

東京大学大学院新領域創成科学研究科  
人間環境学専攻

2019 年度

修士論文

加速度情報を利用した  
遠隔操作システムの操作性向上

2020 年 2 月 4 日提出

指導教員 佐々木 健 教授 印

学籍番号 47186700

金山 泰樹

---

# 目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	2
1.1.1 遠隔操作装置.....	2
1.1.2 人の作業履歴を用いたパラメータ設計手法.....	3
1.1.3 実験的パラメータ設計手法.....	4
1.1.4 実験的パラメータ設計手法.....	5
1.2 研究目的.....	6
1.2.1 遠隔操作装置におけるハプティックデバイス.....	6
1.2.2 バイラテラル制御によって得られる操作感.....	7
1.2.3 提案手法と研究目的.....	8
1.3 本論文の構成.....	10
第2章 遠隔操作用グリッパ型マスタ・スレーブ装置.....	11
2.1 遠隔操作用マスタ・スレーブ装置の力覚提示.....	12
2.1.1 力覚.....	12
2.1.2 バイラテラル制御とその分類.....	12
2.2 遠隔操作用グリッパ型マスタ・スレーブ装置.....	14
2.2.1 はじめに.....	14
2.2.2 アクチュエータ.....	16
2.2.3 位置情報取得.....	17
2.2.4 制御用ツール.....	17
2.2.5 電圧電流変換アンプ.....	18
2.3 マスタ・スレーブ装置の静特性.....	19
2.3.1 マスタ・スレーブ装置の単位ステップ応答.....	19
2.3.2 マスタ・スレーブ間の位置追従性.....	22
2.4 位置制御型マスタ・スレーブ操作の考察とまとめ.....	24

---

第3章 力と加速度の計測情報を取り入れた制御 .....	25
3.1 はじめに .....	26
3.2 力と加速度の計測 .....	27
3.2.1 力の計測 .....	27
3.2.2 加速度センサ .....	29
3.3 力と加速度による接触の検出と提示 .....	30
3.3.1 接触検知と接触提示用信号 .....	30
3.3.2 滑り感覚提示 .....	32
3.3.3 感覚検出のパラメータ設定 .....	34
3.4 マスタ・スレーブ間の位置誤差と感覚提示用信号 .....	37
3.5 力と加速度を含めた制御のまとめ .....	42
第4章 力と加速度の計測情報を取り入れた制御に関する官能評価 .....	43
4.1 はじめに .....	44
4.2 実験概要 .....	45
4.3 官能評価結果 .....	49
4.3 官能評価まとめ .....	51
第5章 結論と今後の展望 .....	53
5.1 結論 .....	44
5.2 今後の展望 .....	55
参考文献 .....	57
謝辞 .....	59

# 第1章 序論

---

1.1 研究背景.....	2
1.1.1 遠隔操作装置.....	2
1.1.2 人間の触覚情報.....	3
1.1.3 既存のハプティックデバイスとその手法.....	4
1.1.4 既存の遠隔操作における触感向上.....	5
1.2 研究目的.....	6
1.2.1 遠隔操作装置におけるハプティックデバイス.....	6
1.2.2 バイラテラル制御によって得られる操作感.....	7
1.2.3 提案手法と研究目的.....	8
1.3 本論文の構成.....	10

---

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 遠隔操作装置

近年、人間が作業現場で直接作業できないような場所にマニピュレータを設置し、作業現場から離れた場所で操作する遠隔操作技術の研究が盛んである。これは危険物処理や海中作業、手術支援などにも応用されている [1]。他にも人間の細胞操作や高収積化が進む電子回路設計の様なマイクロ分野への利用が期待されている。

遠隔操作システムとは操作者の腕や指の運動をそのまま作業現場のマニピュレータが再現するマスタ・スレーブ型のマニピュレータが多く、その操作性の良否は運動の自由度や運動伝達の正確性とともにより操作の臨場感が重要となる。この操作の臨場感というものは人間の五感の中でも特に視覚、触覚で再現されている。視覚は 3D 映像に代表される視覚情報提示技術に関する研究が多く進められており、3D ディスプレイなど実用化されているものも多い。触覚が物体を操作する上で極めて重要な情報であることは我々の日常生活からも容易に想像することができる。これは遠隔操作システムにおいても同様であり、触覚情報を操作者へ伝えることは操作の臨場感、ひいては操作性の向上につながる。

### 1.1.2 人間の触覚情報

人間の触覚情報には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皮膚感覚あるいは触感がある。前述した手術支援ロボットとして実用化されている Da Vinci [2]は従来の手術と比べ患者への負担が小さい反面、画像のみを頼りに操作を行うため操作に熟練を要する [3]。この解決策の一つとして遠隔操作装置の力覚提示を行うバイラテラル制御 [4]というものが研究されており、多自由度への対応や通信遅延下の操作性向上が課題となっている。反面、触感提示ではセンサ素子自体の研究が多く、センサ素子が得た触覚情報の提示方法が確立されていない。そのため遠隔操作での利用例は少ない。

遠隔操作システムの触覚提示には根本的な問題がある。触覚提示を行うためには物体との接触情報などを取得する触覚センサを用い、センサで得た信号が操作者の腕や指に再現される。しかし、触覚センサの表面と人間の皮膚の材質は異なるため作業対象物との物理的な接触状態が異なり、接触に伴う変形や振動も人間が直接物体に触れた場合とは異なるものである。さらに触覚センサの素子の分布や変換特性は人間の触覚神経と同等ではない。このことから触覚センサで得た信号をそのまま触覚提示デバイスへ入力するという事は、必ずしも触感を正しく伝えているということにはなりえない [5]。従って、操作者が物体に直接触れたような触感を提示するためには、接触状態に応じて人間の触覚特性を考慮した信号を用意し提示する必要がある。

### 1.1.3 既存のハプティックデバイスとその手法

実用化されているハプティックデバイスで最もわかりやすいものはスマートフォンやゲームコントローラーに搭載されている振動を提示するものだろう。あの振動によって操作者は画面内の状態を視覚以外で知ることができる。ハプティックデバイスが作成される目的は、視覚に加えて他の情報となる触覚を提示するためであるがその方法はさまざまである。筋肉を中心とした力覚提示、皮膚を中心とした触感提示、それらの融合や中間となる触覚提示について説明する。

力覚提示では単純な手法として仮想ばねによる提示が挙げられる。操作者の指や腕の動きを取得し、仮想物体との差を算出する。その差にばね定数を乗算した力を操作者へ提示することで仮想物体を操作者へ実感させる。指や腕の動きを検出するセンサには位置センサや加速度センサ、力センサ、カメラなど多種多様であるが、力を提示するものはほとんどがモータを利用している。

触感提示においては振動やピンアレイを利用するものが挙げられる。ディスプレイを振動させることでタッチ操作にクリック感を付与するもの [6]や、上下に振動するピンアレイを皮膚に装着させ装着者の動きに合わせて刺激を変化させるものがある。また、近年では空中超音波の放射圧を利用したディスプレイ [7]がある。これは皮膚から離れた場所にある超音波スピーカー群によって放射圧で触覚を提示するというものである。

触覚提示デバイスとして製品化されているものでは 3DSYSTEMS 社の 3DSystems Touch [8]が挙げられる。これは操作者が PC 上の仮想オブジェクトに触れて操作できる高精度の力覚インタラクションを実現するハプティックデバイスである。3 次元オブジェクトと作業者の動的なインタラクションにおいて、視覚情報だけでなく力覚情報を加えることにより、物体に触れたときに手に伝わる反力をリアルに再現し操作性を向上する。

これらの多くは人工的に触感を生み出すことが目的であり、遠隔操作システムとして触覚センサとの組み合わせを想定したものではない。そのためデバイスの大きさは遠隔操作システムのマスタハンドに搭載できるほど小型のものが少ないという問題がある。

#### 1.1.4 既存の遠隔操作における触感向上

遠隔操作における触感向上は大きく二つに分類することができる。一つは既存の制御系の中にあるパラメータを用いて対象物の状態を推定し、その推定値を利用してフィードバックを行う方法。もう一つは新たなセンサを搭載して実際の情報量を増やしフィードバックを行う方法である。前者のスレーブハンドは従来装置を使用することができるため、マスタハンドにアクチュエータがあればそのまま利用することが可能となる。しかし、スレーブハンドの制御値、例えばアクチュエータの電流値からスレーブハンドの状態を推定するためより細かな制御が求められる。一方新たなセンサを搭載する場合、接触検知や圧力分布を知ることにより正確な状態を把握できる。しかしどのような情報をどのように利用するかという基準がないため未だ手探りの状態である。また、情報量の増大により演算処理能力の要求があがることも考えられる。

既存の制御系パラメータを利用する方法として外乱オブザーバ [9]や反力推定機能 [10]を利用するものがある。これらの利点としてアクチュエータにセンサが不必要となることである。また、大西らは加速度制御をもとに様々な制御系を実現した [11] [12]。加速度制御は外乱に対してロバストな制御系であり、他にもスライディングモードベースの加速度制御 [13] [14]が強力な手法として知られている。しかし、これらの多くは制御系を構築することが主であり触感に言及しているものは少ない。

新たなセンサを搭載ものは数多くの研究がなされている。搭載されるセンサも圧力やひずみ、振動、位置、角度、カメラによる画像解析などがある。圧力センサを利用する例として把持物体の滑りを検出するものがあり、Gunji [15]らは圧力中心触覚センサを使用して把持中のスリップ検出を行っている。同様に滑りを検出するにもひずみゲージを使用するものも存在する [16] [17]。カメラによる画像解析としてはTachThumb [18]が挙げられる。親指と人差し指を模したロボットハンドの片方の指腹部にカメラを搭載し、もう一方から光を当てることで把持物体の形状や位置を測定する。これにより手の複雑な運動モデルを必要とせず、基本的な触覚操作を可能としている。



## 1.2 研究目的

### 1.2.1 遠隔操作装置におけるハプティックデバイス

従来の遠隔操作システムの制御系は基本的にマスタ・スレーブで同じ状態を作り出すことが求められる。これに着目したものがバイラテラル制御でありその理想的な制御目標は、

$$X_m = X_s \quad (1.1)$$

$$F_m = -F_s \quad (1.2)$$

で表される。 $X, F$  はそれぞれ位置、力であり、 $m, s$  はマスタとスレーブを表す。すなわち、マスタとスレーブで位置の誤差がなく、力が逆向きで釣り合いの状態であることが求められる。しかしこれら二つを同時達成することは理想目標であり現実では達成し得ない。そのためマスタ・スレーブそれぞれ位置もしくは力の 1 つの情報を送受信する 2 チャンネル型 [19] や、その両方を送受信する 4 チャンネル型と分けて研究されている。

理想目標を見ればわかるようにバイラテラル制御では装置の力や位置を提示する。そのため力覚提示が主であり触感の提示を行っているものは少ない。力の提示と触感の提示を同時に行っているものとして Rebecca ら研究 [20] が挙げられる。指先でつまむ動作を対象として、指の開閉動作にはギアを用いた DC モータで、指腹の圧迫にはボイスコイルモータでフィードバックを再現している。スレーブには市販の PR2 ヒューマノイドロボットを使用し、指先の圧力センサ群と加速度センサによってつまむ動作を検出している。この研究では指の開閉動作という力覚提示と、指腹の圧迫や振動という触感提示を別の駆動装置を用いて提示しているが、加速度センサや圧力センサで検出した情報をそのままボイスコイルモータで再現しているため、遠隔操作装置における根本的な問題を解決しているとは言えない。人間が感じるような触感を提示する場合、スレーブ側で得た情報に何らかの付加情報を加えマスタ側へ送る必要があると考えられる。そのためバイラテラル制御を直接用いることが不可能であり異なる制御系が求められる。

### 1.2.2 バイラテラル制御によって得られる操作感

前節で述べた通りバイラテラル制御は主に力覚を提示する。また、理想目標から自明であるように、操作者が与えた変位や力が等しく返ってくる制御である。しかし、装置の可動範囲や出力可能な力に限界があるため操作感が大きく異なる。マスタハンドを操作しスレーブハンドで物体に触れもそれが分からない。マスタハンドを大きく閉じてはじめて力が提示されていることに気づくため、スレーブハンドがいつ接触していたかということが判別不可能である。これは主にばねのような感覚と表現される。また、スレーブハンドで把持していた物体が滑り動作を行っていてもマスタハンドでは何も起こっていないように感じてしまう。そもそもバイラテラル制御は位置や力を制御対象としているため、ハンドの位置に変化を伴わない滑りのような運動は検知・提示ともに困難である。外乱オブザーバ [9]の反力推定機能 [10]を用いることで加速度次元の応答値を推定し物体の柔らかさによって異なった反力の提示を行う手法も存在する。しかし位置センサや力センサだけでは振動のような触感に關与する信号を検出しにくい。そのため他のセンサによって情報を増やし操作感を向上させる必要がある。

### 1.2.3 提案手法と研究目的

本研究では操作感の向上として従来のバイラテラル制御では判別しにくい以下の2点に着目する。

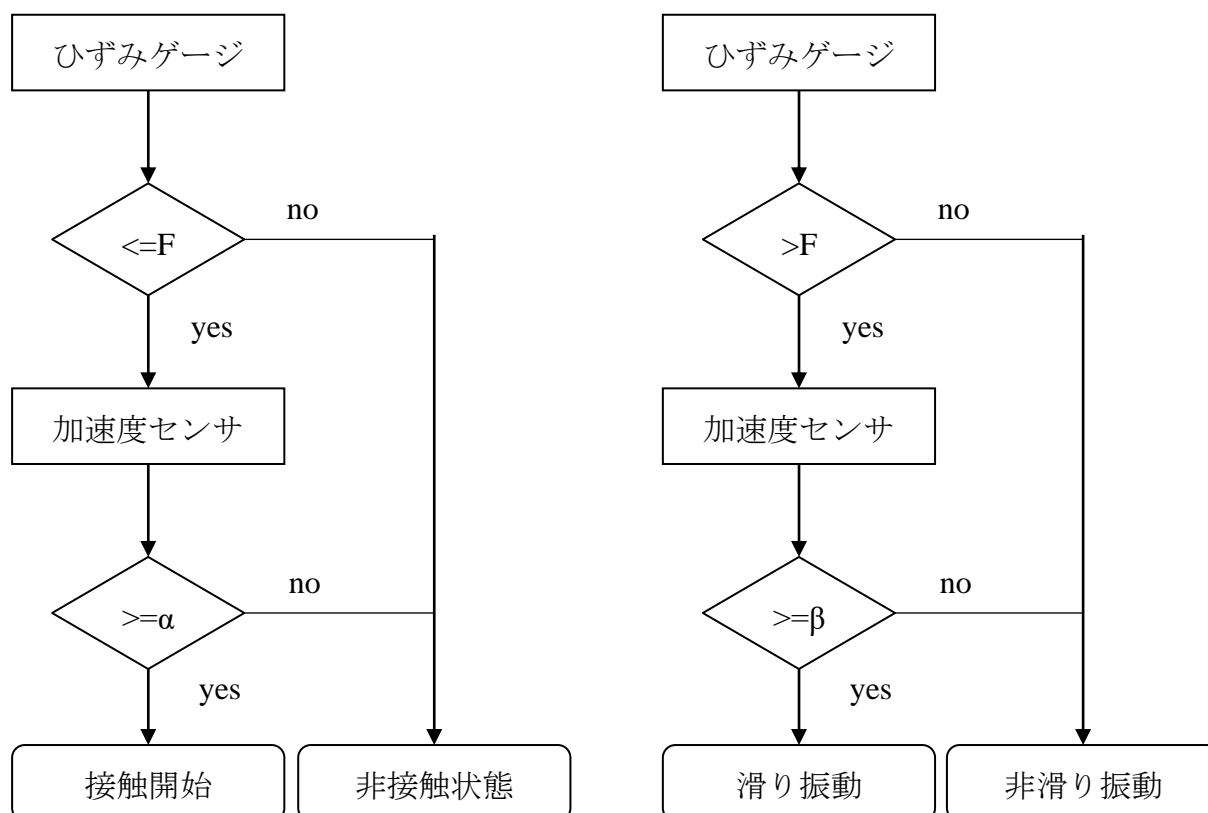
#### 1.接触開始の検出と提示

#### 2.滑りの検出と提示

これらの解決のため位置制御で利用するポテンションメータの他に触覚センサとしてひずみゲージと加速度センサを使用する。提案手法による状態判別のフローチャートを Fig.1-1 に示す。

1.接触開始の検出ではスレーブハンドに装着したひずみゲージによる力がある値  $F$  以下であり、かつ加速度センサの出力が一定値  $\alpha$  以上となったとき接触したとみなす。この際、接触開始を操作者へ伝えるため、接触開始信号として非対称三角波 [5]をマスタハンドの制御信号に重畳する。

2.滑りの検出ではひずみゲージによる力がある値  $F$  より大きく、かつ加速度センサの出力が一定値  $\beta$  以上となったものを滑りに伴う振動と判別し、スレーブハンドで把持する対象物が滑り状態であるとみなす。



(a)接触開始の検出

(b)滑りの検出

Fig.1-1 提案手法によるスレーブハンドの状態判別

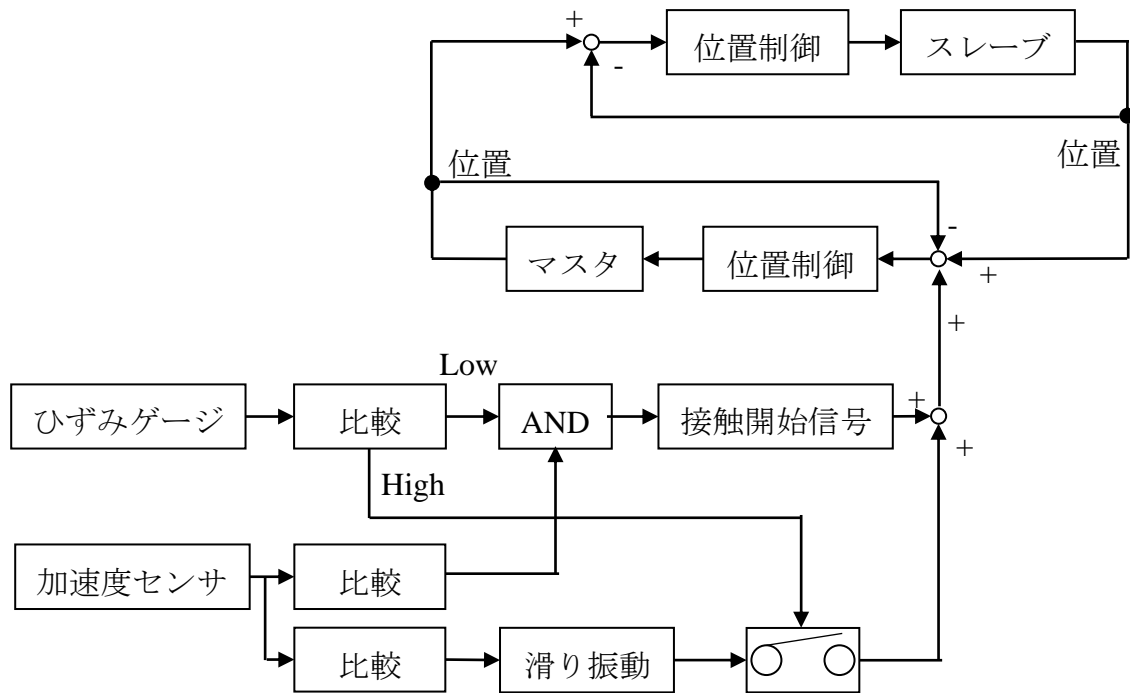


Fig.1-2 提案手法制御法

Fig.1-1 で判別したものを従来制御法に加えることで、接触開始と滑りの検出をより明確に操作者へ伝えることが可能となる。Fig1-2 に提案手法を加えた制御システムを示す。提案手法は物体に接触していない自由状態では従来制御法と変わらない。そのため自由状態では従来制御法と相違ない動作を行っていることを確認し、物体接触時には接触開始信号が出力され、物体が滑り動作を行ったときには滑り振動が出力されていることを確認する。これらの触感提示用信号によって個別の触覚提示用デバイスを用いずに物体との接触状態の触感を高めることを本研究の目的とする。

## 1.3 本論文の構成

本論文は以下のような内容で構成されている。

### 第一章 序論

遠隔操作装置の需要の増加と発達について説明し、人間の感覚を交えながら遠隔操作装置において触覚をフィードバックすることの必要性を示した。さらにバイラテラル制御の手法を挙げ、従来制御では困難な力覚と触感の両方を提示する手法を提示した。ついで、本論文の目的と構成について述べた。

### 第二章 遠隔操作用グリッパ型マスタ・スレーブ装置

本研究で使用する遠隔操作装置の仕様の説明と設計を行った。作成した遠隔操作装置の基本的な特性として単位ステップ応答を確認した。また、動作確認として従来制御法による位置追従を行い提案手法の基準とする。

### 第三章 ひずみゲージ・加速度センサを含めた制御

提案手法で使用する追加の触覚センサについて説明し、提案する制御法を実装した。従来制御法と同様に位置追従を行い、追従性能において同等の結果であることを確認した。

### 第四章 官能評価

従来制御法と提案手法において人間を対象とした官能評価を行った。従来制御法と比較して接触や滑りといった感覚が際立って伝えられていることを確認した。

### 第五章 結論と今後の課題

本研究で得られた知見についてまとめ、今後の展望を述べる。

# 第2章 遠隔操作用グリッパ型マスタ・スレーブ装置

---

2.1 遠隔操作用マスタ・スレーブ装置の力覚提示 .....	12
2.1.1 力覚 .....	12
2.1.2 バイラテラル制御とその分類 .....	12
2.2 遠隔操作用グリッパ型マスタ・スレーブ装置 .....	14
2.2.1 はじめに .....	14
2.2.2 アクチュエータ .....	16
2.2.3 位置情報取得 .....	17
2.2.4 制御用ツール .....	17
2.2.5 電圧電流変換アンプ .....	18
2.3 マスタ・スレーブ装置の静特性 .....	19
2.3.1 マスタ・スレーブ装置の単位ステップ応答 .....	19
2.3.2 マスタ・スレーブ間の位置追従性 .....	22
2.4 位置制御型マスタ・スレーブ操作の考察とまとめ .....	24

---

## 2.1 遠隔操作用マスタ・スレーブ装置の力覚提示

### 2.1.1 力覚

力覚とは前述したとおり筋肉を受容体とする感覚である。壁を押した際反作用によって壁に押し返されるように感じるものである。遠隔操作装置において触覚のフィードバックは臨場感の向上、ひいては操作性の向上に期待されている。力覚についてはバイラテラル制御という確立された手法があり現在も多く研究されている。

### 2.1.2 バイラテラル制御とその分類

バイラテラル制御はマスタ・スレーブ装置に力覚フィードバックを与えるため使われる手法である。人間が操作するマスタと、環境や対象物と接触するスレーブの位置や力を同期させることで力覚フィードバックを実現している。2チャンネルのバイラテラル制御には対称形、力逆送型、力帰還形、力順送型などに分類できる。それぞれの構成を Fig. 2-1(a)~(d)に示す。対称形はマスタ・スレーブの位置を一致させるように双方の位置情報を送り合う制御である。操作者はマスタを通してスレーブの位置によって触力覚が認知できる。力逆送型はマスタの位置や速度といった運動情報をスレーブに送信し、スレーブの位置をマスタと一致させる制御を行うと共に、スレーブの力覚センサが検知した力情報をマスタへ返送する。マスタでは返送された力情報をもとに反力を発生させることで、操作者にスレーブ触力覚を認知させる。しかし、力逆送型では摩擦力や慣性力によって発生する力を操作者が正しく認知できていない可能性があるため力帰還形が考案された。力帰還形では操作力を検知する力覚センサをマスタに追加し力制御を導入することで、スレーブの検知力とマスタの操作力が等しくなるよう保証している。これによって、触力覚の認知性能を向上させることができる。力順送型では力逆送型の反対の構造であり、マスタの力覚センサが検知した操作力をスレーブに送信しスレーブの運動を発生させ、その位置や速度といった運動情報をマスタの運動指令として返送する。マスタの位置とスレーブの位置が一致することによって操作者は触力覚を認知することが可能となる。これらの方法は位置情報や運動情報といった一つの情報をマスタ・スレーブ間で相互に通信し、合計二つの情報をやり取りすることから2チャンネル型と呼ばれている [21]。

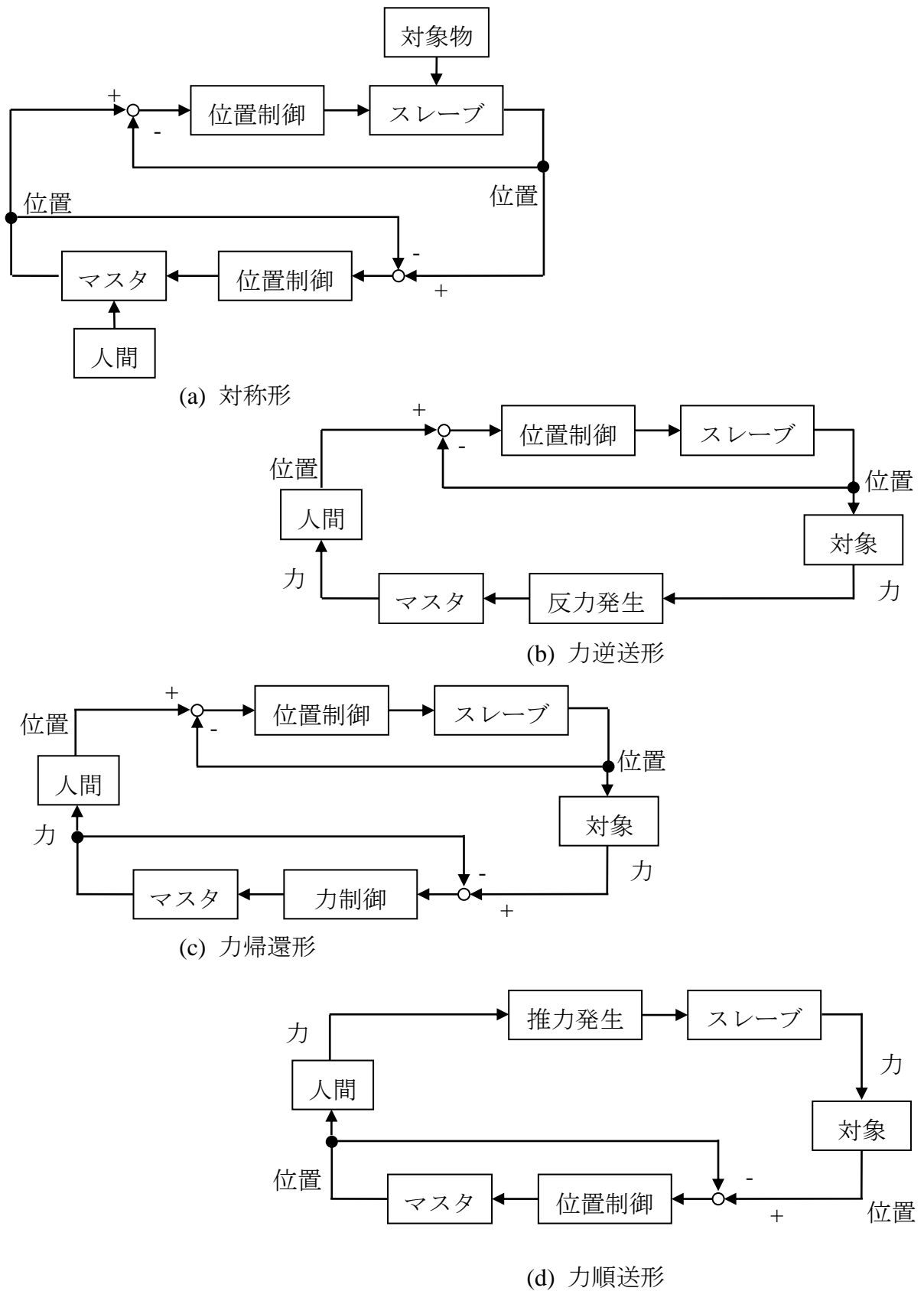


Fig. 2-12 チャンネルバイラテラル制御の分類



## 2.2 遠隔操作用グリッパ型マスタ・スレーブ装置

### 2.2.1 はじめに

現在、力覚装置は3D System Touchをはじめ Falcon, SPIDAR-G AHS, CyberGlove [22] など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ち独自の関数群によって制御されている。そのため特性を調べる際、自由度や関節に応じた座標変換が必要となり、人間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自由度の装置であり、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。遠隔操作を行うためマスタ・スレーブに同等のものを用意した。操作者はマスタ右ハンド・マスタ左ハンドを操作し、スレーブ右ハンド・スレーブ左ハンドが環境や対象物と接触する。Fig.2-2 は作成したマスタ・スレーブ装置の一方の概略図である。

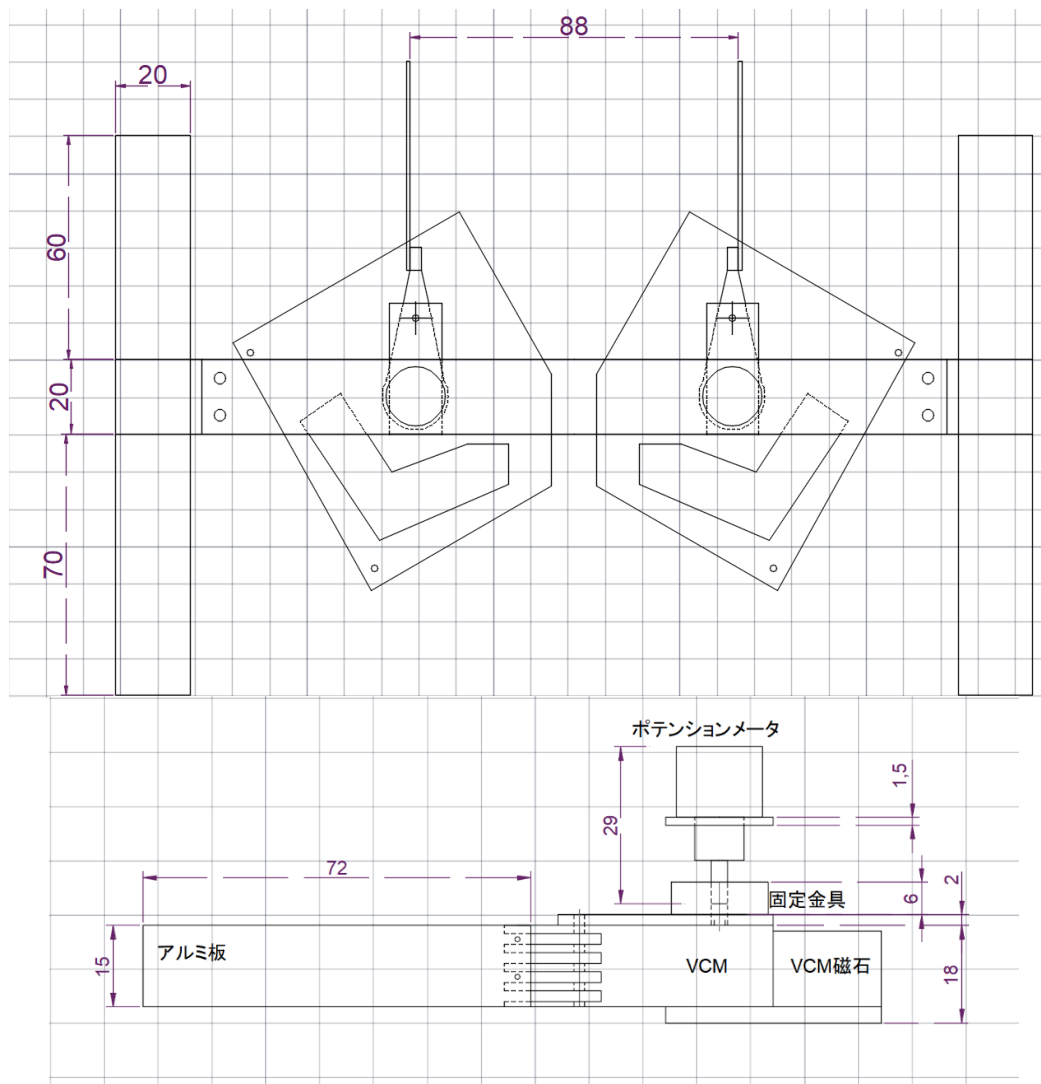


Fig.2-2 実験用マスタ・スレーブ装置概略

また、作成する装置全体の構成は Fig.2-3 の通りである。装置は主にマスタハンド、スレーブハンド制御装置である sBOXII で構成される。マスタハンド、スレーブハンドは制御装置へハンドの位置情報を送り、制御装置は両ハンドの位置情報から制御指令値を計算し、それをマスタハンド、スレーブハンドへ送る。これに加え、スレーブハンドに搭載したひずみゲージと加速度センサから、スレーブハンドに生じる力と加速度を計測する。これらは制御装置へ送られスレーブハンドと対象物との接触状態を判別し、それに応じた触覚提示信号をマスタハンドへ付加する。制御装置は両ハンドの位置制御を 2[kHz]で行うと同時に、Ethernet 接続されたパーソナルコンピュータ (PC) へ位置情報やひずみ、加速度といった計測データを送信する。

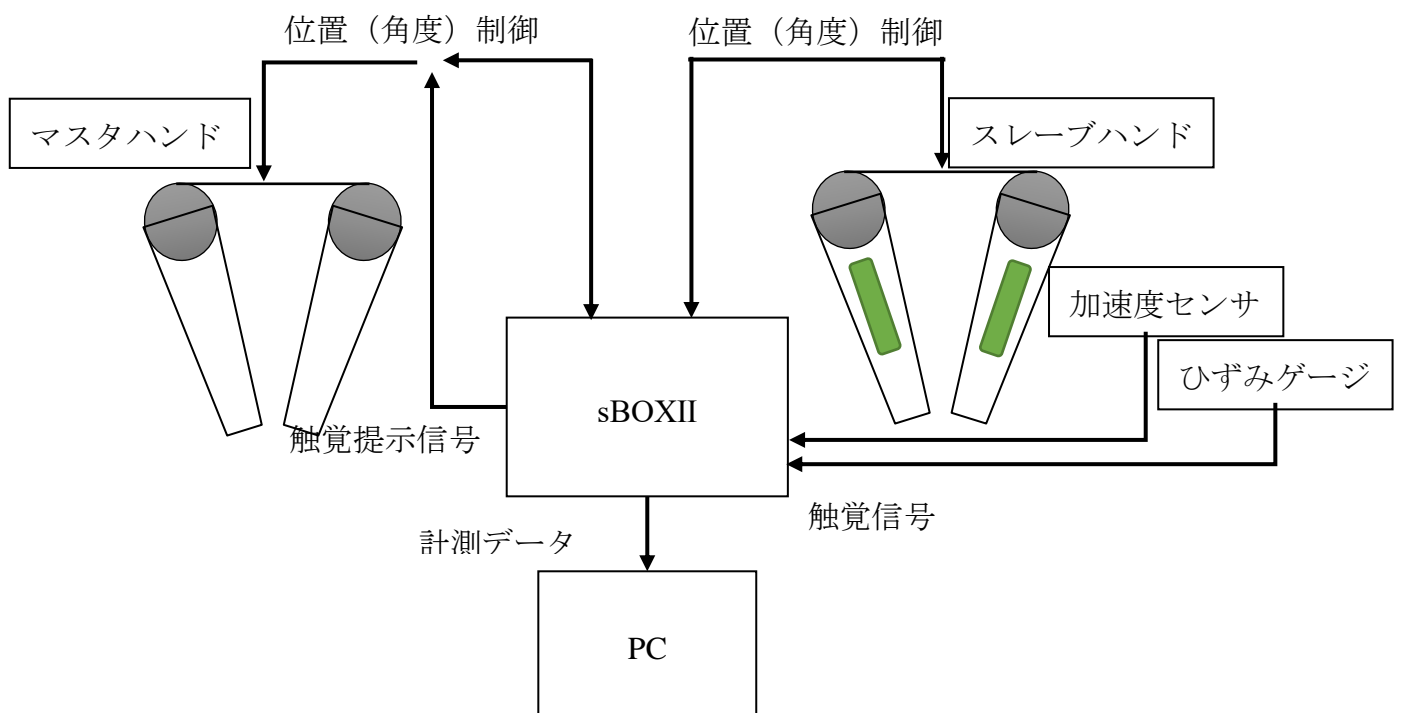


Fig.2-3 実験装置構成

### 2.2.2 アクチュエータ

マスタハンド、スレーブハンドの駆動用アクチュエータにはハードディスクドライブのボイスコイルモータ (VCM) を使用する。ダイレクト駆動とすることで高速応答、低摩擦と良好なバックドライバビリティなど遠隔操作システムに適した特性を実現している。マスタ・スレーブの左右のハンドに一つずつアクチュエータが必要となるため計4つのVCMを搭載する。VCMの外観を Fig.2-4 に示す。



Fig.2-4 VCM 外観

VCM の直流抵抗は  $7\Omega$  であり、回転角度はおよそ  $30^\circ$  である。Fig.2-5 はモータの入力電流に対する発生する力との関係である。図中の近似直線より電流-出力比は  $1.26[\text{N/A}]$  となる。

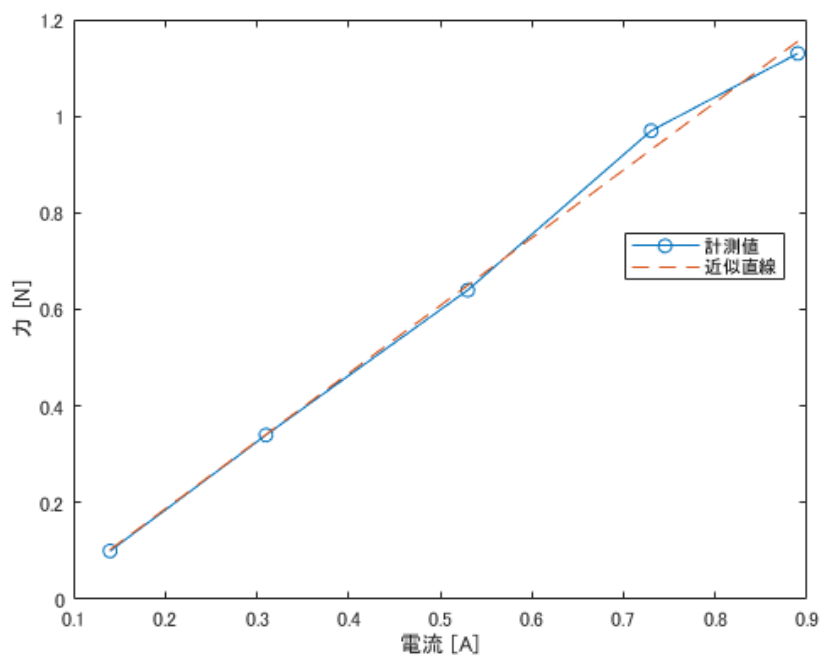


Fig.2-5 VCM 電流-出力特性

### 2.2.3 位置情報取得

位置情報を取得するために本研究ではポテンションメータを利用した。ポテンションメータは音量ボリュームのつまみなどに利用されている可変抵抗である。通常内部に摩擦が発生することで抵抗が生じる。そのため無接触型である磁気抵抗素子を使用した緑測器 CP-2UTX を選択した。有効電気角が $\pm 45^\circ$  と小さいがアクチュエータの回転角度はおよそ  $30^\circ$  であるため十分に対応できる。

### 2.2.4 制御用ツール

制御用ツールとしてエムアイエス株式会社の sBOX II を使用した。プロセッサは Ti 社製 OMAP-L137EVM を搭載しており、AD16bit を 6 チャンネル、DA14bit を 8 チャンネル備えている。プロセッサの動作クロックは 372[MHz]、開発言語は C++ をサポートしているほか、使いソフトウェアによって MATLAB/Simulink によってブロック線図で構築した制御モデルをシームレスに実現することが可能である。アナログ入出力の仕様は Tabel.1-1 の通りである。入出力電圧の範囲はどちらも  $\pm 10[V]$  であり、AD 変換の分解能は約 0.31[mV/bit]、DA 変換分解能は約 1.22[mV/bit] である。本研究の制御系の更新周波数は 2[kHz] である。

Table.1-1 sBOX II 仕様

アナログ	入力	チャンネル数	6ch
		分解能	16bit
		変換時間	4 $\mu$ sec (fs:250kHz/max) 全 ch 同時変換
		入力レンジ	$\pm 10V$ シングルエンド入力
		ローパスフィルタ	1 次 CR フィルター fc=50kHz (typ.)
		入力絶縁	なし
	出力	チャンネル数	8ch
		分解能	14bit
		変換時間	40 $\mu$ s/20V (typ.)
		出力レンジ	$\pm 10V$
		ローパスフィルタ	1 次 CR フィルター fc=50kHz (typ.)
		出力絶縁	なし

### 2.2.5 電圧電流変換アンプ

sBox II の DA は電圧出力であり、VCM を制御するには電流制御が必要となる。そのため電圧を電流に変換し増幅する電気回路を作成した。回路図は Fig.2-6 となる。VCM に流れる電流は、

$$I_o = \frac{1}{VCM} \left\{ \left( \frac{R_2 + R_3}{R_1} - \frac{R_5 + R_6}{R_4} \right) v - \frac{R_2 + R_3}{R_1} V_{in} \right\} \quad (2.1)$$

であるが、R5 を調整し R2 と同等にすることで括弧内が消え  $V_{in}$  のみとなる。これよりこの回路の増幅率  $G$  は、

$$G = \frac{I_o}{V_{in}} = \frac{1}{VCM} \left( \frac{R_2 + R_3}{R_1} \right) \quad (2.2)$$

となりその値は  $G=1.5[A/V]$  となる。

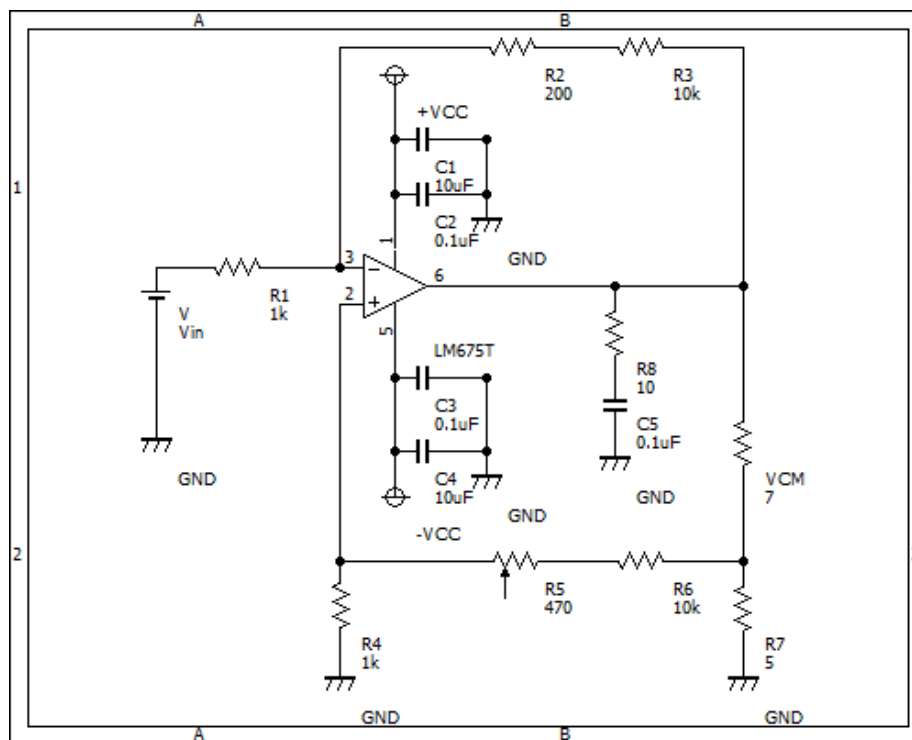
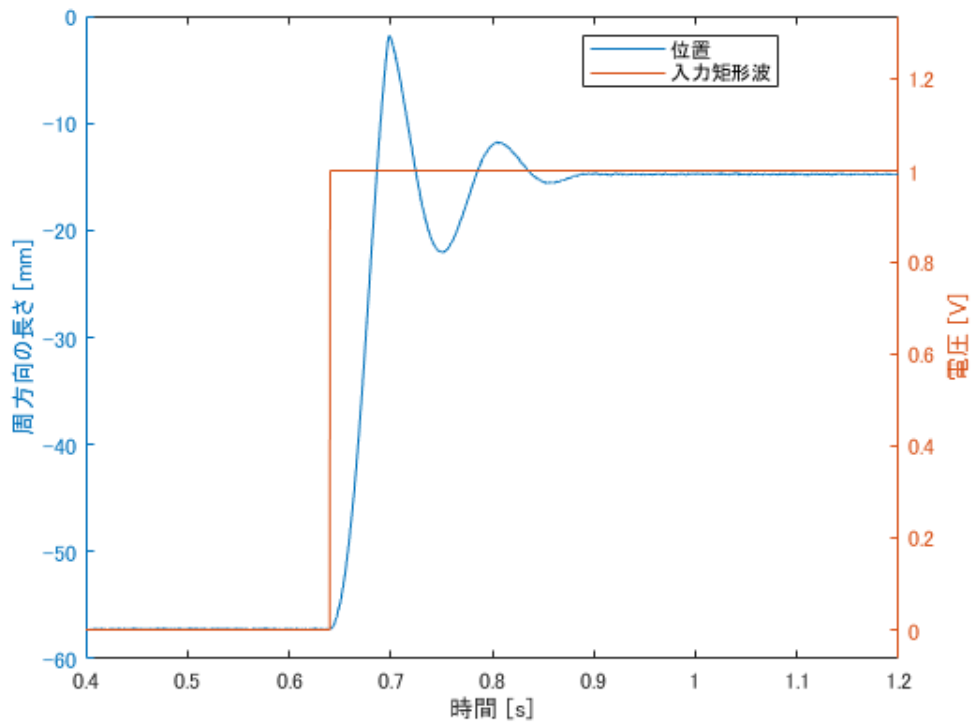


Fig.2-6 電圧電流変換回路

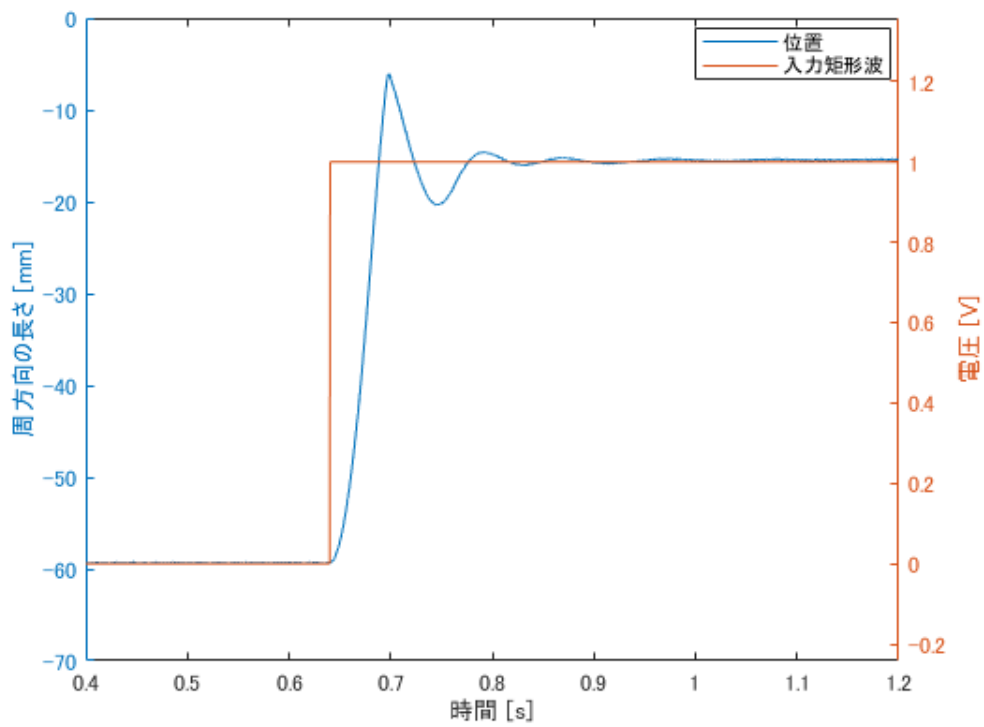
## 2.3 マスタ・スレーブ装置の静特性

### 2.3.1 マスタ・スレーブ装置の単位ステップ応答

作成したマスタ・スレーブ装置の各ハンドの特性を把握するために単位ステップ応答を確認する。Fig.2-7(a)(b)はそれぞれマスタ左ハンド，スレーブ左ハンドを、Fig.2-8(a)(b)はそれぞれ，マスタ右ハンド，スレーブ右ハンドの単位ステップ応答である。各ハンドの指令値に単位ステップ入力を行いその挙動を観測した。オーバーシュートに多少のばらつきがあるが比較的同じ応答を行うことが確認できる。スレーブ右ハンドのみ振動数が他のものより多いが個々のVCMの違いによる誤差と考えられる。

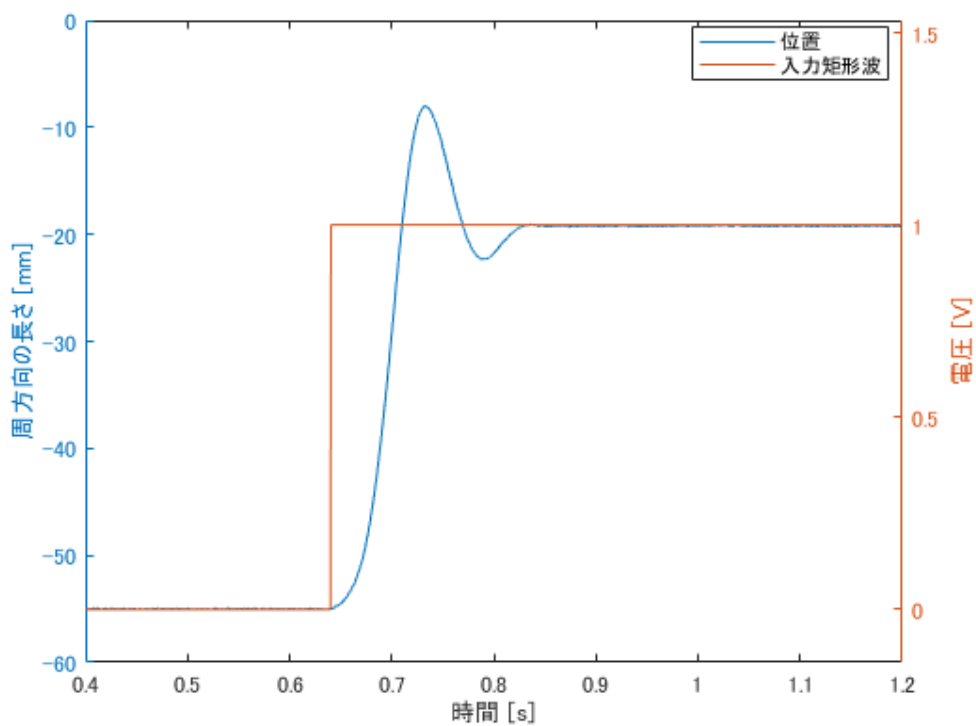


(a)マスタ左ハンドステップ応答

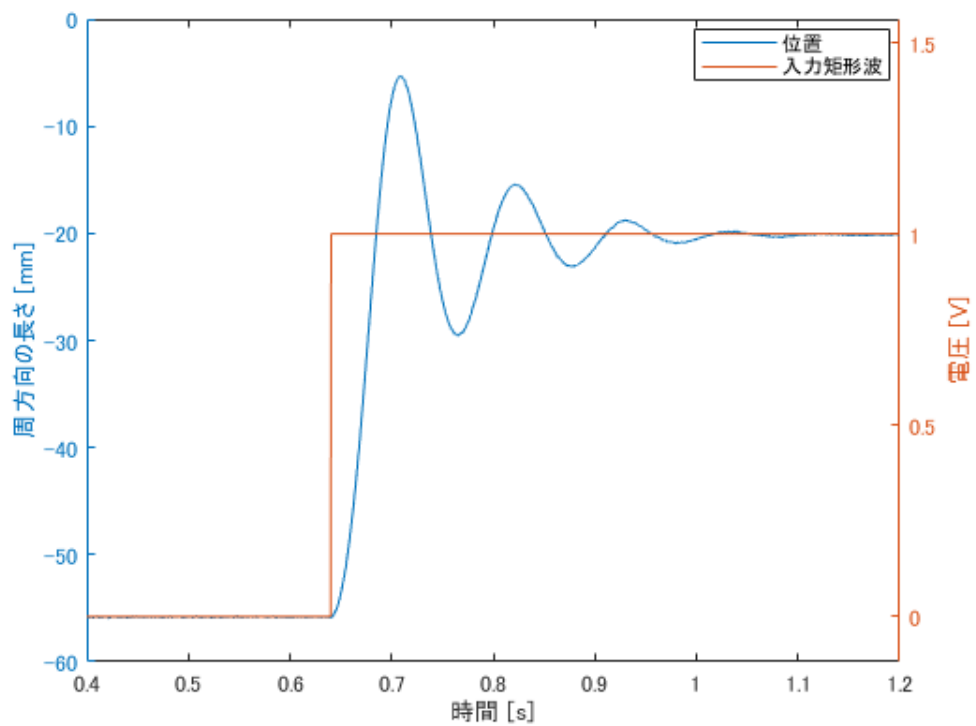


(a)スレーブ左ハンドステップ応答

Fig.2-7 単位ステップ応答 1



(a) マスタ右ハンドステップ応答



(b) スレーブ右ハンドステップ応答

Fig.2-8 単位ステップ応答 2



### 2.3.2 マスタ・スレーブ間の位置追従性

マスタ・スレーブ装置の動作確認と装置の基本特性を知るため、従来制御法である対称形のバイラテラル制御を実装し動作させる。対称形バイラテラル制御とは 2.1.2 節で述べたようにマスタ・スレーブ間の位置を一致させる制御である。本研究では位置情報はポテンションメータによる回転角度として取得するため、ポテンションメータ間の電位差によってマスタ・スレーブ装置に入力する指令値を変更する。これより指令値電圧  $V$  は以下のように与えられる。

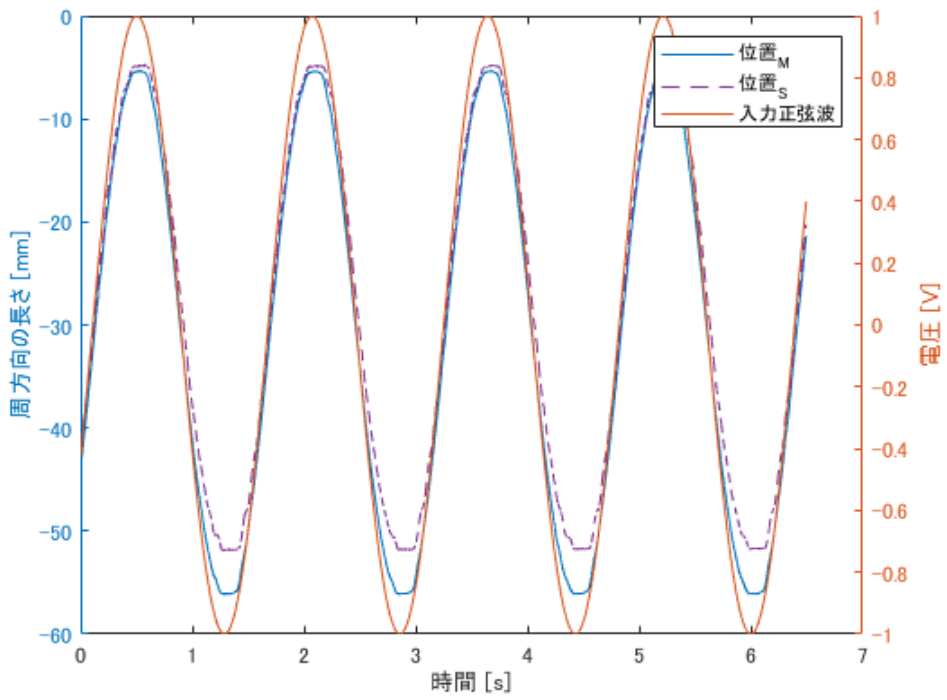
$$V_m = \alpha(X_m - X_s) \quad (2.3)$$

$$V_s = \beta(X_s - X_m) \quad (2.4)$$

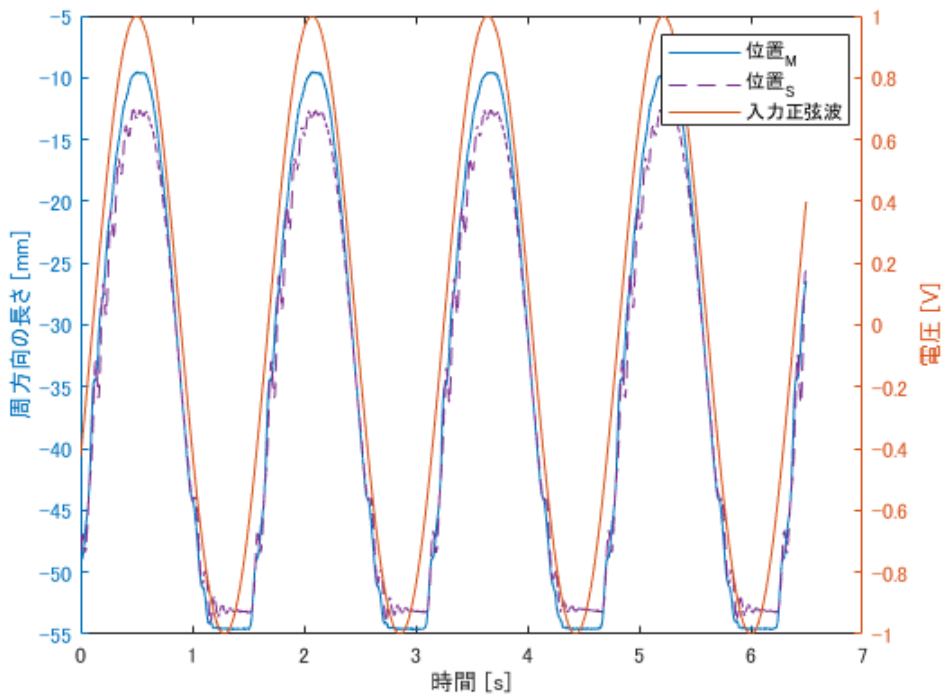
$X$  は位置を、添え字  $m$  はマスタ、 $s$  はスレーブを表す。

対称形のバイラテラル制御を行い、マスタハンドに正弦波を位置情報として入力したときのスレーブハンドの追従性を Fig.2-9 に示す。(a)は各左ハンドの追従を、(b)は各右ハンドの追従を表す。入力した正弦波は振幅 1[V]、周期 4[Hz]である。マスタハンド、スレーブハンドには触れず入力した正弦波のみで動作させた。

青色の実線がマスタの位置を、紫色の点線がスレーブの位置を、橙色の実線が入力信号の正弦波である。



(a) マスタ・スレーブ左ハンドの追従性



(b) マスタ・スレーブ右ハンドの追従性

Fig.2-9 各ハンドの追従性

## 2.4 位置制御型マスタ・スレーブ操作の考察とまとめ

Fig.2-8を見ると各スレーブハンドはある程度の追従性能を有しているといえる。マスタ・スレーブ右ハンドではいくらかのブレが確認できるが、おそらくスレーブ右ハンドによるものと考えられる。マスタハンドが動いている部分ではスレーブハンドはマスタハンドとほとんど同じ位置にある。しかし、ハンドが可動限界に近づくにつれ誤差が大きくなっている。これは位置追従を行う対称形の欠点でもある。位置差が小さくなるとスレーブハンドへ出力される指令値が小さくなり VCM がほとんど動かなくなる。そのため位置差が 0 になることはない。式(2.3)式(2.4)の倍率  $\alpha$  や  $\beta$  を大きくすることで一定の改善が可能であるが振動が発生しやすくなる。加えて、小さな位置差で大きな指令値が出力されるため、どのようなものに触れても最大の力が提示されてしまうため操作が困難となる。

本章では実験で使用する遠隔操作用マスタ・スレーブ装置を作成し、その基本的な特性と従来制御法である対称形のバイラテラル制御を行った。装置は 1 自由度のハンドを二つ合わせた 2 自由度であり、およそ 90[cm]の開きをもつ。作成した装置のすべてのハンドが同じ程度の応答速度であることを確認した。また対称形バイラテラル制御を実行させ正弦波を位置情報として入力し、マスタ・スレーブハンドの位置追従性を評価した。

# 第3章 力と加速度の計測情報を取り入れた制御

---

3.1 はじめに.....	26
3.2 力と加速度の計測.....	27
3.2.1 力の計測.....	27
3.2.2 加速度センサ.....	29
3.3 力と加速度による接触の検出と提示.....	30
3.3.1 接触検知と接触提示用信号.....	30
3.3.2 滑り感覚提示.....	32
3.3.3 感覚検出のパラメータ設定.....	34
3.4 マスタ・スレーブ間の位置誤差と感覚提示用信号.....	37
3.5 力と加速度を含めた制御のまとめ.....	42

---

### 3.1 はじめに

第2章では実験に使用するために装置を作成し、従来制御法である対称形のバイラテラル制御を使用した。第1章でも述べたようにバイラテラル制御では触感の表現が困難である。また、ポテンションメータのみでは接触の検知や滑りといった信号を取得することが不可能なため、触感信号を検出するために、ハンドに加わる力と加速度の計測し、その情報を制御に取り入れる。センサとしてひずみゲージと加速度センサを使用する。これらのセンサは環境や対象物と接触するスレーブハンドに装着し触感信号を検出する。ひずみゲージでは接触力の測定を行い、加速度センサでは接触の検知と滑りの検知を行う。Fig.3-1はスレーブハンドに取り付けたひずみゲージと加速度センサの位置を示す。

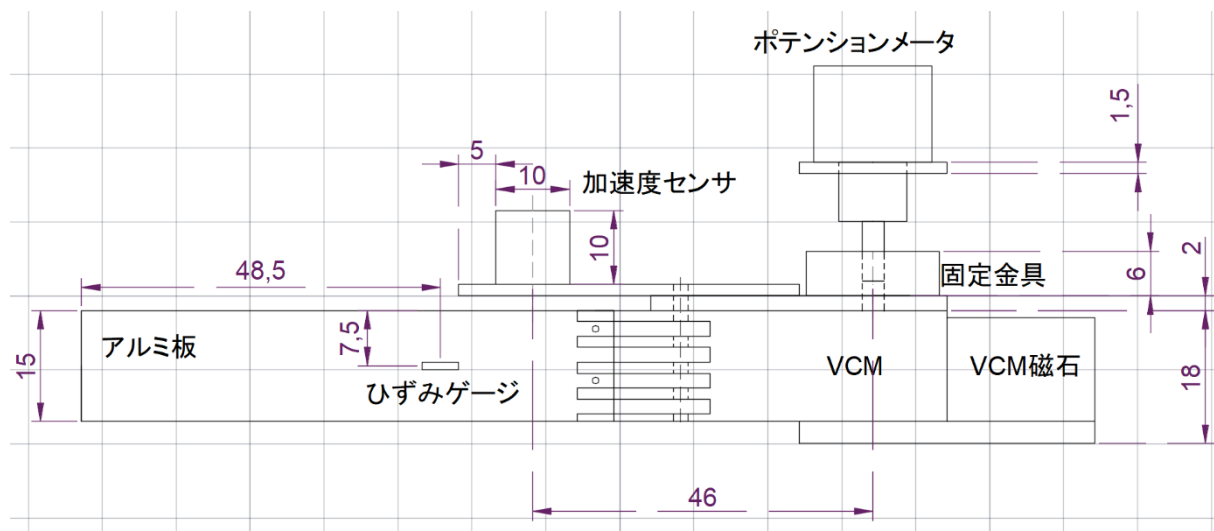


Fig.3-1 ひずみゲージ・加速度センサ取り付け位置

## 3.2 力と加速度の計測

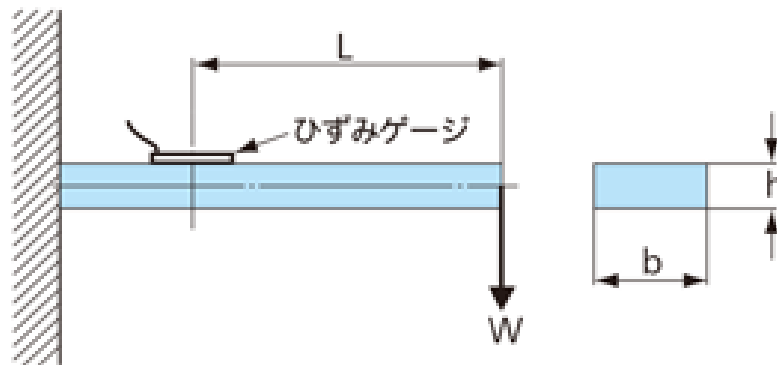
### 3.2.1 力の計測

2.2.2 節で述べたように本研究ではアクチュエータとして VCM を使用する。その出力特性からハンドが出力する最大の力はおよそ 1[N] 程度である。操作する上で対象物は静止状態が殆どであるためスレーブハンドで検出すべき力の範囲は 0-2[N] である。

この力をひずみゲージで測定するために発生するひずみを予測する。片持ち梁のひずみは、

$$\varepsilon = \frac{6WL}{Ebh^2} \quad (3.1)$$

$b$  : はりの幅,  $h$  : はりの厚み,  $L$  : 荷重点からひずみゲージ中心までの距離,  
 $W$  : 加えた荷重,  $E$  : 縦弾性係数



### 曲げ応力の測定(1ゲージ法)

Fig.3-2 片持ち梁ひずみ計測

となる。今、 $b=15[\text{mm}]$ ,  $h=1.5[\text{mm}]$ ,  $L=48.5[\text{mm}]$ ,  $E=68.6[\text{kN/mm}^2]$  として荷重 0-2[N] とすると発生するひずみの最大値はおよそ  $2.51 \times 10^{-4} \text{ST}$  となる。このときのひずみ測定器の出力電圧はおよそ 6.3[V] である。

本研究で使用したひずみゲージは KYOWA 社の一般応力測定用(KFG-02-120-C1-23)を使用した。ゲージ長は 0.2[mm]であり、120[ $\Omega$ ]の抵抗を持つ。スレーブハンドにひずみゲージを装着しハンドのひずみを観測した。また、ひずみ測定器 (Sanei STRAIN AMPLIFIER 6M82)を2台利用してひずみを制御器である sBOX II へ入力し使用した。Fig.3-3 はひずみゲージを取り付けたスレーブハンドである。

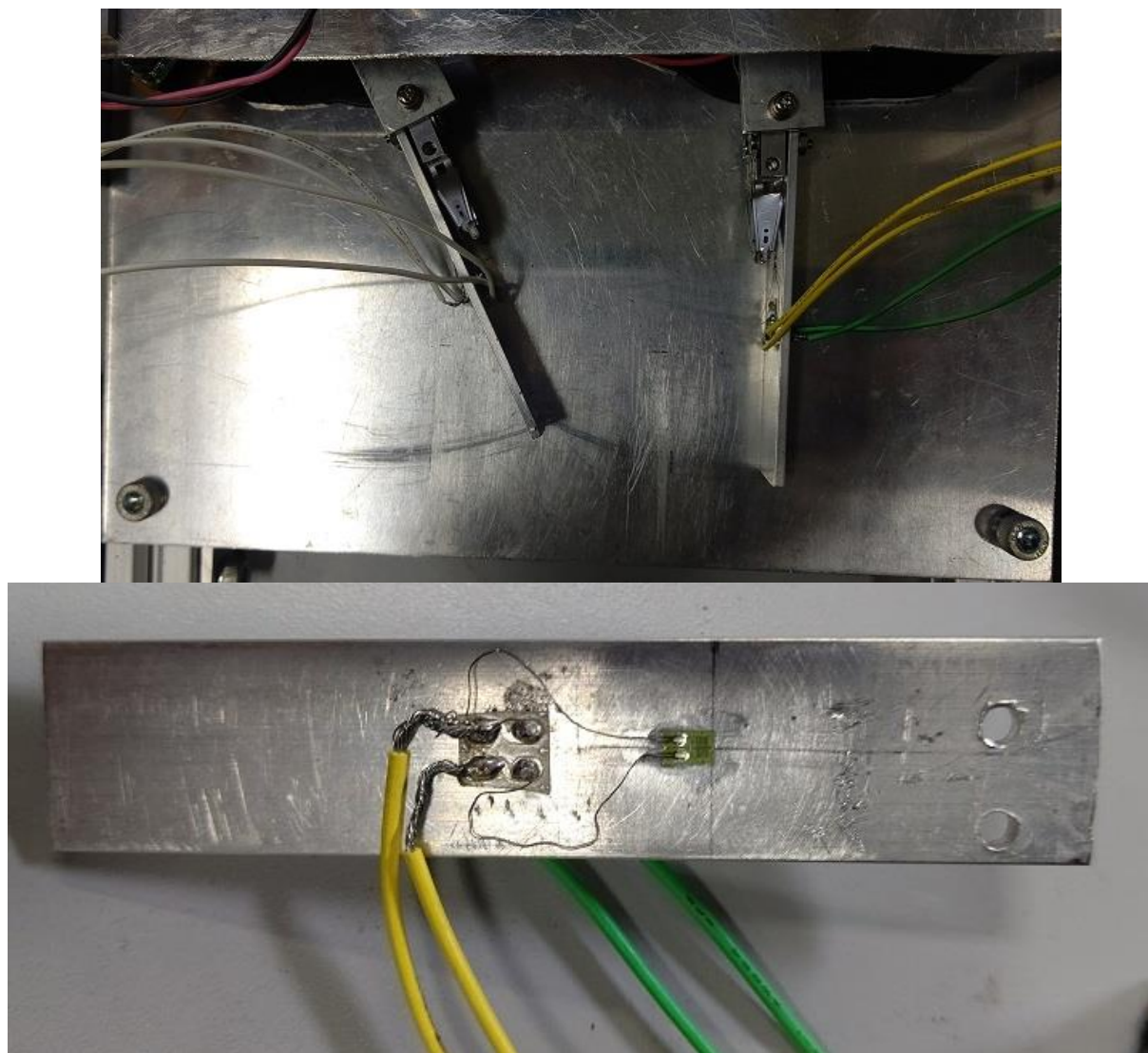


Fig.3-3 ひずみゲージを取り付けたスレーブハンド

### 3.2.2 加速度センサ

加速度センサとは加速度の測定を目的とした慣性センサである。加速度センサには主に静電容量方式、ピエゾ抵抗方式、熱検知方式とあるが本研究では静電容量方式の KXR94-2050 (Kionix 社) のものを使用した。使用したセンサの仕様を Table 3-1 に示す。センサ素子は固定電極と可動電極、スプリングで構成され、固定電極に可動電極が均一の空間を空け挟まれる形で作成される。加速度が加わっていないとき、固定電極と可動電極の間の距離は同じである。一方、加速度が加わると可動電極が変位する。これによって固定電極との位置関係に変化が生じ電極間容量が変化する。発生した容量変化が電圧変換され加速度を算出する。静電容量方式の原理を Fig.3-4 に示す。

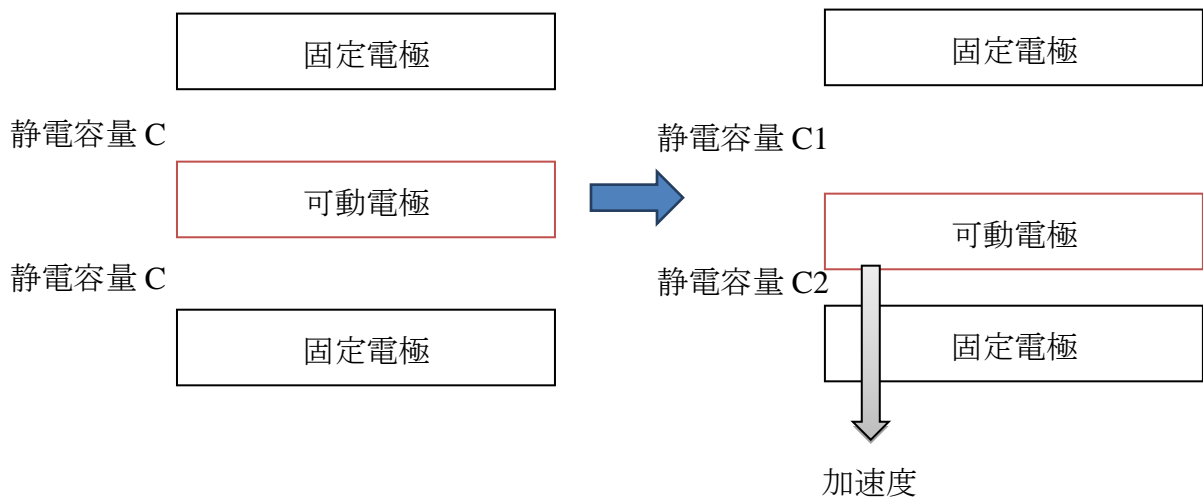


Fig.3-4 静電容量方式原理

Table 3-1 加速度センサ仕様

測定レンジ	±2 [G]
感度	660 [mV/g] typ
ゼロ G 出力電圧	1.65 [V] typ
測定出力	3 軸アナログ出力
非直線性誤差	0.1%FS
出力帯域幅	800 [Hz]
動作電圧範囲	2.5-5.25 [V]



### 3.3 力と加速度による接触の検出と提示

#### 3.3.1 接触検知と接触提示用信号

スレーブハンドが物体に接触する瞬間、スレーブハンドにはほとんど力が生じないが、加速度は大きな出力が生じる。一定速度  $v$  運動しているハンドが物体に接触し静止する場合を考える。このとき速度は  $v$  から  $0$  になり加速度が生じる。一方ハンドと対象物はどちらも静止しているため力が釣り合っている。これらを式で表すと以下のようになる。

$$\alpha = \frac{v}{t}, F_{\text{ハンド}} = F_{\text{対象物}} \quad (3.2)$$

$\alpha$  : 加速度,  $t$  : 接触した時間,  $F$  : 生じている力

また、力の計測に用いるひずみゲージはハンドのひずみを計測し力に換算している。このひずみはスレーブハンドの制御指令値によって決定し、制御指令値はマスタハンドとスレーブハンドの位置の差によって決定される。これらは次式のように関係する。

$$F_{\text{ハンド}} = E \varepsilon a \alpha \beta (X_m - X_s) \quad (3.3)$$

$E$  : ヤング率 (縦弾性係数) ,  $\varepsilon$  : ひずみ,  $a$  : 断面積,  
 $\beta$  : 装置的比例係数 (電圧電流変換比, 制御指令値係数) ,  
 $X_m$  : マスタ位置,  $X_s$  : スレーブ位置

これより、スレーブハンドで観測される力が小さいとき、スレーブハンドは物体に触れていないまたは、触れた直後であり、マスタハンドとの位置差は小さいと考えられる。このとき瞬間的に発生する大きな加速度は接触によるものと考えられるため、接触開始と判断するまでの流れを Fig.3-5 に示す。

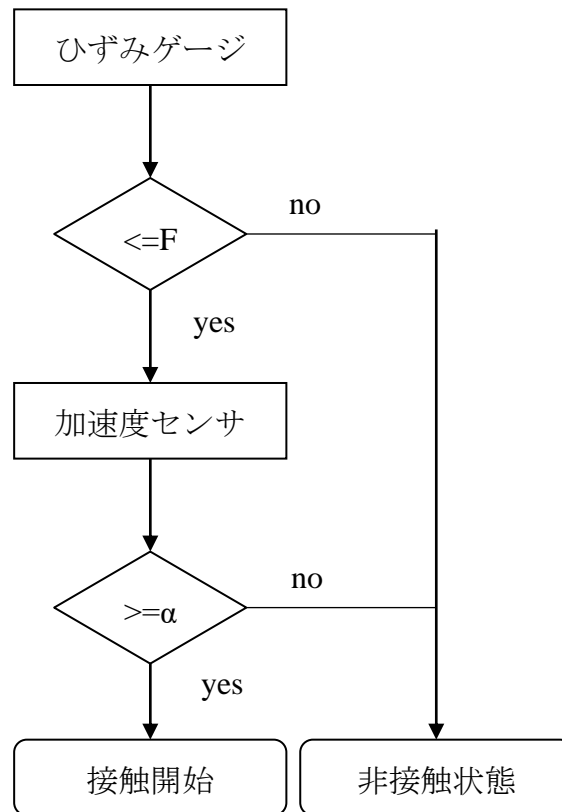


Fig.3-5 接触開始の検知

接触開始を検知したのちどのようにして操作者へ伝えるかが肝要となるが、本研究では非対称三角波 [5]を使用する。これは人間の触覚特性を利用したもので、触覚センサの信号を直接提示するより物体に触れた感覚に近いものを創出する。

### 3.3.2 滑り感覚提示

スレーブハンドで把持している対象物が滑り動作を行うと考える。スレーブハンドが滑り方向に垂直に把持しているとする、対象物が滑らないとき以下の不等号が成立する。

$$\mu F_{\text{ハンド}} > F \quad (3.3)$$

$\mu$  : 静止摩擦係数,  $F$  : 対象物を滑らせようとする外力

この状態から対象物が滑りだした場合不等号が逆転する。しかしどの場合であってもスレーブハンドで検出される力のみでは、対象物の状態を把握することが困難である。

加速度について考えてみる。スレーブハンドで対象物を把持した状態から対象物が滑り動作を行う。滑り動作中もスレーブハンドと対象物が触れている場合、対象物表面をスレーブハンドがなぞる形となり振動することが予想される。この振動は人間が物体に触れる際にも生じるものである。この振動を提示することで対象物の滑り動作を操作者へ伝えられると考えた。この振動はポテンションメータでは観測されないほど小さいが、瞬間的に左右に振れようとしている、すなわちごく短い時間で静止と移動を繰り返しているならば加速度として大きな値が出力される。

したがってスレーブハンドで対象物を把持している状態、すなわち、比較的大きな力が観測されているとき、加速度に一定時間持続する大きな出力が存在する場合、その加速度は振動によるものだと仮定できる。本研究ではこの加速度をマスタハンドの制御信号に重畳することで操作者へ滑りに伴う振動を提示する。滑り振動を検出する流れを Fig.3-6 に示す。

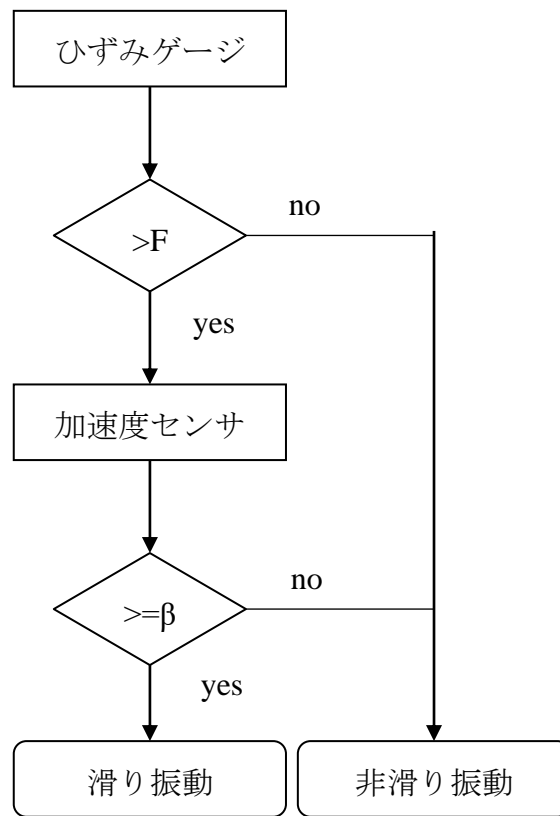


Fig.3-6 滑り検出

### 3.3.3 感覚検出のパラメータ設定

接触検知と滑り動作を検出する仕組みに用いるパラメータを決定する。そのため各触覚センサを搭載した状態で2.3.2節のようにマスタハンドを手で動かす代わりに、正弦波を制御情報として入力し、スレーブハンドにマスタハンドを追従させた。このときのそれぞれの位置と加速度、ひずみ出力電圧を Fig.3-7 に示す。なお以降 sBOX II の AD 端子の関係上マスタ・スレーブハンドの左のみを観測する。

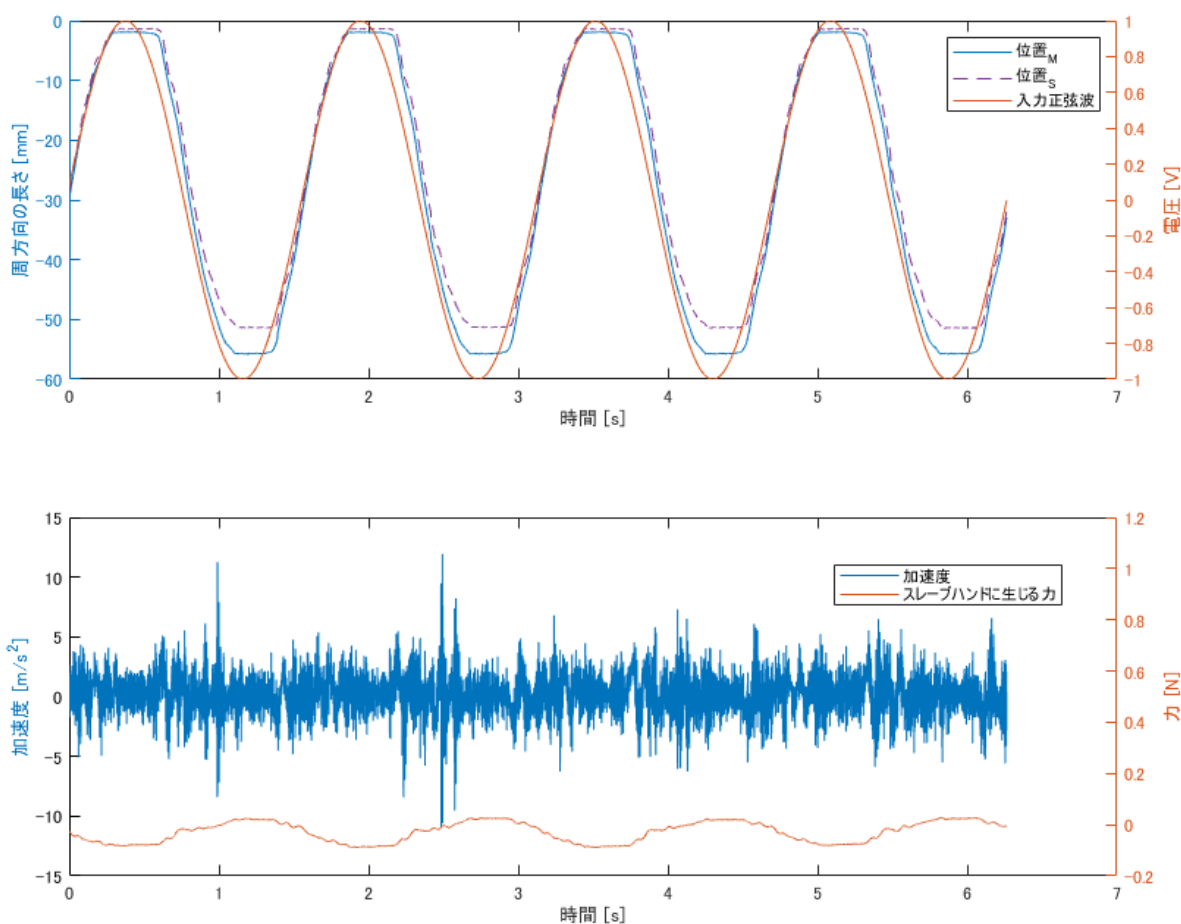


Fig.3-7 触覚センサ付きマスタ・スレーブ装置の位置と加速度、ひずみの関係

図上部ではマスタの制御指令値となる入力した正弦波の値とマスタ・スレーブの各位置を周方向の長さで表す。下部では同時刻での加速度とひずみゲージから計算したスレーブハンドに生じる力を表している。

スレーブハンドに生じる力が位置に同期してわずかに変動しているが、おそらく慣性力によってスレーブハンドに微小ながらひずみが発生しているためと考えられる。

スレーブハンドの可動範囲に金属製のブロック（50mm×55mm×60mm）を対象物として Fig.3-8 のように固定した。これによりスレーブハンドはブロックに接触するまでマスターハンドを追従し、接触後ブロック表面で静止する。このときの各信号を Fig.3-9 に示す。

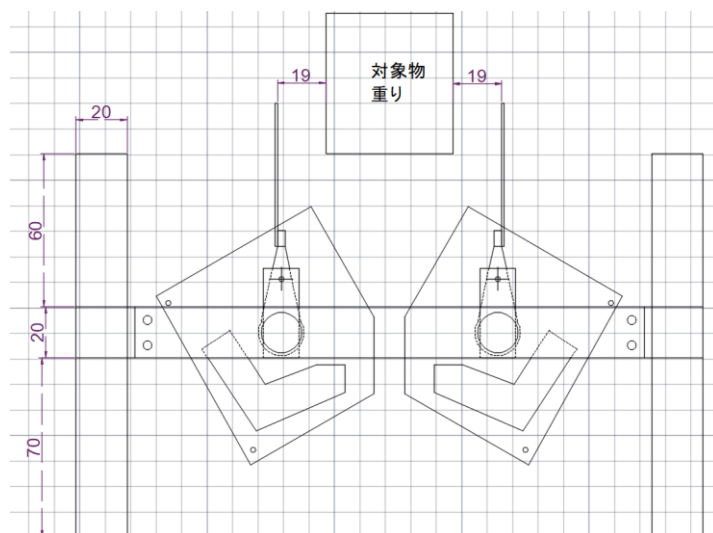


Fig. 3-8 金属製ブロック設置位置

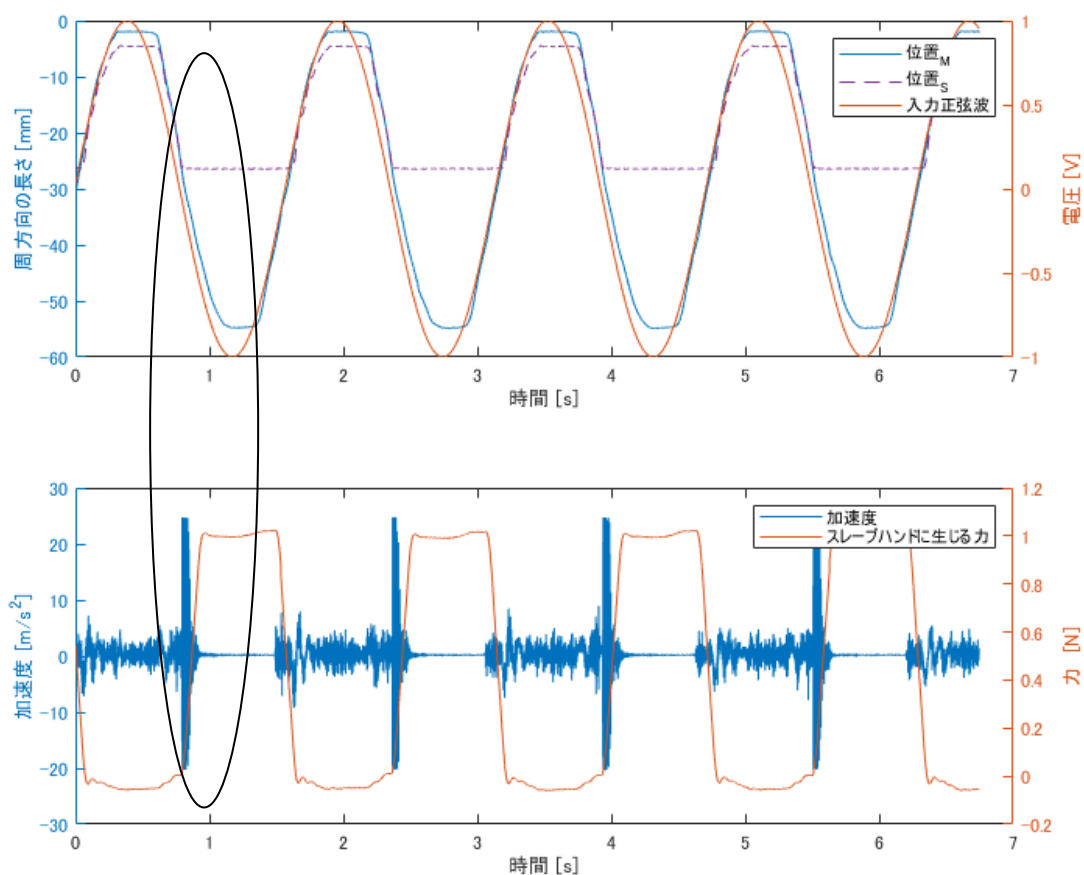


Fig.3-9 重りに接触したときの各信号の関係

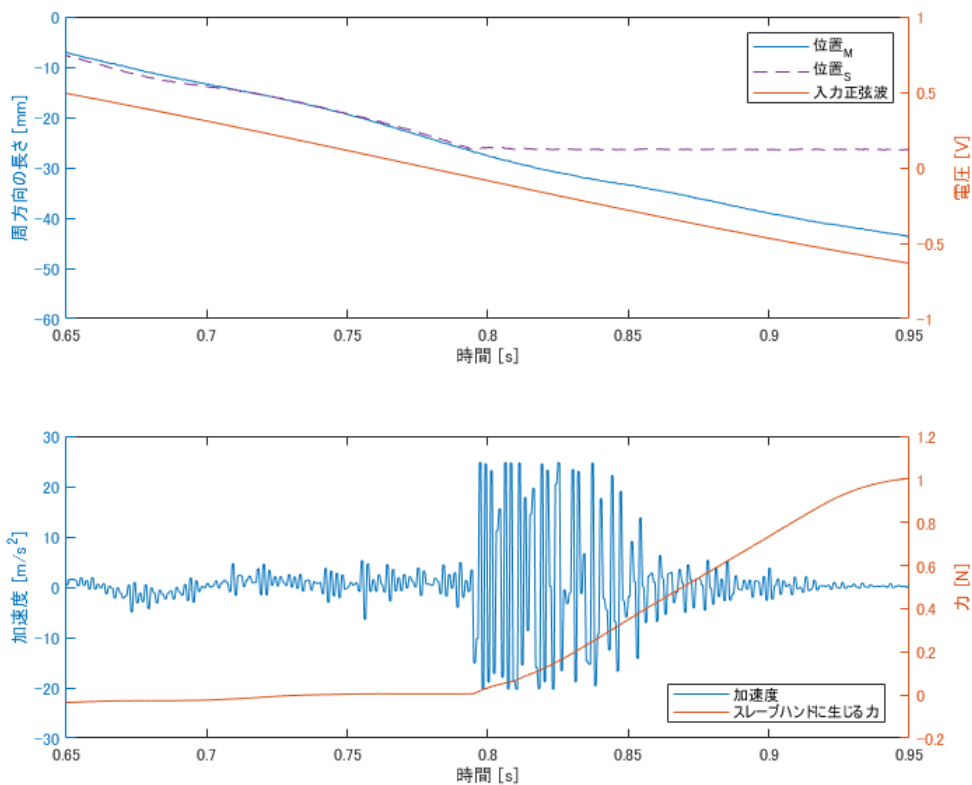


Fig.3-10 Fig.3-9 拡大

物体に接触していない自由状態での加速度はどちらも  $\pm 5[\text{m/s}^2]$  内であり、ひずみ出力電圧は  $\pm 0.1[\text{V}]$  程度である。しかしときおり  $\pm 10[\text{m/s}^2]$  以上の加速度が検出されている。Fig.3-9 の 0.8 秒程度でスレーブハンドの位置が静止するため物体に接触したと考えられる。Fig.3-10 に 0.8 秒部分を拡大したものを示す。スレーブハンドが物体に接触した瞬間およそ 50[ms]の間  $\pm 20[\text{m/s}^2]$  程度の加速度が観測される。ひずみ出力電圧はマスタの位置と比例して上昇する。VCM の最大提示力が 1[N]のため、本研究ではその 1 割の 0.1[N]を超えたならばスレーブハンドは物体に接触しているとする。このとき加速度が  $15[\text{m/s}^2]$  以上となる瞬間に物体に接触したと考えられる。そのため本研究ではスレーブハンドに生じる力が 0.1[N]以下かつ、加速度  $10[\text{m/s}^2]$  以上となったとき、スレーブハンドが物体に接触したと判断する。

また、スレーブハンドに生じる力が 0.1[N]を超え接触中と判断されるとき加速度は 0 である。この状態ではスレーブハンドも対象物も動かないためである。すなわち、この状態で生じる加速度は滑りに伴う振動と考えられる。よってひずみ出力電圧が 0.2[V]を超えている間に生じる  $10[\text{m/s}^2]$  以上の加速度は滑りに伴う振動と判断し、マスタハンドの制御値に重畳する。

### 3.4 マスタ・スレーブ間の位置誤差と感覚提示用信号

2 章では従来制御法である対称形のバイラテラル制御を実装し、操作信号として正弦波を入力して特性を見た。それと同様に感覚提示用信号を加えた制御を実行し、正弦波を制御情報としてマスタハンドへ入力したときの動作を確認する。Fig.3-11 は提案する力と加速度の計測情報を取り入れた制御のブロック線図である。ひずみゲージ、加速度センサの出力がない場合、図右上の対称形バイラテラル制御が実行される。ひずみゲージに出力は無いが、加速度が発生したとき接触開始とみなしマスタの位置情報に接触開始信号を加算する。また、ひずみゲージに出力があり物体を把持していると思われるとき、一定以上の加速度が観測されるとそれを滑り振動としてマスタの位置情報に加算する。

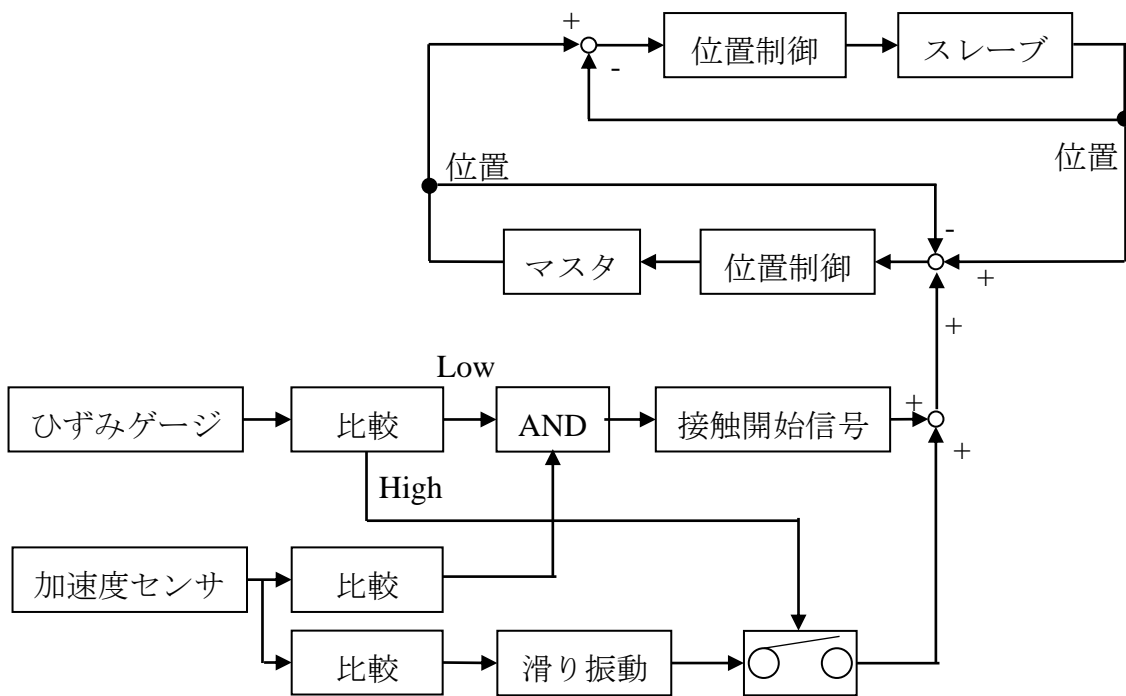


Fig.3-11 力と加速度の計測情報を取り入れた制御



正弦波によって動作するマスタ・スレーブハンドの位置を Fig.3-12 に示す。入力した正弦波は2章と同様に振幅 1[V]、周期 4[Hz]である。Fig.2-8(a)と同様な位置追従性が観測できるため、物体に接触していない状態では従来制御法と同様に動作する。

また、接触検知と提示用信号が出力されていることを確認するために、Fig.3-8 のように対象物を設置し従来制御と提案制御法をそれぞれ実行した。その結果が Fig.3-13 である。図を見ると接触したと思われる場所でマスタハンドの挙動が従来制御法と異なるため、接触検知され提示用信号が重畳されたとわかる。

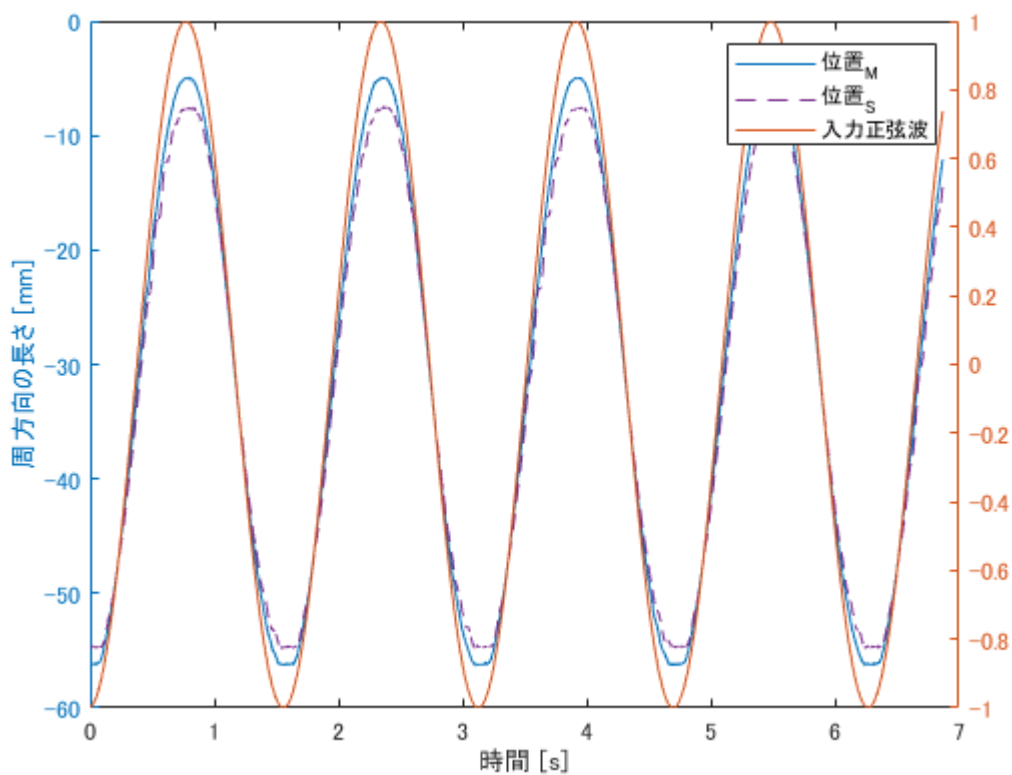
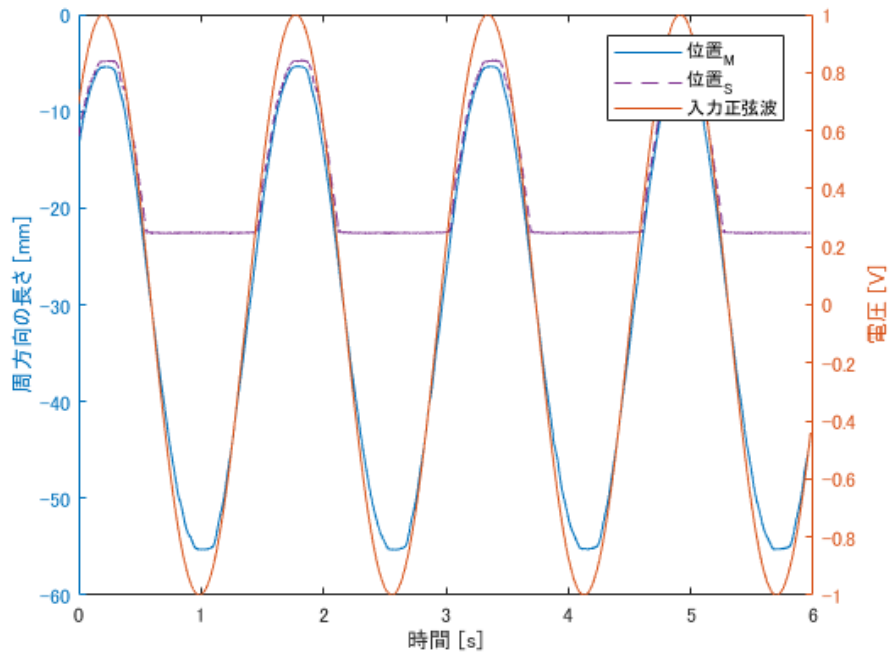
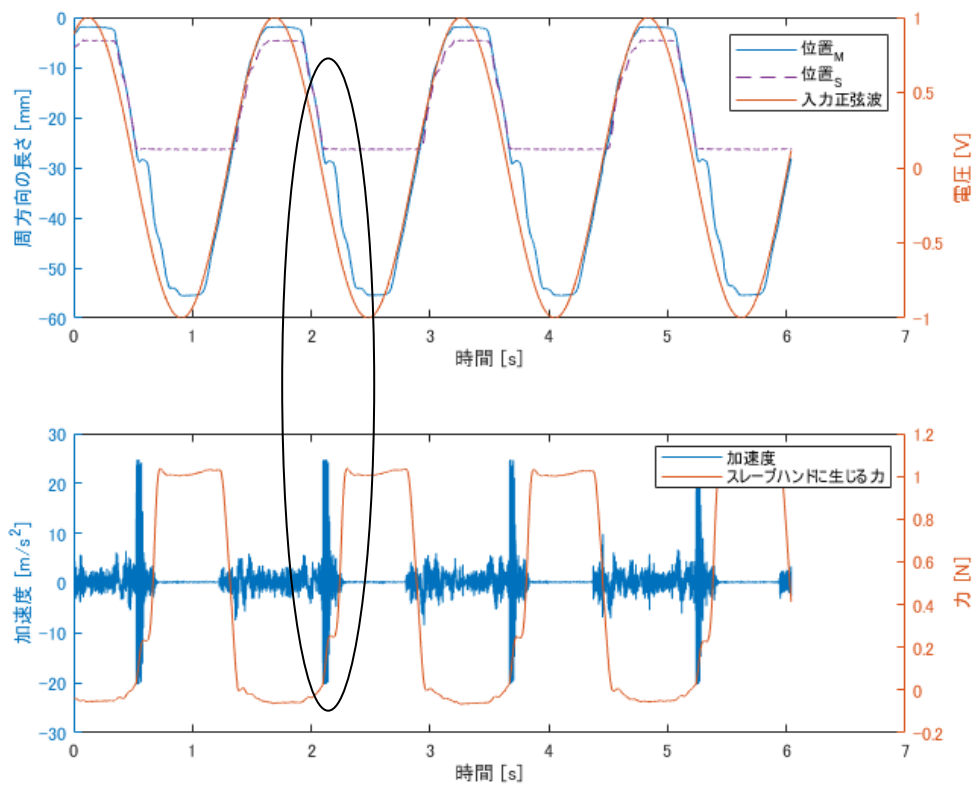


Fig.3-12 正弦波を入力とした提案制御法のマスタ・スレーブハンドの位置



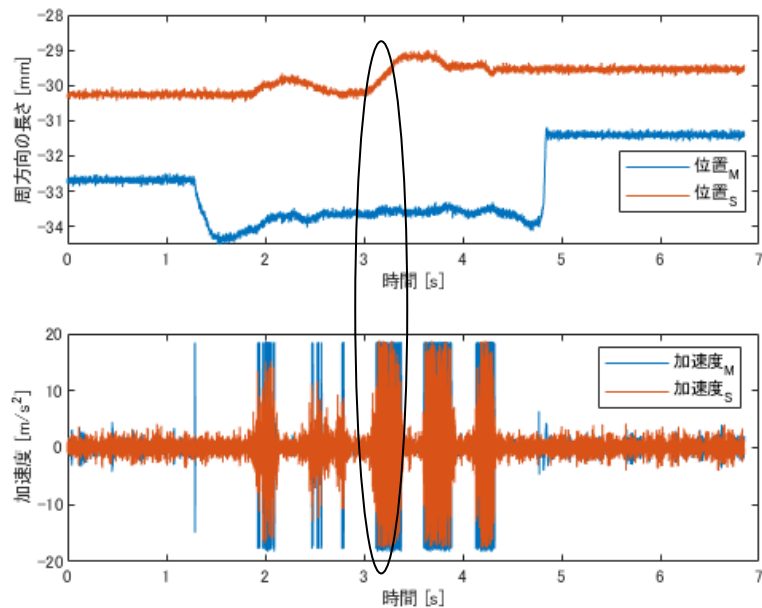
(a)従来制御法



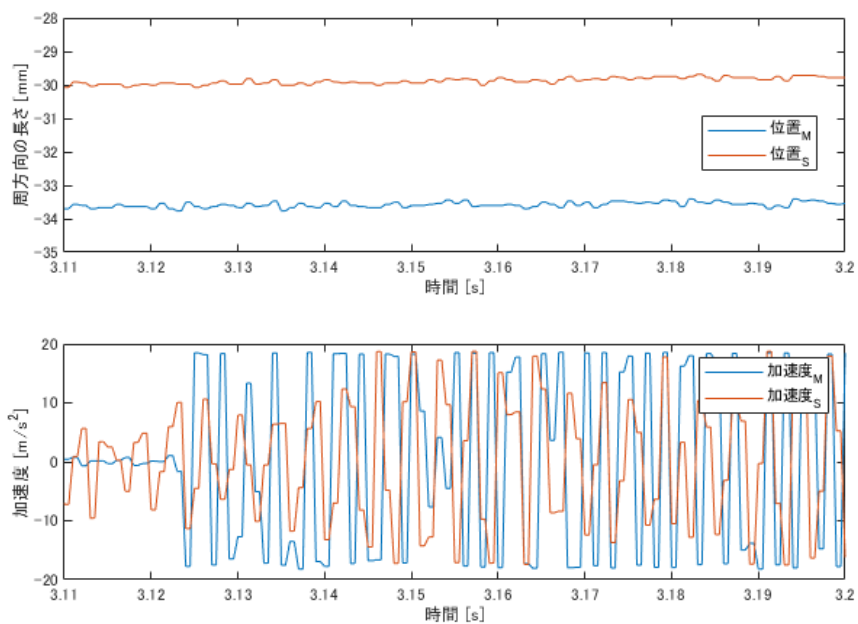
(b)提案制御法

Fig.3-13 対象物がある状態でのマスタ・スレーブハンドの位置

滑り振動を確認するために、マスタハンドを操作してスレーブハンドを対象物へ接触させる。その状態のままスレーブハンドの接線方向に対象物をゆっくり引く。同様に対象物を接線方向にゆっくり押す。これを何度か繰り返しマスタハンド、スレーブハンド両方の加速度を観測した。この加速度を観測するためにマスタハンドにもスレーブハンド同様に加速度センサを搭載した。Fig.3-14(a)が観測した位置と加速度でありその一部を拡大したものが Fig.3-14(b)である。



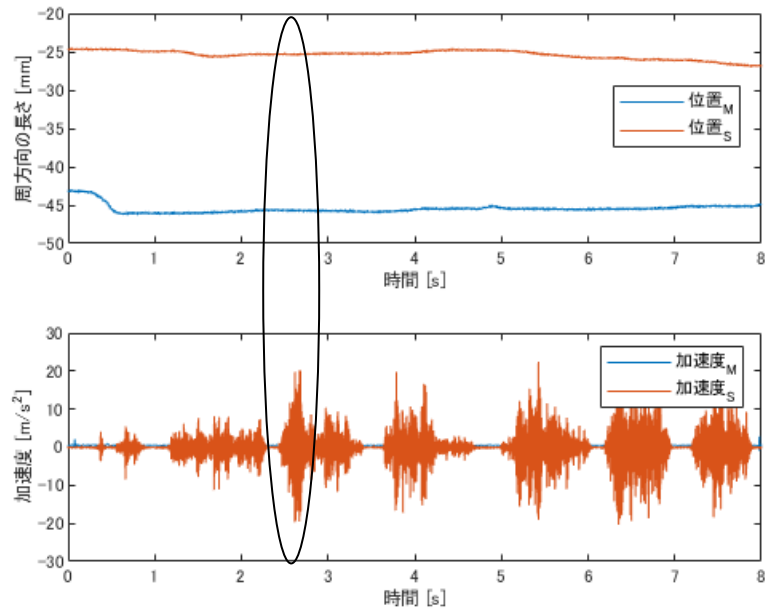
(a)滑り振動観測



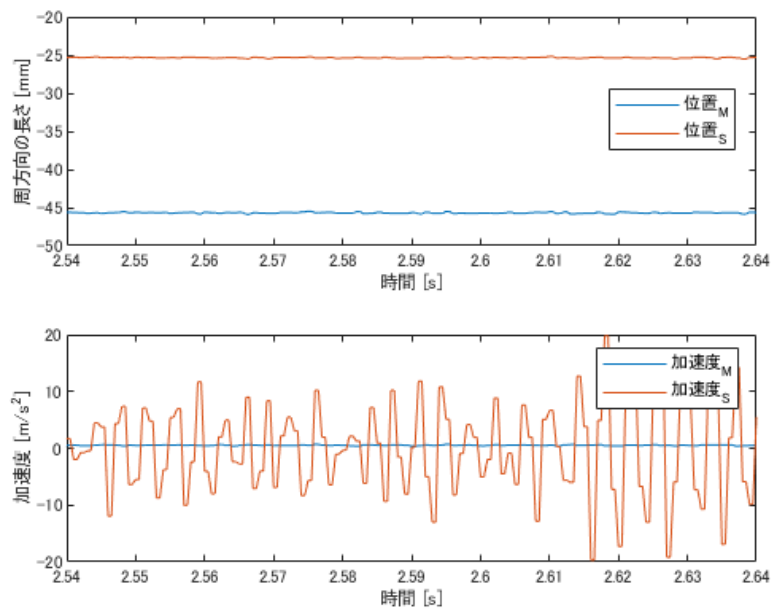
(a)丸枠 3.1-3.2 秒拡大

Fig.3-14 滑り振動時の提案手法におけるマスタ・スレーブハンドの位置と加速度

比較として対称形バイラテラル制御を実行しマスタハンドを操作してスレーブハンドを対象物と接触させる。同様にしてマスタハンド、スレーブハンドの加速度を観測した結果 Fig.3-15 を得た。Fig.3-14 と Fig.3-15 を比較するとどちらもスレーブハンドに加速度を観測しているが、提案手法にのみマスタハンドにも加速度を観測している。また、どちらの拡大図でも位置についてはほとんど変化していない。



(a) 滑り振動観測



(b) 2.54 秒から 2.64 秒拡大

Fig.3-15 滑り振動時の対称形制御におけるマスタ・スレーブハンドの位置と加速度

### 3.5 力と加速度を含めた制御のまとめ

本章では従来制御法では再現が困難である触感情報を操作者へ提示するために、触覚センサとしてひずみゲージと加速度センサを用いた装置とその制御を行った。触感情報として接触と滑り動作に着目し、二つのセンサを組み合わせることでそれぞれの検知を可能とした。検知した動作はマスタハンドを通じて操作者へ提示される。提示方法として接触には非対称三角波をマスタハンドの制御指令値に加え、滑りには物体接触中に生じる加速度を制御指令値に加えることで提示した。マスタハンドに正弦波を位置情報として入力し、スレーブハンドを物体に接触させ触覚提示用信号が出力されることを確認した。

また、提案手法によってスレーブハンドで生じた滑り振動がマスタハンドへ提示されていることを確認した。その際位置情報には影響を与えておらず、提案手法によって従来手法で求められる位置追従と、加速度による滑りに伴う振動情報の提示が両立可能であることが分かる。

# 第4章 力と加速度の計測情報を取り入れた制御に関する官能評価

---

4.1 はじめに.....	44
4.2 実験概要.....	45
4.3 官能評価結果.....	49
4.4 官能評価まとめ.....	51

---

## 4.1 はじめに

これまでの議論で、力と加速度の計測情報を対称形バイラテラル制御に加えることが可能となった。

この章では、付加した計測情報によって操作性がどのように変化していくか述べる。本章ではハンドを直接操作する、対称形バイラテラル制御、力と加速度の計測情報を取り入れた制御について人間による官能評価を行い、提案手法が操作性にどのような影響を与えているかを探る。

## 4.2 実験概要

操作者の指先に触れるハンドの条件を同一とするため、制御を行っていないスレーブハンドの外側に操作者が指を触れ、スレーブハンドの内側で物体に接触する操作をさせる。これを直接操作と呼ぶこととする。直接操作とバイラテラル制御の比較を Fig.4-1 に示す。直接操作及び対称形バイラテラル制御、力と加速度の計測情報を取り入れた制御について、被験者にハンドの操作（対象物がない状態での開閉、対象物がある状態での開閉）を行ってもらい、その操作感覚の評価を行った。被験者はハンドの操作の前にヘッドホンを着用する。これはハンドの操作（対象物との接触など）で発生する音による操作感覚の変化を防ぐためであり、ハンドの操作中にはホワイトノイズを流して操作音が聞こえない状態で評価を行う。評価の手順は以下のとおりである。

### 【実験手順】

1. スレーブハンドの直接操作を行う。被験者はスレーブハンドのみを介して対象物と接触する。操作について時間の制限は設けない。
2. 対称形バイラテラル制御による操作を行う。被験者はマスタハンドと制御されたスレーブハンドを介して対象物と接触する。2 と同様に時間制限は設けない。また、被験者は任意の時点で直接操作を行うことができる。
3. 3 つの評価項目について操作感覚の評価を行い、用意されたアンケート用紙に記入する。
4. 直接操作を基準に力と加速度の計測情報を取り入れた制御について 1-3 の評価を行う。



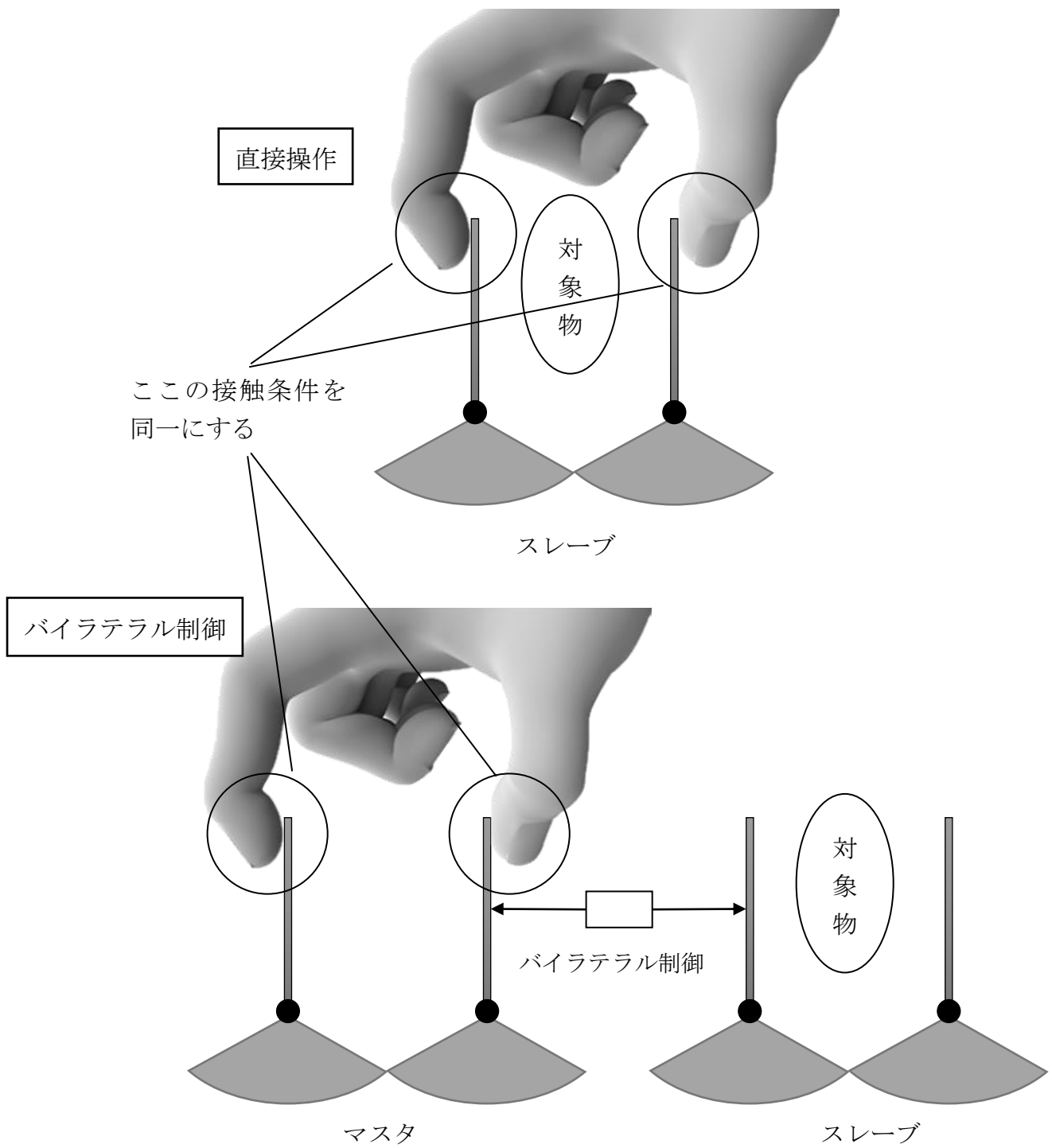


Fig.4-1 直接操作とバイラテラル制御の比較

**【評価項目】**

操作感覚の評価は、5段階の相対評価によって行った。評価項目は以下の3つである。

**・操作全体の類似度**

1をほとんど似ていない、5を非常に似ているとして操作感が直接操作に対してどれだけ類似していたかを評価する。得点が高いほど操作感が直接操作に近いことを示す。

**・接触の明確さ**

直接操作を基準に、1をまったく気づかない、5をはっきり気づくとして接触判断の明確さを評価する。得点は3に近いほど直接操作と近いことを示す。

**・滑りの認識**

直接操作を基準に、1を全く感じない、5を強く感じるとして対象物の滑りの認識具合を評価する。得点は3に近いほど直接操作と近いことを示す。

評価に用いた用紙を Fig.4-2 に示す。被験者は二十代の男女4名である。被験者が少ないため結果は参考程度となる。

操作感評価試験

この度は実験にご協力いただきありがとうございます。

本実験では機器を使つてのつまむ動作において、接触の開始・滑りの認識について評価していただきます。

注意点

ハンド操作の前にヘッドホンを装着していただきます。ヘッドホンからはホワイトノイズが流れていますがこれは操作音による感覚への影響を除外するためです。

ヘッドホンのボリュームに問題がある場合直ちに知らせてください。

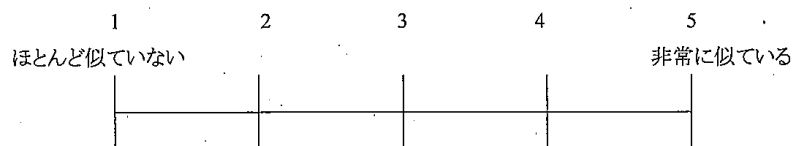
実験の手順

1. 比較対象となるスレーブハンドの直接操作を行う。操作に慣れたのち、スレーブハンドを操作して自由に対象物に触れる。
2. 被験者に対象物を把持させる。その後、対象物を被験者から見えないように設定した上で、他社が対象物を引き抜いてその滑りを評価する。
3. 用意された制御 1 のマスタハンドを操作する。同様に、操作に慣れたのち、スレーブハンドを操作して自由に対象物に触れる。
4. 被験者に対象物を把持させる。その後、対象物を被験者から見えないように設定した上で、他社が対象物を引き抜いてその滑りを評価する。
5. 下に用意された質問について操作感を比較する。
6. 制御を変更し 1,2,3,4,5 を再度行う。

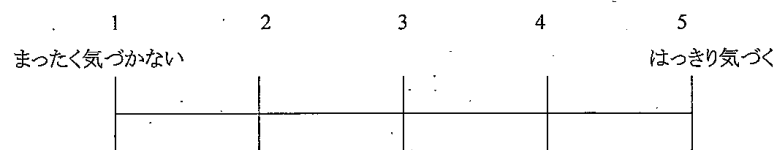
質問

直接操作と制御 1 を比較して、以下の質問に答えてください。

①操作全体の類似度について、5段階で評価してください。



②直接操作を基準に接触の明確さについて、5段階で評価してください。



③直接操作を基準に滑りの認識について、5段階で評価してください。

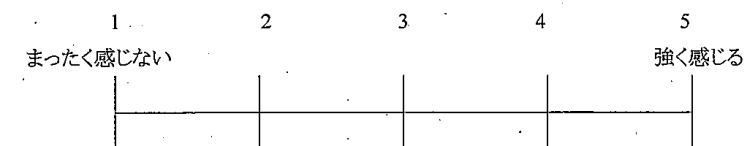


Fig.4-2 官能評価試験用紙

### 4.3 官能評価結果

実験結果を Fig.4-3 4-4, 4-5 に示す。

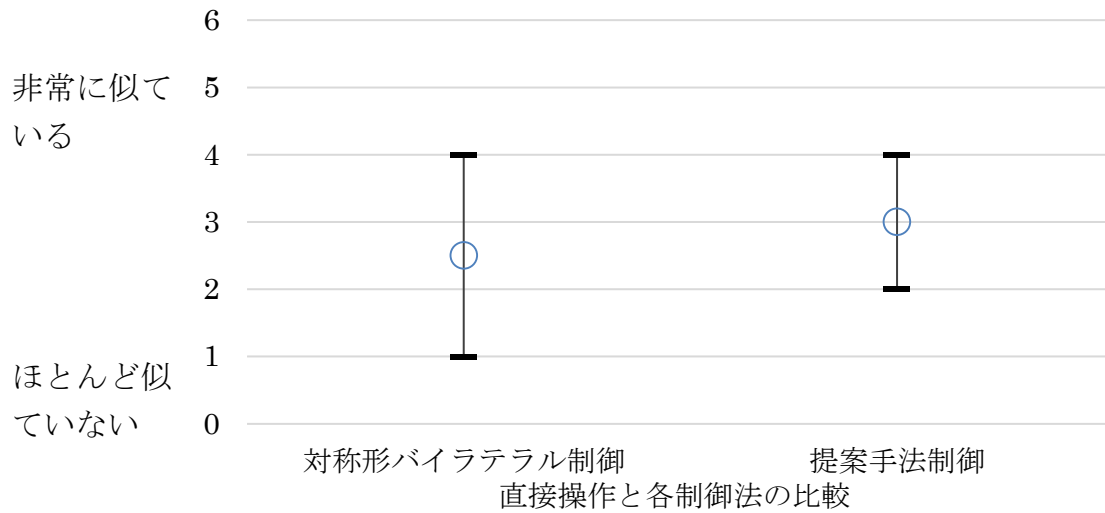


Fig.4-3 全体の類似度

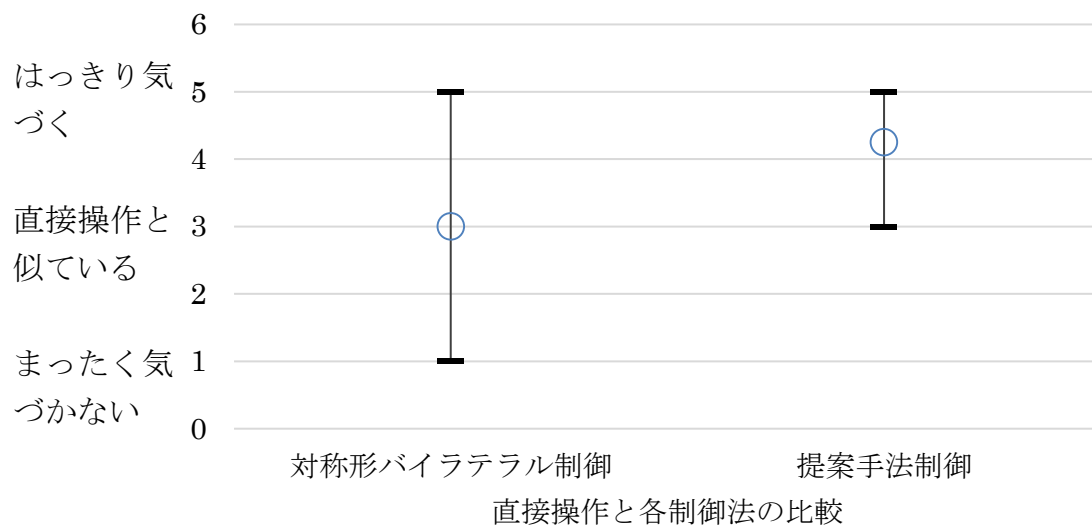


Fig.4-4 接触の明確さ

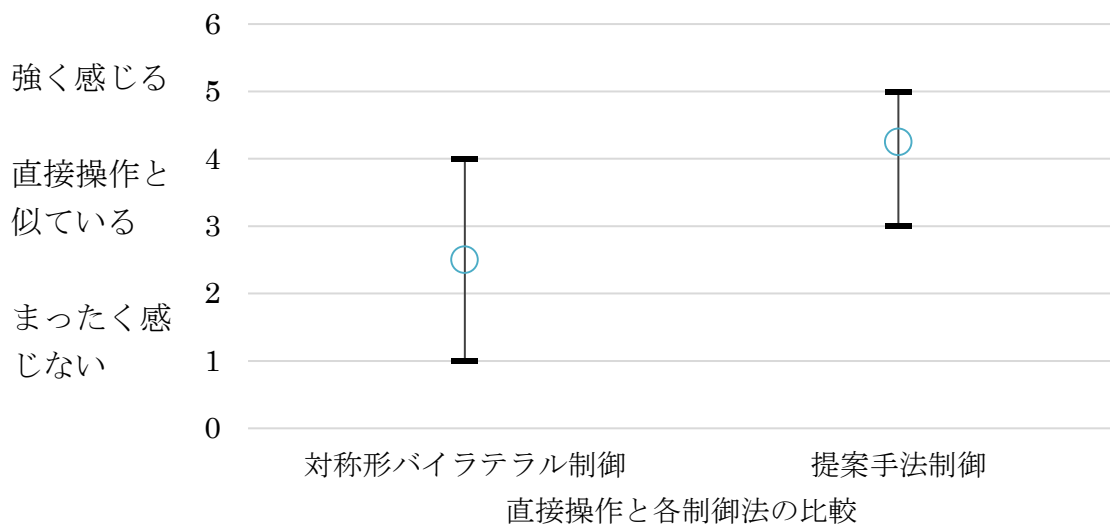


Fig.4-5 滑りの認識

全体の類似度を見ると、対称形バイラテラル制御がわずかに似ていない側に寄っているが、おおよそ似た傾向であることがわかる。

接触の明確さについては対称形バイラテラル制御ではばらつきが大きくなっている。一方提案手法でははっきり気づいている傾向が強く、バイラテラル制御よりもばらつきが小さい。これは接触提示信号によって接触を強調して操作者へ伝えているためであると考えられる。

滑りの認識については対称形バイラテラル制御は直接操作と似ている傾向が強く見れる。提案手法では接触の明確さ同様に強く感じる傾向が強く、提案手法によって対称形バイラテラル制御より滑りに伴う振動をスレーブハンドを通して感じやすいと思われる。

## 4.4 官能評価まとめ

本章では作成した力と加速度の計測情報を取り入れた制御に対して、スレーブハンドを操作し制御を介さないで対象物に触れる操作を基準に、対称形バイラテラル制御と比較を行った。被験者が少ないため参考程度の結果であるが、全体の類似度は対称形バイラテラル制御に近く感じる傾向にある。一方、提案制御法で着目した接触や滑りの認識は対称形バイラテラル制御とは異なり、認識しやすくなっている傾向となった。このことから従来制御法と同じ感覚で使用しつつ、着目した状態に対しては従来制御法より操作性が向上したと言える。

## 第5章 結論と今後の課題

---

5.1 結論.....	54
5.2 今後の展望.....	55

---

## 5.1 結論

本研究は遠隔操作用マスタ・スレーブ装置において、対象形バイラテラル制御では困難な触感の提示を行った。触感センサの信号を制御系に加えることで個別の触覚提示用デバイスを用いずに対象物との接触状態の触感を高めることを目的としている。

これに対して本研究では接触の開始と滑りの2点に着目した。これらは物体を操作するのに重要な感覚である。この2点の検出のためひずみゲージと加速度センサを使用して、スレーブハンドに生じる力と加速度を計測し、この計測情報を従来制御法に加えることで触感を高めることが可能となると考えた。スレーブハンドで生じる力はスレーブハンドで触れている対象物が静止している限り、作用反作用によってスレーブハンドが出力している力となる。この力を観測することでスレーブハンドと対象物体が接触している状態を判別した。また、スレーブハンドに生じる加速度はスレーブハンドの接触状態の変化を観測することが可能となる。スレーブハンドで把持した対象物が滑り動作を行うとき、スレーブハンドの位置情報はほとんど変化しないが、比較的大きな加速度が生じていることが判明した。

スレーブハンドに生じる力と加速度を計測し従来の対称形バイラテラル制御に加えることでより明確な接触の提示や滑りに伴う振動を提示することが可能となった。滑り振動として  $10[\text{m/s}^2]$ 以上の加速度信号をバイラテラル制御に加えることで、力感覚だけでは感じられない滑り状態を操作者へ提示した。また、加速度信号によってマスタ・スレーブハンドが発振してしまわないように、スレーブハンドに生じる力を使用して安定化を図った。

官能評価では客観的な検証は不十分であったが、有効性を示す傾向が見られた。



## 5.2 今後の展望

- ・官能評価について

官能評価において調査した被験者が少ないため全体の傾向を把握する程度の結果となっている。そのため被験者の数を増やし、統計的な手段でもって定量的に再度評価する必要がある。これによって提案手法がどの程度従来制御法と異なって感じるか判断することが可能となる。

- ・可動範囲の変更

本研究ではマスタ・スレーブの可動範囲は同一である。しかし遠隔操作用マスタ・スレーブ装置の需要を鑑みるに、スレーブの可動範囲を縮小しマイクロな環境での操作性向上も求められる。マイクロな環境ではハンドと対象物との間に生じる力の発生源が変わるため、それに対応した制御パラメータが必要となる。

## 参考文献

- [1] 菅野高皓：“触力覚通信の応用事例,” 電子情報通信学会誌, 第 1136 号, vol.102, no.1, pp.69-73, Jan.2019.
- [2] G.S Guthart, J.K Salisbury：“The intuitive telesurgery system : overview and application,” 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.618-612, April 2000.
- [3] A.R. Lanfranco, A.E. Castellaos, J.P. Desai, W.C. Meyers：“Robotic surgery : a current perspective,” Ann. Surg., vol..231, no.1, pp.14-21, Jan. 2004.
- [4] D.A. Lawrence：“Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 9, Issue 5, pp. 624 - 637, Oct. 1993.
- [5] 佐々木健, 石川博隆, 田中康夫：“触覚呈示用信号を重畳させた遠隔操作用バイラテラル制御,” 精密工学会誌, vol.69, no.1, pp.53-57, 2003.
- [6] 谷中聖志, 鎌田裕一, 宮本晶規, 遠藤康浩：“豊かな触感を提示する超音波触感ディスプレイ技術,” 富士通研究所, vol68-1.
- [7] 岩本, 篠田：“空中超音波による触覚提示,” 第 8 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2007), 1A3-3, 2007.
- [8] 3D SYSTEMS 社, 3D Systems Touch, <https://www.ddd.co.jp/3d-systems-touch/>.
- [9] K. Ohnishi, N. Matsui, Y. Hori：“Estimation, identification, and sensorless control in motion control system,” in Proceedings of the IEEE, vol. 82, no. 8, pp. 1253-1265, Aug. 1994.
- [10] T. Murakami, F. Yu, K. Ohnishi：“Torque sensorless control in multidegree-of- freedom manipulator,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 40, no. 2, pp. 259-265, April 1993.
- [11] 大野 嘉紀, 畠本 慶太, 溝口 貴弘, 大西 公平：“多自由度異構造バイラテラル制御系の通信遅延補償法,” 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), 2014, 134 巻, 3 号, p. 317-324
- [12] 境野 翔, 佐藤 智矢, 大西 公平：“斜交座標制御を用いた高度なハイブリッド制御の実現,” 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), 2010, 130 巻, 3 号, p. 300-306

- 
- [13] Y. Yildiz, A. Sabanovic, K. Abidi : "Sliding-Mode Neuro-Controller for Uncertain Systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 3, pp. 1676-1685, June 2007.
- [14] A. Hace, K. Jezernik, A. Sabanovic : " SMC With Disturbance Observer for a Linear Belt Drive," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 6, pp. 3402-3412, Dec. 2007.
- [15] D. Gunji, Y. Mizoguchi, S. Teshigawara, A. Ming, A. Namiki, M. Ishikawa, M. Shimojo : " Grasping force control of multi-fingered robot hand based on slip detection using tactile sensor," 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, 2008, pp. 2605-2610.
- [16] C. Melchiorri : " Slip detection and control using tactile and force sensors," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 5, no. 3, pp. 235-243, Sept. 2000.
- [17] Y. Koda, T. Maeno : " Grasping Force Control in Master-Slave System with Partial Slip Sensor," 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, 2006, pp. 4641-4646.
- [18] B. Ward-Cherrier, L. Cramphorn, N. F. Lepora : " Tactile Manipulation With a TacThumb Integrated on the Open-Hand M2 Gripper," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 1, no. 1, pp. 169-175, Jan. 2016.
- [19] M. Tajiri, Y. Fujimoto : " Design of Two-Channel Bilateral Control Systems by a Transfer-Function-Based Approach," IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, Vol.65, No.7, July 2018.
- [20] Rebecca M. Pierce, Elizabeth A. Fedalei, Katherine J. Kuchenbecker : " A Wearable Device for Controlling a Robot Gripper With Fingertip Contact, Pressure, Vibrotactile, and Grip Force Feedback," IEEE Haptics Symposium 2014 23-26 February, Houston.
- [21] 石橋豊, 三好孝典, 黄平国 : " 触力覚インタフェース装置の分類と特徴," 電子情報通信学会誌, Vol.102, No.1, 2019.
- [22] CyberGlovesystems, <http://www.cyberglovesystems.com/>.

---

## 謝辞

はじめに、指導教員の佐々木健教授には2年間にわたり多大なご教授、ご指導をしていただきました。ここに厚く感謝いたします。

また、研究会など多くの場面で貴重な助言や指摘をしてくださった保坂寛教授、森田剛教授に感謝いたします。両先生にはお忙しい中少なくない時間を割いていただき、研究開始時より多くの助言を賜りました。

本研究を行うにあたり、官能評価実験に参加してくださった方々に御礼申し上げます。

研究テーマが同じということで研究についてともに議論することができた吉本さんに感謝いたします。

研究テーマが異なるにも関わらず、グループミーティングをともに行い、研究の進め方や手本を示してくださった大久保さん、西田さん、井上さん、小松さん、また、佐々木研究室、保坂研究室、森田研究室の皆様には2年間大変お世話になりました。心から感謝いたします。

研究室同期の皆様には実験の協力や議論など、日ごろから多大なご助力を頂きました。研究生活をともにした皆様に心から感謝いたします。

2020年1月  
金山 泰樹