や作業性を向上させるための拡張仮想ツール特性の概念を定義した。次に、拡張仮想ツールの特徴と応用例を示し、拡張仮想ツール特性をマスタースレーブ系に持たせるために拡張した Task-oriented 制御系を構成した。また、受動性の観点からシステムの安定性について解析を行った。最後に、実機を用いて作業実験を行い、システムの有効性を検討した。

第6章では、通信遅れ問題について議論した。テレマニピュレーションシステムをネットワークロボティクスや遠隔医療などへ応用する場合には、マスタースレーブ間の通信伝達部に存在する無駄時間を補償しなければならない。この章では、まず最初に伝達部の通信遅れ特性について議論し、通信遅れのシステムへの影響について受動性の観点から解析した。次に、スキッタリング変換の手法について解説し、マスタースレーブ間の信号を Wave Variable と呼ばれる信号に変換して、実際の受動的な伝送線路の特性を模擬することで、システムの安定性の補償が可能であることを示した。そして、スキッタリング変換と前章で提案した安定なスケーリング手法を併用することで、通信遅れが存在する場合にも安定にスケーリングを行うことのできる制御系を構成した。最後に、通信遅れを模擬した実験により、通信遅れが安定化され、設定されたスケーリングが実現される様子を確認した。

7.2 今後の課題

本研究では、従来のマスタースレーブ系の特性を見直し、新しい実用テレマニピュレーションシステムを構築する際に基盤となる基本構成部分について議論を行った。今後のロボットの応用範囲の一層の拡大を図るためには、現在研究が進められている他の多くの技術との統合によって、システムの有用性を更に高めていく必要があるだろう。最後に、今後研究を進めていく上での研究課題と今後の研究の展望について述べ、本論文のまとめとする。

- 仮想ツールの特性設計問題と汎用システム構築問題

本研究では、作業に適した拡張仮想ツール特性を用いてマスタースレーブ系の特性を改善する手法を提案した。仮想ツールは、これまで蓄積されてきた機械系の設計ノウハウをそのまま利用して陽に特性設計を行えるため、直感的で分かりやすい汎用力制御系を構成できるという利点があった。しかし、一般社会にロボットが普及した場合には、蓄積されたノウハウやデータ等から自動的に特性を設計したり、熟練者の作業から有効な特性を抽出したりする機能が必要となろう。また、設計後の、作業に合わせた最適な特性の調整も必要となるであろう。機構の最適自動設計法については、多くの分野で研究が続けられているが、現在のところ、一般的な作業に対して適用可能な体系的な手法は見つかっていない。今後は、人間の作業特性を考慮したシステムの操作性評価の方法とともに、その評価に基づいたマスタースレーブ系の特性設計手法について体系的に議論していかなければならない。また、設計された多くの作業特性をデータベースとして統合し、真の意味での汎用システムを構築していかなければならない。

- 安全性設計

人間共存型ロボットを実用化するためには、ロボットと人間との関わり方やシステムの安全性設計を見直していかなければならない。本研究では、ソフトウェアの面からロボット援用作業システムとしてのテレマニピュレータの特性を議論したが、実際の使用にあたってはハードウェア面も考慮した二重三重の安全設計を行わなければならないだろう。将来、自律型の知能ロボットの進歩により、知能化されたシステムと既存の技術との一層の融合が図られるものと思われるが、人間共存型ロボットとして有効に利用するためには、人間の意図に反する動作を行わないような安全設計が重要となってくるのではないだろうか？

- ネットワークロボティクスに対応した通信遅れ問題

今後、高速・広域ネットワークが普及するにつれて、人間共存型ネットワークロボティクスへの期待が益々高まってくるものと思われる。ネットワーク上に多数のロボットやインターフェースを接続してコミュニケーションを行っていくためには、ネットワーク通信の特性を考慮してシステムの設計を行わなければならない。汎用通信プロトコルの問題や1対1の専用通信回線では考慮されなかった通信負荷による無駄時間の変動の影響など多くの問題を解決してい

く必要があるだろう。また、宇宙など通信遅れが大きい場合にはスキヤッタリング変換による臨場感向上の効果が薄れるため、例えば、仮想環境に対する作業からオペレータの作業意図や作業情報を抽出して送信するなど、従来のスーパーバイザリ方式を拡張した新たな制御方式が必要となってくるであろう。

- 実用化に向けたシステム統合問題

現在、遠隔操作システムは、他の様々な技術と統合され、アミューズメント分野や医療・福祉分野など新しい分野へ応用されることが期待されている。今後は、従来のようなテレオペレーションの範疇としてだけでなく、広くその意義や特性を捉えていかなければならない。VR技術やレイグジスタンス技術、マイクロ技術、ネットワーク技術、知能化技術等、様々な技術との統合を図ることで、ロボット工学における新たな応用分野を切り開いていかなければならないだろう。

関連図書

- [1] 館, ” テレロボティクスの世界”, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.6, pp.770-772 (1993)
- [2] 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)
- [3] R.C.Goertz et al., ”Electronically Controlled Manipulator”, Nucleonics, Vol.12, No.11, pp.46-47 (1954)
- [4] 富成, 双動型サーボ機構の Signal Flow Diagram による解析, 自動制御研究会資料,102(1958)
- [5] 富成, 双動型サーボ機構の Signal Flow Diagram Matrix による解析と実験, 自動制御, Vol.6, No.2, pp.58-66(1959)
- [6] 野本, 操作感覚をもつサーボ機構, 科学, 27, 6 (1957)
- [7] 藤井, ” バイラテラルサーボ機構の理論”, 日本機械学会誌計,62-480,pp.64-69(1959)
- [8] 江尻, 鴨井, ” サーボマニピュレータ”, 計測と制御,2-7,pp.483-490(1963)
- [9] 福田, 谷江, 光岡, ” マイクロマニプレータの制御”, 日本機械学会論文集 C,53-493,pp.1950-1956(1987)
- [10] K.Kosuge, ”Master Slave Manipulator based on Virtual Internal Model Following Control Concept”, IEEE international conf. Robotics and Automation, pp.567-572 (1987)
- [11] 古田, 小菅, ” マニピュレータの力制御アルゴリズムとその実現”, 日本ロボット学会誌解説,7-3,pp.131-136(1989)

- [12] 古田, 小菅, ” 仮想内部モデルに基づくマスタースレイブマニピュレータの制御”, 計測自動制御学会論文集,24-2,pp.70-76(1988)
- [13] K.Kosuge, ”Control of Single-Master Multi-Slave Manipulator System Using VIM”, IEEE international Conf. on Robotics and Automation, pp.1172-1177 (1990)
- [14] 小菅, 古田, 横山, ” ロボットの仮想内部モデル追従制御系 メカニカルインピーダンス制御への応用”, 計測自動制御学会論文集, Vol.21, No.1, pp.55-62, 1988
- [15] K.Kosuge, A.Sato and K.Furuta, ”Task-Oriented Control of Maste-Slave Manipulators,”Proc. 1990 Japan-U.S.A.Symposium on Flexible Automation, pp.387-393, 1990
- [16] J.Ishikawa, K.Kosuge and K.Furuta, ”Intelligent Control of Assembling Robot Using Vision Sensor”, Proc. of 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1904-1909, 1990
- [17] 小菅, 古賀, 古田, 野崎, ” 仮想内部モデルに基づくロボットアームの協調制御”, 計測自動制御学会論文集,Vol.27, No.1, pp.93-100, 1991
- [18] 小菅, 伊藤, ” 仮想メカニズムに基づくマニピュレータの力制御系の設計”, 第 32 回計測自動制御学会講演会予稿集, pp. 107-108 (1993)
- [19] 小菅, 伊藤, 福田, ” 受動性に基づくテレマニピュレータの Task-oriented 制御”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.61, No.590, pp.4007-4012 (1995)
- [20] K.Kosuge,T.Itoh,T.Fukuda, ”Telemanipulation System Based on Task-oriented Virtual Tool”,Proc.of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,pp.351-356 (1995)
- [21] 小菅, 伊藤, 福田, ” 力と運動のスケーリングを考慮したテレマニピュレータの Task-oriented 制御”, 日本電気学会論文集 C, 115-10, pp.1121-1127(1995)
- [22] W.S.Kim, B.Hannaford, A.K.Bejczy, ”Force Reflection and Shared Compliant Control in Operating Telemanipulators with Time delay”,IEEE trans. on Robotics and Automation, Vol.8,No.2,pp176-185 (1992)
- [23] 舘, 榊, ” インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システム (I) ”, 日本ロボット学会誌,8-3,pp.241-252 (1990)

- [24] 舘, 榊, 荒井ほか, "力センサを用いないダイレクト・ドライブ・マニピュレータのインピーダンス制御", 日本ロボット学会, Vol.7, No.3, pp.60-71, 1989
- [25] 横小路, 吉川, "理想的な筋運動感覚を与えるマスタ・スレーブマニピュレータのバイラテラル制御", 計測自動制御学会論文集, 27-1, pp.56-63 (1991)
- [26] Y.Yokokoji, T.Yoshikawa, "Analysis of maneuverability and stability of micro-teleoperation systems", IEEE International Conf. on Robotics and Automation, pp.237-243 (1994)
- [27] B.Hannaford, "Stability and Performance Tradeoffs in Bi-Lateral Telemanipulation", IEEE International Conf. on Robotics and Automation, pp.1764-1767(1989)
- [28] B.Hannaford, "A Design framework for teleoperators with kinesthetic feedback", IEEE Transactions on Robotics and Automation, pp.426-434(1989)
- [29] 宮崎, 萩原, "バイラテラル・マスタ・スレーブマニピュレータの並列制御方式", 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.5, pp.466-452 (1989)
- [30] G.J.Raju, "Design Issues in 2-port Network Models of Bilateral Remote Manipulation", IEEE Internatinal Conf. on Robotics and Automation, pp .1316-1321(1989)
- [31] R.J.Anderson, M.W.Spong, "Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.34, No.5, pp.494-501(1989)
- [32] R.J.Anderson, M.W.Spong, "Asymptotic Stability For Force Reflecting Teleoperators with Time Delay", IEEE Internayional Conf. on Robotics and Automation, pp.1618-1625 (1989)
- [33] Colgate, J.E., and Hogan, N., "Robust Control of dynamically interacting systems", Int.Journal of Control 48-1, pp.65-88 (1988)
- [34] J.Dudragne, et al, "A Generalized Bilateral Control Applied to Master-Slave Manipulators", 20th ISIR, pp.435-442 (1989)
- [35] J.E.Slotine, "Adaptive Control And Stable Teleoperation", JAPAN-USA symp. on Flexible Automation, pp.1391-1398 (1990)

- [36] H.Kazerooni, "Dynamics and Control of Robotic Systems Worn by Humans", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.113, pp.379-387 (1991)
- [37] H.Kazerooni, "Human Extenders", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.115, pp.281-290 (1993)
- [38] H.Kazerooni, "Human/Robot Interaction via the Transfer of Power and Information Signals", IEEE Transactions on Systems and Cybernetics, Vol.20, No.2, pp.450-461 (1989)
- [39] 有本," 機械システムの知能化 IV", 日本ロボット学会誌, Vol.12-4, pp. 566-572 (1994)
- [40] 坂本, 鈴木," 非線形 H^∞ 問題とシステムの受動化の関係", 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No.6, pp.728-735 (1995)
- [41] 坂本, 鈴木," γ -受動システムとその位相的性質", 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No.12, pp.1945-1953 (1995)
- [42] J.Duffy, "The Fallacy of Modern Hybrid Control Theory that is Based on Orthogonal Complements of Twist and Wrench Space", Journal of Robotic Systems, Vol.7, No.2, pp.139-144, 1990
- [43] 吉川," ロボットアームの位置と力の動的ハイブリッド制御—手先拘束の記述と関節駆動力の算出—", 日本ロボット学会誌, Vol.3, No.6, pp.531-537, 1985
- [44] 吉川," マニピュレータの力制御", 計測と制御, Vol.30, No.5, pp.383-388, 1991
- [45] J.Kenneth Salisbury,"Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates", IEEE Conference on Decision and Control, pp.95-100 (1980)
- [46] N.Hogan,"Impedance Control Part 1 - Part 3",Trans. of ASME, Journal of Dynamic Systems,Measurement and Control,Vol.107, pp.1-24 (1985)
- [47] D.E.Whitney,"Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions",Journal of Dynamic Systems,Measurement,and Control, June, pp.91-97 (1977)
- [48] 高瀬," 束縛運動の表現と束縛下にあるマニピュレータの動的制御", 計測自動制御学会論文集,Vol.21, No.5, pp.86-91, 1985

- [49] 末広, 高瀬, "接触運動の表現と制御およびその組立作業への応用", 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.6, pp.499-506 (1988)
- [50] 和田, 小菅, 福田, "周波数特性に基づく力制御系の一設計法", 日本機械学会論文集 C 編, 60-570, pp.577-582 (1994)
- [51] D.E.Whitney, "Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 104, 1, pp.65-77(1982)
- [52] M.Yamakita, "Tele-Bilateral Impedance Control Using Bilinear Model", 3rd IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp.339-344(1994)
- [53] 新井, 中野, "異構造マニピュレータ間におけるバイラテラルマスタスレーブ制御", 日本ロボット学会誌, Vol.4, No.5, pp.469-479 (1986)
- [54] 松日楽, "異構造マスタスレーブマニピュレータの作業性とその評価実験", 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.1, pp.149-154 (1994)
- [55] 坂本, 小菅, 福田, "油圧マニピュレータの制御", 日本ロボット学会第9回学術講演会, 3431, pp. 827-828(1991)
- [56] 近藤, 山口, "マイコン制御による油圧シリンダ位置決め精度向上に関する実験的研究", 油圧と空気圧, 20-2, pp.66-73(1989)
- [57] 遠藤, 石田ら, "空気圧シリンダのデジタル制御", 計測自動制御学会論文集, 26-4, pp.397-404(1990)
- [58] 真田, 北川, "慣性負荷を有する電気油圧サーボ機構の連続時間領域における適応制御手法の研究", 日本機械学会論文集 C 編, 57-535, pp.840-847(1991)
- [59] 渡辺, "無駄時間を持つ多変数系の有限極配置", 計測自動制御学会論文集, 23-7, pp.389-396(1987)
- [60] 渡部, "スミス法の外乱補償と安定性について", 計測自動制御学会論文集, 23-7, pp.69-75(1987)
- [61] 大石, 大西, 宮地, "高いスチフネスを持つ直流サーボ系の設計法", T.IEE Japan, Vol. 107-C, No.3 (1987)

- [62] 大石, "位置情報だけを用いたマニピュレータのモーションコントロール", 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.6, pp.796-802 (1992)
- [63] Matthew T.Mason, "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol SMC-11 No.6, pp.360-374 (1981)
- [64] Oussama Khatib, "A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators: The Operational Space Formulation", IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.RA-3 No.1, pp.43-52 (1987)
- [65] N.H.McClamroch and D.Wang, "Feedback Stabilization and Tracking of Constrained Robots", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.AC-33, No.5, pp.419-426 (1988)
- [66] R.K.Kankaanranta and H.N.Koivo, "Dynamics and Simulation of Compliant Motion of a Manipulator", IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.4, No.2 (1988)
- [67] J.Y.S.Luh, W.M.Walker and R.P.C.Paul, "Resolved Acceleration Control of Manipulators", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.AC-25, No.3, pp.468-474 (1980)
- [68] 橋本, "逆ダイナミクス of 新しい計算法", 計測と制御, Vol.30, No.5, pp.406-411 (1991)
- [69] S.D.Eppinger, W.P.Seering, "On Dynamic Models of Robot Force Control", Proc. of 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.29-34 (1986)
- [70] R.H.Cannon, E.Schmits, "Initial Experiments on the End-Point Control of a Flexible One-Link Robot", International Journal of Robotics Research, Vol.3, No.3, pp.62-75, 1984
- [71] 美多, " H_∞ 制御理論を用いたハードディスクのヘッド位置決め制御", 計測自動制御学会論文集, Vol.29, No.1, pp.71-77 (1993)
- [72] A.K.Bejczy, "Computer control of space-borne teleoperators with sensory feedback", IEEE inter. conf. on Robotics and Automation, pp.205-214 1985

- [73] G.Hirtinger, "ROTEX the first Remotely Controlled Robot in Space", IEEE inter. conf. on Robotics and Automation, pp.2604-2611, 1994
- [74] John.J.Craig, "ロボティクス", 共立出版 (1991)
- [75] 中溝, "現代制御シリーズ 信号解析とシステム同定", コロナ社 (1988)
- [76] 岩井, 井上, 川路, "現代制御シリーズ オブザーバ", コロナ社 (1988)
- [77] 古田, "現代制御シリーズ デジタルコントロール", コロナ社 (1989)
- [78] 美多, "デジタル制御理論", 昭晃堂 (1984)
- [79] 平井, 池田, "非線形制御システムの解析", オーム社 (1986)
- [80] 前田, 杉江, "アドバンスト制御のためのシステム制御理論", 朝倉書店 (1990)
- [81] 美多, " H_∞ 制御", 昭晃堂 (1994)
- [82] 細江, "制御系設計－ H_∞ 制御とその応用", 朝倉書店 (1994)
- [83] 須田, "PID 制御", 朝倉書店 (1992)
- [84] 杉本, "ロボットマニピュレータの運動学", 培風館 (1997)
- [85] 武部, "伝送回路網及びフィルタ", 電子通信学会 (1972)
- [86] ハーバート・シルト, "C/C++プログラマのための Windows95 プログラミング", 翔泳社 (1996)
- [87] クレイトン・ウォルナム, "Win32 OpenGL プログラミング", プレンティスホール (1996)

謝 辞

本研究を行うにあたり、多大なる御指導を賜りました名古屋大学先端技術共同研究センターの福田敏男教授ならびに東北大学工学部の小菅一弘教授に厚く御礼申し上げます。また、懇切なる御助言・御指導を賜り、快く論文作成の時間をお与えくださいました静岡大学工学部の松井隆教授、藤森篤助教授に深く感謝の意を表します。また、多くの助言を頂きました名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻の新井史人助教授、ロボットの製作の際のみならず多くの適切な御助言を賜りました名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻の松浦英雄技官ならびに静岡大学工学部の高脇雅裕技官に厚く御礼申し上げます。

また、本論文をまとめるにあたり、細部にわたり適切かつ親切な御指示・御指導を頂きました名古屋大学大学院工学研究科電子機械工学専攻の末松良一教授並びに早川義一教授に心より感謝いたします。

研究を進める上で公私の両面にわたり、御助言・励ましを頂きました東京理科大学諏訪短期大学の関山浩介講師、大阪工業大学機械工学科の久保田直行助手、東北大学工学部の竹尾光治助手、ヤンマーディーゼル株式会社の坂本圭三氏に深く感謝の意を表します。また、三菱電機株式会社の荒川丈昌博士、名古屋大学大学院の上松健二氏、静岡大学工学部の安藤彰高氏をはじめ、研究を共にした福田研究室・小菅研究室・松井研究室・藤森研究室の多くの諸兄に感謝いたします。また、常に温かく見守って頂きました両親と妹、関係者の皆様に深く感謝いたします。

論文目録

氏名 伊藤友孝

(発表した論文)

論文題目	公表の方法及び時期	著者
<p>I. 学術雑誌等</p> <p>1. 外乱推定オブザーバを用いた油圧駆動式マニピュレータの制御</p> <p>2. 仮想反力を用いたマスタースレイブマニピュレータの制御</p> <p>3. 受動性に基づくテレマニピュレータの Task-oriented 制御</p> <p>4. 力と運動のスケーリングを考慮したテレマニピュレータの Task-oriented 制御</p> <p>5. 通信遅れを有するテレマニピュレーションシステムの受動性に基づく安定なパワースケーリング手法</p>	<p>日本機械学会論文集 (C編), 59-563, pp. 2152-2156 (1993)</p> <p>日本機械学会論文集 (C編), 60-578, pp.3440-3445 (1994)</p> <p>日本機械学会論文集 (C編), 61-590, pp.4007-4012 (1995)</p> <p>電気学会論文誌 C 電子情報システム部門誌, Vol.115C, No.10, pp.1121-1127 (1995)</p> <p>日本機械学会論文集 (C編), 64-621, pp.1780-1785 (1998)</p>	<p>小菅一弘 伊藤友孝 福田敏男 坂本佳三 米澤 徹</p> <p>小菅一弘 伊藤友孝 福田敏男 坂本佳三 野間康男</p> <p>小菅一弘 伊藤友孝 福田敏男 大塚まなぶ</p> <p>小菅一弘 伊藤友孝 福田敏男</p> <p>小菅一弘 伊藤友孝 福田敏男</p>

論文目録

氏名 伊藤友孝

(発表した論文)

論文題目	公表の方法及び時期	著者
II. 国際会議等		
1. Semi-autonomous Teleoperation System Using Virtual Tool	IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp.327-332 (1994)	Kazuhiro Kosuge Tomotaka Itoh Toshio Fukuda Manabu Otsuka
2. Tele-manipulation System Based on Task-oriented Virtual Tool	IEEE International conference on Robotics and Automation, pp.351-356 (1995)	Kazuhiro Kosuge Tomotaka Itoh Toshio Fukuda Manabu Otsuka
3. Scaled Telemanipulation System Using Semi-autonomous Task-oriented Virtual Tool.	IEEE/RSJ International conference on Intelligent Robots and Systems, pp.124-129 (1995)	Kazuhiro Kosuge Tomotaka Itoh Toshio Fukuda
4. Passive Realization of Task-oriented Scaled Teleoperation System	International Symposium on Micro-systems, Intelligent Materials and Robots, pp.528-531 (1995)	Kazuhiro Kosuge Tomotaka Itoh Toshio Fukuda
5. Scaled Telemanipulation with Communication Time Delay	IEEE International conference on Robotics and Automation, pp.2019-2024 (1996)	Kazuhiro Kosuge Tomotaka Itoh Toshio Fukuda
6. Improvement of Maneuverability of Telemanipulation System Using Virtual Tool Dynamics	Joint International Conference an Advanced Science and Technology, pp.12-15 (1998)	Tomotaka Itoh Akitaka Andoh Takashi Matsui