

東京大学大学院新領域創成科学研究科
人間環境学専攻

2021 年度

修士論文

スレーブ側のベースの運動を考慮した
バイラテラル制御

2022 年 2 月 8 日提出

指導教員 佐々木 健 教授



学籍番号 47206710

吉本 理

目次

| | |
|----------------------------------|----|
| 第1章 序論..... | 1 |
| 1.1 研究の背景..... | 2 |
| 1.1.1 遠隔操作..... | 2 |
| 1.1.2 バイラテラル制御..... | 2 |
| 1.1.3 バイラテラル制御における力覚、触覚情報..... | 3 |
| 1.2 関連研究..... | 4 |
| 1.2.1 加速度制御..... | 4 |
| 1.2.2 情報記憶による動作再現..... | 4 |
| 1.2.3 通信による時間遅れに関する研究..... | 4 |
| 1.2.4 搭載センサに関する研究..... | 5 |
| 1.3 研究目的..... | 6 |
| 1.4 本論文の構成..... | 8 |
| 第2章 加速度制御を導入したバイラテラル制御..... | 9 |
| 2.1 はじめに..... | 10 |
| 2.2 力触覚..... | 11 |
| 2.3 位置制御、力制御..... | 12 |
| 2.4 アダマール変換を利用した速度と力の制御..... | 13 |
| 2.5 先行研究における外乱オブザーバを導入した制御..... | 15 |
| 2.6 位置ゲイン、カゲインと操作性..... | 19 |
| 2.7 本研究における加速度制御を導入したブロック線図..... | 20 |
| 2.8 本研究における動力学モデルと慣性力の影響..... | 23 |
| 2.9 提案手法のブロック線図..... | 25 |
| 2.10 本章のまとめ..... | 26 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| 第3章 2自由度バイラテラル制御システム | 27 |
| 3.1 実験装置の構成..... | 28 |
| 3.2 ハードウェア..... | 31 |
| 3.2.1 ボイスコイルモータ | 31 |
| 3.2.2 センサ | 32 |
| 3.2.3 電流アンプ | 33 |
| 3.3 ソフトウェア..... | 35 |
| 3.3.1 制御用プロセッサ | 35 |
| 3.3.2 制御の周波数..... | 36 |
| 3.3.3 MATLAB/Simulink によるコード作成..... | 37 |
| 3.4 まとめ..... | 38 |
| | |
| 第4章 スレーブ台の運動による力を補正するバイラテラル制御 | 39 |
| 4.1 はじめに..... | 40 |
| 4.2 ステージ台に手による外乱を与える実験手法..... | 41 |
| 4.3 振動のピーク値を取得し振幅から行う評価手法..... | 43 |
| 4.4 目標物体を設置せず把持していない時に台が運動する場合 | 44 |
| 4.5 目標物体を一定の力で把持している時に台が運動する場合 | 48 |
| 4.6 目標物体を操作によって把持して台が運動する場合 | 54 |
| 4.7 マスタスレーブの力の拡大比を変えた場合の比較..... | 59 |
| 4.8 柔らかい目標物体を把持している時に台が運動する場合 | 68 |
| 4.9 考察 | 73 |
| 4.10 まとめ..... | 75 |
| | |
| 第5章 結論と今後の展望 | 77 |
| 5.1 結論 | 78 |
| 5.2 今後の展望..... | 79 |
| 5.2.1 慣性力のより正確な補正 | 79 |
| 5.2.2 相対位置のずれ以外の影響についての考察 | 79 |
| | |
| 謝辞 | 81 |
| | |
| 参考文献 | 83 |

第1章 序論

| | |
|--------------------------------|---|
| 1.1 研究の背景..... | 2 |
| 1.1.1 遠隔操作..... | 2 |
| 1.1.2 バイラテラル制御..... | 2 |
| 1.1.3 バイラテラル制御における力覚、触覚情報..... | 3 |
| 1.2 関連研究..... | 4 |
| 1.2.1 加速度制御..... | 4 |
| 1.2.2 情報記憶による動作再現..... | 4 |
| 1.2.3 通信による時間遅れに関する研究..... | 4 |
| 1.2.4 搭載センサに関する研究..... | 5 |
| 1.3 研究目的..... | 6 |
| 1.4 本論文の構成..... | 8 |

1.1 研究の背景

1.1.1 遠隔操作

近年、人間の能力の拡張として期待される遠隔操作技術の研究は盛んに行われている[1]。遠隔操作の主な特徴として機械の制御において距離的な制限を受けないため遠く離れた場所からの操作を可能にするほか、人間が立ち入るには危険な場所において機械のみを向かわせて作業するなどの応用方法がある。さらにミクロの世界で細かい作業を機械が行うほか、マクロな世界で大きな力による作業を機械で実現するなど人間の能力以上の作業が可能になると考えられているように、その利点との多さと可能性の高さから非常に注目されている分野のひとつである。さらに新しい通信技術 5G の登場により通信技術が向上し毎秒あたりに送受信できるデータ量が増えたことからインターネットを介した交信も注目されるようになった。この通信技術の発達はさらに遠隔操作技術の発展につながる事が予想される。

遠隔操作システムの多くはマスタ・スレーブ型のものとなっている[2]。これは操作者側のマスタの指令に合わせて機械側のスレーブが動作する構造となっている。この遠隔操作において操作者があたかも現実に目の前で操作できているように感じるためには、指令に対する機械の応答の正確性と操作の臨場感を与えることが重要であり、この操作性の向上を目指した研究が多くなされている[3]。

操作感の向上として、遠隔操作の時間遅延の減少[4]、操作の正確性の向上などが研究されている[5]。また応用的な使用として記録された動作を遠隔地で動作させる研究も行われている[6]。

1.1.2 バイラテラル制御

遠隔操作の臨場感を操作者に与えるための手法の一つにバイラテラル制御が挙げられる[7]。これはマスタの指令によって動いたスレーブが現場で得た情報を操作者にフィードバックする制御法である。一方、マスタからスレーブへの指令の一方通行による制御はユニラテラル制御と呼ばれている。

現在、バイラテラル制御を用いた実用例として手術支援ロボットとして用いられる Da Vinci が挙げられる。Da Vinci は患者の負担を軽減する低侵襲手術として胸腔ないし腹腔の内視鏡下手術用ロボットとして初めて開発された製品である。3 つのアームと 1 つのステレオ 3D カメラを搭載し、アームのカセットを交換することで、様々な処置を行うことが出来る。術者は離れた場所に置かれたコンソールに座って操作を行う。両眼視で見る 3D モニターを使用して下向きの目線で操作を行うために術者の疲労が少なく、視野も広く奥行きも良好とされる一方、力触覚情報がなく難しい

操作になれるために訓練が必要である。ほかにも自由度を増やすこと、時間遅延を減らすなどの改善の余地もある。

1.1.3 バイラテラル制御における力覚、触覚情報

力覚、触覚情報をフィードバックに用いることで操作者に臨場感の向上につながる。人間の五感のひとつである触覚は広義の触覚であり、これは力覚と狭義の触覚の二つに分類することができる[8]。人間の筋肉が受容体となる力覚と皮下組織中の細胞が受容体となる触覚によって分類される。力覚ディスプレイはスレーブにかかる反力情報、触覚ディスプレイはスレーブが触れている物体の表面の材質間の情報をフィードバックするものとなっている。

力覚、触覚情報を操作者に伝えることは操作性の向上につながるが、視覚、聴覚のフィードバックとは異なる難しさが存在する。機械に取り付けた力覚センサ、触覚センサの情報を用いて操作者に伝達されるが、センサの表面と人間の皮膚の材質は異なる。またセンサの素子の分布や変換特性は人間の神経組織と同じではない。以上などの理由により、力覚、触覚の情報呈示にはセンサの値をそのまま用いることなく、人間の感覚に変換して伝達する必要がある、この点において力触覚ディスプレイの実現には難しさが存在する。ここで力触覚とは力覚、触覚を表すものである。

1.2 関連研究

1.2.1 加速度制御

力触覚の情報呈示の研究のひとつに大西らのグループの加速度制御によるバイラテラル制御がある[9]。加速度制御はその制御法により、センサを搭載することなく位置情報からのみで力触覚を伝達することを実現している。加速度制御は推定外乱オブザーバがあり、外乱に対してロバストである。詳しくは第 2 章に説明されるが同期性と双方向性により位置制御と力触覚制御を可能としている。

加速度制御においては外乱オブザーバを用いていることやローパスフィルタを用いていることが多いためプログラムの処理に負担がかかってしまう。そのため、本来時間遅れを減少させて臨場感を挙げるためにシステムの周波数はなるべく大きくしたほうがよいのだが、プログラムの処理の問題で限界がきてしまうことがある。そのためより効率よくプログラムを構成することが求められる。

1.2.2 情報記憶による動作再現

遠隔操作はマスタとスレーブ間の情報のやり取りによって実現している。その情報や指令値を記録することで同じ動作を繰り返し行う研究もなされている[10][11]。この研究は工場などにおける作業の自動化を推進するもので、遠隔地に工業ロボットのみがあったとしても、インターネットで情報を送ることで繰り返し同じ動きを行わせたり、不具合が出たときに情報のみをアップデートして対応することも可能になる。

1.2.3 通信による時間遅れに関する研究

操作の臨場感にはスレーブがマスタの動きに遅延することなく動くことも重要な点である。スレーブの反応が遅れるほどマスタは操作にストレスを感じてしまうため、情報処理における時間遅れには注意が必要で、この時間遅れによって制御系の性能評価もされる。また、インターネット通信を想定したバイラテラル制御の場合、通信の最大データ量は決まっているため、多くの情報をやり取りしようとするとそれだけ交信に時間がかかり動作の遅延につながってしまう。それに対応するために操作感を損なうことなく交信のデータ量を減らすなどいくつかの研究がなされている[12][13][14]。データに違いが見られない場合は交信をしない手法のほか、スレーブ側に次の値を予想するシステムを取り付けることでマスタの送るデータ量を節約する手法などが提案されている。[15]

1.2.4 搭載センサに関する研究

上記までは情報処理のソフト面での研究を列挙したが、搭載センサの種類などハード面での研究も多くある。スレーブに取り付ける力センサとして圧電素子、ひずみゲージについての研究や、振動、位置、角度などのセンサ、カメラによる画像解析などがある[16][17]。物体は把持時のすべり検出について圧電素子を用いた検出とひずみゲージを用いた検出の研究がそれぞれある。

1.3 研究目的

本研究ではスレーブ機構が不安定な状況での操作性の向上を目的とする。ここで不安定な状況とは、機構が固定されておらず、外部環境からの影響により機構全体が運動をもち変位してしまう状況を表す。

先にも述べたようにバイラテラル制御の研究分野では操作者に力触覚をフィードバックすることで操作感の向上を目指している。遠隔側での力触覚をよりリアルに操作者に伝えることが試みられている。

具体的イメージでは、スレーブ機構が水中や海上のように固定されていない状況での作業を想定する。波や風などの外部からの影響でステージが動くとも目標物もそれに合わせて変位するが、何も制御しない場合スレーブハンドの相対位置は動く。

これまでの研究では力触覚の再現度や通信の時間遅れについて対象とされてきた。ここではマスタ機構、スレーブ機構については安定環境に置かれた状態が想定され、制御系の外部環境(風、波など)の影響は考慮されていなかった。

本研究ではスレーブ機構が設置される遠隔側が固定されておらず運動するような状況において、運動によって発生する慣性力が力触覚に与える影響を抑制し、操作性を向上させる制御法を開発することを目的とする。

本研究においては外部環境から受ける影響について考慮し、操作者にとっての操作性が向上するような適切なフィードバックを目指した研究となっている。

外部環境の影響について、遠隔操作の利点である人間の手の届かない危険な環境でも操作が可能になる、という特徴を考え、スレーブ機構のみ影響を受けることを想定する。遠隔操作を行う際、マスタ側は通信環境が整っていること以外に条件はないため、マスタ機構を安定した環境に置くことが可能となるので考慮しない。外部から影響を受けるスレーブ機構については、スレーブハンドが装着されているステージに外乱が加わることを想定している。ここでスレーブハンドの位置情報はセンサから得られるが、これはステージにとりついていることがほとんどである。つまり、ステージが変位すると、静止座標系からみたスレーブハンドは変位していないが、相対位置がずれるため、センサ情報からだと動いていると判断することになる。

このようにスレーブ機構の運動によってステージ台とスレーブハンドに相対偏差が生じると、操作者にはマスタ出力を通してスレーブ機構の運動による慣性力を伝送する。操作者はスレーブハンドが物体から受ける力触覚の情報に加えて慣性力も感じるため正確に物体の力触覚を知ることができず、操作性に違和感が生じる。

本研究においてはこのような状況下における制御においても慣性力を補正することにより、操作者にスレーブハンドの受ける力触覚を伝送することをを行う。慣性力の補正にあたり、スレーブ機構に加速度センサをつけその運動を観測する手法を用いる。

以上のように、バイラテラル制御においてスレーブ機構が外部からの影響で運動をもつ状況下での制御で、その運動による慣性力を補正しスレーブハンドの受ける力触覚を操作者に伝送するために、スレーブ機構に加速度センサをつけその観測値から慣性力の影響を補正することをを行う。

1.4 本論文の構成

本論文は本章を含めて全 5 章からなる。
各章の概要を以下に示す。

第 1 章：序論

本研究の背景と目的について説明する。

第 2 章：加速度制御を導入したバイラテラル制御

本研究を行ううえで重要な制御方法である加速度制御の原理についてまとめる。またそこから本研究の提案する制御方法の説明も行う。

第 3 章：2 自由度バイラテラル制御

本研究の目的達成に必要なバイラテラル制御系について説明される。

第 4 章：スレーブ台の運動による力を補正するバイラテラル制御

慣性力の影響を対象とした実験が行われ、従来法と新規手法での違いを比較し評価する。

第 5 章：結論と今後の展望

本研究の結果をまとめ、今後の研究について述べる。

第2章 加速度制御を導入したバイ ラテラル制御

| | |
|----------------------------------|----|
| 2.1 はじめに..... | 10 |
| 2.2 力触覚..... | 11 |
| 2.3 位置制御、力制御..... | 12 |
| 2.4 アダマール変換を利用した速度と力の制御..... | 13 |
| 2.5 先行研究における外乱オブザーバを導入した制御..... | 15 |
| 2.6 位置ゲイン、力ゲインと操作性..... | 19 |
| 2.7 本研究における加速度制御を導入したブロック線図..... | 20 |
| 2.8 本研究における動力学モデルと慣性力の影響..... | 23 |
| 2.9 提案手法のブロック線図..... | 25 |
| 2.10 本章のまとめ..... | 26 |

2.1 はじめに

力触覚を再現するロボットの作成において大西ら[18]による加速度制御によるバイラテラル制御の研究は非常に有効であると考えられている。遠隔操作の操作感の向上として人間の五感の伝送は古くから研究対象となり、聴覚、視覚はそれぞれ試みがあったが、力触覚の伝送はなかなか実現されてこなかった。聴覚、視覚は対象となる情報から人間の感覚器にたいして一方的に伝送される単方向性の感覚である。一方、遠隔操作における力触覚はオペレーターの操作に対してロボットの受ける力を返すループ性の感覚となっている。つまり、位置変化と力変化に対し随時それらが等しくなるようなマスタ、スレーブ間の双方向性の感覚の伝送となっているため接触対象の位置、力を伝えるのみでは不足、このため長く研究が進められていてもなかなか力触覚の実現には至らなかった。

この問題に対する解決策として加速度制御が注目されており、この章では本論文において用いた加速度制御の原理を説明する。また最後にこの加速度制御をベースとしてバイラテラル制御における問題に対しての新たな制御手法について述べる。

2.2 力触覚

加速度制御の原理に先立ってまず力触覚を人間、機械がどのように知覚するかを簡単に説明する[19]。

人間は生命活動を行うなかで周囲の環境から情報を得て自らの行動を選択している。生体としての知覚の仕組み等は完全には明らかになってはいないものの、一般に感覚は人間に具わっている感覚器で知覚され脳に伝送されると考えられている。例えば、視覚情報は目の網膜にある視細胞が光の電氣的刺激を感知する、聴覚情報は内耳の有毛細胞で音の大きさ、高さ等の機械的刺激を感知して脳に送られる。本論文において研究対象としている力触覚はハプティック（広義の触覚）と呼ばれ、生理学的には体性感覚の一部であるとされる。さらにこのハプティックは感覚受容器の存在部位の違いから深部感覚と皮膚感覚に分類される。

力覚は深部感覚であり、筋肉や関節などにある感覚受容器によって知覚される。筋肉の進展や腱の張力、関節の動きによって感知されるこの感覚は、バーチャルリアリティ世界や遠隔操作環境で考えると、ロボットの腕が壁や物体触れた場合に受ける反力にあたる。そのため操作者は力覚呈示ディスプレイを通じて視覚情報だけでなく身をもって壁や物体の存在を知覚することができる。

一方、（狭義の）触覚は皮膚感覚であり、皮膚の表面近傍に分布する感覚受容器によって感知される。皮膚感覚には触覚のほかに温度感覚、痛覚等がある。触覚は機械的刺激に反応するためその感覚受容器は機械受容器と呼ばれる。今後本論文で用いられる触覚は特別な断りがない限りこの狭義の触覚を意図して用いるものである。この感覚を用いた触覚呈示ディスプレイはバーチャルリアリティ世界や遠隔操作環境で考えると、接触した壁や物体の手触り感、硬さ等の情報をユーザーに提供する。

これらの感覚は人間の感覚受容器で知覚されることは説明したが、これらを機械的に感知するデバイスとしてセンサがある。視覚の場合はカメラ内にあるイメージセンサ、聴覚はマイク内のマイクロセンサを用いて情報を電気信号に変換している。力覚や触覚は力センサとしてひずみゲージ、圧電素子等が用いられる。バーチャルリアリティ世界、遠隔操作における感覚呈示デバイスはこれらのセンサによって変換された電気信号を処理してユーザーに伝える。これらの感覚は操作をするうえで違和感なく臨場感をもって行うのに重要な役割を果たす。人間の感覚を再現することはより詳細で正確な作業を実施することが可能となる。

視覚、聴覚は研究によってカメラ、マイクを用いてディスプレイがある程度実装されている一方、表面テクスチャ感、材質感といった情報はその仕組みが完全に明らかになっていないなどの理由から触覚ディスプレイの実現は困難であり現在でも数多くの研究がなされている。

2.3 位置制御、力制御

ロボットなどの人工物を動きを制御する際、運動系のエネルギーを制御する。このエネルギーの制御においてロボットの位置(速度)を制御する方法と力を制御する方法がある。遠隔操作におけるこの2つの制御法にはそれぞれ特徴があり、特に物体接触時と非接触時にその違いが現れる。位置(速度)制御において、物体非接触時は位置同期が行われるため意図通りに動かすことは可能であるが、物体接触時でロボットが動かないとき受ける力が不定のためその時の出力を調整することができない。一方、力制御においては物体接触時に力が定まっているので力の出力を調整できるが、物体非接触時における位置同期が不安定になる欠点もある。また式(2-1)に示す運動剛性の観点からも位置制御は硬い運動、力制御は軟らかい運動という性質を持つ。このため2つの制御法は正反対の性格を持ち、双対性と呼ばれる。

$$\kappa = \frac{\Delta f}{\Delta x} \quad (2-1)$$

力触覚を伝送する遠隔操作は同期性は位置のずれ(Δx)、作用力と反作用力の大きさのずれ(Δf)を0に近づけることであるが、式(2-1)で見ても二つを同時に満たすことは困難である。現在の産業用ロボットの多くは位置制御(または速度制御)を用いられており、位置決めは得意だが接触作業は苦手という性質を持つ。

つまり、まとめると力触覚を再現する装置を作成するには、マスタとスレーブが同じ動きをする同期性と、マスタに働く作用力とスレーブに働く反作用力が一致する双方向性が満たされることが必要十分である。

2.4 アダマール変換を利用した速度と力の制御

位置、力を同時に決定しそのまま制御することは困難であることは先に述べたとおりであるが、アダマール変換を用いて座標変換することで力触覚を理想的に再現することに近づくことがわかっている[20]。

バイラテラル制御を図式化すると図 2-1 のようになる。このとき速度(位置)、力の理想的な状態からの差である誤差をそれぞれ Δv 、 Δf として定義すると、以下の式となる。

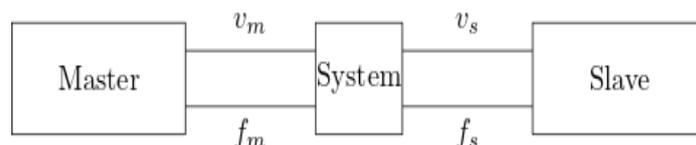


図 2-1 バイラテラル制御

$$\Delta f \cong f_m + f_s \quad (2-2)$$

$$\Delta v \cong v_m - v_s \quad (2-3)$$

同期性は Δv 、双方向性は Δf を 0 に近づけることで理想状態となる。

これまで提案されてきた対称型バイラテラル制御、力逆送型バイラテラル制御、力帰還型バイラテラル制御などの手法はどれも同期性、双方向性のどちらも満たすものではなかった。

特に、双方向性について作用反作用力の一致となるため装置の摩擦等の外乱に影響されないロバストな制御系である必要がある。先に大西らによって行われた研究によりこのロバスト制御系は加速度制御系からなることが知られている。

ロバスト制御系を導入した加速度制御系が成り立っているので式(2-2)(2-3)のマスター、スレーブの変数を、アダマール変換を用いてコモン軸、ディファレンシャル軸に座標変換して加速度を考える。

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_c \\ \dot{v}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_m \\ \dot{v}_s \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

これより、コモン軸、つまりマスター・スレーブの加速度の和で力制御、ディファレンシャル軸、つまり加速度の差で位置制御を行い、アダマール変換の逆変換を行うことにより力触覚を再現する制御系を作成できる。

コモン軸はマスター・スレーブの加速度の和を 0 にする制御、ディファレンシャル軸

は加速度の差を0に近づける制御であるといえる。この二つはトレードオフの関係にあり同時に満足に満たすことは不可能であるため、どこかで妥協点を決める必要がある。

また加速度の次元で処理を行うため位置の同期は2回積分された後となることから、最低でも2周期遅れて位置同期が実施される。このことから完全な意味で同期を再現することはできないが、人間が知覚できないほどの同期の遅れであれば操作上の問題は無い。そのため、同期性、双方向性の処理とハードウェアのスペックにより制御周期を短くすることでこの時間差をなるべく小さくすることが重要となる。

2.5 先行研究における外乱オブザーバを導入した制御

先にも述べたようにロバストな加速度制御系を実現しようとする、外乱の影響をなるべく少なくする必要がある。ロボットの制御において加速度の次元で制御を行う場合、最終的に2回積分された位置の次元で出力されるが、この積分の処理によって加速度の外乱による誤差が積み重なることで制御が安定させるのが困難になる。そのため積分して位置の次元にする前の段階で、加速度次元における外乱を推定して除去する処理を必要とする。

外乱を除去する手法の一つである外乱オブザーバが用いられる[21]。以下の図のように外乱 d が存在する制御系を考える。 x_{ref} を制御の目標値、 $G(s)$ を制御の伝達関数、 x を制御値とする。

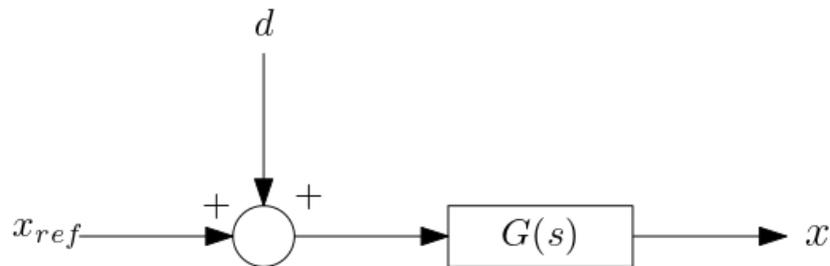


図 2-3 外乱を含むシステム

このとき、システムの伝達関数 $G(s)$ について逆システムを定義し $G(s)^{-1}$ とおく。この逆システムを用いてフィードバックすると、以下図 2-4 となる。

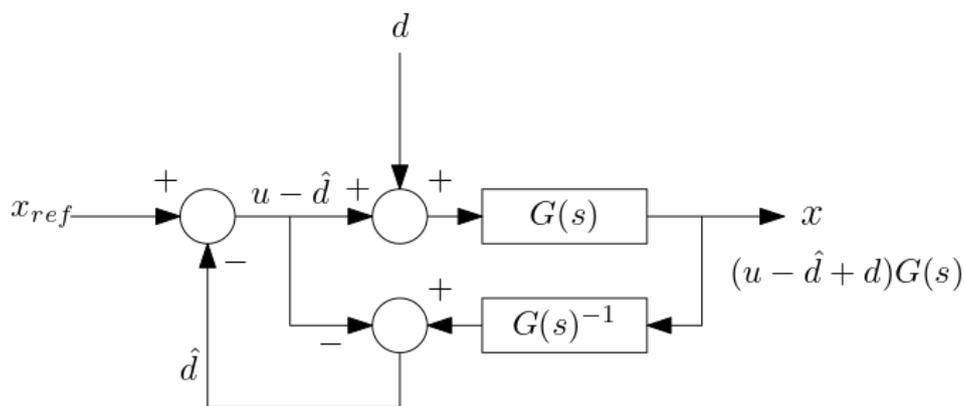


図 2-4 逆システムによる外乱推定

推定される外乱 \hat{d} は、

$$\begin{aligned}\hat{d} &= xG(s)^{-1} - (x_{ref} - \hat{d}) \\ &= (x_{ref} - \hat{d} + d)G(s)G(s)^{-1} - (x_{ref} - \hat{d})\end{aligned}\quad (2-5)$$

とともまる。逆システムの性質を用いて $G(s)G(s)^{-1}=1$ を代入すると、

$$\hat{d} = d \quad (2-6)$$

となり、システムの実出力 x は、

$$\begin{aligned}x &= (x_{ref} - \hat{d} + d)G(s) \\ &= x_{ref}\end{aligned}\quad (2-7)$$

と計算できるため逆システムを導入することにより外乱を除去できることがわかる。だが、実際に使用するシステムの逆システムを定義することは難しいケースが多い。そこで、制御系が1次遅れ系と近似できる場合、逆システムについて規範モデルを用いて、

$$G(s)^{-1} = \tau s + 1 \quad (2-8)$$

と定義できる。

この規範モデルをもとに実用上ではローパスフィルタを解して推定外乱を除去する。本論文における外乱オブザーバのモデルを以下に示す。

加速度次元で処理され算出された電流参照値 I_{ref} にたいして推定外乱 \hat{d} を求める。

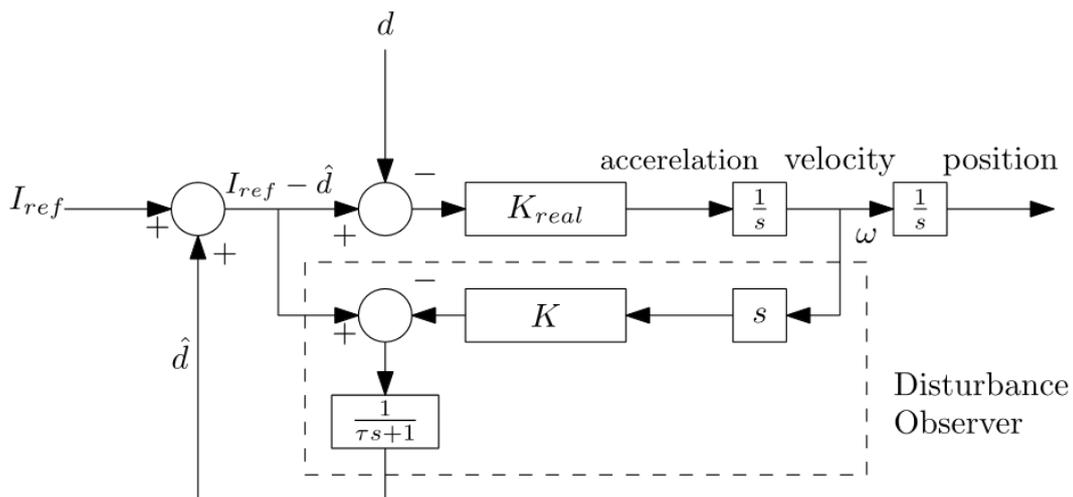


図 2-5 外乱オブザーバを導入したブロック線図

このとき、推定される外乱はブロック線図より、

$$\hat{d} = \frac{I_{ref} + \dot{d} - Ks\omega}{\tau s + 1} \quad (2-9)$$

これを整理すると

$$\hat{d} = \frac{I_{ref} - Ks\omega}{\tau s} \quad (2-10)$$

となり、推定外乱 \hat{d} は積分形となることがわかる。このときのシステム系の出力 ω は、

$$\omega = \frac{K_{real}}{s} \left(I_{ref} - d + \frac{I_{ref} - sK\omega}{\tau s} \right) \quad (2-11)$$

となる。以上からブロック線図を等価に変形したものが以下の図 2-6 にしめす。

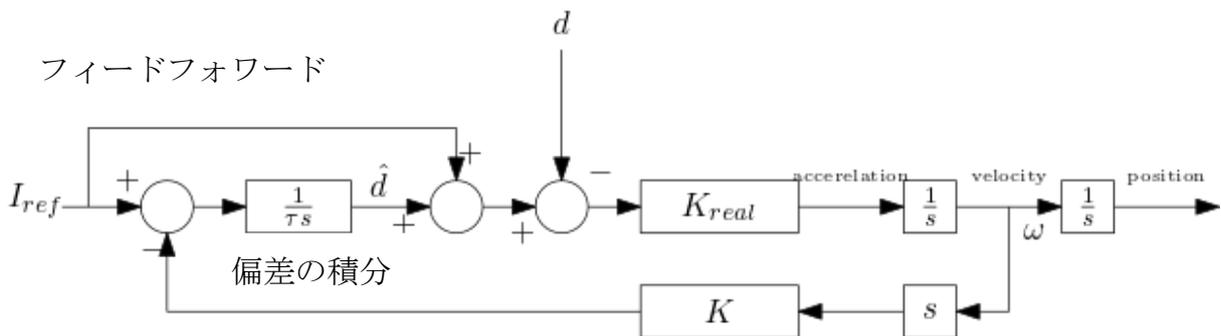


図 2-6 外乱オブザーバを等価変換したブロック線図

この簡略されたブロック線図を用いて本論文ではシステムの処理コードを生成する。実際に外乱オブザーバでローパスフィルタを用いることから、係数決めやフィルタの次数など時間遅れに影響を与える数値は慎重に決定する。

本研究では、装置を動かすときの摩擦力、ボイスコイルモータの性質からかかる電磁力が主な外乱として考えられ、この大きさを正確に計測することは困難であるが、外乱オブザーバを用いて随時推定し除去すること影響を少なく抑えることができる。

この外乱オブザーバを導入して、物体との接触の力触覚を外乱の一種としてとらえ、

推定外乱オブザーバからマスタ、スレーブの間で力制御を実現する研究が行われている[22]。また、遠隔操作における力触覚の提示の実用に向けてはこの力制御と同時に、操作者の指令によりスレーブハンドが正しく位置に動く必要があり、位置制御と力制御を組み合わせた研究も進んでいる[23]。また、より精度を改善するために外乱オブザーバの帯域幅を増やすことなどの研究もおこなわれている[24]。

2.6 位置ゲイン、カゲインと操作性

これまでの研究により、バイラテラル制御の性能評価に関して以下の式に示すハイブリッドパラメータを用いてマスタ・スレーブ間の位置、力の伝達特性が定式化された。

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

これは Lawrence[25]や hashttrudi-Zaad ら[26]によってバイラテラル制御における透明性という評価基準に置き換えられた。さらに、Iida ら[27]の研究でハイブリッド行列を環境のインピーダンスに組み込むことにより透明性はさらに再現性と操作性に分解された。

ハイブリッド行列を用いたバイラテラル制御の位置、力関係は以下の式となる。

$$\begin{bmatrix} F_m \\ X_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ -F_s \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

これより、バイラテラル制御の理想的な制御は、

$$H_{11} = 0, H_{12} = -1, H_{21} = 1, H_{22} = 0 \quad (2-14)$$

となるため、なるべくこの数値に近づく制御を行う。

環境インピーダンス Z_e とおくと、以下の式が導かれる。

$$\begin{aligned} F_m &= \left(\frac{-H_{12}}{H_{21} - H_{22}Z_e} Z_e + \frac{H_{11}}{H_{21} - H_{22}Z_e} \right) X_m \\ &= (P_r Z_e + P_o) X_m \end{aligned} \quad (2-15)$$

この式に代入した P_r 、 P_o はそれぞれ再現性、操作性と定義される。

P_r は1に、 P_o は0に近づくことで理想が実現される。この再現性、操作性の値は位置、力制御のそれぞれのゲインの比、そして装置の周波数によって決定される。

位置ゲイン K_p 、カゲイン K_f の値を変化させ検討することで再現性、操作性を高めるものを目指す。

2.7 本研究における加速度制御を導入したブロック線図

これまで先行研究における加速度制御について説明した。この節ではそれを用いた本研究の制御法を説明する。

以下の図に本研究で使用する位置制御の部分のブロック線図を図 2-7 に示す。表 2-1 にはブロック線図内の変数の説明がされている。今回観測可能な物理量はマスタとスレーブの位置 X_m, X_s の情報と、電流指令値 I である。

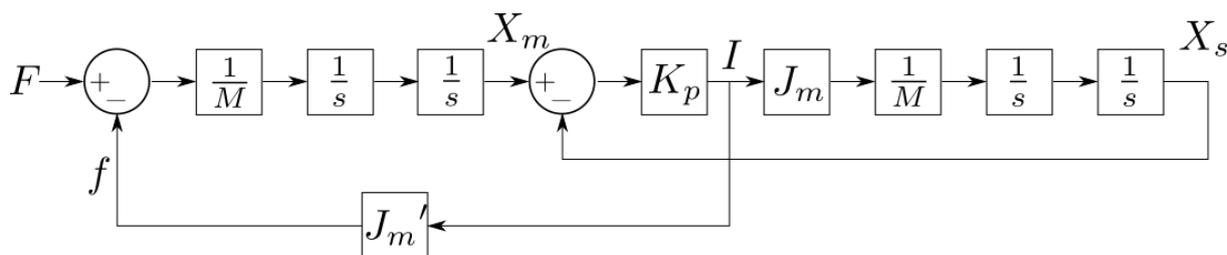


図 2-7 本研究における位置制御のブロック線図

表 2-1 変数説明

| 文字 | 説明 |
|------------|----------------|
| F | マスタの操作する力 |
| M | マスタ、スレーブハンドの重さ |
| X_m, X_s | マスタ、スレーブ位置 |
| K_p | 比例定数 |
| J_m | スレーブ側モーター定数 |
| J_m' | マスタ側モーター定数 |
| I | 電流指令値 |
| f | 操作者が受け取る力情報 |

ブロック線図に示されているように、スレーブ位置のフィードバックをもとに電流指令値が決定され、マスタ位置に追従するようになっている。

また、スレーブにモーターが加える力を反転させて、力 f として操作者にフィードバックしている。

このブロック線図を等価変換したものが以下の図 2-8 になる。

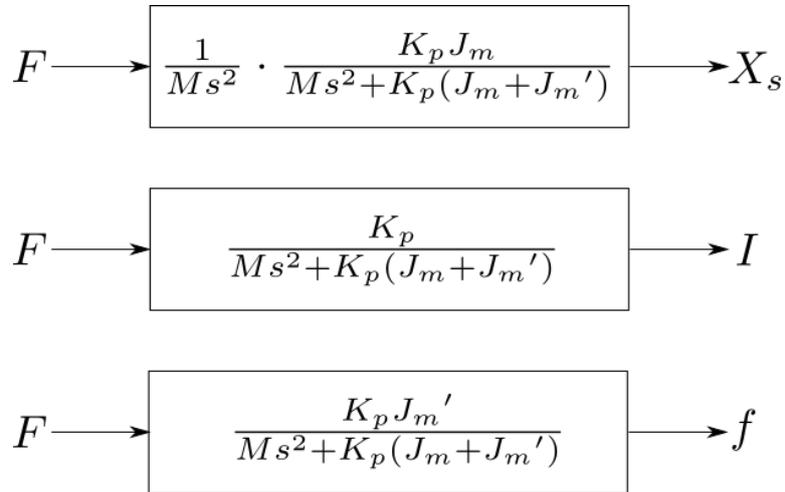


図 2-8 本研究における外乱オブザーバを等価変換したブロック線図

この図から操作者の入力に対し、スレーブの位置は 4 次遅れになっていることがわかる。

以下の図に入力する力をステップ関数としたときのスレーブ位置のステップ応答のシミュレーション結果を図 2-9 に示す。青線がスレーブ位置を表しており入力に対して遅れて立ち上がっている。

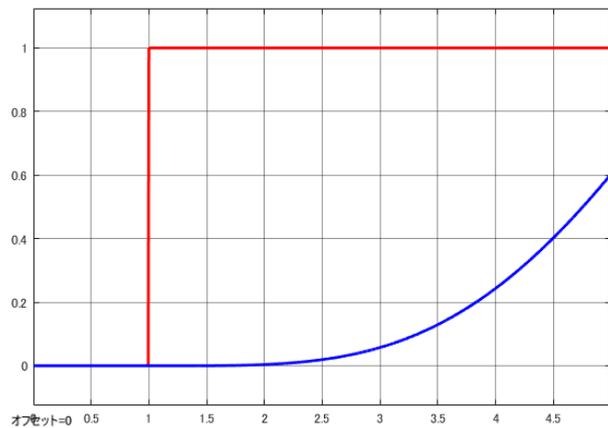


図 2-9 マスタからステップ入力をしたときのスレーブ位置の応答

これに力制御として外乱オブザーバを導入したブロック線図が図 2-10 に表されている。これまでの先行研究である図 2-5 との大きな相違点として、外乱の推定時に使う物理量が速度の1階微分から位置の2階微分となっている点である。これは、本研究において位置の追従を行う際に制度の良い位置センサを使用しているためで、力制御にもこの信号を使用している。

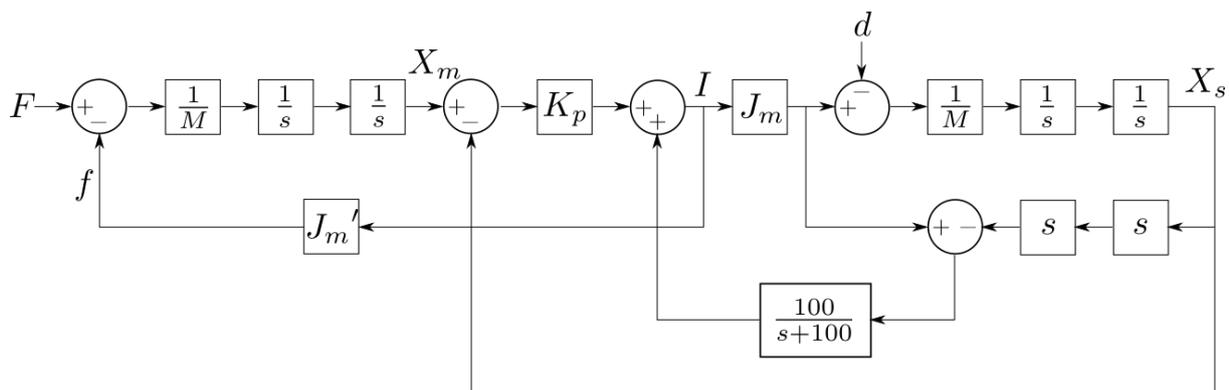


図 2-10 本研究において外乱オブザーバを導入したブロック線図

表 2-2 変数説明

| 文字 | 説明 |
|------------|----------------|
| F | マスタの操作する力 |
| M | マスタ、スレーブハンドの重さ |
| X_m, X_s | マスタ、スレーブ位置 |
| K_p | 比例定数 |
| J_m | スレーブ側モーター定数 |
| J_m' | マスタ側モーター定数 |
| I | 電流指令値 |
| f | 操作者が受け取る力情報 |
| d | スレーブ側における外乱 |

スレーブの外乱を外乱オブザーバで推定し、それをフィードバックしている。これによりスレーブ側で物体に接触した場合にはそれが外乱として認識されその感触が操作者にフィードバックされている。

2.8 本研究における動力学モデルと慣性力の影響

本研究においてはスレーブ側に目標物体が存在するため、ここでスレーブハンドと物体が接触しているときの動力学モデルを説明し、慣性力の影響を受けること、その解決法としての提案手法を示す。運動方程式を立て、慣性力と遠隔操作における力触覚の関係を解析する。

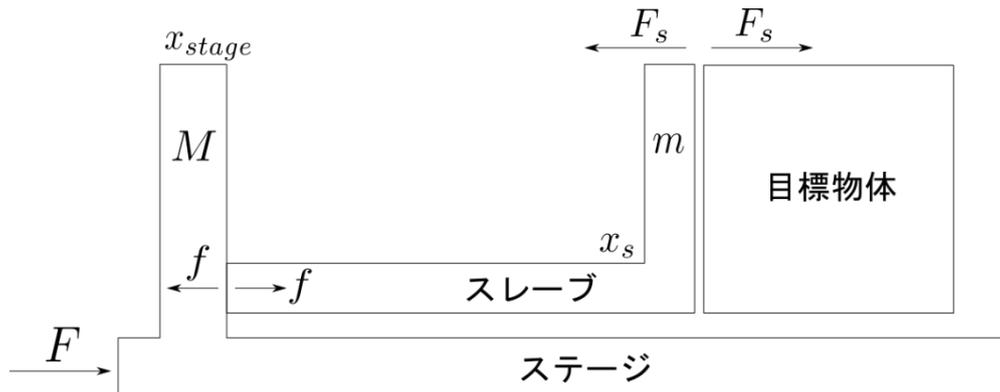


図 2-12 本研究におけるスレーブと目標物体の動力学モデル

図 2-12 はバイラテラル制御のスレーブ側における関係図を示している。遠隔操作において力触覚を知りたいとき、スレーブハンドと目標物体の間に発生する作用反作用力である F_s が操作者に伝えたい物理量である。

そこで、モーターによる駆動力 f を用いてスレーブハンドの運動方程式を立てると、

$$m\ddot{x}_s = f - F_s \quad (2-16)$$

となる。ここで、スレーブハンドの重さを m 、位置を x_s としている。位置情報 x_s をセンサにより取得すれば、(2-16)式から目標物体との間の力を計算可能である。

ここで、一般的な位置センサはある安定な場所に基準点を設定しそこからの距離を測る形で求める場合が多い。バイラテラル制御の分野においてもそうであり、スレーブ側全体の機構に位置の基準を設定し、そこからスレーブハンドが変位する。

一般に基準点は安定した場所を選択するため、その点の運動を考慮することは少ない。しかし、遠隔操作の利点である、人間では届かない過酷な環境での操作を想定した場合、現実の問題として外部環境からの影響を考える必要がある。

本研究においてはそのスレーブ機構の基準点を持つステージに何らかの力が加わり、運動を起こす場合を検討する。ステージに外力 F が加わったときのステージの運動方程式は、

$$M\ddot{x}_{stage} = F - f \quad (2-17)$$

となる。ここで、ステージの重さを M 、位置を x_{stage} と置いている。

先ほど記述したように位置センサから得られるスレーブの位置情報は基準点からの距離で測られるため、センサ値 x_{sensor} は、

$$x_{sensor} = x_s - x_{stage} \quad (2-18)$$

を表していることになる。

そこで式(2-16),(2-17)を用いると、

$$\begin{aligned} \ddot{x}_s - \ddot{x}_{stage} &= \frac{1}{m}(f - F_s) - \frac{1}{M}(F - f) \\ &= \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{M}\right)f - \frac{1}{m}F_s - \frac{1}{M}F \end{aligned} \quad (2-19)$$

の関係が求まる。ここで力触覚のあるバイラテラル制御の目的に戻ると、目標物体から受ける力 F_s を知りたい。式変形を行うと、

$$\begin{aligned} F_s &= f - m\ddot{x}_s \\ &= f - m(\ddot{x}_{sensor} - \ddot{x}_{stage}) \\ &= f - m\ddot{x}_{sensor} - m\ddot{x}_{stage} \end{aligned} \quad (2-20)$$

となる。上式の第3項がスレーブハンドに働く慣性力に相当する。

従来法の式(2-20)から導かれる力触覚をフィードバックすると、ステージに発生した加速度による慣性力も伝えることになってしまい、目標物体の感触を正しく伝えることはできなくなってしまう。

本研究は位置センサのほかに、ステージに加速度をつけ外部環境からの影響を加速度で評価することにより、慣性力に関係なく力触覚を伝えることを目的とした制御法を提案するものである。

2.9 提案手法のブロック線図

ここではスレーブ側におけるステージが加速度を持った時、スレーブハンドの受ける慣性力を出力として補正することで、ステージとスレーブハンドの相対位置がずれないようにする。この時のブロック線図を以下に示す。

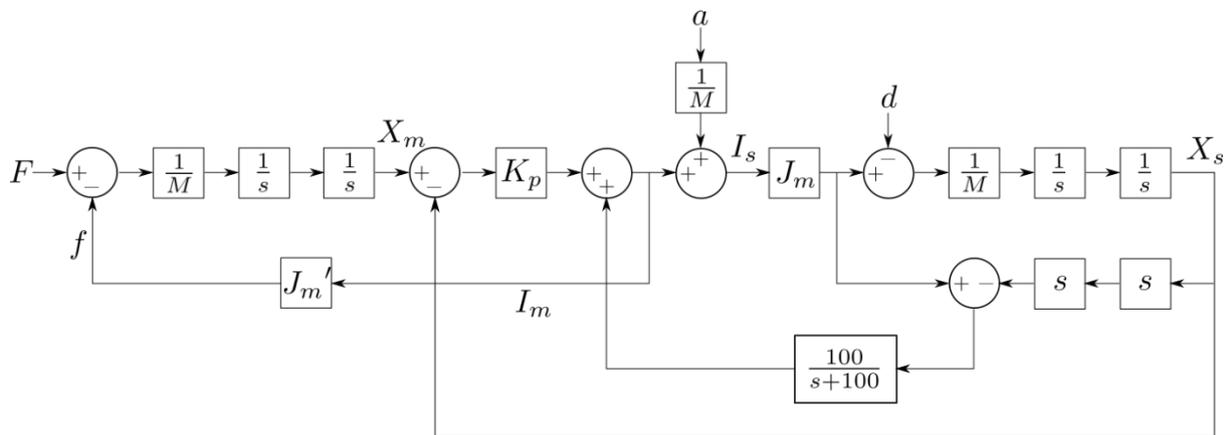


図 2-11 補正によるブロック線図

表 2-3 変数説明

| 文字 | 説明 |
|------------|----------------|
| I_m, I_s | マスタとスレーブの電流指令値 |
| f | 操作者が受け取る力情報 |
| d | スレーブ側における外乱 |
| a | ステージの加速度 |

ここで、ステージの加速度 a は加速度センサにより観測可能である。これまでのバイラテラル制御ではマスタスレーブの電流指令値は $I_m = -I_s$ と反転したものであったが、新規手法においては補正が入るため、

$$I_m = -I_s - \frac{a}{M} \quad (2-22)$$

となる。この第2項が慣性力に相当する力である。ステージが加速度を持たない場合は従来と同じ制御になるように構築されている。

2.10 本章のまとめ

本章においては、まず関連研究として外乱オブザーバを用いた加速度制御の研究事例を紹介した。その制御におけるブロック線図を示し、制御の特徴についてみた。

次にスレーブ側機構全体が外部環境からの影響で運動を持っている場合の動力学モデルを示し、運動方程式から慣性力による影響の項が出現した。

最後に、慣性力の影響を補正するために本研究で提案する制御方法のブロック線図を示した。これはスレーブ側機構に加速度センサをとりつけその値から慣性力を補正した制御を行うことを新たに行っている。

次の章では本研究に当たり使用した2自由度バイラテラル制御装置についての説明を行う。

第3章 2 自由度バイラテラル制御システム

| | |
|--------------------------------------|----|
| 3.1 実験装置の構成 | 28 |
| 3.2 ハードウェア | 31 |
| 3.2.1 ボイスコイルモータ | 31 |
| 3.2.2 センサ | 32 |
| 3.2.3 電流アンプ | 33 |
| 3.3 ソフトウェア | 35 |
| 3.3.1 制御用プロセッサ | 35 |
| 3.3.2 制御の周波数 | 36 |
| 3.3.3 MATLAB/Simulink によるコード作成 | 37 |
| 3.4 まとめ | 38 |

3.1 実験装置の構成

現在、力覚装置は3D System Touchをはじめさまざまなものが開発されている。しかし、その多くは汎用性を得るため高い自由度を持っており、複雑な制御を必要としている。そのため、人間の力触覚や装置の基本的な特性のみを実験する場合には不向きである。そこで本研究ではよりシンプルに評価を行うため、1自由度のハンドを二つ組み合わせた2自由度の装置で、アクチュエータで直接駆動できるような実験装置を作成した。実験装置の構成図のイメージを下の図3-1に示す。

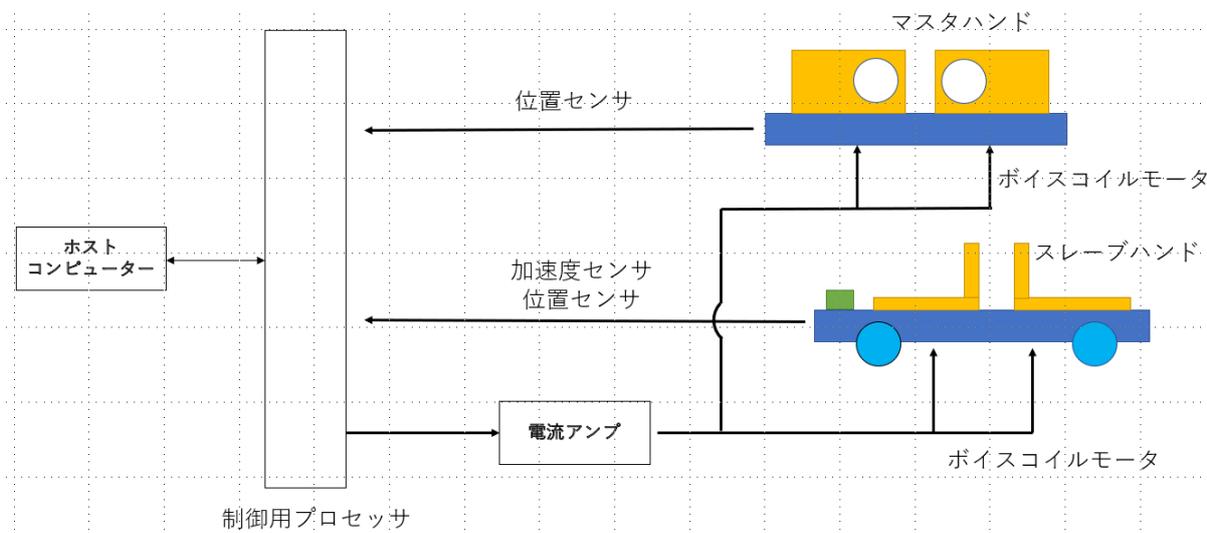


図 3-1 バイラテラル制御装置構成図

バイラテラル制御装置の外観を図3-2に示す。

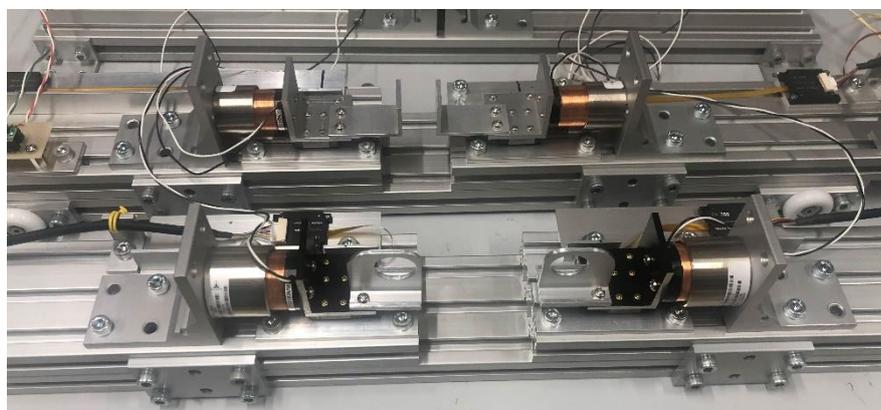


図 3-2 バイラテラル制御装置の外観

図 3-3、3-5 にマスタとスレーブの構造をそれぞれ示す。

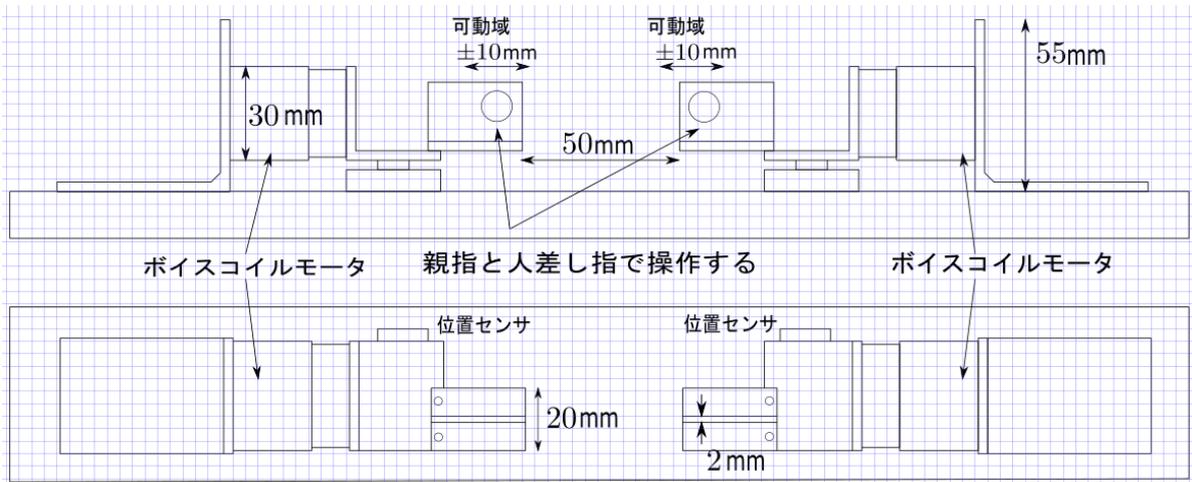


図 3-3 マスタ構造

図 3-3 のようにマスタ側の機構は直線方向に 2 自由度を持つ。可動域はそれぞれ $\pm 10[\text{mm}]$ である。

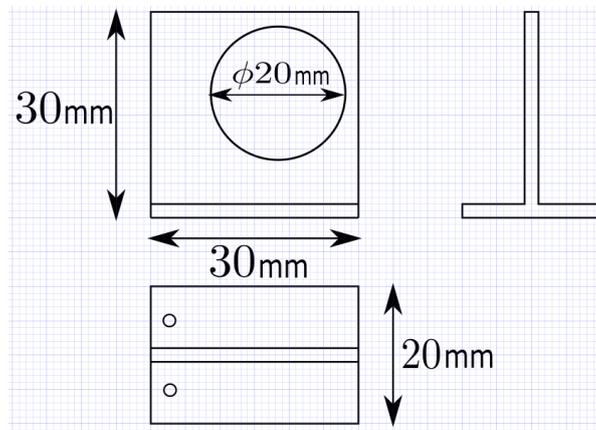


図 3-4 マスタハンドの持ち手部分

操作する場所として持ち手を用意し、そこに指を入れて幅を狭める、あるいは広げるように操作する。その持ち手の部分について拡大して表示したものが以下の図 3-4 である。左右のハンドの持ち手部分については同じものになっている。

位置センサがハンドについており、左右のハンドの位置情報を得られる。

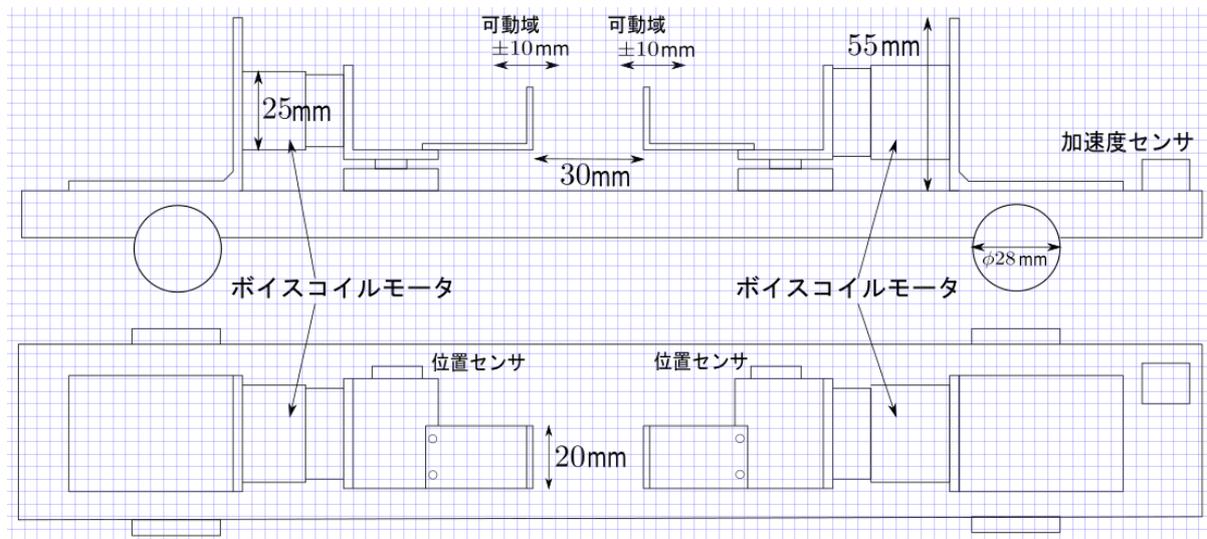


図 3-5 スレーブ構造

スレーブの構造図については図 3-5 について示す。基本的なつくりと可動域が $\pm 10[\text{mm}]$ である点はマスタのものと同一である。

スレーブのステージには車輪が取り付けられており、これにより外部環境からの影響で運動を持ち移動することが可能になっている。また、加速度センサがステージについており、このときの運動を観測することができる。

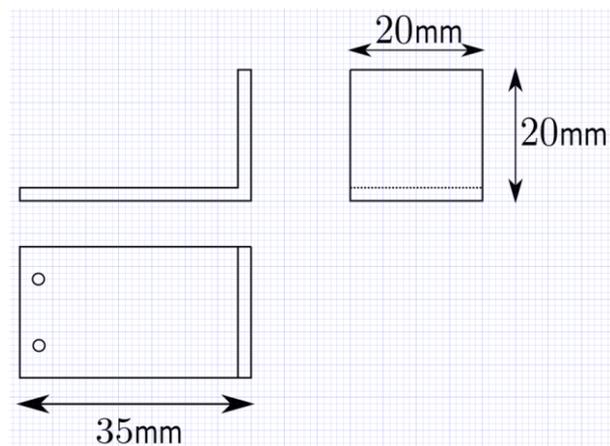


図 3-6 スレーブハンドの先端部分

図 3-6 にスレーブハンドの先端部分を示す。左右に同じハンドがあり、モーターの駆動力を通じて狭めたり広がりたりできる。狭めることにより、物体をつかむことのできる把持機構を持っている。

3.2 ハードウェア

3.2.1 ボイスコイルモータ

本研究では 5[kHz]の周波数で動作することを想定しているため、制御用プロセッサからの出力の変化をすばやく反映させることのできるアクチュエータを用いる必要があるため、立ち上がりの動きが速く、パソコンのハードディスクなどに用いられているボイスコイルモータを使用する。

本研究では、Technohands 社の円筒型ボイスコイルアクチュエータを使用する。マスタ側には AVM30-15 を、スレーブ側には AVM24-10 を使用している。以下の表 3-1 に製品の性能を示す。

表 3-1 ボイスコイルモータの仕様

| | AVM30-15 (マスタ側) | AVM24-10 (スレーブ側) |
|----------------|-----------------|------------------|
| ストローク(mm) | 15 | 10 |
| 推力定数(N/A) | 7.35 | 3.9 |
| 定格推力(N) | 4.63 | 2.65 |
| 最大推力(N) | 29.40 | 14.82 |
| 抵抗(Ω) | 10.22 | 5.86 |
| 定格電流(A) | 0.63 | 0.68 |
| 最大電流(A) | 4.00 | 3.80 |

3.2.2 センサ

本研究における装置には、ハンドの位置情報を計測するリニアエンコーダ、ステージ台の動きを計測する加速度センサの2種類がついている。

- リニアエンコーダ

4つのハンドそれぞれの位置情報を得るために光学反射式リニアエンコーダを取り付けてある。分解能は $0.5(\mu\text{m})$ である。4 逡倍で記録する。マスタ、スレーブともにリニアエンコーダの光の部分はステージに取り付けられている。

- 加速度センサ

ステージ台についている加速度センサの外観を以下の図 3-7 に示す。

センサは AE-KXR94-2050(Kionix 社製)を用いており、静電容量方式で加速度を計測している。5[V]の電源電圧に接続されセンサ出力は電圧となっている。

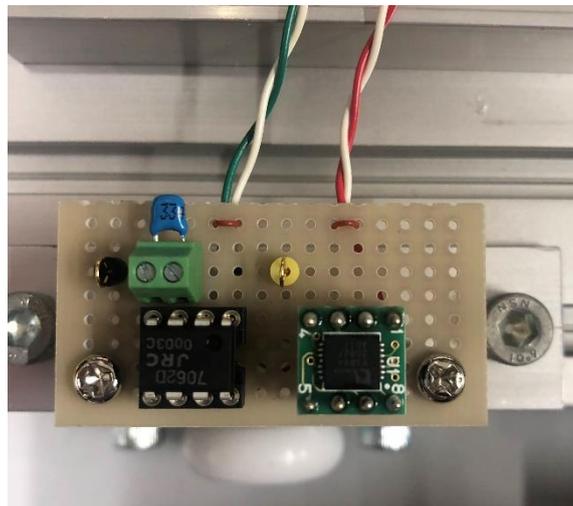


図 3-7 加速度センサ外観

3.2.3 電流アンプ

センサで感知された値はコンピューターを介して処理された後に出力されるが、これは電圧の値として出力される。一方、今回用いるボイスコイルモーター(VCM)は電流に比例して作動するものとなっているため、電圧を電流に変換する回路を作成し、それを通過したもの使用する VCM に接続する。図 3-8、3-9 に今回用いた電流アンプの回路図と外観を示す。回路は反転増幅回路となっており、増幅率は、 $G = 2.3(A/V)$ である。

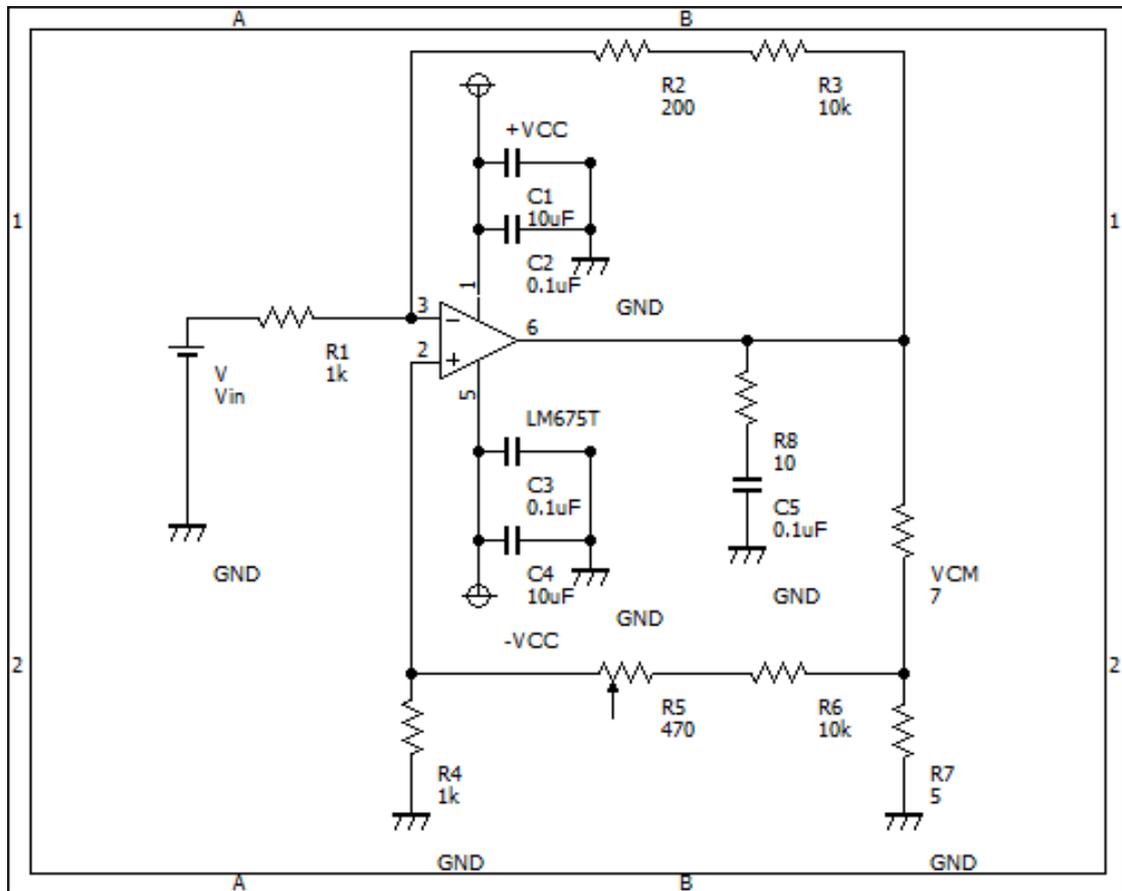


図 3-8 VCM 駆動用電流アンプ回路図

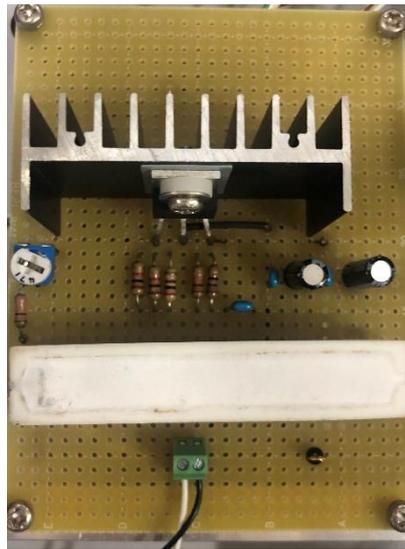


図 3-9 電流アンプ外観

V_{in} に信号処理された制御値を入力し、電流に変換された値が V_{CM} に接続される。
 V_{CC} の部分には電源電圧 $\pm 5[V]$ が送られる。

3.3 ソフトウェア

3.3.1 制御用プロセッサ

センサが取得した値を入力し制御値を出力するバイラテラル制御において、再現性、操作性を高めるために、装置の周期を決定する制御用プロセッサは最も重要な要素のひとつといえる。本研究では、高速な演算処理を行うため信号処理を用途に用いられる DSP(Digital Signal Processor)を使用する。今回用いる OMAP-L137 EVM (Texas Instrument 社製)は開発言語 C++をサポートしている。

また、センサ値としてアナログ信号を取り扱うことから、AD/DA コンバータとして、s-BOX II (MTT 社製)を用いる。s-BOX II の入力電圧範囲等の主なスペックは以下の表 3-2 にまとめられ、外観は図 3-10 に示される。

表 3-2 s-BOX II の性能

| | |
|--------|--------|
| 入力電圧範囲 | ±10[V] |
| 出力電圧範囲 | ±10[V] |
| 入力 ch | 6ch |
| 出力 ch | 8ch |
| 入力分解能 | 16bit |
| 出力分解能 | 14bit |

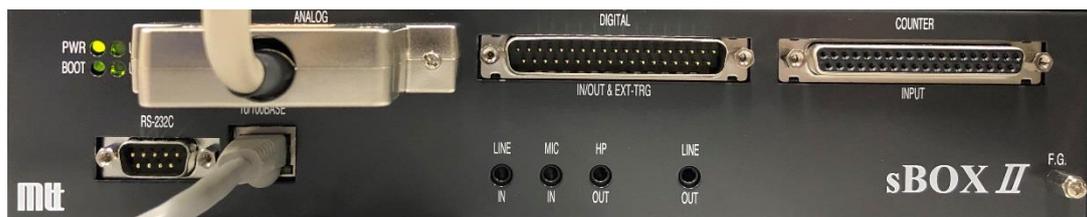


図 3-10 制御用プロセッサ外観

制御される信号の値は sBox II から PassBox ソフトウェアを介してリアルタイムでパソコンの画面上で確認される。この PassBox 上で DSP プログラムは実行制御、信号の保存がなされる。

3.3.2 制御の周波数

装置の周期は後述する MATLAB での C++のコード生成の際に決めるが、処理が重くなりコンピュータに負荷がかかると装置が設定した周期で動作しない場合がある。そのため、処理に負担のかかるフィルタの次数等の設定や用いる数をなるべく少なくするなどの工夫が必要である。また、本研究ではセンサの値を処理するのに微分を用いたが、装置の周期によってセンサに含まれるノイズの影響が変わるためその点も周期決め考慮された。

以上のことに留意して本研究では周波数 5[kHz]で制御される。設定した周波数で動作しているのかの確認は s-BOX II から装置の周波数と同じ 5[kHz]の矩形波を出力しそれを随時オシロスコープで直接観察することでなされている。以下の図 3-11 にオシロスコープで確認された矩形波を示す。

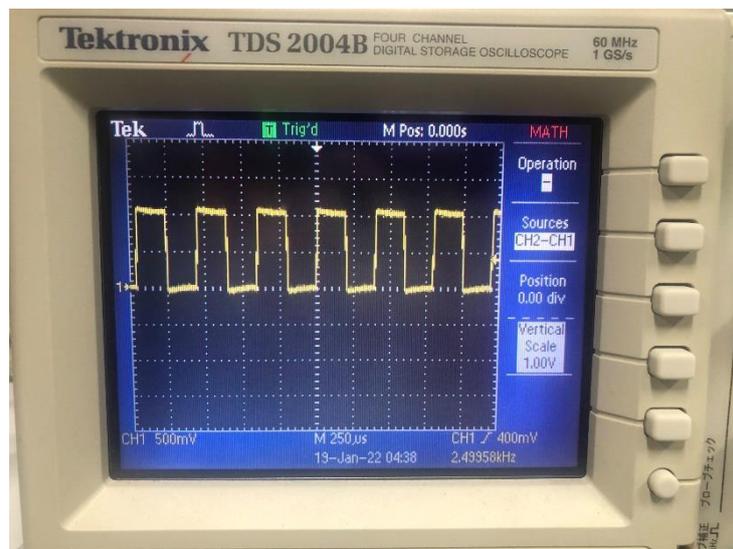


図 3-11 実験中にオシロスコープによる周期 5[Hz]の矩形波の観測

3.3.3 MATLAB/Simulink によるコード作成

本研究において、MATLAB の Simulink を用いて制御用の C++ のコードを作成する。Simulink 上でブロック線図を構成しこれを Simulink Coder、MATLAB Coder を用いて C++ のコードに変換する。

Simulink のブロック線図を用いることにより、信号の四則演算、微積分とうの処理を簡単に生成することができ、また自らコードを作成する場合に比べて複雑なフィルタの設計も可能となっている。

図 3-12 に Simulink による制御プログラムの作成例を示す。

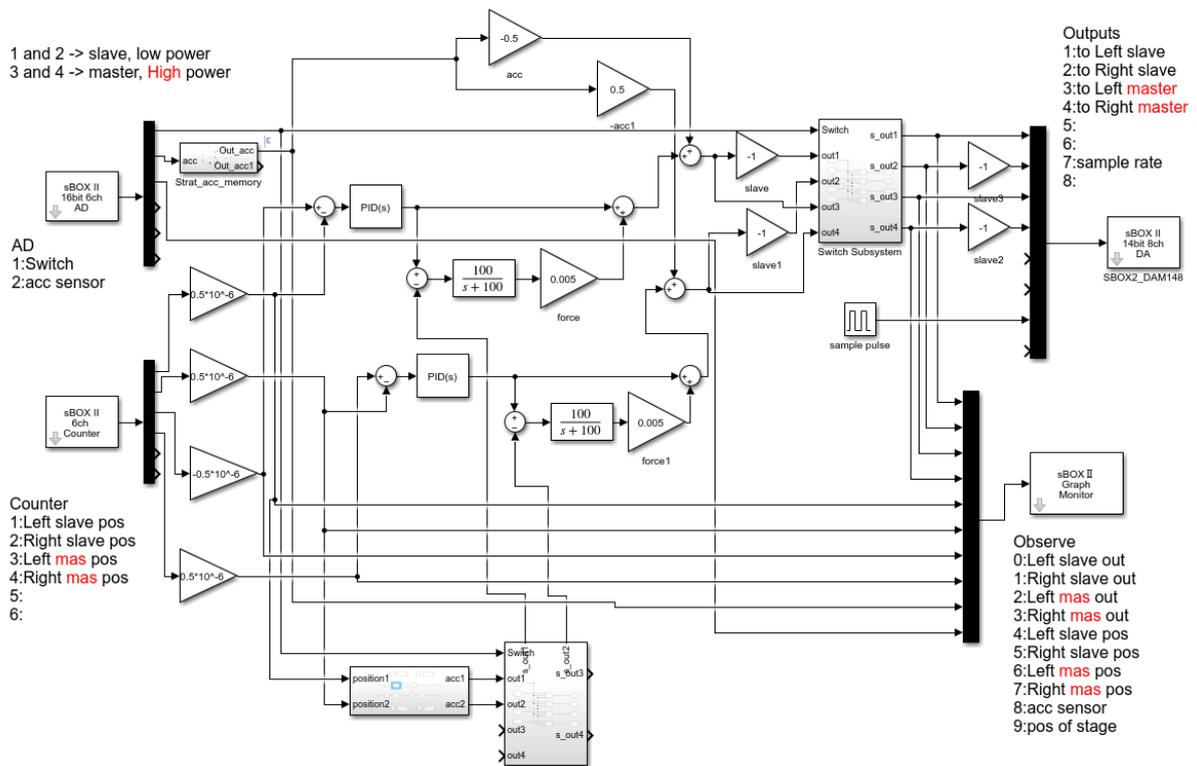


図 3-12 Simulink によるバイラテラル制御プログラムの例

3.4 まとめ

本研究における2自由度バイラテラル制御システムについて説明した。マスタ、スレーブともに2本の腕をもち、それぞれが直線方向の自由度を持つ。ハンドは把持機構を持っており、間にある目標物体を挟むことができる。

次の章から、この装置を用いた詳しい研究内容について触れていく。

第4章 スレーブ台の運動による力を補正するバイラテラル制御

| | |
|--------------------------------------|----|
| 4.1 はじめに..... | 40 |
| 4.2 ステージ台に手による外乱を与える実験手法 | 41 |
| 4.3 振動のピーク値を取得し振幅から行う評価手法 | 43 |
| 4.4 目標物体を設置せず把持していない時に台が運動する場合 | 44 |
| 4.5 目標物体を一定の力で把持している時に台が運動する場合 | 48 |
| 4.6 目標物体を操作によって把持して台が運動する場合 | 54 |
| 4.7 マスタスレーブの力の拡大比を変えた場合の比較 | 59 |
| 4.8 柔らかい目標物体を把持している時に台が運動する場合 | 68 |
| 4.9 考察..... | 73 |
| 4.10 まとめ..... | 75 |

4.1 はじめに

従来の制御方法では、スレーブ側の装置全体はスレーブ側の環境に固定され動かないことが想定されており、マスタスレーブの出力は反転した式(4-1)のような関係になっている。つまりスレーブが接触物体に与える力と操作者がマスタから感じる力は等しいものになっている。以下の図4-1に2章で用いた従来法のブロック線図を再掲する。

$$I_m = -I_s \tag{4-1}$$

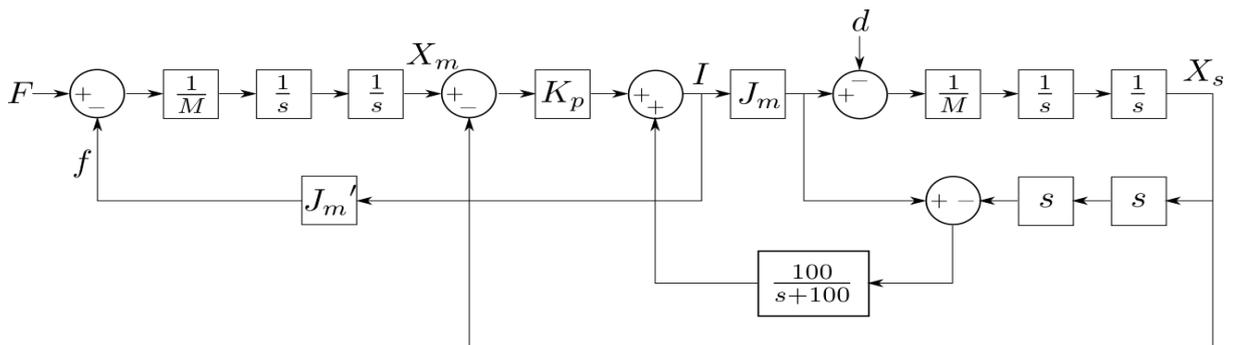


図4-1 従来法制御のブロック線図 (再掲)

一方で、スレーブ側全体が動いてしまうような外乱が加わりそれによって変位が発生するとスレーブハンドには慣性力が発生し、式(4-1)のように反転して操作者に力触覚を提示すると操作者は物体の感触に加えて慣性力も感じることになる。遠隔地での状況によらず安定した操作を可能とするため、新規手法として慣性力を補正する制御を検証する。慣性力をスレーブ側に補正するため、マスタとスレーブでの電流指令値 I_m, I_s は異なる値をもち、式(4-2)のような関係となる(a は台の加速度)。以下の図4-2は2章からの再掲となる新規手法でのブロック線図である。

$$I_m = -I_s - \frac{a}{M} \tag{4-2}$$

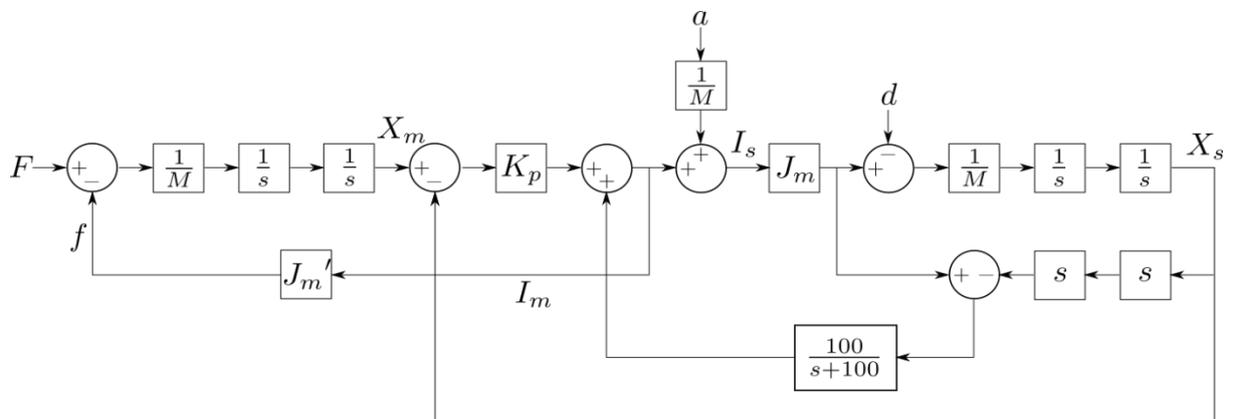


図4-2 新規手法の補正によるブロック線図 (再掲)

4.2 ステージ台に手による外乱を与える実験手法

実験においては3章で説明した実験装置を使用する。

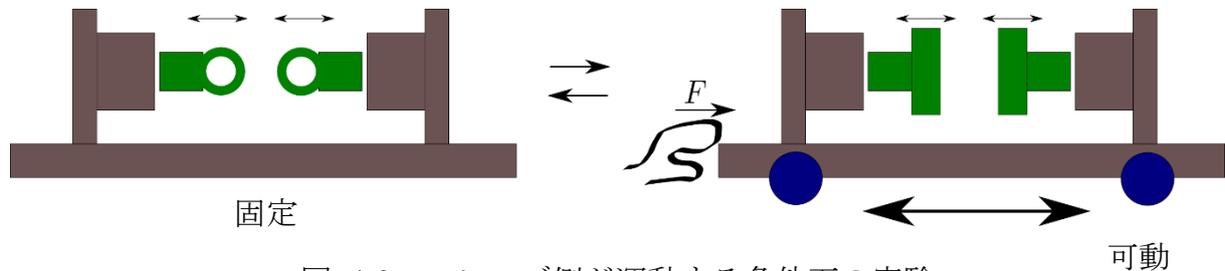


図 4-3 スレーブ側が運動する条件下の実験

前節で説明した従来法と新規手法の制御法による違いについて検証していく。

実験中、操作者がマスタハンドを親指と人差し指でつかんだ状態で操作を行う。

図 4-3 にスレーブ側が運動する条件下の実験のイメージを示す。この操作中に車輪付きのステージを手で押し引きすることでスレーブの台が振動して動くような外乱が与えられる。すべての実験の条件をなるべく等しくするため、ステージ台にはできるだけ同じ振幅、周期の振動を加えるようにしている。そのほか、操作者はすべての実験で統一であり、制御周期は等しいなど、比較対象である制御方法以外の条件は統一されている。(a)従来法と(b)新規手法を比較するにあたり、様々なマスタハンドの操作の条件によって実験を実施することで多くの角度から評価する。

操作者のする操作の内容として以下の5種類について行った。

4.4 節 目標物体を設置せず把持していない時に台が運動する場合

この操作中はスレーブ側に目標物体は設置されておらず、したがってスレーブハンドは物体と接触していない。操作者はマスタハンドに指を通して指を動かしているが、マスタハンドを操作することでスレーブに指令を与えようとはせず、マスタハンドのモーターから力触覚を受け取るだけである。このときスレーブと物体の間に作用する力はないので、操作者の受け取る力触覚は0[N]であることが理想である。

4.5 節 目標物体を一定の力で把持している時に台が運動する場合

この操作中スレーブハンドには一定の力として1[N]の出力を与えられ、スレーブハンドの間に設置された目標物体をその力で把持し続ける。操作者はマスタハンドに指を通し、スレーブハンドから力触覚を受け取る。また、マスタハンドの動きにかかわらず、スレーブハンドは一定の力を出力する。このとき、スレーブと物体の間に作

用する力は1[N]で固定となっているため、操作者の受け取る力触覚は1[N]であることが理想である。

4.6節 目標物体を操作によって把持して台が運動する場合

この操作において、スレーブハンドはマスタハンドに追従するようになっており操作者はマスタハンドに指を通して動作を加えることでスレーブハンドを動かせる。スレーブハンドの間に目標物体を設置し、操作者は遠隔操作によってその物体を把持する。この把持している操作中にステージ台に外乱を加え、運動を持たせる。操作者はマスタハンドのモーター出力により力触覚を受け取る。このときスレーブは物体を同じ力で把持し続けているので、操作者の受け取る力触覚はステージ台運動の影響を受けて振動することなく、一定の力であることが理想である。

4.7節 マスタスレーブの力の拡大比を変えた場合の比較

4.6節において行った実験内容をマスタスレーブの出力する力の拡大比を変えて行う。これは遠隔操作において人間の加える力を拡大縮小することで人間の能力を拡張した操作を行う状況を想定したものである。比率を1/3, 1/2, 2, 3倍にしたときについての結果を求めて、力の拡大、縮小による違いについて検討する。このときスレーブは物体を拡大あるいは縮小された力で把持し続けているので、操作者の受け取る力触覚はステージ台運動の影響を受けて振動することなく、一定の力であることが理想である。

4.8節 柔らかい目標物体を把持している時に台が運動する場合

4.6節において行った実験は目標物体が十分に硬く、スレーブハンドとの接触によって変形を起こさないものであった。この節では、目標物体を柔らかいものとしスレーブハンドの出力によって変形を起こすものを把持している。把持している最中にステージ台に外乱を加え運動を持たせる。操作者はマスタハンドのモーター出力により力触覚を受け取る。このときスレーブは物体を同じ力で把持し続けているので、操作者の受け取る力触覚はステージ台運動の影響を受けて振動することなく、一定の力であることが理想である。また、スレーブと物体の間の作用力がステージ台の運動にかかわらず一定であり、柔らかい物体の形状変化させないことが理想である。

4.3 振動のピーク値を取得し振幅から行う評価手法

本研究において観測可能な物理量は、センサから取得されるマスタスレーブの位置情報とスレーブステージの加速度である。また、各モーターへの電流指令値も観測可能であるためそこから実際の出力を用いて解析を進める。

本研究の目的にもう一度返ると、遠隔操作における力触覚を正しく伝えることである。そこで今回の実験では、スレーブハンドと目標物体との間に発生する作用反作用力がマスタに提示されるモーター出力として伝わっているかを評価する。特に、各モーター出力に注目した評価を行う。また、実際にその出力になった原因を分析を進めるのに各ハンドの位置情報を用いる。スレーブステージの加速度は実際に台に加えられた外力による運動がどのようなようだったか、各条件で特別な差がないかを確認するために観測する。

慣性力の影響によりマスタスレーブ出力が振動を起こすが、新規手法においてその振幅をどれくらいの割合で減少させることができたかにより定量的表評価を行う。本研究で用いる目標物体は振動の力を発生せず、物体から受ける力触覚は本来振動しないことから、制御中に観測される振動の振幅が小さくすることを目標として評価を行う。

振幅について、波形に対して局所的最大値、局所的最小値を計算しそれらのピーク値の差分を振幅とする。以下の図 4-4 に波形からピーク値を求めた例を示す。赤が局所的最大値、黒が局所的最小値を示している。この各赤と黒の点の縦軸方向の差を計算しその平均を振幅として評価に使用する。

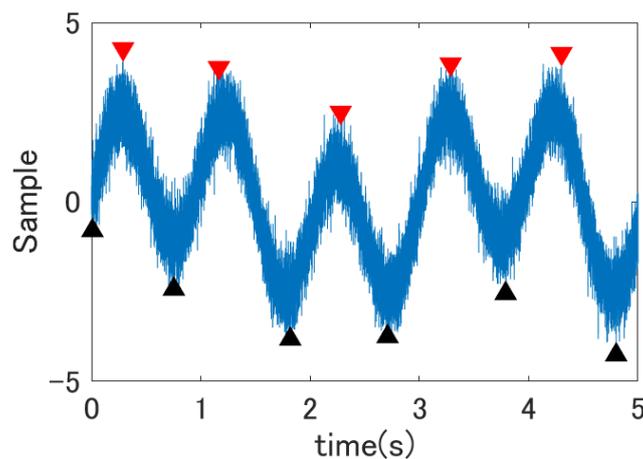


図 4-4 波形からピーク値を求め振幅を計算する例

4.4 目標物体を設置せず把持していない時に台が運動する場合

はじめに、目標物体を設置しない場合についての結果を示す。この実験中、操作者はマスタハンドに2本の指を通してている。スレーブ側ハンドの間には、目標物体を置かず、マスタの指令で動いても物体とは接触しない。この操作中にステージ台に外乱を与えることで加速度を発生させる。操作者はマスタハンドからのモーター出力により力触覚を受け取るが、この力触覚の中に慣性力の分も含まれてフィードバックされる。

操作中、制御方法に関して、左右のハンドで(a)従来法と(b)新規手法の異なる制御法を用いる。右ハンドは(a)従来手法の制御をする一方、左ハンドには(b)新規手法としてステージに取り付けられた加速度センサ値から慣性力をフィードバックする。つまり操作者は操作中、2本の指で左右のハンドから別々の力触覚のフィードバックを受け取る。これは、同じ台の運動に対しての異なる制御方法による結果の違いを明確にし、定量的に評価するためである。

目標物体とスレーブハンドは接触していないため、スレーブと物体の間で作用する力はない。よって、本来操作者の感じるべき力触覚は0[N]であるはずである。つまり、マスタハンドに出力される力がステージ台の加速度に関係なく0[N]に近いことが理想である。

以下の図4-5は今実験で実際にステージに加えられた力によって観測された加速度センサの値である。振幅がおよそ1[m/s²]となっている。

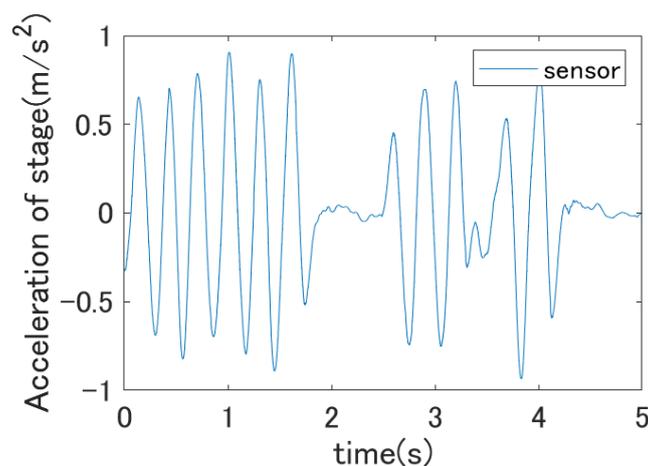


図 4-5 ステージの加速度

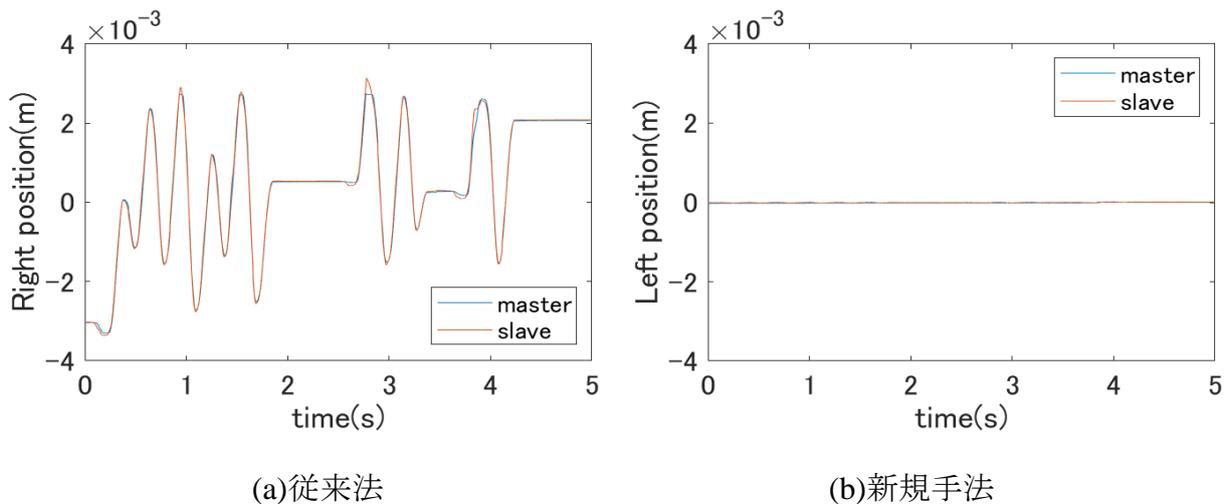


図 4-6 操作中におけるマスタスレーブのハンドの位置

はじめに、操作中におけるマスタスレーブのハンドの位置の変化を図 4-6 に示す。

まず、従来法を用いた場合について、(a)からステージに加速度が発生した影響で振幅 3[mm]ほどの振動を起こしている。一方新規手法を用いた場合では、(b)の図から(a)に比べほとんど振動していない。

(a)の場合では、ステージ台が発生した運動により、ステージ台に対してのスレーブハンドの相対位置に変位が出たことがわかる。(b)においては、スレーブハンドにステージ台の運動による慣性力を補正しているため、ステージ台の動きにスレーブハンドが追従した結果、相対位置の変化が少なくなったと解釈できる。

この制御において図 4-1、4-2 のブロック線図からも、電流指令値 I_m, I_s の計算項には位置追従のために $K_p(x_m - x_s)$ が含まれている。そのためステージの運動によって生じる相対位置の変化はマスタスレーブの出力に大きく影響する。

そこで次に操作中におけるマスタスレーブの出力の変化についてみる。

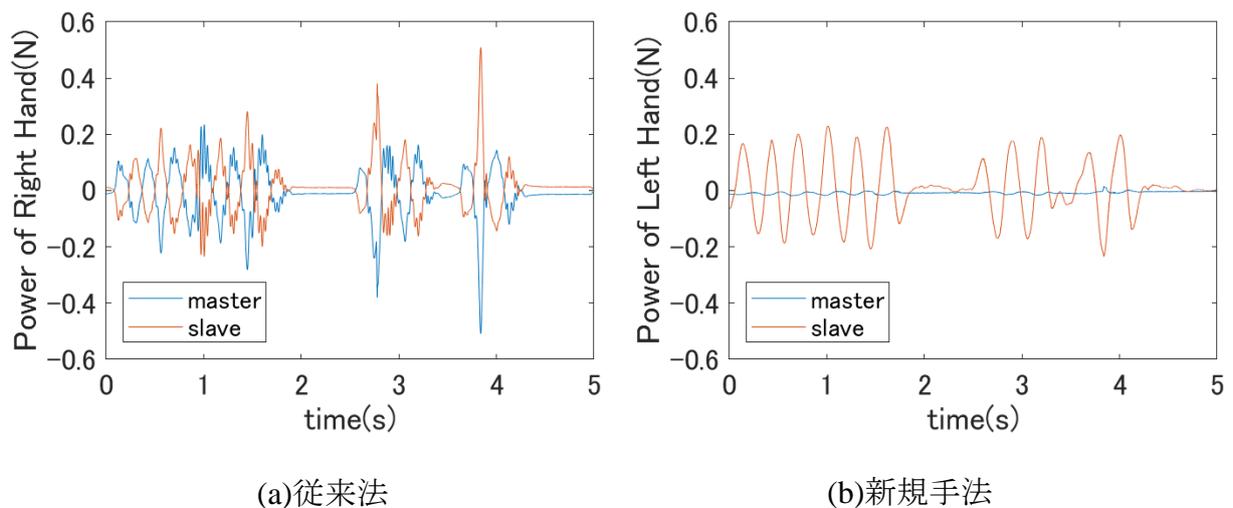


図 4-7 操作中におけるマスタスレーブのモーター出力

上の図 4-7 にマスタスレーブハンドのモーター出力を示している。

まず従来法を用いた場合の(a)に注目すると、従来法の特徴でもあるようにマスタスレーブの力が反転関係になっていることがわかる。また (a)において青線のマスタ出力は振幅がおよそ $0.2[N]$ の振動を起こしており、この振動が操作者に伝えられている。この振動の発生源はステージ台の運動による慣性力である。

一方、新規手法の(b)に注目するとマスタを表す青線は $0[N]$ を示しており、操作者はモーターを介して力触覚を感じていない様子がわかる。赤線のスレーブ出力はステージ台の運動に合わせて変化しており、先ほど述べたようにステージ台の動きにスレーブハンドがついていくよう出力されている。。

ここで、今回の実験では接触物体がなく、スレーブと物体の間に発生する作用力はない。よって操作者は $0[N]$ の力触覚を感じる事が理想であった。操作者の感じる力触覚は図 4-7 中の青線であるマスタ出力と一致する。そこで(a)従来法と(b)新規手法を評価するためにこの青線部分に注目する。

次の項では図 4-7 中の青線部分を拡大したものを図示する。

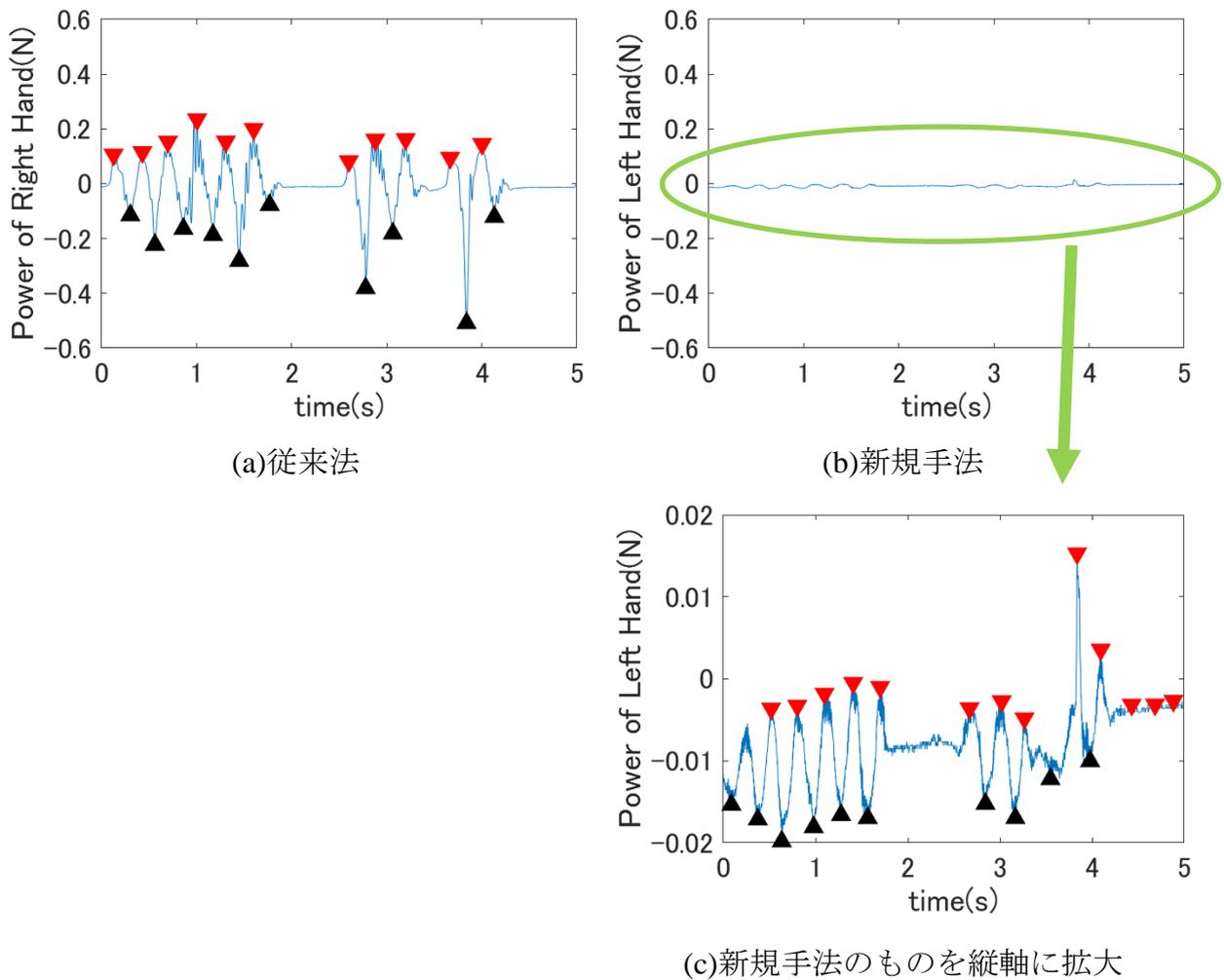


図 4-8 操作中のマスタハンドの出力の拡大図とピーク値

図 4-8 は操作中におけるマスタ出力を表示したものである。(a)は従来法、(b)は新規手法の結果を示しており、縦軸の 1 目盛りは同じとなっている。(c)は(b)の図を縦軸方向に拡大し表示したものである。また(a)と(c)の図には局所的最大値、最小値であるピーク値が赤と黒の三角で示されている。

赤と黒の三角からマスタ出力において振動している部分の振幅を計算する。(a)から操作者が受けとる力触覚は従来法で $0.37[\text{N}]$ ほどの振幅、(c)から新規手法では $0.0149[\text{N}]$ ほどの振幅となっており、振動は小さいほうが良いという観点から振動が 95% 減少に改善したと評価できる。

以上により目標物体と接触していない場合において新規手法を用いたハンドのほうが従来法のハンドより振動を少なく伝えており、理想に近いことがわかった。

4.5 目標物体を一定の力で把持している時に台が運動する場合

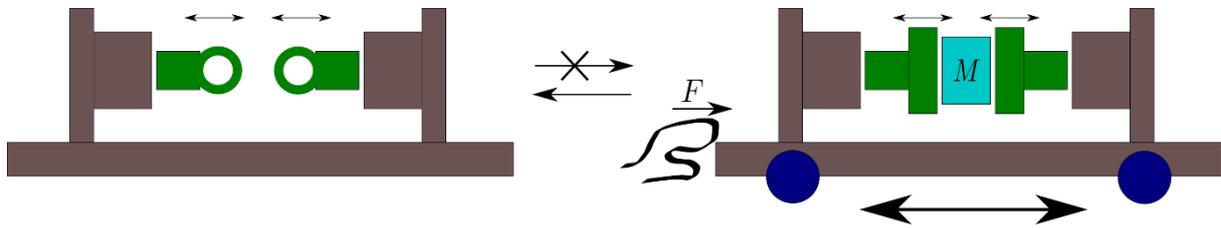


図 4-9 マスタスレーブハンドダメージ図

次に、物体を把持しており、スレーブハンドと物体の間に作用力が発生した状態においてその作用力がステージ台の運動によらず操作者に力触覚を伝えることを目的とした実験を行う。スレーブ側ハンドの間には目標物体を置き、物体を把持した状態でステージに加速度を加える。

この節では硬い物体として木の立方体を目標物体とし形状は 25[mm]の立方体である。従来の制御法と新規の制御法の2回実験を行い、制御法による違いを比較する。前節と同様、操作者はマスタハンドに指をいれそこから力触覚を受け取る。またステージ台に与えられる加速度は手によるものである。

実際に操作者がマスタを動かし目標物体を把持することをを行う前に、スレーブハンドに一定の力(1[N])を出力し続けて、その途中でステージに力が加わったときの実験を行う。

つまり図 4-9 に示すようにスレーブからマスタへの通信はある一方マスタからスレーブへの通信はなく、スレーブからマスタへの通信の一方通行であるユニラテラルな制御である。この実験の位置づけとして、人間による操作でばらばらな力で把持するのではなく同じ力を出力するよう指令することで結果を定量的に解析しやすくするものである。

新規手法と従来法での比較を行う。スレーブへの電流指令値は以下のように従来法では式(4-2)、新規手法では慣性項をつけた(4-3)となる。

$$I_s = \begin{cases} k & (4-2) \\ k + \frac{a}{M} & (4-3) \end{cases}$$

ここでkは定数であり、モーター出力が 1[N]となるような電流指令値(0.25[A])である。

マスタへの電流指令値 I_m はどちらの方法においても、ブロック線図 4-1,4-2 から以下の式(4-4)となる。第1項は位置制御、第2項は力制御を表す。

$$I_m = K_p(X_s - X_m) - s^2 X_s \frac{100}{s + 100} \quad (4-4)$$

この操作中、マスタの動きにかかわらずスレーブハンドと物体の間の作用力がは 1[N]で固定されている。よって、操作者の受け取る力触覚はこの作用力の 1[N]であることが理想である。

実験は(a)従来法と(b)新規手法の2回行われている。台に手で加えられる外乱は、外乱に加える役割の人が調整することでなるべく同じ運動になるように行われており、その時に実際に発生した運動は図4-10に示されている。

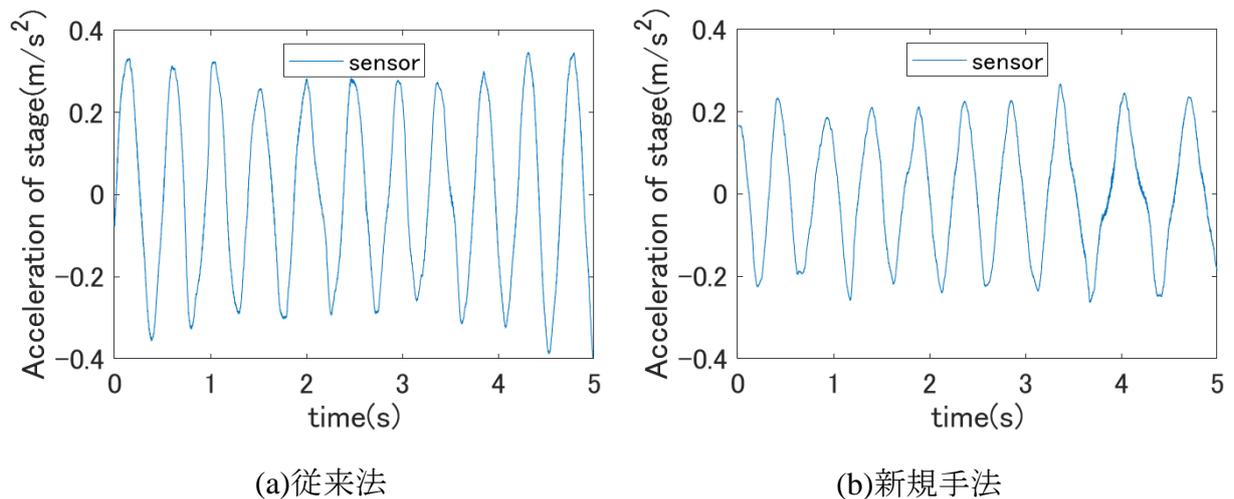


図4-10 加えられた外力によるステージの加速度

操作中における左右のハンドの位置変化を図4-11に示す。(a)と(b)の場合ともに左右のハンドの位置に差が25[mm]あるが、これはスレーブ間に把持されている目標物体の厚さである。(a)の実験中にはマスタスレーブが台の動きに合わせて振動している一方で、(b)の場合はそこまで位置が変化していない。

左右のハンドにおける違いはないため、次の項で図4-11の緑の丸で囲まれた左ハンドの位置を拡大したもので解析を行う。

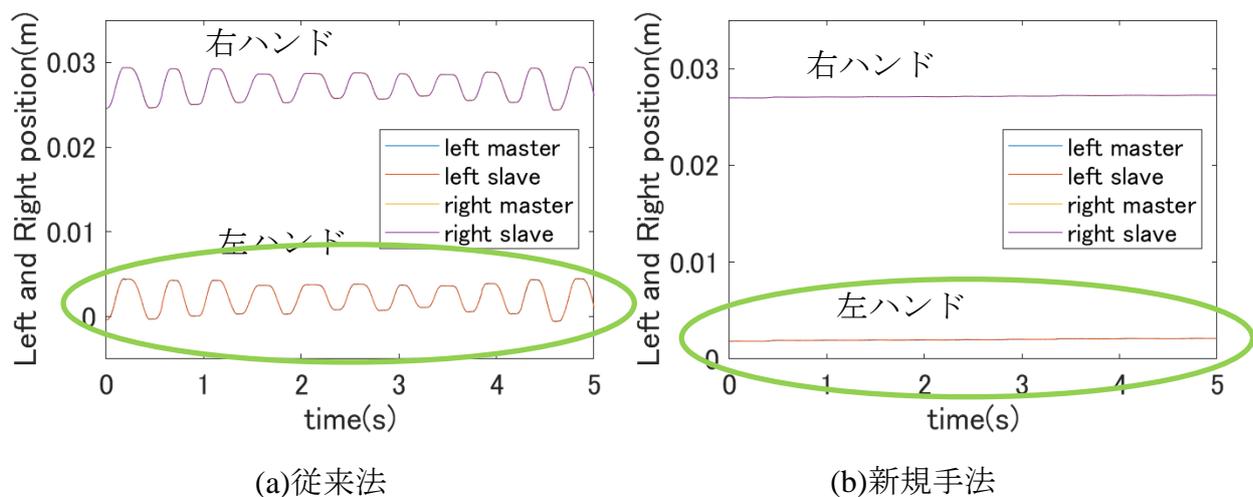


図4-11 操作中における左右のハンドの位置変化

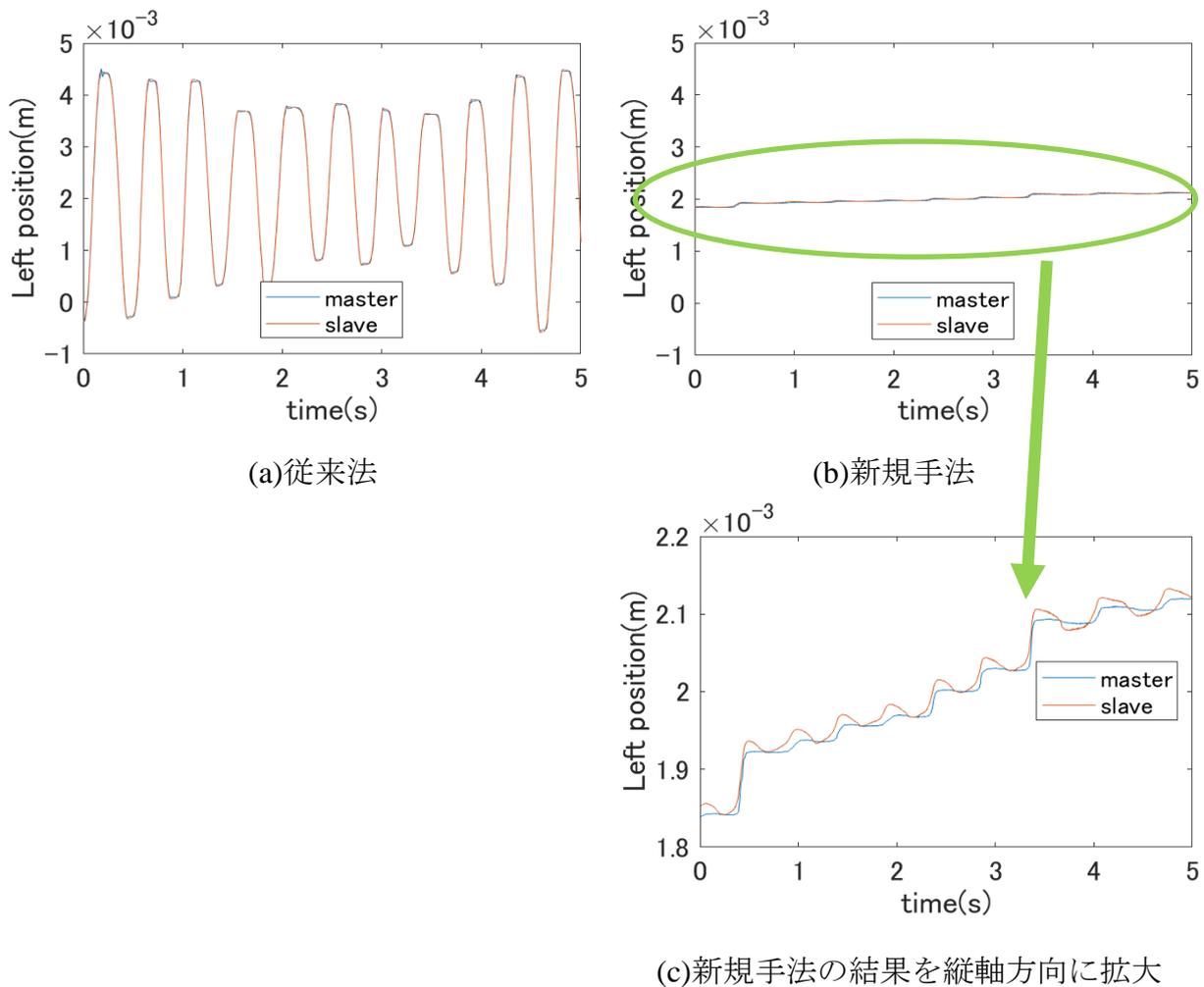


図 4-12 左ハンドの位置

図 4-12 は図 4-11 における左ハンドに注目し拡大表示したものである。(a)は従来法、(b)は新規手法の結果を示しており、縦軸の 1 目盛りは同じとなっている。(c)は(b)の図を縦軸方向に拡大し表示したものである。

図 4-12 の(a)を見ると、振幅 2[mm]で相対偏差が振動している一方、(b)では移動はほぼなく、(c)の拡大図を見ることで移動は 0.3[mm]程度に抑えられている。(c)の拡大図で見ると時刻とともに上昇している様子が見えるが、(a)従来法でのグラフに比べて、縦軸が約 10 倍に拡大している影響によるものであり、同じ縦軸で比較されている(a)と(b)のグラフからも無視できるものであるといえる。

(a)の場合では、ステージ台に発生した運動により、ステージ台に対してのスレーブハンドの相対位置に変位が出たことがわかる。(b)においては、スレーブハンドにステージ台の運動による慣性力を補正しているため、ステージ台の動きにスレーブハンドが追従した結果、相対位置の変化が少なくなったと解釈できる。

そこで次に操作中におけるマスタスレーブの出力の変化についてみる。

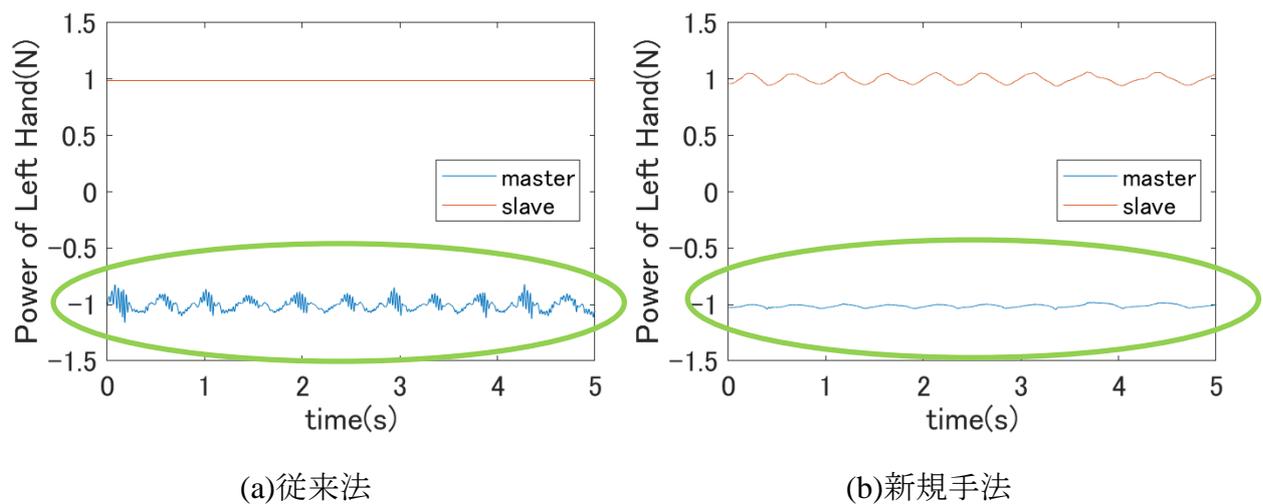


図 4-13 操作中におけるマスタスレーブの左ハンドの出力

操作中におけるマスタスレーブの左ハンドの出力を表したのが図 4-13 である。実験においてハンドの左右による違いはないため各回とも左ハンドの出力のみを表示している。

図中の(a)について赤線のスレーブ側への出力は式(4-2)の通りに 1[N]で一定となっている。一方、(b)については赤線のスレーブ側への出力は式(4-3)のから、1[N]からステージ台の運動に合わせて振動していることがわかる。この振動部分がスレーブ側における慣性力の補正部分に当たる。

図 4-13 内において操作者に伝えられる力触覚である青線のマスタ出力に注目する。この操作中、マスタの動きにかかわらずスレーブハンドと物体間の作用力がは 1[N]で固定されている。よって、操作者の受け取る力触覚はこの作用力の 1[N]であることが理想である。

よって次の項で図 4-13 中の緑で囲まれた青線部分を拡大したものを見る。

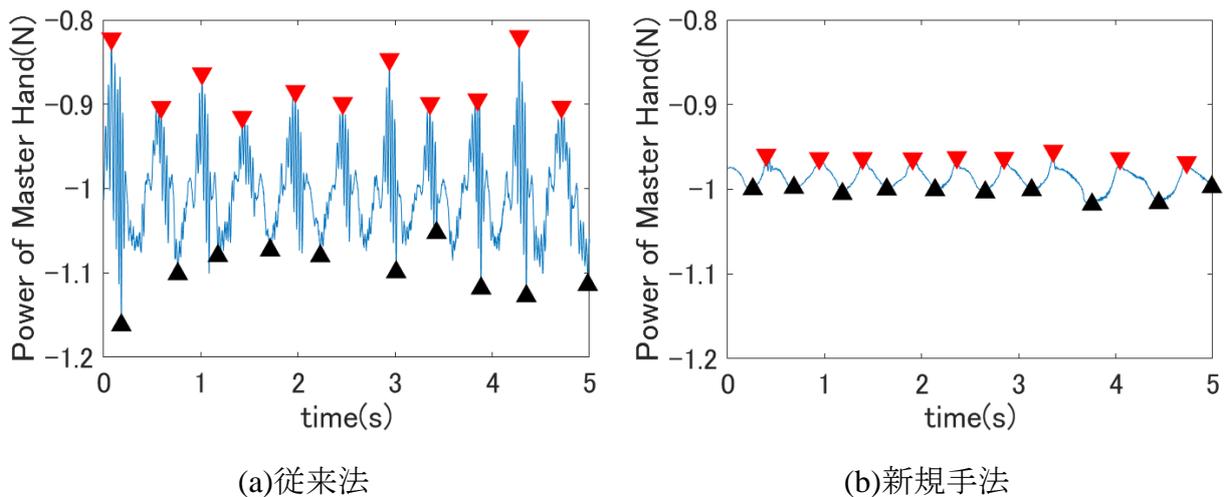


図 4-14 マスタの左ハンドの出力の拡大図とピーク値

ここで、図 4-13 においてマスタへの出力は慣性力によって発生する振動を含むものであった。その振動の振幅を求めるために図 4-13 の緑で囲まれたマスタ出力を拡大したものが図 4-14 になる。(a)は従来法、(b)は新規手法の結果を示しており、縦軸の 1 目盛りは同じとなっている。また(a)と(b)の図には局所的最大値、最小値であるピーク値が赤と黒の三角で示されている。

赤と黒の三角からマスタ出力において振動している部分の振幅を計算する。(a)から操作者が受けとる力触覚は従来法で 0.223[N]ほどの振幅、(b)から新規手法では 0.0416[N]ほどの振幅となっており、振動振幅は小さいほうがよいという観点から精度として振動が 81%減少に改善したと評価できる。

新規手法を用いて相対偏差を抑えることで慣性力の影響を補正できている点は前節で行った把持物体がない状態の時と同じである。新規手法において慣性力による振動の影響を抑えることができている。

以上により目標物体を一定の力で把持している場合において新規手法を用いたハンドのほうが従来法のハンドより振動を少なく伝えており、理想に近いことがわかった。

4.6 目標物体を操作によって把持して台が運動する場合

次に、実際にマスタスレーブの間にバイラテラル制御を行い、スレーブがマスタの指令によって動く実験を行う。

この操作において、スレーブハンドはマスタハンドに追従するようになっており操作者はマスタハンドに指を通して動作を加えることでスレーブハンドを動かせる。スレーブハンドの間に目標物体を設置し、操作者は遠隔操作によってその物体を把持する。この把持している操作中にステージ台に外乱を加え、運動を持たせる。操作者はマスタハンドのモーター出力により力触覚を受け取る。

スレーブの左右のハンドの間には同じ目標物体を置き把持する。マスタの電流指令値は、前節と変わらず、式(4-5)である。

$$I_m = K_p(X_s - X_m) - s^2 X_s \frac{100}{s + 100} \quad (4-5)$$

一方スレーブの電流指令値は、前節と異なり、(a)従来法では式(4-6)、(b)新規手法では(4-7)となる。

$$I_s = \begin{cases} -I_m & (4-6) \\ -I_m - \frac{a}{M} & (4-7) \end{cases}$$

この操作中、スレーブハンドの出力が固定されていた前節とは異なり、マスタの動きにスレーブハンドが追従するようになっている。つまりオペレーターの操作によって目標物体を把持するが、そのときのスレーブと物体の間の作用力も操作者が動かすマスタの動きによる。

この実験において、操作者は同じ力で物体を把持し続けるような操作を実行している。そのためスレーブと物体の間の作用力は一定であり、操作者の受け取る力触覚はステージ台運動の影響を受けて振動することなく、一定の力であることが理想である。

前節同様(a)従来法と(b)新規手法の2回の実験を行い、それを比較する。図4-15に加速度センサから得た入力加速度波形を示す。2回とも同じ振幅となるよう調整して外乱が与えられている。

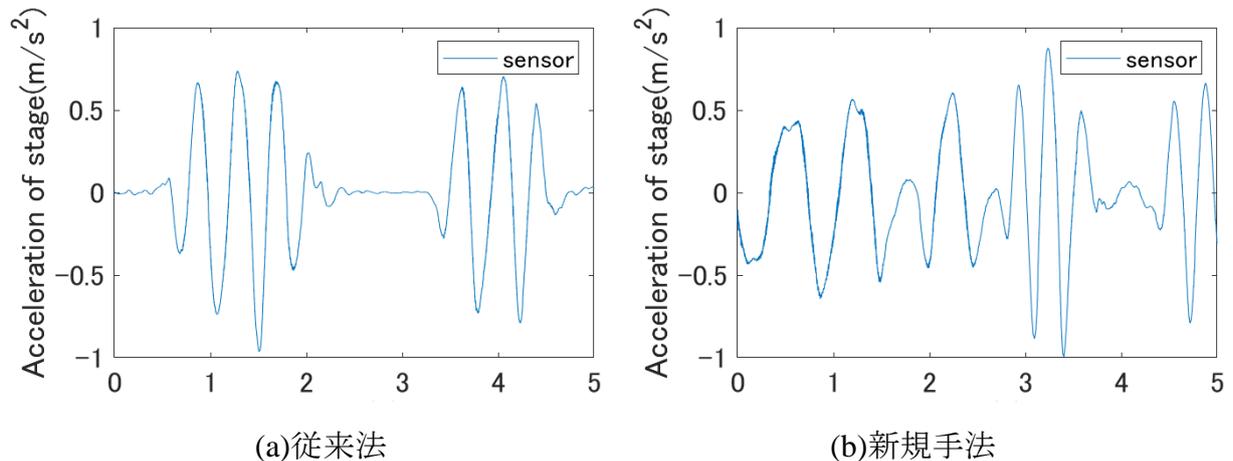


図4-15 加えられた外力によるステージ台の加速度

操作中における左右のハンドの位置変化を図4-16に示す。(a)と(b)の場合ともに左右のハンドの位置に差が25[mm]あるが、これはスレーブ間に把持されている目標物体の厚さである。(a)の実験中にはマスタスレーブが台の動きに合わせて振動している一方で、(b)の場合はそこまで位置が変化していない。

左右のハンドにおける違いはないため、次の項で図4-16の緑の丸で囲まれた左ハンドの位置を拡大したもので解析を行う。

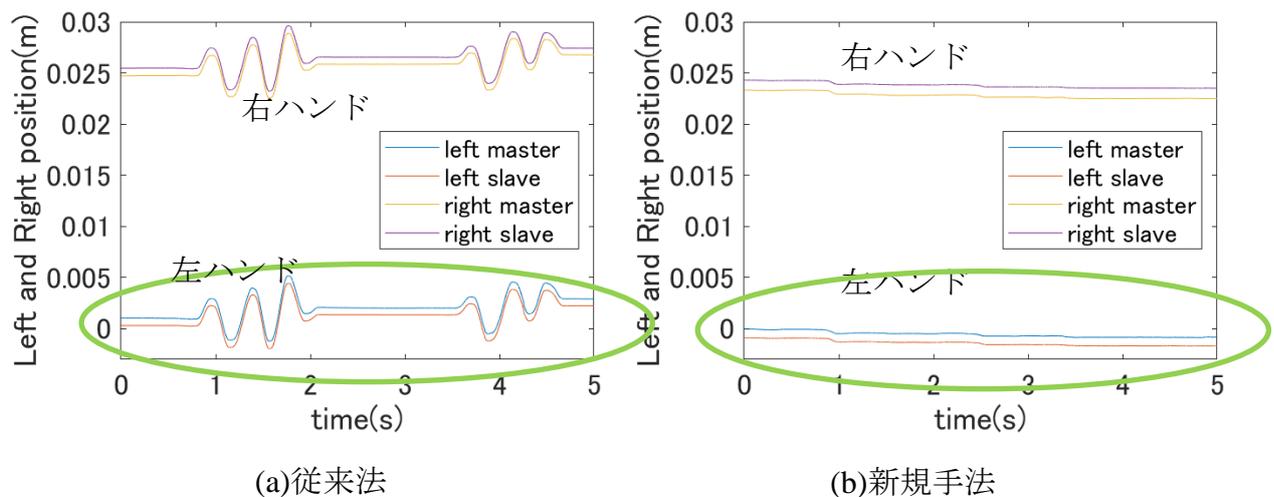


図4-16 左右マスタスレーブハンドの位置

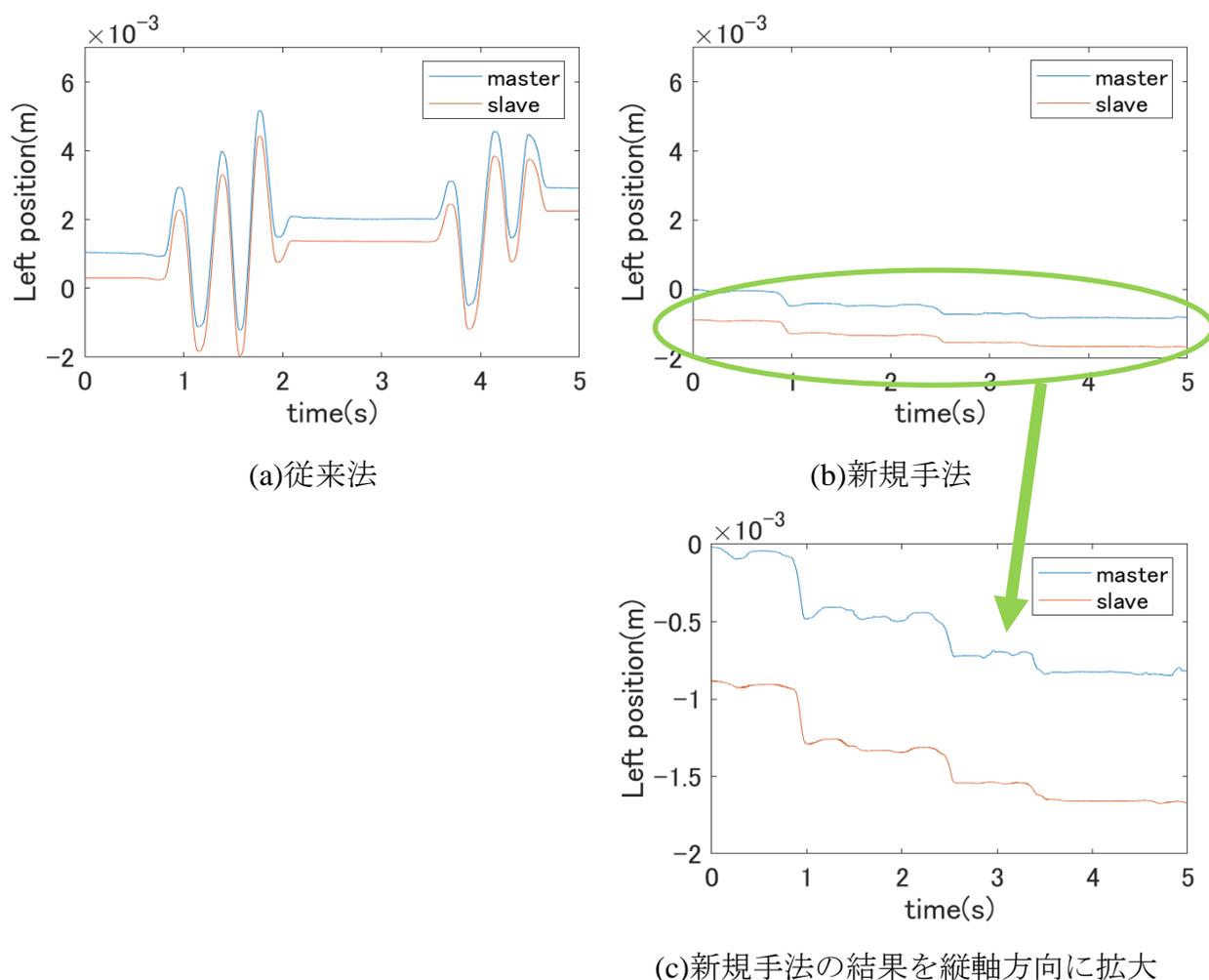


図 4-17 マスタスレーブの左ハンド位置

図 4-17 は図 4-16 における左ハンドに注目し拡大表示したものである。(a)は従来法、(b)は新規手法の結果を示しており、縦軸の 1 目盛りは同じとなっている。(c)は(b)の図を縦軸方向に拡大し表示したものである。

図 4-12 の(a)を見ると、振幅 2.5[mm]で相対偏差が振動している様子がわかる。一方(b)では移動はほぼなく、(c)の拡大図を見ることで移動は 0.6[mm]程度に抑えられている。

(a)の場合では、ステージ台に発生した運動により、ステージ台に対してのスレーブハンドの相対位置に変位が出たことがわかる。(b)においては、スレーブハンドにステージ台の運動による慣性力を補正しているため、ステージ台の動きにスレーブハンドが追従した結果、相対位置の変化が少なくなったと解釈できる。

そこで次に操作中におけるマスタスレーブの出力の変化についてみる。

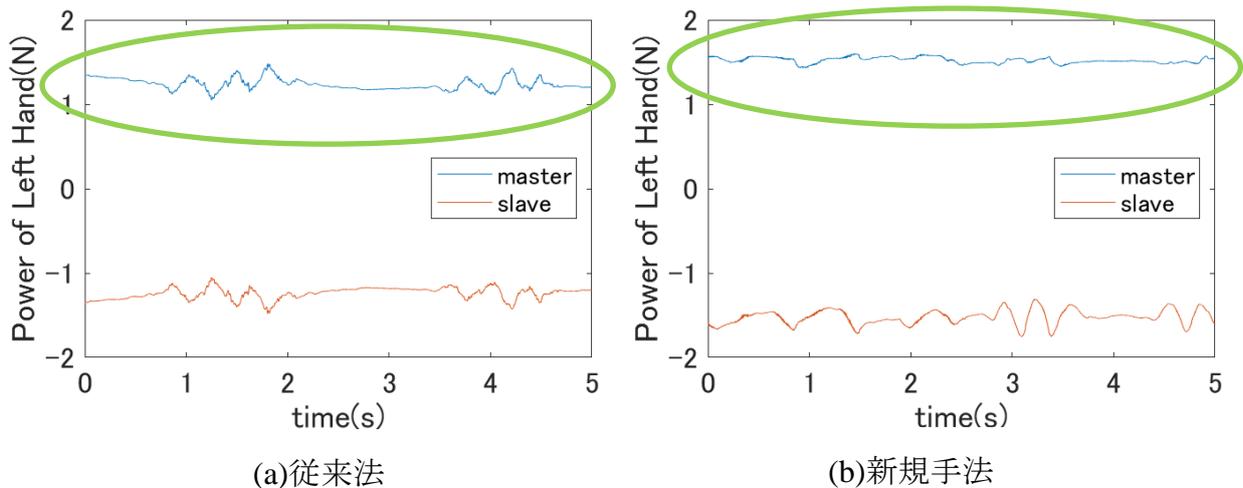


図 4-18 操作中におけるマスタスレーブの左ハンドの出力

このときマスタスレーブの左ハンドのモーター出力を示したものを図 4-18 に示す。実験においてハンドの左右による違いはないため各回とも左ハンドの出力のみを表示している。

図中の(a)と(b)の場合ともにスレーブ側の赤線に注目すると、1.5[N]ほどの出力となっており、この力を把持力として物体を把持している。このスレーブ側の出力である赤線は図 4-15 のステージ台の運動に合わせて振動していることがわかる。これはスレーブハンドがステージ台の運動による慣性力を受けているためである。

マスタ側の出力である青線に注目すると、(a)従来法の場合は式(4-6)のように反転関係になっているため、スレーブハンドが受ける慣性力の振動を操作者に伝えている。(b)新規手法においては式(4-7)において慣性力を補正している分振動は少なくなっている。

ここで、この実験において、操作者は同じ力で物体を把持し続けるような操作を実行している。そのためスレーブと物体の間和作用力は一定であり、操作者の受け取る力触覚はステージ台運動の影響を受けて振動することなく、一定の力であることが理想である。つまり慣性力による振動は少なく操作者に力触覚として提示したい。

よって次の項で図 4-18 中の緑で囲まれたマスタへの力触覚を伝えている青線部分を拡大したものを見て定量的評価を実施する。

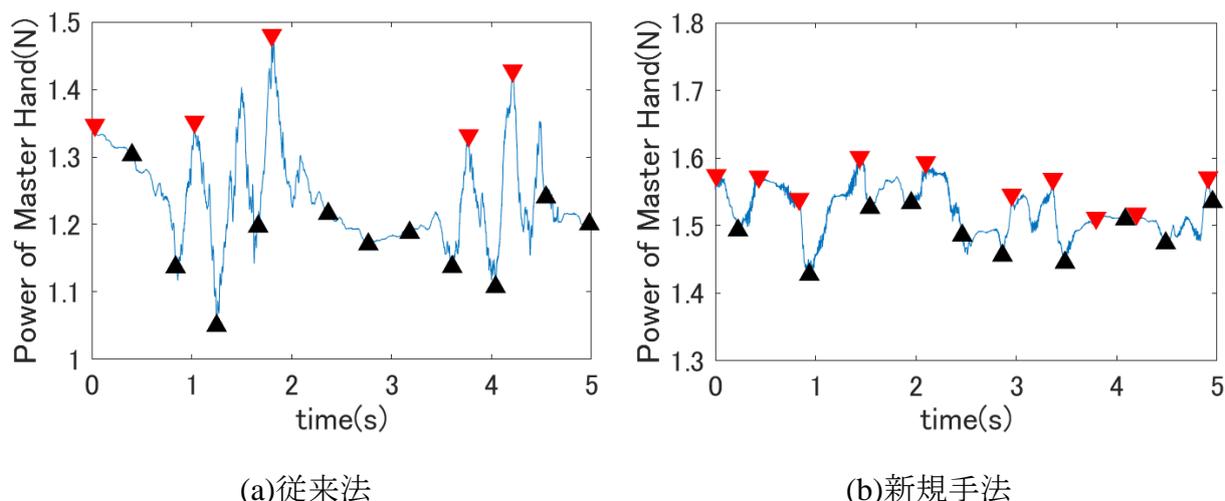


図 4-19 マスタの左ハンドの出力の拡大図とピーク値

ここで、図 4-18 においてマスタへの出力は慣性力によって発生する振動を含むものであった。その振動の振幅を求めるために図 4-18 の緑で囲まれたマスタ出力を拡大したものが図 4-19 になる。(a)は従来法、(b)は新規手法の結果を示しており、縦軸の 1 目盛りは同じとなっている。また(a)と(b)の図には局所的最大値、最小値であるピーク値が赤と黒の三角で示されている。

赤と黒の三角からマスタ出力において振動している部分の振幅を計算する。(a)から操作者が受けとる力触覚は従来法で 0.21[N]ほどの振幅、(b)から新規手法では 0.071[N]ほどの振幅となっており、振動振幅は小さいほうがいという観点から精度として振動が 66%減少に改善したと評価できる。

新規手法を用いて相対偏差を抑えることで慣性力の影響を補正できている点は前節で行った一定の力で把持した状態の時と同じである。以上により操作中において目標物体を把持している場合において新規手法を用いたハンドのほうが従来法のハンドより振動振幅を少なく伝えており、理想に近いことがわかった。

また振動の振幅の減少率については、一定の力で把持している場合のほうが高かった。これは通信がバイラテラルになったため、提示された振動の力触覚を受け取った操作者の反応がスレーブハンドに適用されることが原因であると考えられ、実際の操作中における慣性力の影響は、ある一定の値を出力し続ける制御に比べて大きいといえる。

4.7 マスタスレーブの力の拡大比を変えた場合の比較

前節において実際の動作において新規手法によって慣性力の補正が可能になることを示した。次に今項ではマスタスレーブハンドの出力の比を変えた場合に起こる慣性力の影響について検証していく。理想では、力の拡大縮小を行っている場合でもステージ台の運動に関わらず操作者にスレーブと物体の間の作用力を伝えることである。

これまでの実験においては、マスタとスレーブモーターの出力は同じように制御されてきた。遠隔操作においては、操作者の意図する力を拡大あるいは縮小してスレーブハンドに伝えることで人間の能力を拡張してミッションを達成することが考案されている。本研究の実験装置では電流指令値のゲインを調整することで、スレーブ側の出力を増幅あるいは減少させることが可能である。

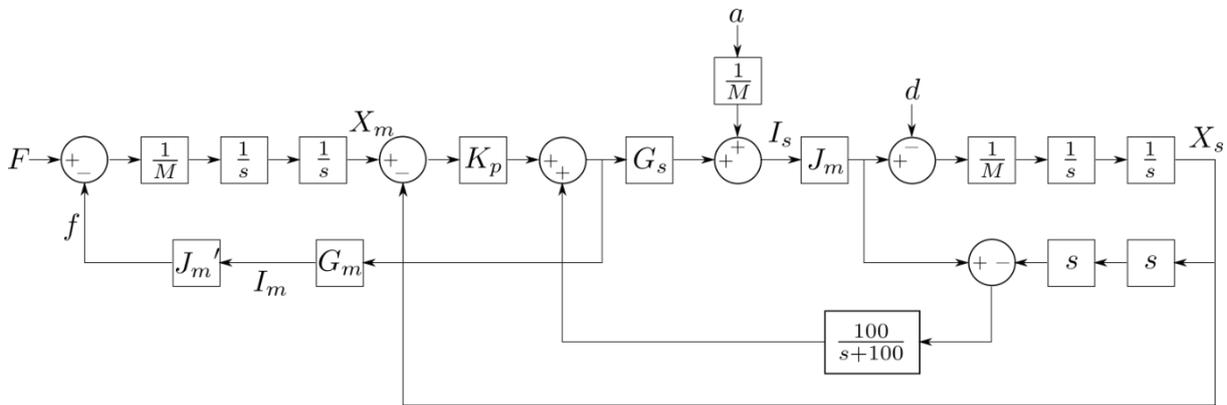


図 4-20 力の拡大比を調整したときのブロック線図

上記図 4-20 は拡大比を調整できるようにしたときのブロック線図である。出力ゲインを調整する G_m, G_s が図 4-2 に比べて追加されている。マスタの電流指令値は式(4-8)で表される。

$$I_m = G_m \left(K_p (X_s - X_m) - s^2 X_s \frac{100}{s+100} \right) \quad (4-8)$$

提案手法でスレーブ側の電流指令値 I_s については、拡大比の調整と慣性力は無関係であるはずなので G_s によって増幅あるいは減少させた後に慣性力を補正される。従来法では式(4-9)、新規手法では式(4-10)のような関係になる。

$$I_s = \begin{cases} -\frac{G_s}{G_m} I_m & (4-9) \\ -\frac{G_s}{G_m} I_m - \frac{a}{M} & (4-10) \end{cases}$$

ここで拡大比率を式(4-11)のように置く。

$$\kappa = \frac{G_s}{G_m} \quad (4-11)$$

この拡大比率を $\kappa = \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1, 2, 3$ とした時の慣性力の影響について検証する。

実験においては前節までと同様に一辺 25(mm)の立方体を把持した状態で行う。ここで例えば $\kappa = 3$ で、スレーブが 3[N]の把持力で目標物体を把持した場合、操作者に伝えられる力触覚は 1[N]である。これにより操作者は物体を実際より柔らかく感じることになる。

出力を増幅させたときのほうが、同じ相対位置の変化でも増幅分だけ大きい力がフィードバックされる。つまり、増幅させたときのほうが慣性力を感じやすい。よって、慣性力の補正の有無でより相対位置の差が出るのは増幅させたときであると予想される。

この実験において、操作者は同じ力で物体を把持し続けるような操作を実行している。そのためスレーブと物体の間の作用力は拡大あるいは縮小されたもので一定である。よって操作者の受け取る力触覚はステージ台運動の影響を受けて振動することなく、一定の力であることが理想である。

今節では外部からの影響によるスレーブ台の運動を加速度で確認し、それによってマスタスレーブの出力がどう変化するかを見る。左右に特別な差はないため今回は左ハンドに注目する。

はじめに力の拡大をしている、拡大比率 $\kappa = 2, 3$ の時の(a)従来法と(b)新規手法で比較する。ステージ台の加速度は図 4-21、22 に示されており、なるべく似た運動になるよう外部から力を加えている。これらの運動をステージがするときのマスタスレーブの出力を見ていく。

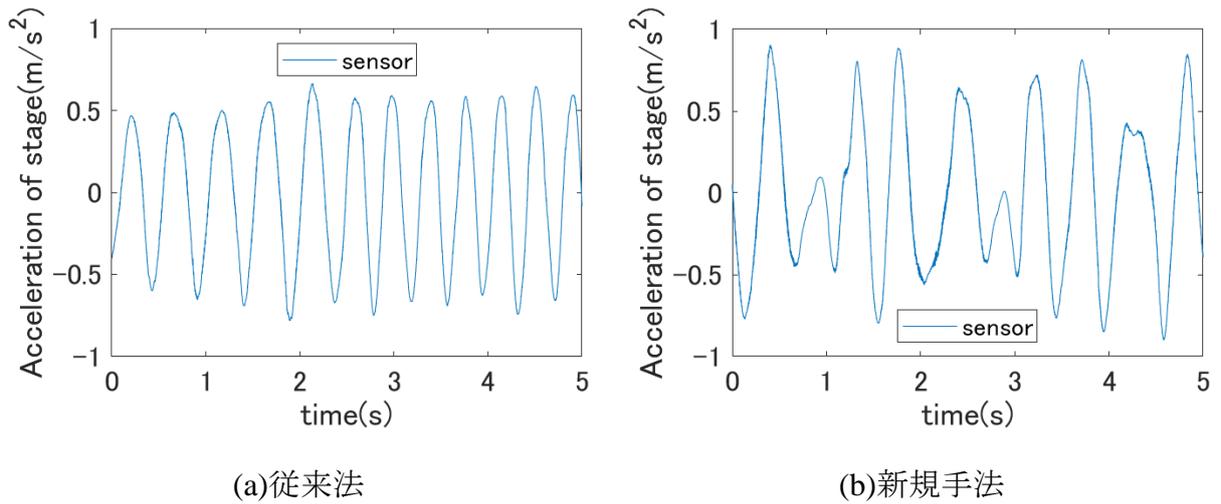


図 4-21 $\kappa = 2$ の時に加えられた外力によるステージ台の加速度

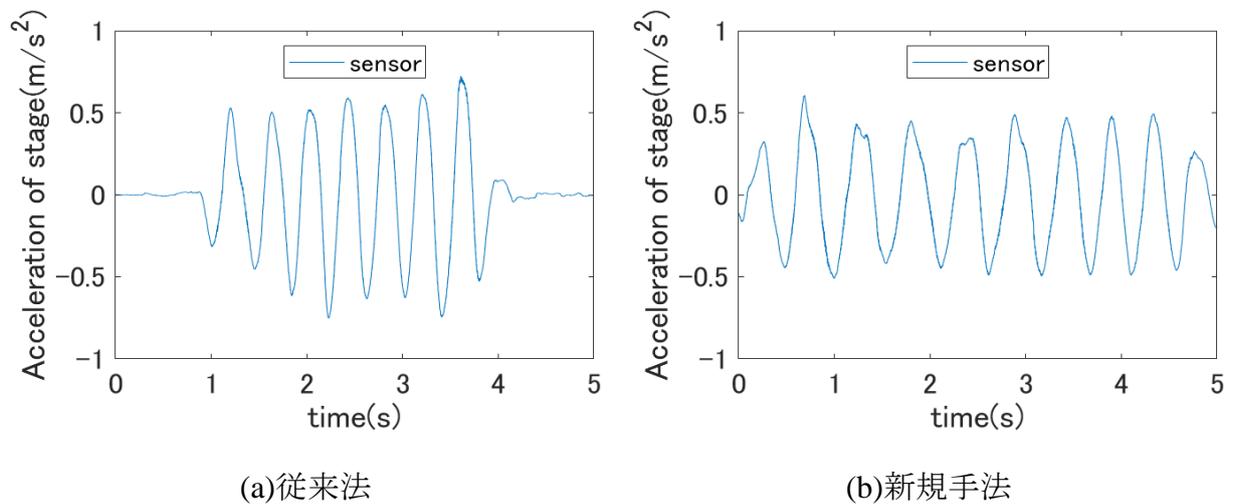


図 4-22 $\kappa = 3$ の時に加えられた外力によるステージ台の加速度

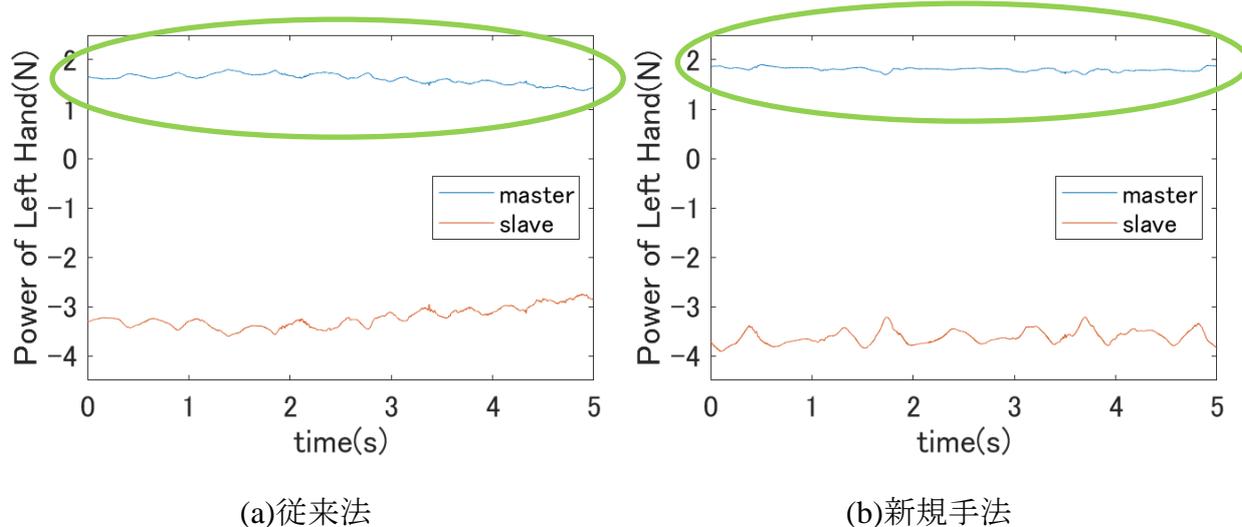


図 4-23 $\kappa = 2$ における左ハンドのマスタスレーブの出力

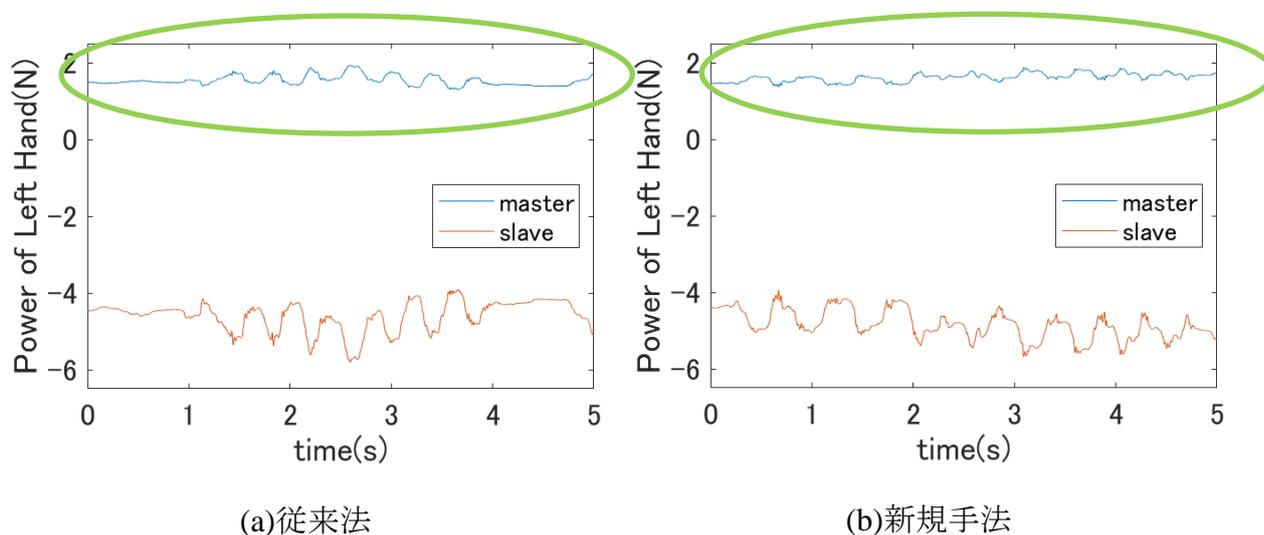


図 4-24 $\kappa = 3$ における左ハンドのマスタスレーブの出力

図 4-23、24 に $\kappa = 2, 3$ の時の(a)従来法と(b)新規手法における左ハンドの出力を示している。

赤線のスレーブのハンドに注目すると、図 4-23 より $\kappa = 2$ のときは3.5[N]程度で目標物体を把持している。

また図 4-24 より $\kappa = 3$ のときは5[N]程度で目標物体を把持している様子がわかる。

図 4-23、4-24 の青線より操作者に提示される力触覚であるマスタ出力は1.7[N]付近であるが、ステージ台の運動に合わせて振動していることが観察できる。

スレーブ台の運動による慣性力で振動が発生しており、その影響を見るため次項では緑で囲まれた青線部分を拡大する。

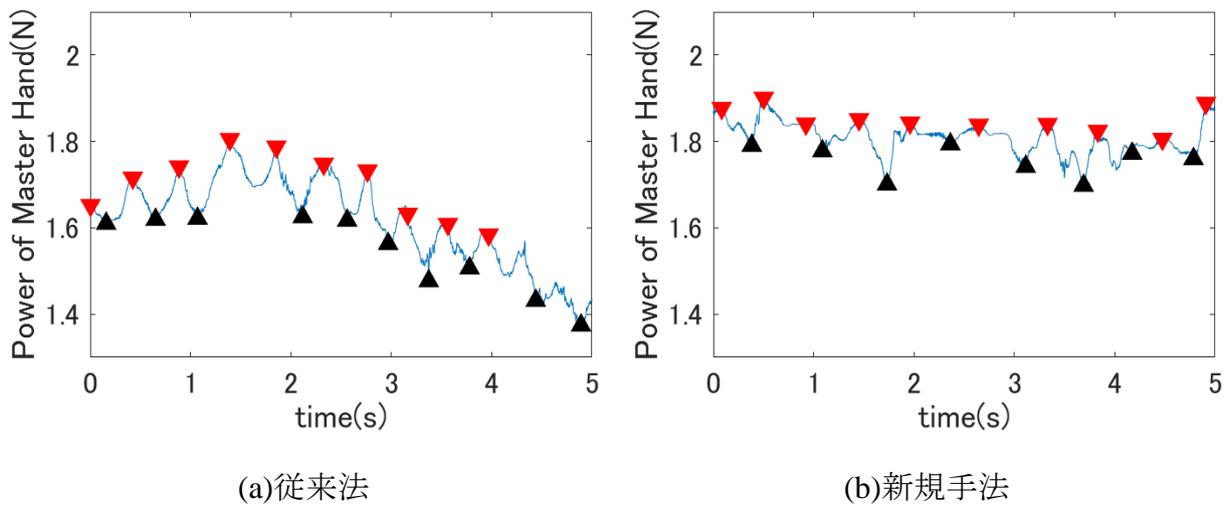
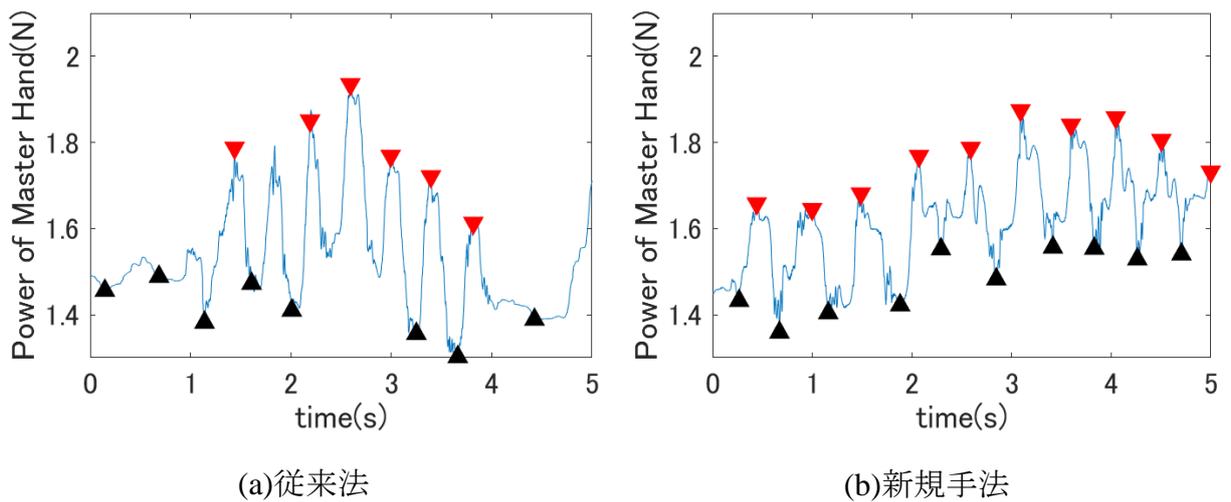
図 4-25 $\kappa = 2$ における左ハンドのマスタの出力も拡大図とピーク値図 4-26 $\kappa = 3$ における左ハンドのマスタの出力の拡大図とピーク値

図 4-25、4-26 は左ハンドのマスタ出力の拡大したものと同様のピーク値を示したものである。これを用いて振動の振幅を求める。縦軸の目盛りは同じになっている。

図 4-25 から $\kappa = 2$ において操作者が受けとる力触覚は(a)従来法で 0.156[N]ほどの振幅、(b)新規手法では 0.095[N]ほどの振幅となっており、精度として振動振幅が 38% 減少に改善したと評価できる。

図 4-26 から $\kappa = 3$ において操作者が受けとる力触覚は(a)従来法で 0.372[N]ほどの振幅、(b)新規手法では 0.281[N]ほどの振幅となっており、精度として 24% 減少に改善したと評価できる。

次に力の縮小をしている、拡大比率 $\kappa = \frac{1}{2}, \frac{1}{3}$ の時の(a)従来法と(b)新規手法で比較する。外力によるステージ台の加速度は図 4-27、28 に示されており、なるべく似た運動になるよう外部から力を加えている。これらの運動をステージがするときのマスタースレーブの出力を見ていく。

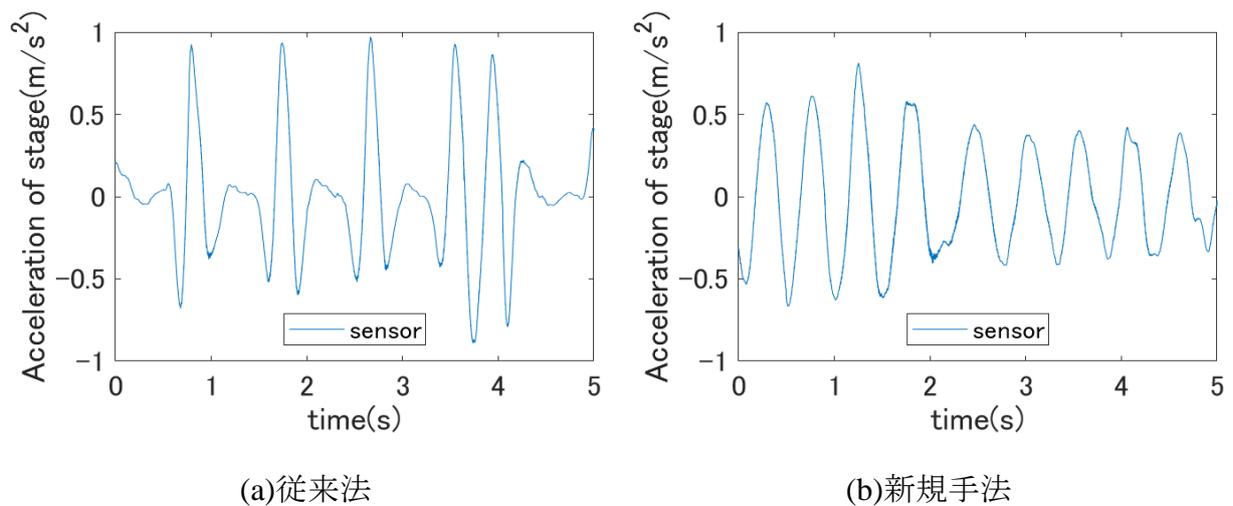


図 4-27 $\kappa = 1/2$ の時に加えられた外力によるステージ台の加速度

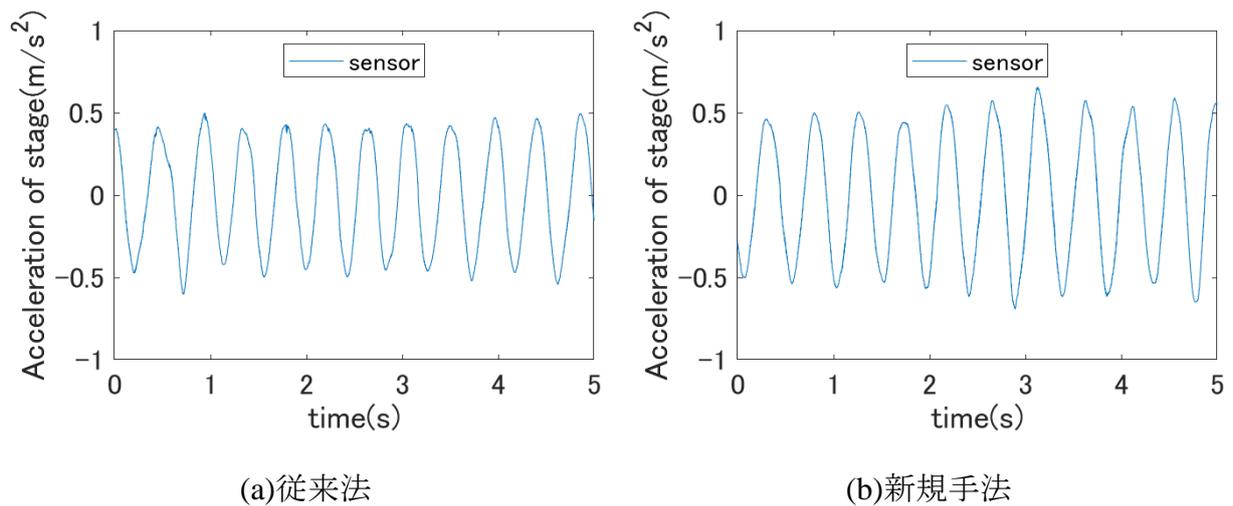


図 4-28 $\kappa = 1/3$ の時に加えられた外力によるステージ台の加速度

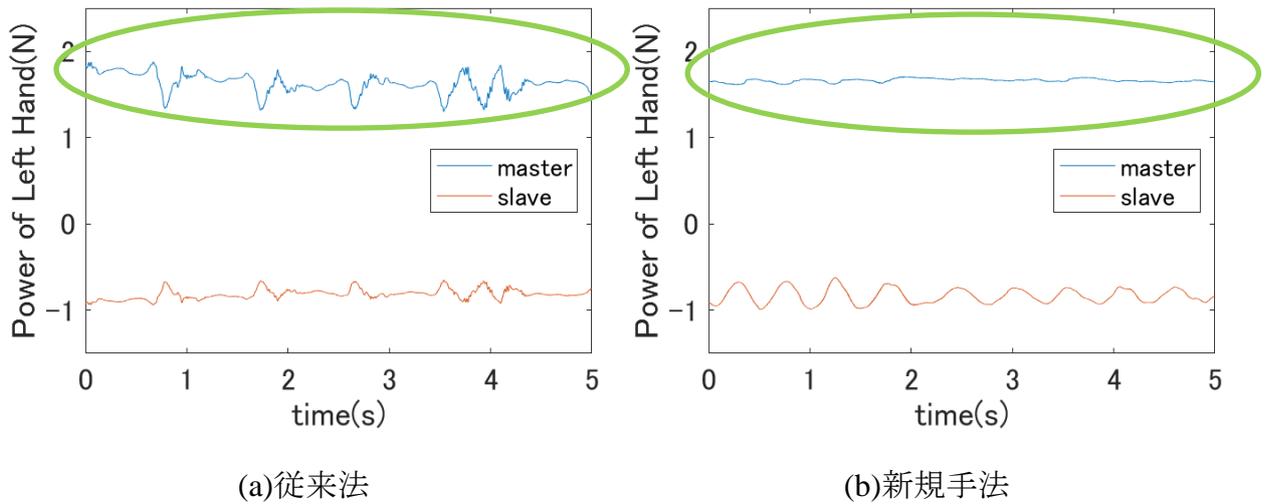
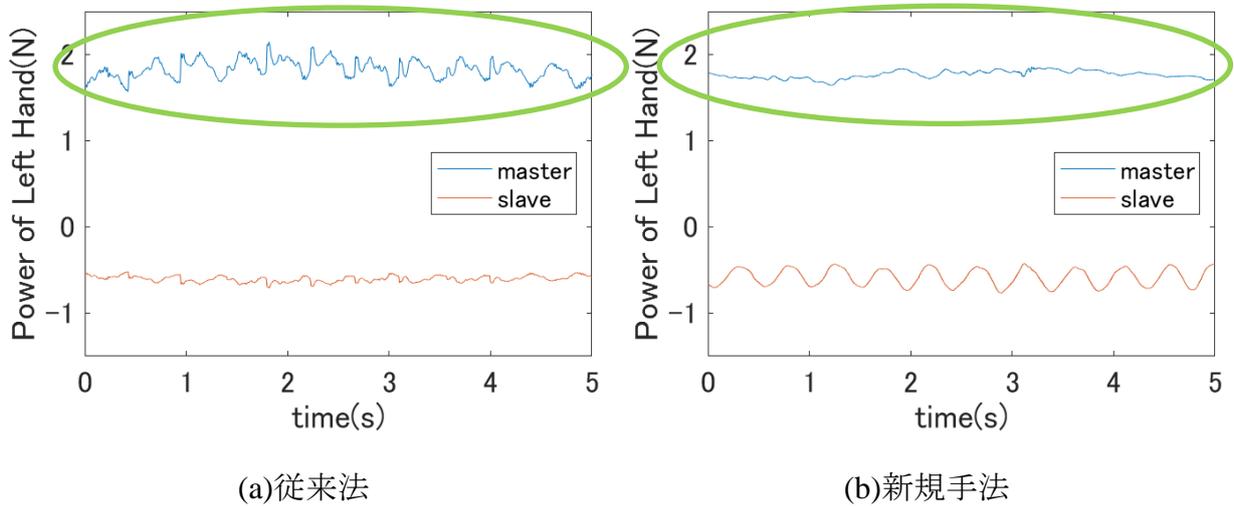
図 4-29 $\kappa = 1/2$ における左ハンドのマスタスレーブの出力図 4-30 $\kappa = 1/3$ における左ハンドのマスタスレーブの出力

図 4-29、30 に $\kappa = 1/2, 1/3$ の時の(a)従来法と(b)新規手法における左ハンドの出力を示している。

赤線のスレーブのハンドに注目すると、図 4-24 より $\kappa = 1/2$ のときは1[N]程度で、目標物体を把持していることがわかる。また、図 4-25 より $\kappa = 1/3$ のときは0.7[N]程度で目標物体を把持している様子が見える。

図 4-29、4-30 の青線より操作者に提示される力触覚であるマスタ出力は1.8[N]付近であるが、ステージ台の運動に合わせて振動していることが観察できる。

スレーブ台の運動による慣性力で振動が発生しており、その影響を見るため次項では緑で囲まれた青線部分を拡大する

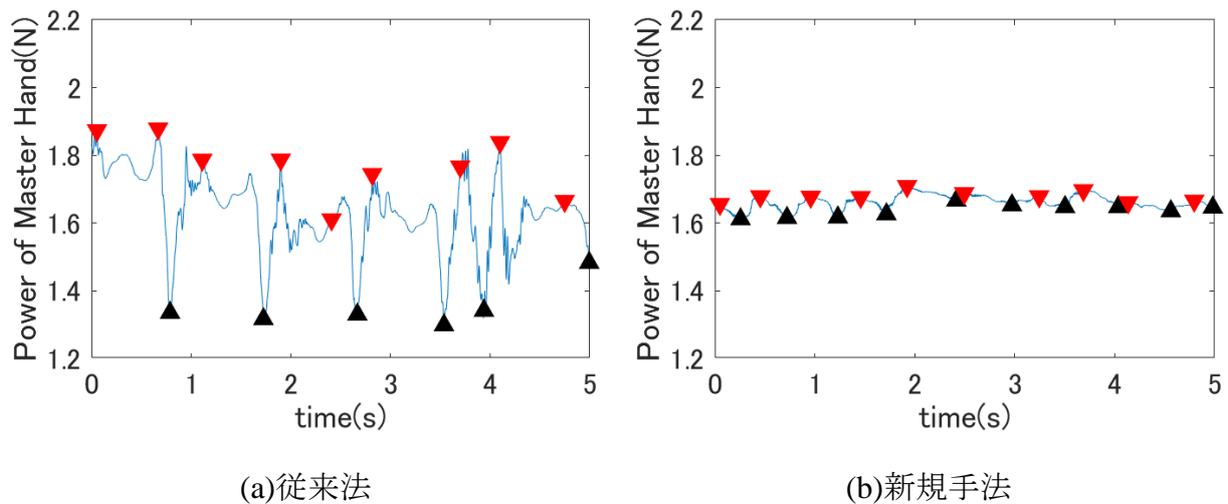


図 4-31 $\kappa = 1/2$ における左ハンドのマスタの出力の拡大図とピーク値

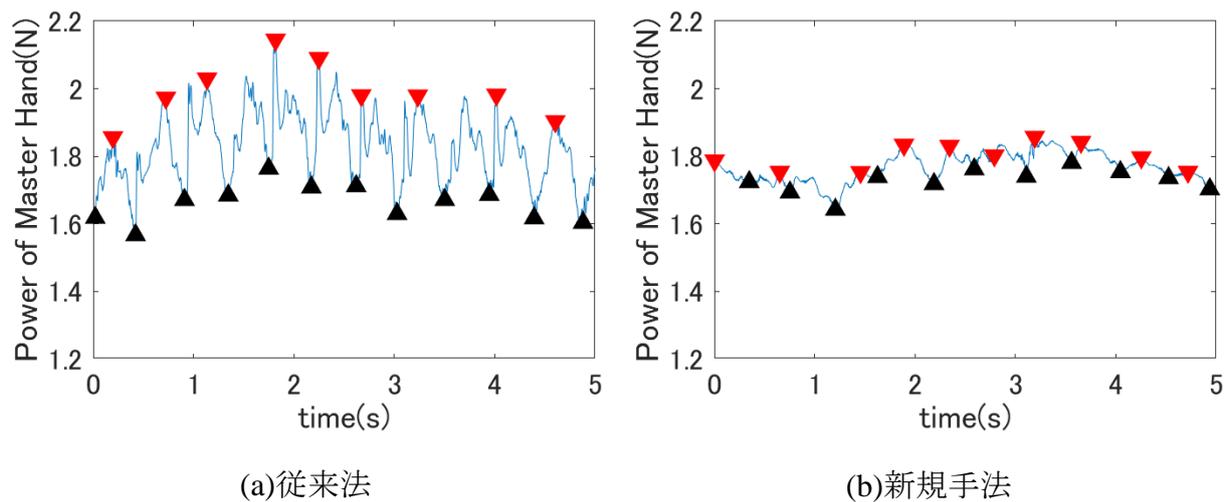


図 4-32 $\kappa = 1/3$ における左ハンドのマスタの出力の拡大図とピーク値

図 4-31、4-32 は左ハンドのマスタ出力の拡大したものとピーク値を赤と黒の三角形で示したものである。これを用いて振動の振幅を求める。縦軸の目盛りは同じになっている。

図 4-31 から $\kappa = 1/2$ において操作者が受けとる力触覚は(a)従来法で $0.421[\text{N}]$ ほどの振幅、(b)新規手法では $0.0421[\text{N}]$ ほどの振幅となっており、精度として振動振幅が 90%減少に改善したと評価できる。

図 4-32 から $\kappa = 1/3$ において操作者が受けとる力触覚は(a)従来法で $0.332[\text{N}]$ ほどの振幅、(b)新規手法では $0.0736[\text{N}]$ ほどの振幅となっており、精度として 78%に改善したと評価できる。

以上のように、拡大比率 $\kappa = \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1, 2, 3$ の時の(a)従来法と(b)新規手法で行った。

実験によって発生した振動の振幅と新規手法によって振幅がどれくらいの割合で減少したかをまとめたものが表 4-1 となる。ただし拡大比率 1 の部分は前節 4.3 の結果を使用している。

表 4-1 拡大比率の変化と振動の振幅、減少率の関係表

| 拡大比率 κ [倍] | (a)従来法[N] | (b)新規手法[N] | 減少率[%] |
|-------------------|-----------|------------|--------|
| 1/3 | 0.332 | 0.073 | 78 |
| 1/2 | 0.421 | 0.042 | 90 |
| 1 | 0.211 | 0.071 | 66 |
| 2 | 0.156 | 0.095 | 38 |
| 3 | 0.372 | 0.281 | 24 |

出力を増幅させたときのほうが、同じ相対位置の変化でも増幅分だけ大きい力がフィードバックされることから増幅させたときのほうが慣性力を感じやすい。よって、慣性力の補正の有無でより相対位置の差が出るのは増幅させたときであると予想されたが、実際にそのような結果となった。拡大比率が大きくなり力を拡大するほど慣性力の影響が大きいことが分かった。

一方、表 4-1 の減少率の列に注目すると細かい作業を行うために力の縮小をする場合において、新規手法はより慣性力を正しく補正することができるという示唆を得ることができた。

4.8 柔らかい目標物体を把持している時に台が運動する場合

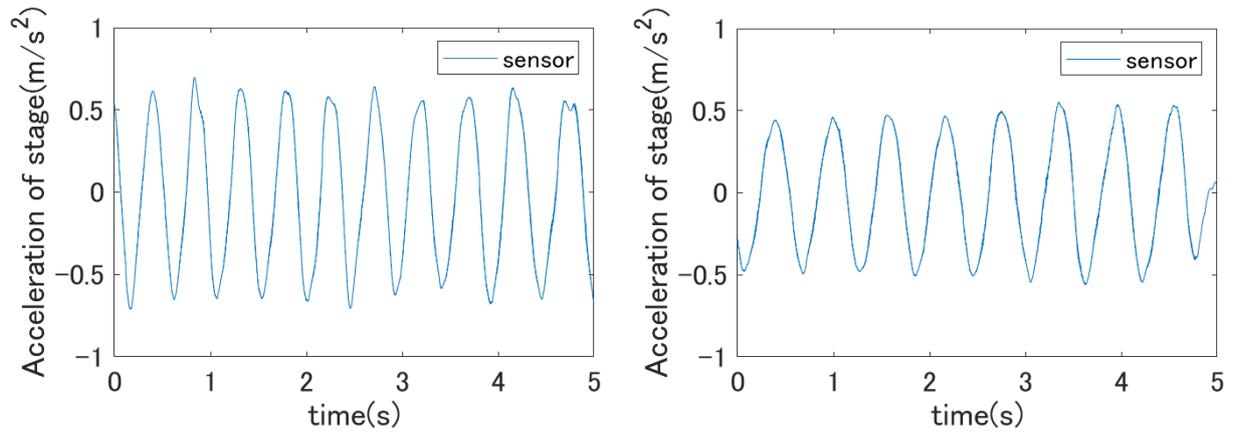
今までの議論において目標物体は十分な硬さがあり、スレーブハンドからの力で変形することのないものであった。今節では目標物体を柔らかい物体にし、強い作用力が働いた場合変形する可能性のあるものにする。

この節では、目標物体を柔らかいものとしスレーブハンドの出力によって変形を起こすものを把持している。把持している最中にステージ台に外乱を加え運動を持たせる。操作者はマスタハンドのモーター出力により力触覚を受け取る。このときスレーブは物体を同じ力で把持し続けているので、操作者の受け取る力触覚はステージ台運動の影響を受けて振動することなく、一定の力であることが理想である。また、スレーブと物体の間の作用力がステージ台の運動にかかわらず一定であり、柔らかい物体の形状変化させないことが理想である。

今回素材はスポンジであり一辺 25[mm]の立方体の形状をしたものを使用する。また、目標物体が変形するのに十分大きい力での操作を行うため、拡大比率は3倍にして実験をする。操作者は実験中スポンジを把持しようとしており、押しつぶしたりする意図はない。

これまでの議論同様、(a)従来法と(b)新規手法の2回実施し、その結果を比較する。評価方法は操作者にあるべき力触覚がフィードバックされているかという観点からとらえる。また、目標物体であるスポンジの形状の変化にも注目する。

図 4-33 は実際にステージ台の運動による加速度センサである。(a)従来法と(b)新規手法の各回においてなるべく同じような波形になるよう力が加えられている。



(a)従来法

(b)新規手法

図 4-33 加えられた外力によるステージ台の加速度

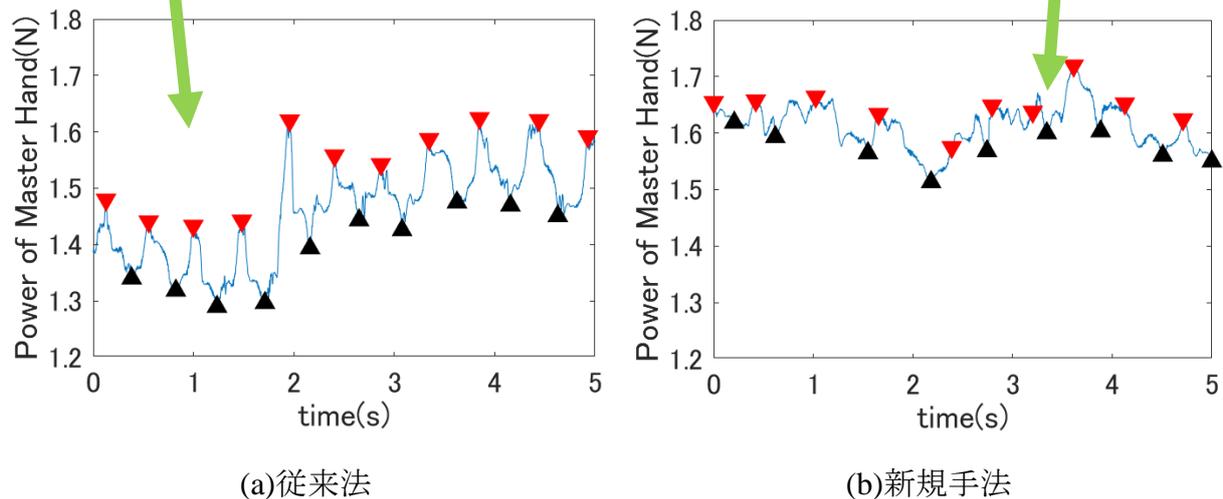
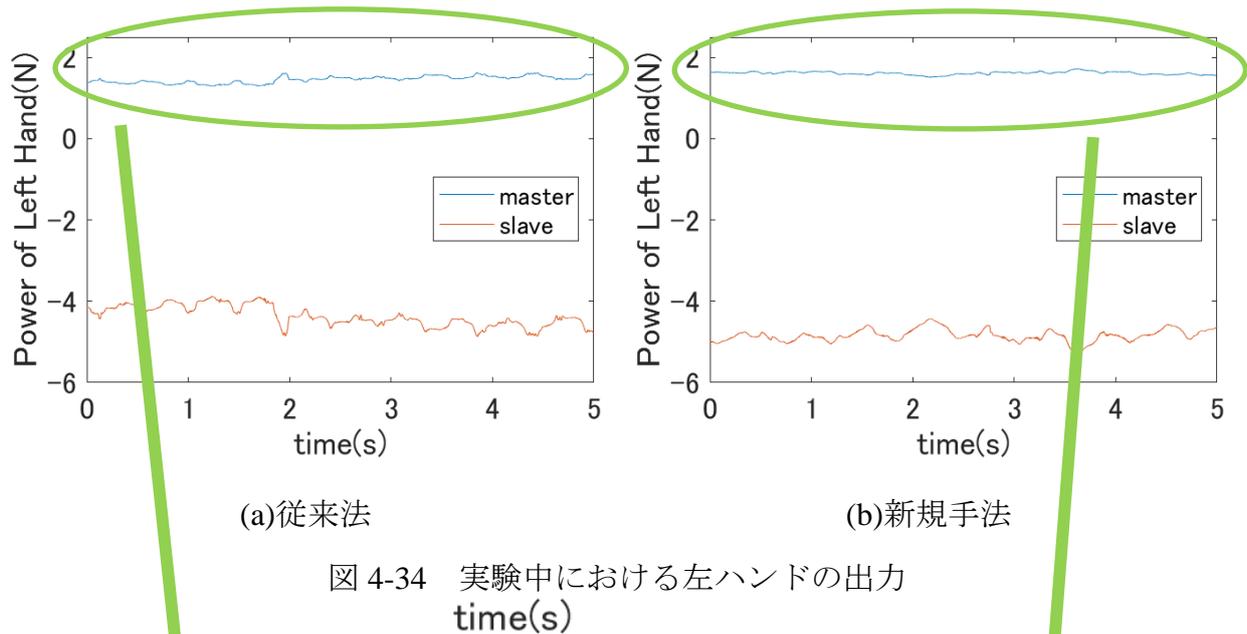


図 4-34 に実験中における左ハンドの出力を示す。どちらの手法においてもスレーブは約 5[N]の力で柔らかい物体を把持していることがわかる。スレーブ台の運動による慣性力によりマスタへ提示される力も振動している。

マスタの出力を拡大したものが以下の図 4-35 になる。振動の振幅を求める際に識別されたピーク値が赤と黒の三角で示されている。(a)従来法での振幅は 0.149[N]、(b)新規手法での振幅は 0.072[N]であったため、振動振幅を 51%減少したことになる。

今回の目標物体は柔らかいものであり、力を加えると変形する性質を持っているため次項で、操作中における物体の形状に着目した解析を行う。

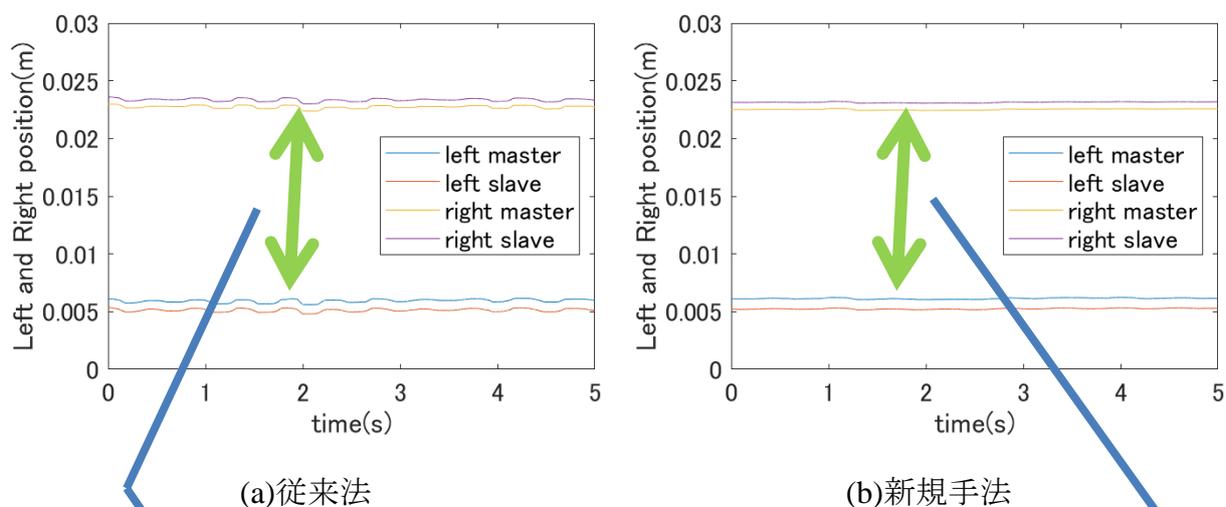


図 4-36 操作中におけるマスタスレーブの位置

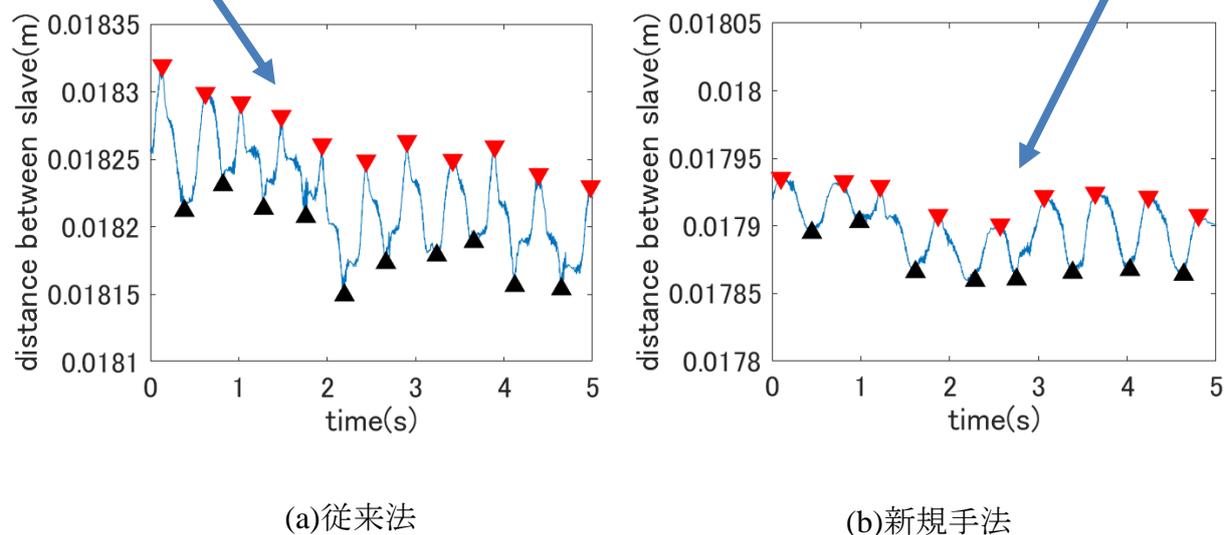


図 4-37 左右のスレーブハンドの距離とそのピーク値

今回の目標物体は柔らかいものであり、力を加えると変形する性質を持っていた。そこで、操作中における物体の形状に着目して解析を行う。

上の図 4-36 は操作中におけるマスタスレーブの位置情報を表したものである。この図中におけるスレーブハンドの間には今回の目標物体が挟まっている。つまり、スレーブハンドの間の距離を計測することで目標物体の厚さの時間変化がわかる。そこで緑の部分の差分を計算したものが図 4-37 となる。

図4-37はスレーブ側における左ハンドと右ハンドの距離を表したものになっている。もし物体が変形していないままで把持されている場合、この距離は25[mm]となる。この図よりスレーブのモーター出力によって約7[mm]スポンジは押しつぶされていることがわかる。

この図においてスポンジは押しつぶされて、もとに戻るといふ変形を周期的に繰り返している様子がわかる。この周期における局所的最大、最小値を赤と黒の三角で示している。そこから振幅を計算すると(a)従来法では0.0811[mm]、(b)新規手法では0.0427[mm]となっている。

これは台の運動から受ける慣性力とそれを受ける操作者の影響でスポンジの形状が変化しているが、実験中の操作者の意図は把持しているだけであるため、スポンジの形状変化は意図しないものである。そこで、上で計算された形状変化がなるべく少ない方がよいという観点から(b)新規手法にすることで振幅が47%減少し改善されたと評価することができる。

今節のまとめとして、目標物体が形状変化するような柔らかい物体の場合であってもマスタに出力される振動の力と、目標物体の形状変化の振幅という二つの観点から(b)新規手法の有効性が確認された。

4.9 考察

今回得られた結果をもとに考察を行う。

本研究で新規手法として利用した制御方法では、スレーブ側機構の加速度情報をもとに、スレーブハンド出力から慣性力分の力を引くことで補正している。つまり、スレーブ側で生じた慣性力をそのままスレーブハンドの補正に利用している。これにより実際に新規手法を用いた場合、ステージ台に起きる運動と同じ運動をスレーブハンドもしており、実験中におけるステージ台とスレーブハンドの間の相対偏差が従来法よりも小さくなっていることが、スレーブハンドの位置の時間変化を見るとわかる。相対偏差が小さくなった結果としてマスタに提示されるマスタハンド出力の振動振幅も小さくなっており、目標物体の力触覚を正確に伝送するという観点から制御方法による改善が見られた。

柔らかい物体を把持していた場合について、新規手法を用いることで物体の形状変化が小さくなる結果が得られている。従来法においては慣性力の影響でステージ台とスレーブハンドの間に相対偏差ができてしまい、その相対偏差によってスレーブハンドの間に挟まれている柔らかい物体は形状変化を起こしている。新規手法においてはスレーブハンドとステージ台の間の相対偏差が小さくなり、ステージ台の運動とスレーブハンドが同じ運動をしている。その結果スレーブハンドに挟まれている柔らかい物体はこれと同時に動いており、形状変化が小さいことにつながった。

力の拡大縮小をしているときの結果について考察する。今回の結果より新規手法により振動振幅を小さくすることはできたが、慣性力の影響が完全になくなったわけではない。新規手法においてもステージ台とスレーブハンドの間の相対偏差はまだ少し発生しており、それによりマスタに提示される力触覚はわずかに振動している。力の拡大を行う場合、操作者によって加えられる力に加えてこのわずかな振動の力を含めて拡大してスレーブハンドに伝送している。よって振動も同時に拡大してしまうため力の拡大を行ったときの、新規手法による振動振幅の減少率は、力が等倍での制御に比べ小さくなった。一方、力の縮小を行っている場合は拡大とは逆のことが起き、振動も同時に縮小して伝送するため振動振幅の減少率は高い結果が得られている。このことから力を拡大した場合においても同程度の改善率を実現しようとしたら、慣性力による影響を完全に近く補正することが必要である。

本研究ではスレーブ側機構の加速度情報をもとに、スレーブハンド出力から慣性力分の力を引くことで補正している。つまり、スレーブ側で生じた慣性力をそのまま

スレーブハンドの補正に利用しているもので、マスタハンド側に対しては補正を行っていない。今回、ステージ台の運動によるスレーブハンドとの間に発生する相対偏差を小さくすることで慣性力を補正することを行ったが、マスタハンド出力から慣性力分の力引くことで、慣性力の補正を行うことも可能であるはずである。本研究では振動振幅を小さくすることはできたが、慣性力の影響が完全になくなったわけではないため、さらなる改善案の一つとしてマスタ側の出力も補正の対象に含めた制御方法を実施することが今後考えられる。

4.10 まとめ

本章では実際にステージ台に外乱を加えたときに、従来の制御法と新規に提案する手法においてどのような違いが出るかを見てきた。

操作者にフィードバックされる力触覚情報が振動しているため、その振幅がなるべく少ない方がよいという判断のもと、制御法による違いを評価した。また、柔らかい物体を把持しようとしていた場合にはその物体の形状変化についても評価した。なお局所的最大、最小値を計算によってこれらの振幅は計算された。

目標物体が存在しない場合、一定の力で把持する場合、操作中に把持している場合、柔らかい物体を把持した場合のすべてにおいて新規提案手法の有効性を示す結果が得られた。これはステージ台の運動とスレーブハンドが同じ運動をすることでステージ台とスレーブハンドの間の相対偏差が小さくなることで、慣性力による影響を補正した結果である。

また、マスタスレーブの出力の拡大比がより小さい場合、つまり力を縮小して操作する場合は特に新規提案手法が有効であることも分かった。これは力の拡大を行う場合、振動の力を含めて拡大してスレーブハンドに伝送していることにより振動振幅の減少率は、力が等倍での制御に比べ小さくなった。一方、力の縮小を行っている場合は拡大とは逆のことが起き、振動も同時に縮小して伝送するため振動振幅の減少率は高い結果が得られた。

柔らかい物体を把持していた場合について、新規手法を用いることで物体の形状変化が小さくなる結果が得られた。新規手法においてはスレーブハンドとステージ台の間の相対偏差が小さくなり、ステージ台の運動とスレーブハンドが同じ運動をしている。その結果スレーブハンドに挟まれている柔らかい物体はこれと同時に動いており、形状変化が小さいことにつながった。

第5章 結論と今後の展望

| | |
|--------------------------------|----|
| 5.1 結論..... | 78 |
| 5.2 今後の展望..... | 79 |
| 5.2.1 慣性力のより正確な補正..... | 79 |
| 5.2.2 相対位置のずれ以外の影響についての考察..... | 79 |

5.1 結論

本研究ではバイラテラル制御系における力触覚の提示というテーマにおいて、スレーブ側のステージ台に外部から力が加わり運動を持った時の、スレーブハンドの慣性力が操作者に提示する力触覚に与える影響について考察してきた。

この慣性力はスレーブと目標物体とのあいだの作用力とは別物であり、目標物体の感触を知りたい操作者にとって不要な力触覚である。そこでこの慣性力を補正するための方策として、ステージ台に加速度センサをつけそのセンサ値をバイラテラル制御に組み込むことを新規手法とした。

実験では、従来法と新規手法を比較するにあたり、様々なマスタハンドの操作の条件によって実験を実施することで多くの角度から評価した。目標物体を設置せず把持していない時、目標物体を一定の力で把持している時、目標物体を操作によって把持している時、マスタスレーブの力の拡大比を変えた時、柔らかい目標物体を把持している時において従来法と新規手法を比較してきた。

本来スレーブと目標物体の間で存在しない力の慣性力の振動が、操作者に伝えられる力触覚であるマスタ出力にどの程度の振幅で含まれているのかで評価を行った。慣性力の振動の発生源はステージ台の運動である。その振幅の計算時には局所的最大値、最小値が用いられた。その評価を行い新規手法の有効性を示す結果を得ることができた。

新規手法を用いて相対偏差を抑えることで慣性力の影響を補正できている点は前節で行った一定の力で把持した状態の時と同じである。操作中において目標物体を把持している場合において新規手法を用いたハンドのほうが従来法のハンドより振動を少なく伝えており、理想に近いことがわかった。

また、マスタスレーブの出力の拡大比がより小さい場合、つまり力を縮小して操作する場合は特に新規提案手法が有効であることも分かった。これは力の拡大を行う場合、振動の力を含めて拡大してスレーブハンドに伝送していることにより振動振幅の減少率は、力が等倍での制御に比べ小さくなった。一方、力の縮小を行っている場合は拡大とは逆のことが起き、振動も同時に縮小して伝送するため振動振幅の減少率は高い結果が得られた。

5.2 今後の展望

5.2.1 慣性力のより正確な補正

本研究により、新規手法において慣性力による振動を抑制することは可能となった。しかし、完全に慣性力の影響を補正できたわけではなく、微妙な振動は操作者に伝わる場所であった。また、特にマスタスレーブ間で力の拡大を実施した場合はその振動の与える影響は大きくなっており、より正確な慣性力の補正が求められる。

改善策の一つとして考えられるのは、実際のバイラテラル制御装置に近いより緻密な動力学モデルを組むことである。今回用いた動力学モデルではスレーブハンドとステージ台の間にはボイスコイルモータによる作用反作用力のみがあるととらえていたが、実際にはステージ台が運動する際そこには摩擦も発生する。この摩擦によって計算によって出される慣性力の理論値とずれた場合はその力触覚が操作者に伝わることとなる。そこで摩擦なども考慮に入れた動力学モデルを考え慣性力をより正確に求める作業が求められる。

また、今回ステージ台の運動によるスレーブハンドとの間に発生する相対偏差を小さくすることで慣性力を補正することを行ったが、マスタハンド出力から慣性力分の力引くことで、慣性力の補正を行うことも可能であるはずである。本研究では振動振幅を小さくすることはできたが、慣性力の影響が完全になくなったわけではないため、さらなる改善案の一つとしてマスタ側の出力も補正の対象に含めた制御方法を実施することが今後考えられる。

5.2.2 相対位置のずれ以外の影響についての考察

本研究では相対位置のずれによる慣性力を主に扱ってきた。これは遠隔にあるスレーブと目標物体はともに同じ程度外部からの影響を受けている場合の操作で有効である。一方で、目標物体が地中に固定されているなど、ステージ台は外部からの力で運動をもつが目標物体は動かない場合における操作にはあまり適応できない。これは目標物体が静止しており、スレーブハンドの絶対座標がずれるためである。これを解決するのに、静止している目標物体との間の位置情報を導入しそこから算出される慣性力を補正することが考えられる。

謝辞

はじめに、指導教員の佐々木教授には 2 年間多大な御享受、御指導をしていただきました。ここに厚く感謝いたします。

本研究テーマは研究室の中でも新しく毛色の異なるものであり、苦労しているときや行き詰っているときに適切な指導を指定いただいた皆様にも心より感謝申し上げます。

最後に、この 2 年間多くのご協力をしてくださった環境情報マイクロシステム学分野の皆様に感謝を申し上げます。

2022 年 2 月
吉本理

参考文献

<和文文献>

[2]

横小路泰義:”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.

[6]

水島 知央, 神蔵 貴久, 大前 学” 遠隔型自動運転システムにおける遠隔操作時の映像遅延が操舵の操作に与える影響の評価”, 自動車技術会論文集, 2019 年 50 巻 3 号 p. 970-976.

[7]

桂誠一郎, 大西公平: “バイラテラル制御による力覚の伝達と再現,” 電子論 D, 12 巻, 11 号, pp 1371-1376, 2003.

[8]

山本晃生: “触覚ディスプレイの研究動向”, ロボティックバーチャルシステム, 計測と制御 第43巻 第2号 2004年2月号.

[12]

名取賢二: Roberto Oboe: 大西公平: “通信外乱オブザーバを用いたむだ時間制御系のモデル誤差に対するロバスト性”, 2008 The Institute of Electrical Engineers of Japan, 2008.

[13]

鈴木敦、大西公平:”通信外乱オブザーバを用いた通信遅延下におけるバイラテラル遠隔操作の適応的性能調整手法”, 2011 The Institute of Electrical Engineers of Japan, 2011.

[14]

鈴木敦、大西公平:”通信遅延下におけるバイラテラル遠隔操作の再現性と操作性”, 電気学会論文誌 D Vol. 133 No.7 pp. 738-746, 2012.

[16]

古明地秀治、佐藤克成、南澤孝太、渡邊孝一、新居英明: “ロボットハンド操作システムのための円筒型多点力ベクトル入力インターフェース”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌、Vol. 16, No. 3 pp. 415-426, 2011.

[17]

赤羽克仁、高見豪、佐藤誠: “フレームの可動機構を持つワイヤ駆動多指型ハプティッ

クインターフェースの開発”、日本バーチャルリアリティ学会論文誌、Vol. 16, No. 3
pp. 441-448 , 2011.

[18]

大西公平：“外乱オブザーバによるロバスト・モーションコントロール”、日本ロボット学会誌 Vol.11 No.4, pp.486～493, 1993

[19]

大西公平：“力触覚のあるロボット”、人工臓器 47 巻 1 号 2018 年

[20]

横小路泰義：“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

[21]

桂誠一郎、大西公平：“バイラテラル制御による力触覚の伝達と再現”、電学論 D,123
巻 11 号,2003

[22]

村上俊之、中村亮、郁方銘、大西公平：“反作用力推定オブザーバに基づいた多自由度ロボットの力センサレスコンプライアンス制御”、日本ロボット学会誌 Vol.11No.5,PP.765
～768,1993

[23]

入江航平、桂誠一郎、大石潔：“位置・加速度入力型外乱オブザーバによる広帯域モーションコントロール”、電学論 D,127 巻 6 号,2007

<英文文献>

[1]

Yang Dong ; Shuangxin Wang ; Hairui Liu:” Establishment of remote measure and control system based on complex dynamic objects” ,2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments,2009.

[3]

S. J. Phee ; S. C. Low ; V. A. Huynh ; A. P. Kencana ; Z. L. Sun ; K. Yang:”” Master and slave transluminal endoscopic robot (MASTER) for natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery (NOTES), 2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2009.

[4]

Guang Wen : Dingxuan Zhao : Hongyan Zhang ; “Research on Bilateral Control Strategy of Tele-operation 4 -DOF Manipulators with Force Tele-presence”, World Congress on Intelligent Control and Automation July 6 -9 2010, Jinan, China

[5]

Toshiyuki Murakami, Fangming Yu, and Kouhei Ohnishi: “Torque Sensorless Control in Multidegree-of-Freedom Manipulator”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 40, NO. 2, APRIL 1993.

[9]

Tkahiro Nozaki: Takahiro Mizoguchi: Kouhei Ohnishi; “Real-World Hapticsfor Motion Realization”, IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 2 No.1 pp. 1-6,2012.

[10]

Kohei Ohnishi: Takahiro Nozaki: Takahiro Mizoguchi; “Motion-copying System with Variable Impedance based on Scaled Bilateral Conyrol in One-degree-of-freedom Robot”, IEEEJ Journal of Industry Applications, Vol.3 No.1 pp.1-9,2013.

[11]

Dangxiao Wang: Kouhei Ohnishi: Weiliang Xu;” Multimodal Haptic Display for Virtual Reality: A Survey”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 67, NO. 1, JANUARY 2020

[15]

Tiehua Chen: Dingxuan Zhao: “Research on Master-Slave Robots Bilateral Control Strategy with Force Tele-Presence” , International Conference on Automation and Logistics August 18 - 21, 2007, Jinan, China.

[24]

Emre SARIYILDIZ, Davide CATTIN, Kouhei OHNISHI: “Improving the Performance of Higher Order Disturbance Observers: A Position Approach”, The 12th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control March 25-27, 2012, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina

[25]

Dale A. Lawrence: “Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation”, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION. VOL. 9, NO. 5. OCTOBER 1993

[26]

Keyvan Hashtrudi-Zaad and Septimiu E. Salcudean: “Transparency in Time-Delayed Systems and the Effect of Local Force Feedback for Transparent Teleoperation”, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, VOL. 18, NO. 1, FEBRUARY 2002

[27]

Wataru Iida, Kouhei Ohnishi: “Reproducibility and Operationality in Bilateral Teleoperation”, The 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 2004. AMC '04.