



## 圧電ハイブリッドアクチュエータシステムの開発と その応用

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2014-06-26 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 桶谷, 涼太 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.15118/00005110">https://doi.org/10.15118/00005110</a>

# 学位論文

## 圧電ハイブリッドアクチュエータ システムの開発とその応用

室蘭工業大学大学院工学研究科  
生産情報システム工学専攻

桶谷 涼太

## 概要

現在用途や出力によってさまざまなアクチュエータが開発されている。その中で一般的に電磁モータ (EMM) は、出力要求に対して汎用性が高く、容易に出力を制御できることから様々なシステム組み込まれている。しかし、高出力なものほど大型でイナーシャやインダクタンスが増加し、応答の遅れるなどの問題がある。一方、圧電アクチュエータは、EMM と比較して応答が速く、EMM と同質量で大きな出力を持つことから、EMM と組み合わせることで互いの短所を補完するアクチュエータシステム(AS)が実現可能と考えられる。しかし、USM は摩擦駆動であるため外力による回転が困難なため、AS の実現には高速クラッチ/ブレーキが必要である。先行研究で高速クラッチ/ブレーキとして圧電クラッチ/ブレーキを開発し、超音波モータ (USM) と組み合わせた超音波 AS を実現している。開発した超音波 AS と EMM を組み合わせることで出力範囲が広範で高速応答可能な AS を実現可能であると考えられる。

本研究では、EMM と超音波 AS を組み合わせたハイブリッド AS の開発を行い、その効果を検討する。また、高速応答性やアクチュエータを切り替えることによる広い出力特性を活かした応用例として、力覚提示への効果について検討した。本システムを用いることで、従来十分な表現ができていない硬さなどの高速な応答が必要な表現から弾性表現までを一つのシステムで表現可能となる。

試作したハイブリッド AS では、超音波 AS による圧電クラッチによる回転速度・トルクの予圧制御およびハイブリッド駆動によるアシスト効果の検討を行った。USM への印加電圧を一定とした状態で、予圧制御により回転速度・トルクの制御を実現した。また、大きな予圧力を与えた状態での USM 始動から瞬間的に予圧力を下げることで最高速度への到達時間の短縮が可能であることを確認した。さらにこの制御を拡張し、EMM 始動時に USM を併用することで EMM の立ち上がり特性が向上し、消費電力の削減効果を確認した。

ハイブリッド AS の応用例の一つとして力覚提示での効果の検討を行った。提示する力覚状態に応じて、EMM, USM, 圧電クラッチの組み合わせを切り替えることにより、弾性体から剛性体までを安定して提示可能であることを確認した。また、ハイブリッド AS を 2 自由度ハイブリッド AS に拡張することで、よりリアルな操作感と力覚提示を実現した。

本論文は以下の 5 章より構成される。

第 1 章「緒論」では、研究背景、先行研究および本研究の目的について述べた。

第 2 章「一軸型ハイブリッドアクチュエータシステムの構成および特性」では、ハイブリッドアクチュエータシステムの構成および使用アクチュエータの動作原理について述べる。また、超音波アクチュエータの基本性能、回転速度特性、トルク特性の測定結果について述べる。

第 3 章「ハイブリッドアクチュエータの制御」では、アクチュエータシステムによる回転速度およびトルク制御について述べる。また、ハイブリッド駆動や制動による効果の検討について述べる。

第 4 章「力覚提示への応用」では、ハイブリッドアクチュエータシステムの力覚提示への可能性について、幾つかの力覚提示実験を通して検討する。

第 5 章「結論」では、第 2 章から第 4 章までのまとめと今後の課題について述べる。

## Abstract

Various actuators had been developed for the output and applications. In general, an electromagnetic motor (EMM) has versatility for the output request. In addition, the power of EMM can easily control with the electrical operation. However, the high power EMM has disadvantage such as response delay by increases of mass and inductance. On the other hand, an ultrasonic motor (USM) has a rapid response by friction force drive between a stator vibrator and a rotor or a slider. If the EMM and the USM are used together in the same actuator system (AS), the individual actuators can complement each other. Then, such AS has a wide output range and high speed response. However, the USM is hardly operated by external force. Therefore, realizing such an AS requires high speed clutch/brake.

As the first step of study, an ultrasonic AS which was able to electrically control a preload had been developed by combining a USM with a piezoelectric clutch (piezo-clutch). As a result, it was realized that the expansion of the operating range and increased stability. Therefore, a new AS with wide output range and rapid response is realizable by combining the EMM and the ultrasonic AS.

The objective of this study is to develop a new hybrid AS that includes an EMM and an ultrasonic AS. In addition, as the one application of wide outputs range and rapid response, the effect of the force-feedback display by the hybrid AS was considered. The proposed hybrid AS is composed of a USM and an EMM which generate the rotation and a piezo-clutch/brake based on a mechanical amplifier which is used for adjustments of preload and braking force. A preload control by the piezo-clutch was examined. The revolution speed was stabilized by controlled preload using the piezo-clutch. The rise time was shortened by preload control during transient rotation at starting the USM. In addition, the rise time and driving power was reduced by hybrid drive with both of EMM and the USM.

As the one application of the hybrid AS, the effect on a force-feedback display was examined. As author's impression, the hardness feeling was realistically represented by the piezo-brake. The elastic feeling was represented by either the EMM or the USM. In addition, the hybrid AS was extended a two-degree-of-freedom hybrid AS. As a result, the force-feedback was represented with more real operational.

As above, the hybrid AS realized by combining the EMM and the ultrasonic AS. The rise time and driving power was able to reduce by hybrid drive. In addition, the effect on a force-feedback display by the hybrid AS confirmed.

## 目 次

第1章 緒 論 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 ハイブリッドアクチュエータ .....	5
1.3 力覚ディスプレイ .....	6
1.4 本研究の目的と意義 .....	8
1.5 論文構成 .....	9
第2章 一軸型ハイブリッドアクチュエータシステムの構成および特性 .....	11
2.1 緒言 .....	11
2.2 ハイブリッドアクチュエータシステム .....	11
2.2.1 システム構成 .....	11
2.2.2 超音波モータの構成および動作原理 .....	13
2.2.3 圧電クラッチ/ブレーキの構成及び動作原理 .....	14
2.3 超音波アクチュエータシステムの設計 .....	15
2.3.1 超音波モータの設計 .....	15
2.3.2 圧電クラッチ/ブレーキの設計 .....	16
2.4 動作特性 .....	18
2.4.1 圧電クラッチ/ブレーキの動作特性 .....	18
2.4.2 回転速度特性 .....	19
2.4.3 トルク特性 .....	21
2.4.4 超音波モータの回転速度-トルク特性 .....	23
2.4.5 最大静止摩擦トルク特性 .....	25
2.5 結言 .....	26
第3章 ハイブリッドアクチュエータの制御 .....	28
3.1 緒言 .....	28
3.2 制御システム概要 .....	28
3.3 圧電ブレーキによる摩擦トルク制御 .....	29
3.4 USM 回転速度一定制御 .....	30
3.5 負荷変動に対する USM 回転速度一定制御 .....	31
3.6 超音波モータの予圧駆動の検討 .....	33
3.7 ハイブリット駆動 .....	35
3.7.1 駆動原理 .....	35
3.7.2 駆動実験結果 .....	36
3.8 ハイブリッドアクチュエータシステムの制動特性 .....	38
3.9 結言 .....	40
第4章 力覚提示への応用 .....	41
4.1 緒言 .....	41
4.2 力覚提示システム .....	42
4.3 力覚提示実験 .....	44
4.4 質量移動の提示 .....	45
4.5 弾性提示 .....	46
4.5.1 超音波アクチュエータによる再現 .....	46
4.5.2 電磁モータ・圧電クラッチ併用による再現 .....	48

4.6.2 自由度デバイスへの拡張 .....	49
4.7.2 自由度ハイブリッドアクチュエータシステムの構成 .....	50
4.8 操作範囲 .....	51
4.9 出力特性 .....	52
4.9.1 USM 印加電圧に対する出力特性 .....	52
4.10 最大静止摩擦力特性 .....	53
4.11 壁なぞり操作の提示 .....	54
4.11.1 なぞり動作における力の釣り合い .....	54
4.11.2 領域内でのブレーキ力制御法 .....	54
4.11.3 なぞり動作提示実験 .....	55
4.11.4 水平方向へのなぞり動作提示実験 .....	57
4.12 ブロック移動の提示 .....	59
4.13 弾性提示 .....	60
4.14 結言 .....	63
第5章 結 論 .....	64
5.1 研究成果 .....	64
5.2 課題 .....	65
謝 辞 .....	67
参考文献 .....	68
筆者による発表文献 .....	71
付録 A 変位拡大機構の拡大率の算出 .....	73
付録 B 変位拡大機構の離脱条件の算出 .....	75
付録 C 超音波アクチュエータシステムの特性測定 .....	78
C.1 変位特性 .....	78
C.2 変位時間応答特性 .....	79
C.3 圧接力特性 .....	80
付録 D 自動整合 PID 制御 .....	82
付録 E 電磁モータシミュレーション .....	84
付録 F 力覚提示例 .....	85
F.1 壁面提示 .....	85
F.2 凹凸提示 .....	87
付録 G 力覚提示の再現度評価 .....	89
G.1 実験方法 .....	89
G.2 感触のみによる力覚識別 .....	89
G.3 視覚情報を含めての再現度の評価 .....	90

# 第1章 緒 論

本章では、アクチュエータシステムに関する研究背景・先行研究について述べる。また、これまでの結果から得られる問題点や課題を明かにし、本研究の目的と意義、さらに、本論文の構成と概要について述べる。

## 1.1 研究背景

アクチュエータとは、供給されたエネルギーを機械的仕事に変換する機械要素である<sup>[1]</sup>。その種類は電気を変換する電磁アクチュエータ、圧力を変換する油空圧アクチュエータ、振動を変換する超音波モータ、さらに温度変化による変形を利用するアクチュエータなども存在する。代表的なアクチュエータの出力・動作特性範囲をそれぞれ Fig. 1.1, Fig. 1.2 に示す<sup>[2]-[4]</sup>。

数あるアクチュエータの中で一般的に広く用いられているアクチュエータとして、磁場の力により駆動する電磁アクチュエータである。電磁アクチュエータは Fig. 1.1 に示すように出力可能領域が広範で汎用性が高く、その他エネルギー変換効率など他のアクチュエータを上回っているといえる。またコンピュータなどを介した電氣的な制御が容易に可能なことから、多くのシステムに組み込まれている。しかし、大出力なものほど大型化やギアが必要となり、イナーシャやインダクタンスの増加により応答が遅れる。ほかに自己保持状態での消費電力などの問題がある。これらの問題を解決方法の一つとして、異なる特性を持つアクチュエータを組み合わせるシステム化が考えられる。組み合わせるアクチュエータとして Fig. 1.1 および Fig. 1.2 より同質量で電磁アクチュエータより大きな出力特性を有し、応答が速い圧電アクチュエータがあげられる。

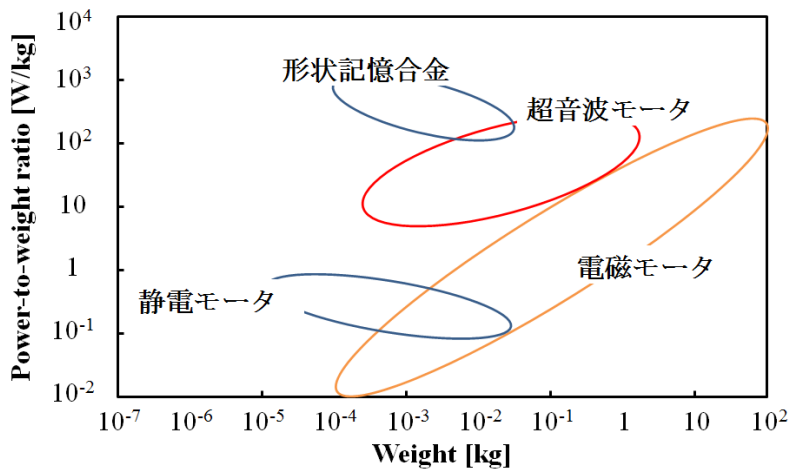


Fig. 1.1 Power to weight ratio of the actuator.



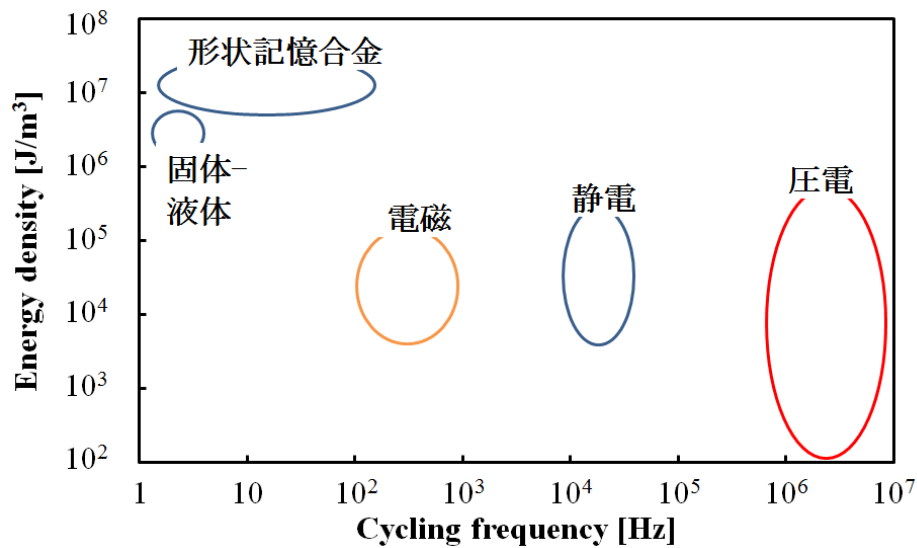


Fig. 1.2 Operating characteristic of the actuator.

圧電アクチュエータは機械的振動を動力源とし、摩擦を介して外部に駆動力を取り出し回転または直線運動に変換するアクチュエータである。駆動方式から Fig. 1.3 のように分類できる<sup>[5]</sup>。圧電アクチュエータと他のアクチュエータの特徴を比較すると以下の点があげられる。

#### 長所

- 単純構造で形状の自由度が高いため小型化、薄型化が可能
- 巻線を使用しないため電流の遅れが小さく、高速応答
- 高精度の位置決めが可能
- 磁場を発生せず、磁場による影響も受けない
- 超音波領域の周波数で駆動するため静粛性に優れる
- 摩擦力による駆動のため自己保持力が大きく、ロック機構が不要

#### 短所

- 摩擦駆動により、接触部分での摩耗により耐久性が比較的低い
- 接触部分での損失が大きく、効率が低い
- 外力での動作が困難

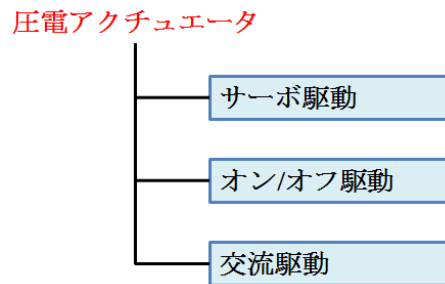


Fig. 1.3 Classification of the piezoelectric actuator.

上記の特徴を持つ圧電アクチュエータは腕時計，デジタルカメラ用のズーム機構，オートフォーカス機構，手ぶれ補正機構およびカード搬送装置など微小変位・精密制御分野において，これまで電磁アクチュエータが採用されていたものと置き換えて用いられている<sup>[6]-[12]</sup>。

圧電アクチュエータ特に超音波モータ（Ultrasonic motor, 略称：USM）と電磁モータ（Electromagnetic motor, 略称：EMM）の特徴を比較する。超音波モータは電磁モータと同程度の出力特性を持ち，軽量かつ高速動作で実現でき，非給電時自己保持力を有している。以上より電磁モータと超音波モータを組み合わせたシステムを構成することで，出力増加に対する質量増加を抑え，高速動作や無給電保持を実現可能であると考えられる。

しかし，超音波モータは用途や目的に応じて様々な方式のもの研究開発されているが，他のアクチュエータを併用するアクチュエータシステム（Actuator system, 略称：AS）としての研究・実用例はほとんど存在しない。一般的に超音波モータは常時予圧がかかっているため，外力による回転が困難である。そのため電磁モータなどのように複数のアクチュエータを組み合わせた運用は困難であった。しかし，超音波モータを機械的にロータから離脱が可能であれば，他のアクチュエータとの併用が可能となる。

問題解決の一案として，武村により電氣的に予圧力を変化できるクラッチ機能を有する超音波アクチュエータシステムの開発された<sup>[14]</sup>。開発したアクチュエータシステムを Fig. 1.4 に，特性を Table 1.1 にそれぞれ示す。本システムはブレーキ状態，超音波モータ動作状態に加えて，クラッチ機能によるトルクフリー状態を実現可能である。超音波モータおよびクラッチ機構には高速応答性に優れている積層圧電アクチュエータ（Multilayer piezoelectric actuator, 略称：MPA）<sup>[15]</sup>を採用している。MPA の基本構成を Fig. 1.5 に示す。MPA は薄い圧電素子が厚み方向に分極が互いに逆になるように数十～数百枚積層されている。分極の同極同士がそれぞれ並列に接続されており，その電極に電圧を印加することで積層方向に変位させることができる。圧電素子の積層枚数に比例した変

位が発生するため、クラッチに用いることにより従来の超音波モータでは実現不可能な駆動中に予圧を電氣的に制御することを可能とした。その結果、本システムは高速な応答及び高い保持力という超音波モータの特徴を有したまま、超音波モータの出力範囲の広範囲化を実現した。さらに、圧電クラッチによるステータをロータから離脱したトルクフリー状態の実現により、他のアクチュエータと併用するシステムによる出力の広範囲化が望める。ただし、試作した超音波アクチュエータシステムは推力が小さく、回転速度が非常に低速であるため特性改善が必要である。

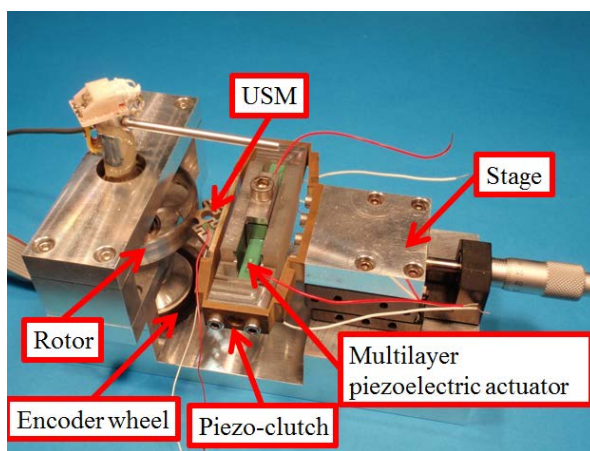


Fig. 1.4 Ultrasonic actuator system.

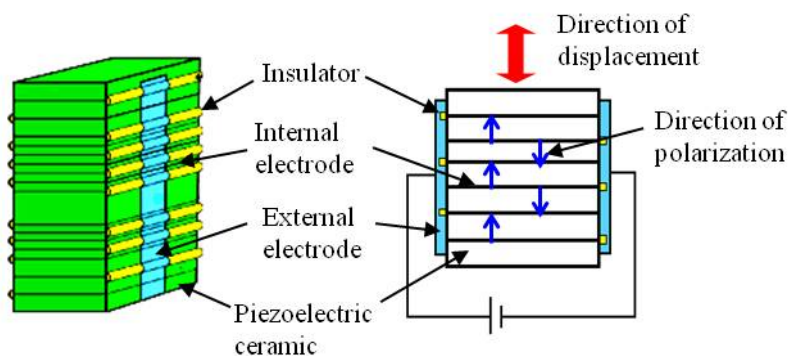


Fig. 1.5 Basic structure of MPA.

Table 1.1 Performance of ultrasonic AS.

Max. displacement ( $\mu\text{m}$ )	161
Max. contact force (N)	26.7
Revolution speed ( $V_{\text{USM}}=40\text{V}$ , Preload = 15.7N)(rpm)	9.1
Torque ( $V_{\text{USM}}=40\text{V}$ , Preload = 15.7N) (mNm)	9.7
Max. static friction torque (mNm)	70

## 1.2 ハイブリッドアクチュエータ

一般的に特性の異なる動力源など 2 種類以上のものを併用した各々の特徴を活かすシステムをハイブリッド（システム）と呼称し、様々なものが研究されており、ハイブリッドカーなどが一般的に知られている<sup>[16]-[18]</sup>。前述のように従来超音波モータは外力に対して大きな抗力を有しているため、他のアクチュエータとのハイブリッド化の研究はほとんどない。

ここで電磁モータと超音波モータの特性比較を Table 1.2 に示す。両アクチュエータはそれぞれ異なる特性を持っている。各特徴の中から 3 つの項目に注目し Fig. 1.6 の直交座標上に示す。超音波モータは、圧電クラッチを組み合わせることで電磁モータとの併用を可能とし、摩擦駆動では実現できない高効率・高速回転が可能となる。逆に電磁モータは、超音波モータを駆動のアシストや高速ブレーキとして用いることで回転速度、トルクの応答性の向上や消費電力の削減効果が見込める。

以上より、電磁モータと超音波モータを組み合わせたハイブリッドアクチュエータシステムの実現は、各々の長所を活かしながら短所を補完することで広範な出力特性をもつシステムを構成することができ、様々な用途への応用が期待できる。

Table 1.2 Characteristics comparison of EMM and USM

	電磁モータ	超音波モータ
回転速度・トルク	高速・低トルク	低速時高トルク
トルクコントロール性	○	△
応答性	△	○
保持電力	必要	不要
外力による動作	容易	困難

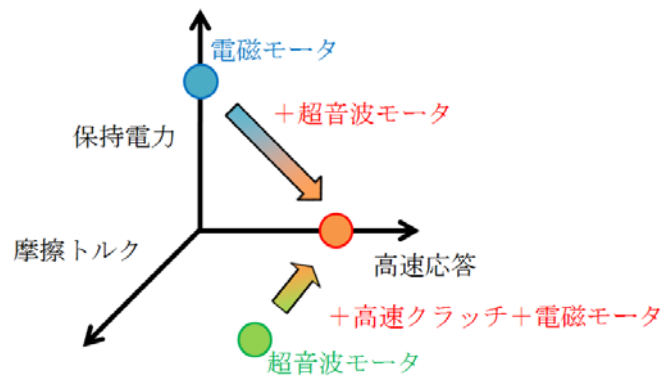


Fig. 1.6 Coordinate graph of actuator characteristic.

### 1.3 力覚ディスプレイ

提案したハイブリッドアクチュエータシステムの実現により、システムのアクチュエータを切り替えや併用することで、多様な出力を得ることができる。このような複数の力を必要とする応用例として力覚提示が考えられる。

現在、現実空間には存在しないが人工的に実質的なものを作り出し、それをユーザに提示するバーチャルリアリティ（VR）技術が盛んに研究されている。従来、VR技術はCG（コンピュータグラフィックス）などによって視覚を刺激するものや、音響効果などによって聴覚を刺激するものであった。現在はそれに加え触覚を刺激する力覚デバイスの開発が進められている。力覚デバイスは、ロボットマニピュレーション、工業デザイン、医療、アミューズメントなどへの応用が期待される<sup>[19]-[23]</sup>。

力覚デバイスを用いてロボットハンドの遠隔操作を行うことで、あたかもその環境にいるかのような感覚で操作できるテレグジスタンス技術がある<sup>[24]</sup>。この技術を、遠隔手術、人が立ち入ることができないような宇宙空間、深海、原子炉などの極限空間および災害現場などにおいて使用することで、作業効率の向上が期待できる。

力覚は物体の形状、重量、材質などを認識するための重要な感覚器官である。力覚の感覚受容器は大きく機械受容器と固有受容器に分けられる<sup>[24]</sup>。機械受容器は皮膚表面近くに存在し、皮膚の感覚情報を得ることができる。固有受容器は筋肉、腱、関節などに存在し、身体各部の位置感覚や力の感覚などの固有感覚情報を得ることができる。Fig. 1.7に示すように機械受容器を刺激する力覚デバイスには、電気刺激、空気噴流、弾性表面波、バイモルフ型圧電アクチュエータなどが利用されている。電気刺激を利用した力覚デバイスは、多数配列した電極により皮膚表面に電流を流し、機械受容器を刺激することができる<sup>[24]</sup>。空気噴流を利用した力覚デバイスは、小径のノズルアレイから皮膚表面に圧縮空気を噴出し、機械受容器を刺激するものである<sup>[26]</sup>。弾性表面波を利用した力覚デバイスは、圧電材料によりステータ振動子に弾性表面波の定在波を励振し、ユーザが下面に鉄球が取り付けられたスライダー越しに振動子をなぞることで感触を得ることができる<sup>[26]</sup>。また、機械受容器を刺激するピンをバイモルフ型圧電アクチュエータで振動させ、そのピンに触れることで感触を得ることができる力覚デバイスも研究されている<sup>[27][28]</sup>。機械受容器を刺激し、皮膚感覚情報を提示する力覚デバイスは数多く報告されているが、現状では十分な成果が得られていないため製品化には至ってはいない。

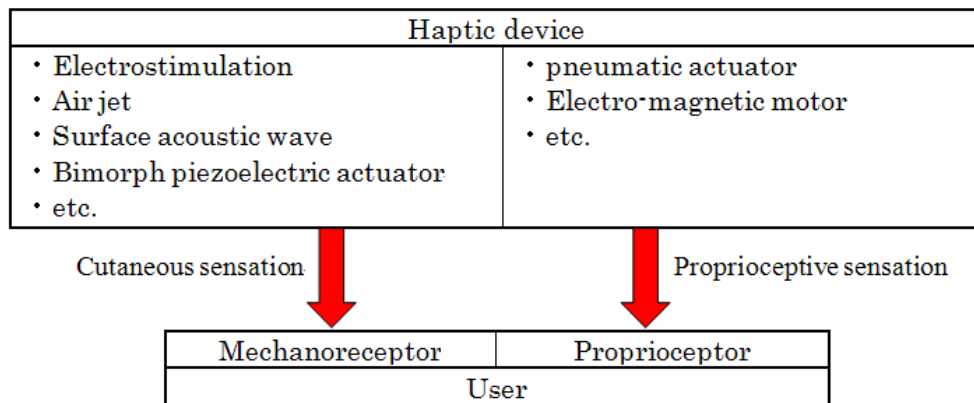


Fig. 1.7 Communication of tactile information.

固有受容器を刺激する力覚デバイスには、空気圧アクチュエータや電磁モータなどが利用されている。空気圧アクチュエータを利用した力覚デバイスは、チューブが取り付けられたグローブをユーザがはめ、チューブを圧縮空気で加圧することにより剛性を増加させ、指に拘束力を与えるというものである<sup>[29]</sup>。この力覚デバイスは小型で軽量という利点はあるが、チューブ自体に剛性があるため無加圧時においても抵抗力を感じるといった問題がある。また、空気で加圧するため動作速度が遅く、硬い感触を再現しにくいといった問題がある。一方、電磁モータを用いた力覚デバイスはすでに製品化されており、PHANTOM（SensAble Technologies 社製）が有名である<sup>[19]</sup>。PHANTOM Premium 1.5 の性能を Table 1.3 に示す。Fig. 1.8 に示すようにペン型の操作部を操作することで電磁力による反力を感じることができる。電磁モータはトルクが大きく、トルク制御も簡便であるため、主に柔らかい感触の再現に優れている。PHANTOM の他にも電磁モータを用いた力覚デバイスは多く研究開発されている<sup>[30]-[32]</sup>。しかし、硬い感触を提示するためには高速な制御が必要であるため、ソフト面・ハード面共に実現が困難である。

硬い感触の提示の手段として応答性の高いパッシブアクチュエータによる研究がなされており、一定の成果を得ている<sup>[33]</sup>。

以上に述べたように数多くの力覚デバイスが研究されてきたが、感触の再現度は十分とは言えないため、よりリアルな感触を提示する力覚デバイスの開発が求められている。



Fig. 1.8 Image of PHANTOM Premium 1.5 (SensAble Technologies, Inc.).

Table 1.3 Performance of PHANTOM premium 1.5 (SensAble Technologies, Inc.).

Workspace	381W×267H×191D mm
Footprint	330W×254D mm
Range of motion	Lower arm movement pivoting at elbow
Nominal position resolution	0.03 mm
Backdrive friction	0.04 N
Maximum exertable force (nominal position)	8.5 N
Continuous exertable force (nominal position)	1.4 N
Stiffness	3.5 N/mm
Inertial (apparent mass at tip) - without encoder gimbal	< 75 g
Force feedback	x, y, z
Position sensing	x, y, z (roll, pitch, yaw optional)

## 1.4 本研究の目的と意義

圧電クラッチを備えた超音波アクチュエータシステムは、従来の超音波モータでは実現が困難な、ロータ間の予圧制御や完全離脱を実現している。その結果、他のアクチュエータとの併用が可能となり、より出力範囲の広範なアクチュエータシステムが実現可能となる。

本研究では広範な動作特性を有する電磁モータと高速応答性を持つ超音波アクチュエータシステムを組み合わせたハイブリッドアクチュエータシステムの開発を行い、その効果を検討する。具体的には、超音波モータの高速応答性を活かした、併用駆動による始動特性改善や消費電力軽減効果について検討する。



また、高速応答性やアクチュエータの切り替えによる広範な出力範囲を活かした応用例として力覚提示への効果について検討する。本システムを用いることで、従来十分な表現ができていない硬さなどの高速な応答が必要な表現から弾性表現までを一つのシステムで表現可能となる。

### 1.5 論文構成

本論文は5章より構成される。

第1章「緒論」では、研究背景、先行研究および本研究の目的について述べた。

第2章「一軸型ハイブリッドアクチュエータシステムの構成および特性」では、ハイブリッドアクチュエータシステムの構成および使用アクチュエータの動作原理について述べる。また、超音波アクチュエータの基本性能、回転速度特性、トルク特性の測定結果について述べる。

第3章「ハイブリッドアクチュエータの制御」では、アクチュエータシステムによる回転速度およびトルク制御について述べる。また、ハイブリッド駆動や制動による効果の検討について述べる。

第4章「力覚提示への応用」では、ハイブリッドアクチュエータシステムの力覚提示への可能性について、幾つかの力覚提示実験を通して検討する。

第5章「結論」では、第2章から第4章までのまとめと今後の課題について述べる。



第1章 緒 論

- ・研究の背景, 目的, 意義, 概要
- ・クラッチ機構を備えた超音波アクチュエータシステム
- ・ハイブリッドシステム
- ・力覚提示
- ・論文の構成と概要

第2章 一軸型ハイブリッドアクチュエータシステムの構成および特性

- ・構成とアクチュエータの動作原理
- ・設計について
- ・アクチュエータの特性の把握



第3章 ハイブリッドアクチュエータの制御

- ・超音波 AS の回転速度およびトルク制御
- ・ハイブリッド AS の始動および停止



第4章 力覚提示への応用

- ・力覚応用 (一軸型)
- ・多自由度への拡張および提示

第5章 結 論

付録

Fig. 1.9 Line-up of this thesis.

## 第2章 一軸型ハイブリッドアクチュエータシステムの構成および特性

### 2.1 緒言

先行研究で開発した超音波アクチュエータシステムは、駆動中に予圧を電氣的に制御することを可能とし、従来の超音波モータと比較して出力範囲を広げることを実現している。また、クラッチ機構を組み込むことで超音波モータをロータから離脱することを可能としたことで、他のアクチュエータとの併用を可能とした。

本研究では、新たな構成として超音波アクチュエータシステムと電磁モータを組み合わせたハイブリッドアクチュエータシステムを考案した。

本章は、試作したハイブリッドアクチュエータシステムの構成、動作原理および超音波アクチュエータ部の特性について述べる。

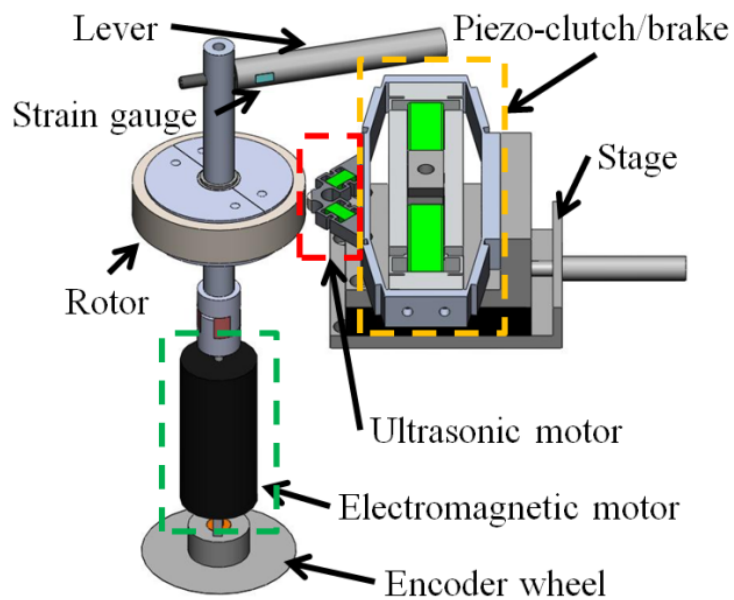
### 2.2 ハイブリッドアクチュエータシステム

#### 2.2.1 システム構成

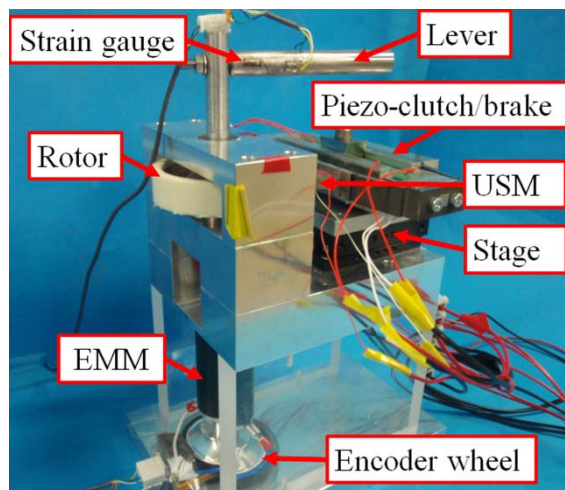
Fig. 2.1 (a) および (b) に試作したハイブリッドアクチュエータシステムの構成モデルと実際の写真を示す。本アクチュエータシステムは推力を発生する超音波モータ部、電磁モータ部と予圧を制御する圧電クラッチ／ブレーキ部から構成されている。このクラッチ／ブレーキは MPA と変位拡大機構から構成され、本論文では超音波モータ駆動時は圧電クラッチ (piezoelectric clutch, 略称: piezo-clutch)、非駆動時には圧電ブレーキ (piezoelectric brake, 略称: piezo-brake) と呼ぶ。超音波モータ部のステータはロータの側面に予圧されており、摩擦力によってロータを回転する。回転軸の外側に振動子が置かれているこの予圧方法は、すでに他の様々な文献で報告されている<sup>[7][35][36]</sup>。これは進行波タイプ、ディスクタイプ、ロッドタイプなどの振動子の中心に回転軸がある超音波モータに比べて予圧を変化させるのに適していると考えられる<sup>[34][37]-[41]</sup>。また、変位拡大機構を取り付けているステージによって初期予圧を調整することができる。

電磁モータ部に用いているコアレス DC モータ (Maxon Motor AG, RE25) は、他の DC モータと比較して低慣性・低インダクタにより応答速度が速い。

また、力覚提示への応用を見据えシャフト部にレバーの取り付けを可能とした。



(a)



(b)

Fig. 2.1 Hybrid actuator system: (a) construction system and (b) photograph of constructed device.

### 2.2.2 超音波モータの構成および動作原理

Fig. 2.1(a) に示すように、超音波モータのステータが圧電クラッチの上に配置されている。Fig. 2.2 に示すように、超音波モータ部は2つの MPA (NEC-Tokin AE0505D08,  $5 \times 5 \times 10 \text{mm}^3$ ) とホルダー及びその先端部から構成されている<sup>[41]-[44]</sup>。2つの MPA はホルダーの中で互いに直交するように配置している。ホルダーとロータはステンレス鋼でできている。ホルダーの剛性はスリットと空洞を設けることで弱めているため、わずかに弾力性がある。そのため MPA はホルダーの予圧力を受け支持されるので、ホルダーの中の MPA の変位と発生力の損失が少なくなる。Fig. 2.3 に示すように位相差が 90 度の正弦波交流電圧に単極性となるよう、振幅値と等しい直流バイアスを加えた電圧 (USM 電圧,  $V_{\text{USM}}$ ) を、2つの MPA にそれぞれ印加することで、超音波モータ部の先端に楕円変位を発生させる。先端をロータに接触させたとき、摩擦力によってロータは回転する。そのため、USM 電圧を変化させることで推力を制御することができる。

この超音波モータは、それぞれの MPA に同相の交流電圧を印加することで先端に直線的な変位を発生することができる。この変位によって超音波モータ部の先端とロータの接触時間が短くなるため、先端とロータ間の摩擦力を減少させることができる。これは超音波クラッチの一例である<sup>[45][46]</sup>。

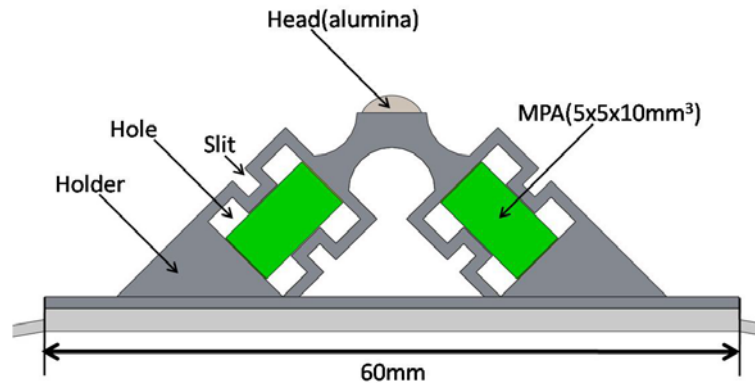


Fig. 2.2 Construction of stator of USM.

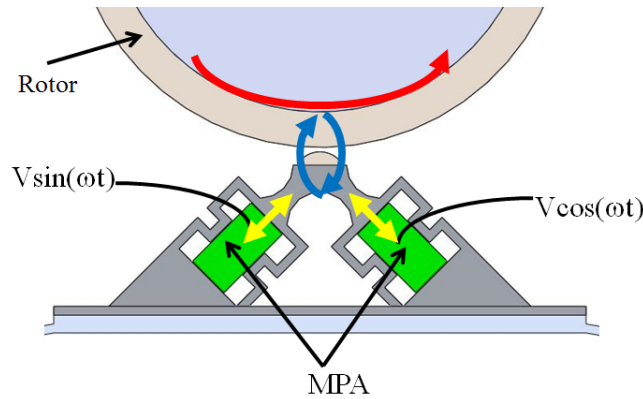


Fig. 2.3 Operating principle of USM.

### 2.2.3 圧電クラッチ／ブレーキの構成及び動作原理

Fig. 2.4(a) および (b) に圧電クラッチ／ブレーキの動作原理を示す。圧電クラッチ／ブレーキは4つの MPA(NEC-Tokin AE1010D16,  $10 \times 10 \times 20 \text{mm}^3$ )と変位拡大機構と金属治具から構成されている。以降は超音波モータ駆動時における動作原理を示す。Fig. 2.4(a) に示されるように、通常超音波モータ部の先端はロータに予圧され、クラッチが ON となっている。クラッチ部の MPA に直流電圧（クラッチ電圧,  $V_{\text{clutch}}$ ）を印加することで MPA が伸び、変位拡大機構の両サイドを押し広げる。その結果、超音波モータ部の先端が下方方向に動き Fig. 2.4(b)のようにロータから離れることで、クラッチ OFF 状態となる。この状態では、超音波モータ部とロータ間の摩擦力がまったく無くなるためトルクフリー状態となる。MPA は高速応答特性を有しているため圧電クラッチは高速に動作し、電氣的に予圧力を制御することができる。変位拡大機構は八角形の形をしており、4つの MPA の小さい変位をクラッチ動作に十分な変位まで拡大することができる。

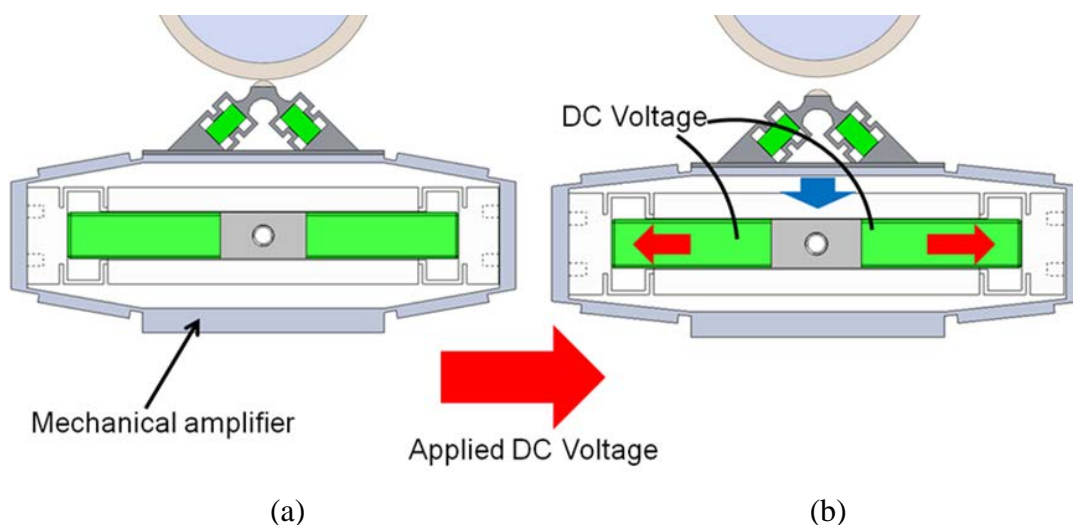


Fig. 2.4 Operating principle of piezo-clutch/brake: (a) clutch ON and (b) clutch OFF.

## 2.3 超音波アクチュエータシステムの設計

先行研究で試作した超音波アクチュエータシステムは、回転速度・トルクともに使用する電磁モータに対して非常に小さい値であるため各々向上が必要である。超音波モータは摩擦駆動であるため、推力は最大静止摩擦を超えない。本研究では力覚提示への応用を踏まえて、PHANTOM premium 1.5 を比較対象とし以下に示す条件で超音波モータおよび圧電クラッチの設計を行った。

- ・最大予圧：50N 以上
- ・発生力：2N 以上

### 2.3.1 超音波モータの設計

本研究で用いる超音波モータの特性は、MPA の特性に依存する。最大予圧力に上昇に対して、十分な推力を得るために Table 2.1 に示す MPA (NEC-Tokin AE0505D08,  $5 \times 5 \times 10 \text{mm}^3$ ) を採用し、ホルダーの設計を行った。

また、摩擦駆動であるために連続駆動することによってロータ及び超音波モータの先端が摩耗し、ロータ・超音波モータ先端表面が荒れる。その結果、ロータ・超音波モータ間の接触が安定せず回転速度およびトルクが大きく変動する。これを改善するため、ロータ・超音波モータ先端に耐摩耗性に優れたアルミナで作成したカバーおよびチップ取り付けた。

Table 2.1 Performance of MPA

	AE0203D04	AE0505D08
Displacement [mm]	4.6	9.1
Generative force [N]	200	850

### 2.3.2 圧電クラッチ／ブレーキの設計

前述したとおり，力覚提示への応用を見据えて圧電クラッチは以下の条件で設計した。

- 最大予圧： $F_0 > 50 \text{ N}$
- 拡大率： $\alpha > 5$

上記の条件をもとに，概形設計および拡大率の選定を行った。Fig. 2.5 に示すように変位拡大機構を簡易な台形モデルとし， $l$ :斜辺の長さ[m]， $\theta$ :斜辺の角度[deg]， $du$ :MPA 変位[m]， $dh$ :拡大機構の変位[m]とすると，拡大率の導出式（付録 A 参照）は，以下のようになる。



Fig. 2.5 Mechanical amplifier model.

$$\alpha = \frac{2 \times dh}{du} = \frac{2 \times (l \times \sin(\theta) - \sqrt{l^2 - (l \times \cos(\theta) + du/2)^2})}{du} \quad (2.1)$$

本研究で用いる MPA の変位の最大変位は  $18.4 \mu\text{m}$  であり，同様の MPA を 4 つ用いるので  $du=73.6 \mu\text{m}$  である。また， $l=29 \text{ mm}$ ， $\theta=10 \text{ deg}$  として，式(2.1) より変位拡大機構の拡大率  $\alpha=5.81$  と求まる。

この拡大率をもとに変位拡大機構の離脱条件式<sup>[47]</sup>（付録 B 参照）及び有限要素法解析（ANSYS）を用いて設計を行った。

Fig. 2.6 に示すような変位拡大機構を拡大率  $\alpha$  をもった梘子と弾性係数  $k_1, k_2$  である 2 つのばねに置き換えたモデルを用いて考える。

MPA の個数を  $n$ ，最大発生力  $F_{max}$ ，無負荷最大変位量  $d_{max}$  とし，初期予圧  $F_0$  とした時，変位拡大機構がロータから離脱する条件は次式のようになる。

$$1 \geq \frac{F_0(k_2 + \frac{F_{max}}{d_{max}})}{k_1 n \alpha F_{max}} \quad (2.2)$$

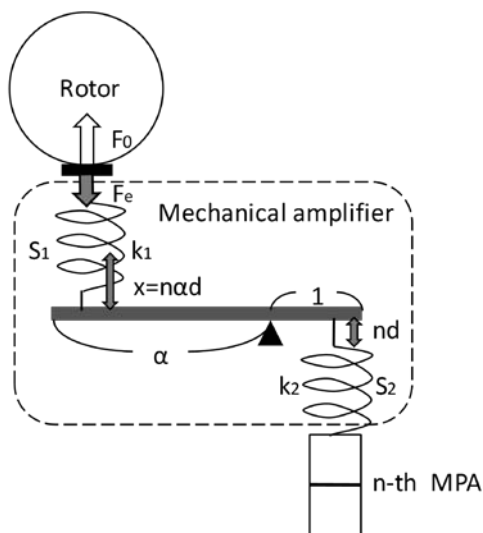


Fig. 2.6 Mechanics model of piezoelectric-clutch.

式(2.2)をもとに有限要素法解析にて、弾性係数  $k_1$ ,  $k_2$  を決定することで、変位拡大機構の設計を行った。解析によって得られた各パラメータを Table 2.2 に示す。また、設計した変位拡大機構を Fig. 2.7 に示す。

Table 2.2 An analysis result of mechanical amplifier.

Displacement[ $\mu\text{m}$ ]	351
Magnification	5.18
$k_1$ [N/ $\mu\text{m}$ ]	0.169
$k_2$ [N/ $\mu\text{m}$ ]	8.26
Maximum Contact force[N]	59.3



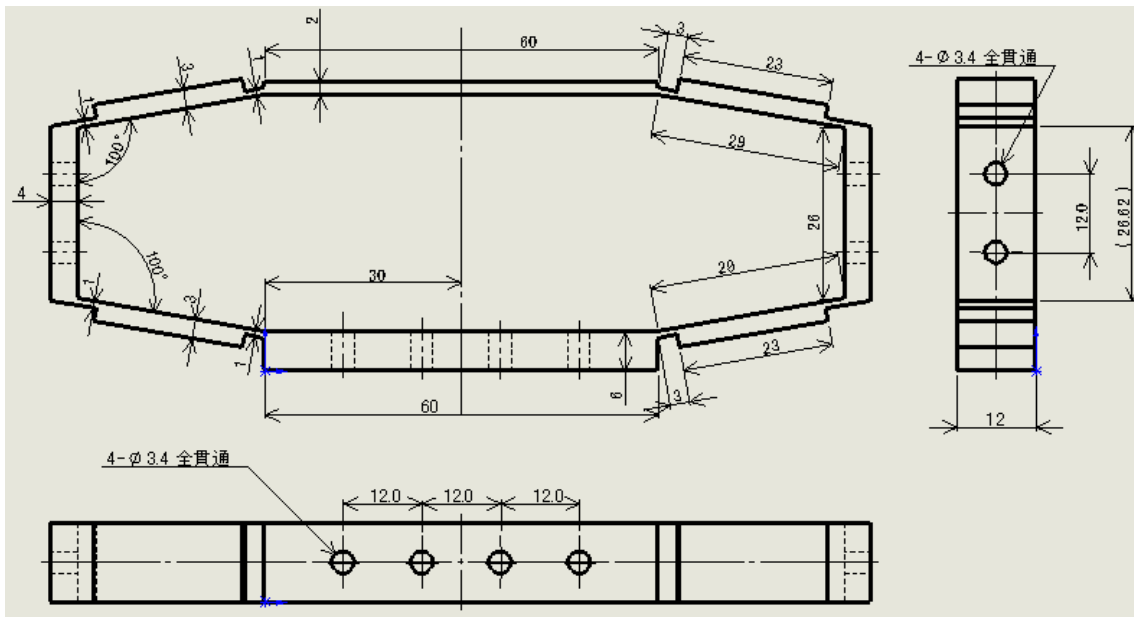


Fig. 2.7 Design of mechanical amplifier.

## 2.4 動作特性

### 2.4.1 圧電クラッチ/ブレーキの動作特性

試作した圧電クラッチの変位および圧接力の測定を行った。変位の測定にはレーザードップラー振動計 (LDV) (LV-1710, 小野測機) とデジタル変位計ユニット (LV-0121, 小野測機) を、圧接力は荷重計 (9E01-L42-50K, NEC 三栄) を用いて測定した (詳細は付録 C 参照)。各測定結果を Table 2.3 に示す。測定値と解析結果を比較すると圧接力は同程度の値を得られた。しかし、変位量は小さくなった。その原因として圧電クラッチ用 MPA 取り付け時の予圧による変位量の損失, 解析時より変位拡大機構の剛性が高かったことなどが考えられる。前装置と比較すると最大圧接力は 2 倍以上向上したが, 応答時間は 2 倍程度長くなった。これは, クラッチの大型化が影響していると考えられる。

Table 2.3 Performance of piezo-clutch.

	Former	Measure	Analysis
Max. displacement ( $\mu\text{m}$ )	161	257	351
Max. contact force (N)	26.7	60	59.3
Reaction time for max. deformation (ms)	0.49	1.2	

## 2.4.2 回転速度特性

Fig. 2.8 に示すように、ロータのシャフトにコードホイール (HEDM-6120 #T12, Avago Technologies) を取り付け、ロータリエンコーダ(HEDS-9000, Avago Technologies)からの出力を DAQ ボードに入力し、パルス間隔を回転速度に変換することで測定した。

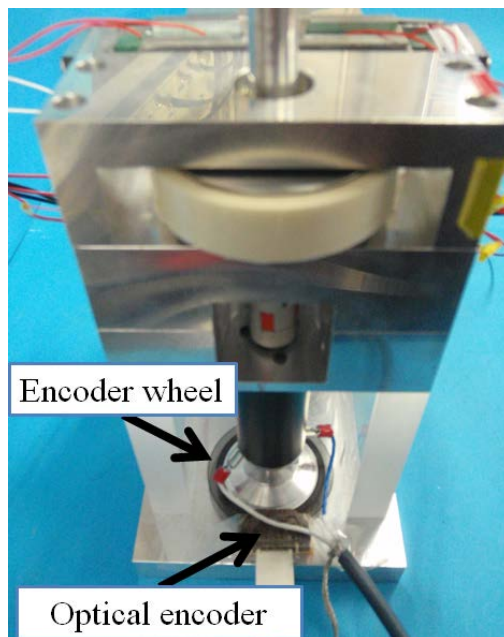


Fig. 2.8 Measurement method of revolution speed.

### 2.4.2.1 USM 電圧一回転速度特性

超音波モータの電圧駆動の一例として、17.8N で超音波モータ部の先端をロータに予圧し、超音波モータ部を駆動してロータの回転速度を測定した。Fig. 2.9 に USM 電圧 (23.5 kHz) の大きさを変化させたときのロータの回転速度を示す。ロータは  $V_{\text{USM}} = 10V_{\text{p-p}}$  から回転し始め、印加電圧を増加することで回転速度は  $V_{\text{USM}}=60 V_{\text{p-p}}$  でおおよそ 50 rpm まで線形的に上昇した。この結果より、超音波モータ部に印加する電圧の大きさを変化させることで回転速度を制御できることを確認した。ただし、長時間駆動することで、MPA の温度が上昇し、回転速度の低下がみられた。また、前装置と比較すると回転速度特性が 4 倍程度向上したことを確認した。

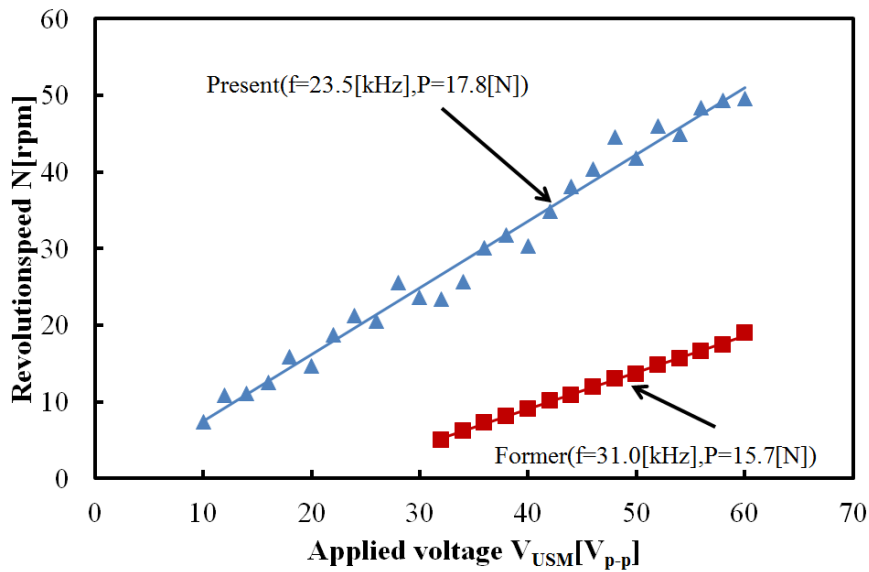


Fig. 2.9 Revolution speed vs voltage applied to MPAs of USM.

#### 2.4.2.2 クラッチ電圧－回転速度特性

圧電クラッチにより予圧力を変化させたときの速度特性の一例として、初期予圧を 62 N とし、超音波モータ部に正弦波電圧 ( $V_{USM} = 46 V_{p-p}$ , 23.5 kHz) を印加して回転速度を測定した。Fig. 2.10 にクラッチ電圧を変えたときの回転速度を示す。最大予圧状態である  $V_{clutch}=0 V$  のときにもロータが回転した。これは、超音波モータ先端が円筒状であり、超音波モータを駆動することにより摩擦力が低下したためと考えられる。一方、 $V_{clutch}=150 V$  のときロータは回転しなかった。これは超音波モータ部の先端がロータから分離したためである。この結果より、圧電クラッチ部に印加する電圧の大きさを変化させることでも回転速度を制御できることを確認した。

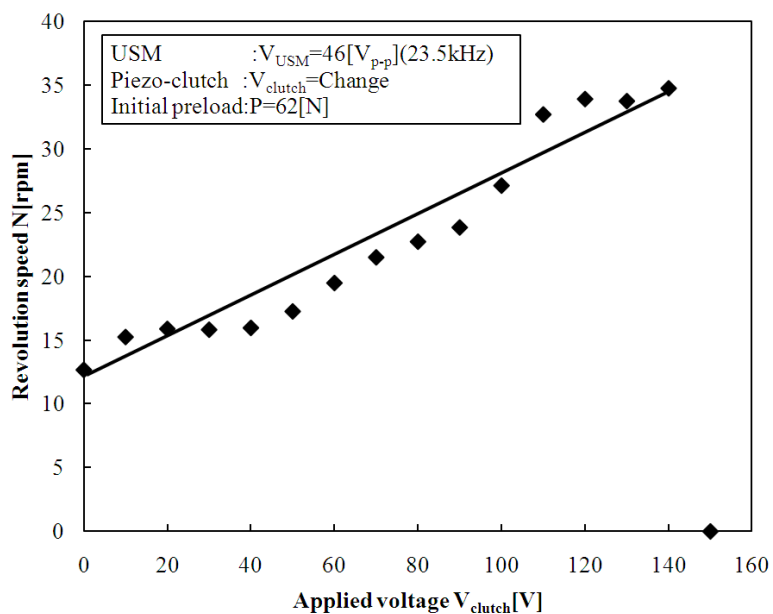


Fig. 2.10 Revolution speed vs. voltage applied to MPAs of piezo-clutch.

### 2.4.3 トルク特性

力覚へ応用するとき、仮想物体の反発力や抗力を再現するためには、アクチュエータの発生トルクや最大静止トルクを把握し、制御する必要がある。そこで、Fig. 2.11 に示すようにロータのシャフトを固定し、レバーにひずみゲージ（KFG-3-120-C1-11N50C2, 共和電業）を貼り付けた。そして、アクチュエータを動作させたときのレバーのひずみから、アクチュエータが発生するトルクを求めた。

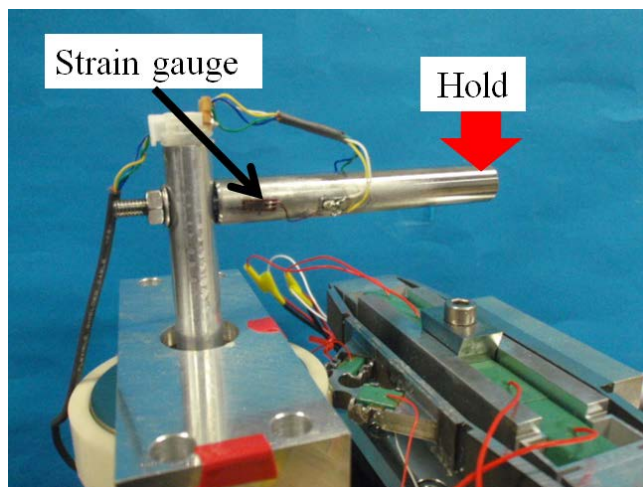


Fig. 2.11 Measurement method of torque.

### 2.4.3.1 USM 電圧ートルク特性

超音波モータ部の先端とロータ間の初期予圧を 15.0 N とし，USM 電圧 (23.5kHz) の大きさを変化させたときのトルクを Fig. 2.12 に示す。トルクにばらつきはあるものの  $V_{USM} = 0 V_{p-p}$  から直線的に増加した。この結果より，超音波モータ部に印加する電圧の大きさを変えることで超音波モータの発生トルクを制御できる。前装置と比較すると低印加電圧でのトルク発生を確認した。しかし， $V_{USM}$  が 60V 付近では同程度であった。これは予圧に対する最大静止摩擦力が同程度であったことが考えられる。

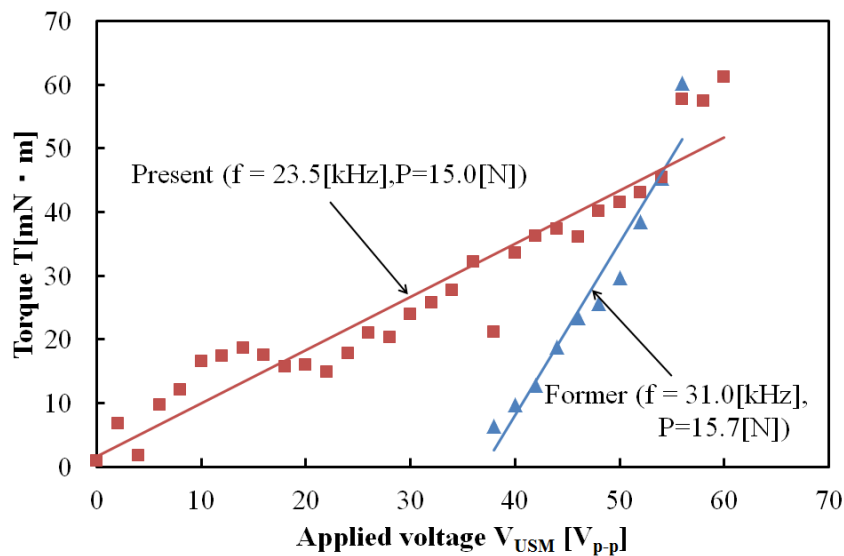


Fig. 2.12 Torque vs. voltage applied to MPAs of USM.

### 2.4.3.2 クラッチ電圧ートルク特性

初期予圧を 65 N とし，超音波モータ部に  $V_{USM} = 46 V_{p-p}$ , 23.5 kHz の正弦波電圧を印加して超音波モータを駆動した。クラッチ電圧の大きさを変化させたときのトルクを Fig. 2.13 に示す。クラッチ電圧の大きさによって予圧力が変わるため，発生トルクも変化した。

測定の結果， $V_{clutch} \approx 60 V$  で最大トルクをもつ曲線を得た。 $V_{clutch} < 60 V$  では，予圧過剰によりロータと超音波モータ先端の接触時間が増加し，進行方向と逆方向推力の伝達が起きていると考えられる。逆に  $V_{clutch} > 60 V$  では，予圧減少によりロータと超音波モータ先端間の摩擦力が減少することでトルクが減少したと考えられる。この結果より，特定の範囲内において圧電クラッチ部に印加する電圧の大きさを変えることでも発生トルクを制御できることを確認した。

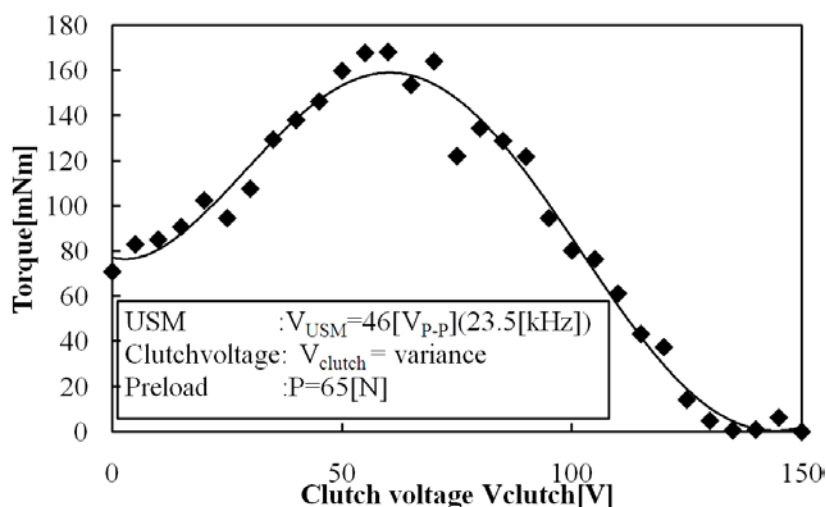


Fig. 2.13 Torque vs voltage applied to MPAs of piezo-clutch.

#### 2.4.4 超音波モータの回転速度－トルク特性

まず初期予圧を 60 N，クラッチ電圧 90 V 一定としたときの USM 電圧（23.5 kHz）に対する回転速度 - トルク曲線を Fig. 2.14 に示す。この回転速度－トルク曲線は直線的であり，USM 電圧に対して平行移動した。この結果より，定トルクにおいて広範囲に速度制御が可能であり，直流機の電圧制御に近い特性であることを確認した。

次にクラッチ電圧により予圧力を変化させたときの回転速度－トルク特性の測定を行った結果を Fig. 2.15 に示す。ここで，初期予圧を 112 N に設定し，超音波モータの駆動電圧を一定とした。測定の結果，負荷に対して直線的に変化する垂下特性が得られた。また，クラッチ電圧の変化に対して速度変化の傾きが変化した。このような特性は，直流機の界磁制御特性に近いものであり，超音波モータの予圧制御は電磁モータの界磁制御と類推できる。高速な電氣的予圧制御により電磁モータと同様な制御・応用が可能であると考ええる。

Fig. 2.16 に本システムで用いている電磁モータの定格電圧時の負荷特性と超音波モータの負荷特性を比較したものを示す。高速回転時には電磁モータ，低速トルク時には超音波モータ，2 つのアクチュエータの特性が重なる境界では同時駆動など使用状況に応じて切り替えることで広範囲での動作が実現可能であると考ええる。しかし，本研究で試作した超音波アクチュエータシステムは電磁モータと比べて非常に低速であるため，大幅な出力範囲拡張には至らなかった。

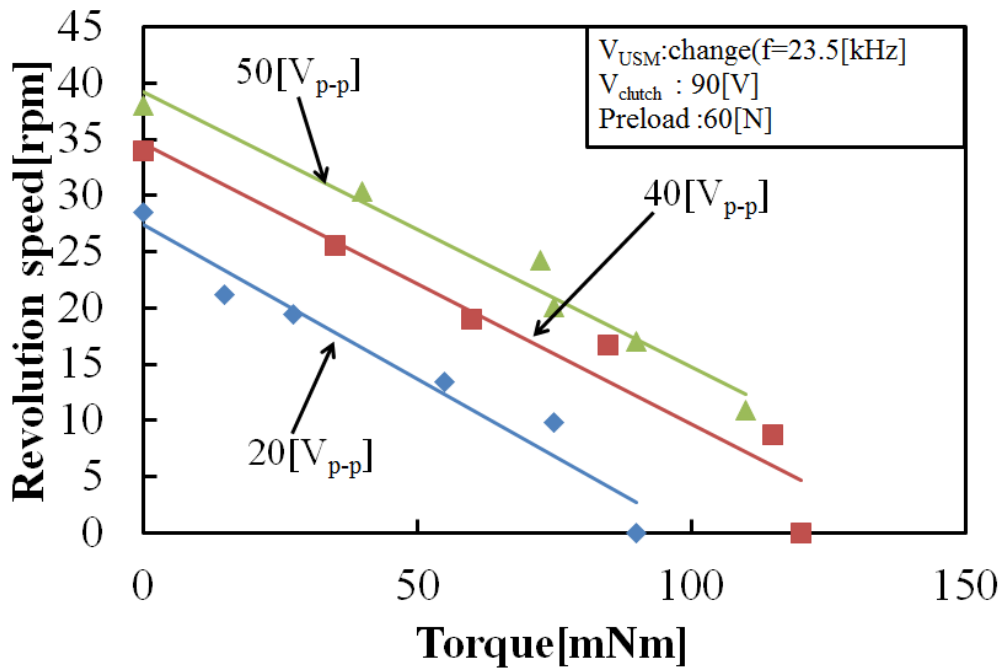


Fig. 2.14 Revolution speed vs torque controlled voltage applied to MPAs of USM.

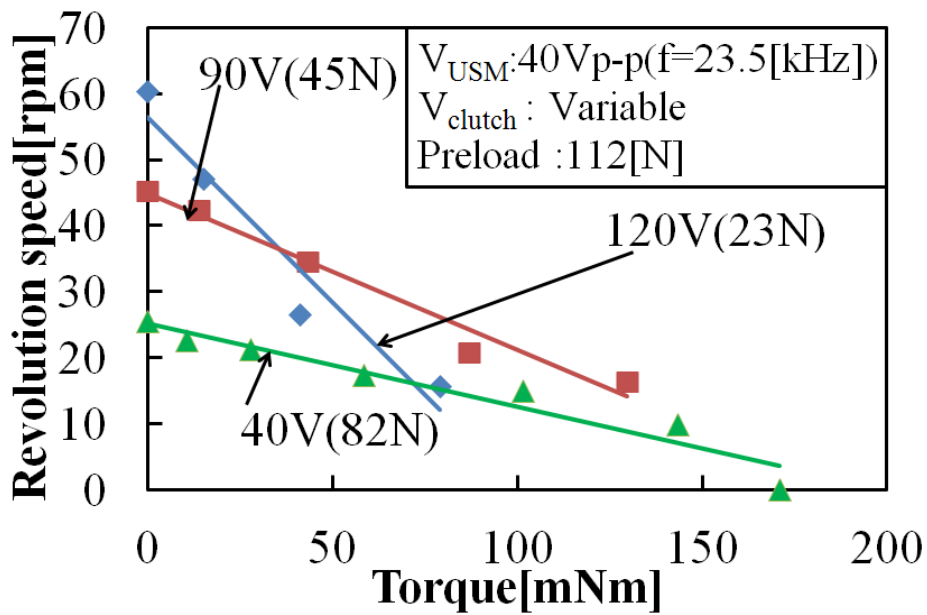


Fig. 2.15 Revolution speed vs torque with preloads changed by applied voltage to MPAs of piezo-clutch.



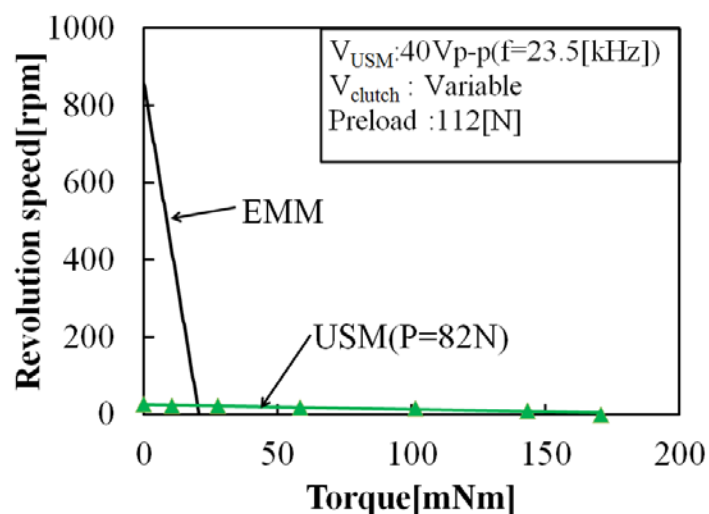


Fig. 2.16 Revolution speed vs torque of EMM, USM and Hybrid.

### 2.4.5 最大静止摩擦トルク特性

超音波モータを駆動させずに、超音波モータの先端とロータ間に 65 N の初期予圧を与えた。そして、レバーを手動で動かし、ロータが回転するまでの最大静止摩擦トルクを測定した。クラッチ電圧の大きさを変化させたときの最大静止トルクを Fig. 2.17 に示す。最大で 300 mNm の最大静止摩擦トルクが発生し、クラッチ電圧に対して直線的に減少した。この結果より、クラッチ電圧により摩擦トルクを制御でき、力覚へ応用した際には様々な抗力・摩擦力の提示が可能となる。

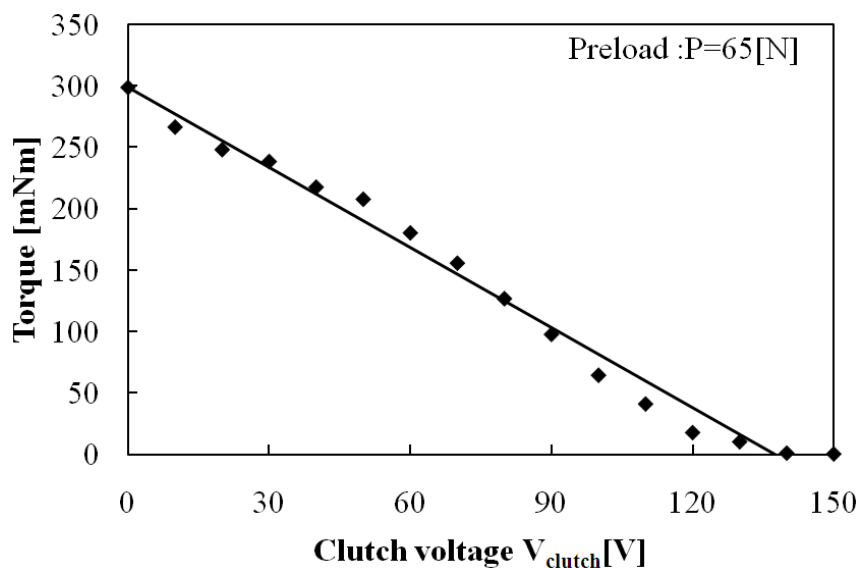


Fig. 2.17 Holding torque vs. voltage applied to MPAs of piezo-clutch.



## 2.5 結言

超音波モータ・圧電クラッチ／ブレーキおよび電磁モータを組み合わせたハイブリッドアクチュエータシステムの構成および超音波アクチュエータ部の特性について述べた。本章にて得た結果について以下にまとめる。

- 超音波モータ・圧電クラッチ／ブレーキ・電磁モータによるハイブリッドアクチュエータシステムの構成を実現した。
- 新たに設計した変位拡大機構は、最大変位は 256.7  $\mu\text{m}$ 、拡大率は 5.23 であった。設計時と差異はあるもののほぼ設計通りの性能を得た。
- クラッチ動作による変位の応答時間は 1.4 ms であり、圧電クラッチは高速応答であることが確認できた。
- 圧電クラッチに印加する電圧により予圧力を制御でき、トルクフリー状態を実現可能であることを確認した。超音波モータ先端が離脱可能な最大予圧時の 64 N であった。
- ロータの回転速度および発生トルクを超音波モータまたは圧電クラッチへ印加する電圧大きさにより制御可能であった。しかし、変位拡大機構の剛性や摩擦の状態により回転速度および発生トルクが不安定となることを確認した。
- 超音波アクチュエータの負荷特性は、直流機の電圧制御および界磁制御特性に類似する特性であった。また、ハイブリッドアクチュエータシステムの負荷特性は電磁モータ・超音波モータの特性範囲すべてと考えることができる。
- 最大静止トルクは圧電クラッチに印加する電圧により制御可能であり、試作した装置の最大予圧時の静止摩擦トルクは 300 mNm であった。
- 前装置と比較すると回転速度・トルクおよび最大静止摩擦力が 4 倍程度向上していることを確認した。

本章で試作したハイブリッドアクチュエータシステムの性能例の一覧および PHANToM Premium1.5 (SensAble Technologies, Inc.) との比較を Table 2.4 に示す。最大発生力は及ばないものの、連続発生力は同程度の性能を実現した。

Table 2.4 Performance comparison of PHANTOM and Hybrid AS.

	PHANTOM Premium1.5(Standard)	Hybrid AS
Workspace	381W×267H×191D mm	360 deg
Footprint	330W×254D mm	150W×100D mm
Range of motion	Lower arm movement pivoting at elbow	Axis
Nominal position resolution	0.03 mm	0.045 deg
Maximum exertable force (nominal position)	8.5 N	4 N(using brake) 2 N(using USM)
Continuous exertable force (nominal position)	1.4 N	4 N(using brake) 2 N(using USM)
Force feedback	x, y, z	Tx
Position sensing	x, y, z (roll, pitch, yaw optional)	x (roll)

## 第3章 ハイブリッドアクチュエータの制御

### 3.1 緒言

従来の超音波モータは、駆動電圧や周波数・位相などを操作量として様々な制御法が報告されている<sup>[48][49]</sup>。しかし、予圧力を操作量とする制御は、超音波モータ駆動中の予圧変更が容易ではないため、これまで検討はされてこなかった。

本研究で、開発したハイブリッドアクチュエータシステムは超音波モータ・圧電クラッチと電磁モータを組み合わせることで、駆動中に電氣的に予圧を制御するや電磁モータと超音波モータを切り替えて駆動することが可能である。

本章では、まず、超音波アクチュエータ部の回転速度およびトルク制御について検討する。次に電磁モータと超音波アクチュエータによるハイブリッド駆動の効果についても検討する。

### 3.2 制御システム概要

Fig. 3.1 に制御システムの概要を示す。本システムは、シャフトに取り付けたロータリエンコーダから出力されたパルスが、PC 内のデータ収集ボード (DAQ ボード) (NI PCI-6221, National Instruments Corp.) に入力される。また、レバーに取り付けたひずみゲージをブリッジボックスに接続し、動ひずみ測定器によりシャフトのひずみを検出して DAQ ボードに入力される。PC 上でプログラム (MATLAB/Simulink) によってロータリエンコーダの出力から回転速度を、ひずみゲージの出力からトルクを求める。それらの値を制御量とし、目標値との比較をもとに決定されたクラッチ電圧を DAQ ボードから出力する。

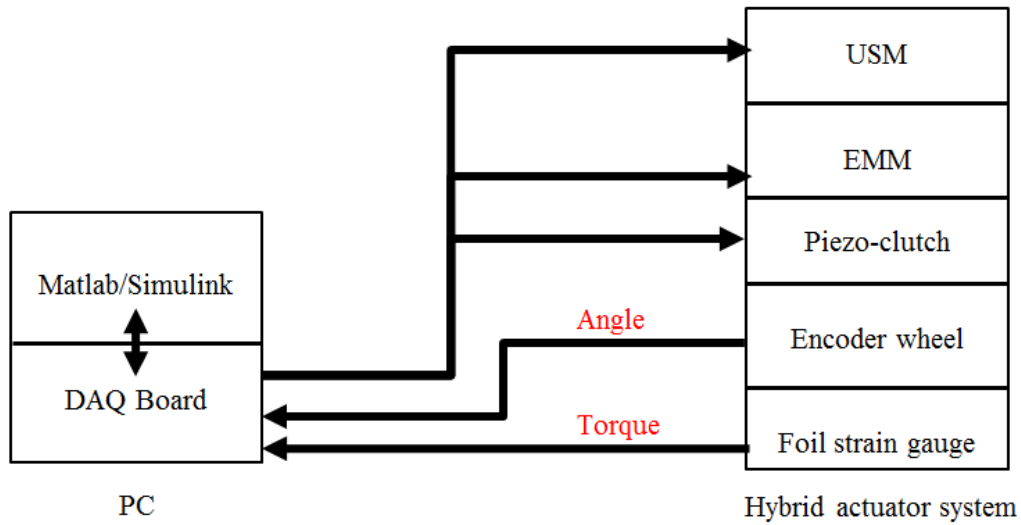


Fig. 3.1 Control system of hybrid actuator system.

### 3.3 圧電ブレーキによる摩擦トルク制御

初期予圧を最大に設定し、超音波モータ部を駆動せずに圧電クラッチ部のMPAに30V一定の電圧を印加した状態で、レバーを動かしたときの動摩擦トルクを測定した。そのときのトルク、クラッチ電圧、レバーの角度、回転速度の測定結果をFig. 3.2(a)に示す。ロータの真円度が悪く、摩擦によりロータが削れたことによって、超音波モータ部の先端と接触するロータの場所によって摩擦むらが発生するため動摩擦トルクは安定しなかった。超音波モータは摩擦駆動であるため、このような摩擦むらは、回転駆動に影響を及ぼす。

そこで、MATLAB/Simulinkによる自動整合PID制御(付録D参照)を用いてクラッチ電圧を変化させることで、動摩擦トルクを一定(-94 mNm)とし、摩擦むらを軽減するように制御した。測定結果をFig. 3.2(b)に示す。自動整合PID制御によって動摩擦トルクを一定に維持できることが確認できた。また、この制御法を力覚提示に用いることで一定摩擦状態の提示が可能となる。

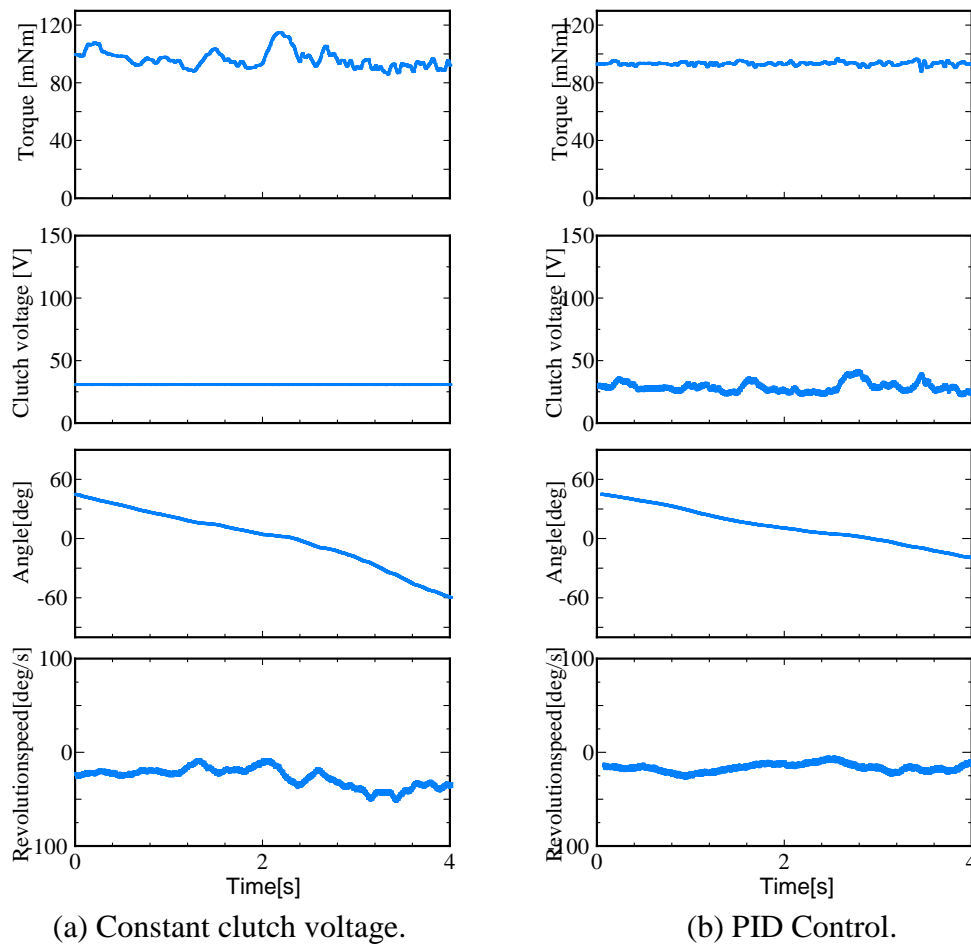


Fig. 3.2 Resulting torque, clutch voltage, lever angle and rotation speed at dynamic friction torque control.

### 3.4 USM 回転速度一定制御

圧電クラッチ部の MPA に 100 V 一定の電圧を印加した状態で、超音波モータ部の MPA に  $40 V_{p-p}$ , 23.5 kHz の正弦波電圧を印加して超音波モータを駆動し、無負荷の状態でもータを駆動した。そのときのクラッチ電圧、回転速度の測定結果を Fig. 3.3 に示す。先ほどの実験で述べたように摩擦むらの影響により回転速度にむらが生じた。

そこで摩擦トルク制御と同様に自動整合 PID 制御を用いてクラッチ電圧を変化させて、回転速度を一定 (45 rpm) に制御したときの測定結果を Fig. 3.4 に示す。誤差はあるものの自動整合 PID 制御によって回転速度を一定に制御できることが確認できた。

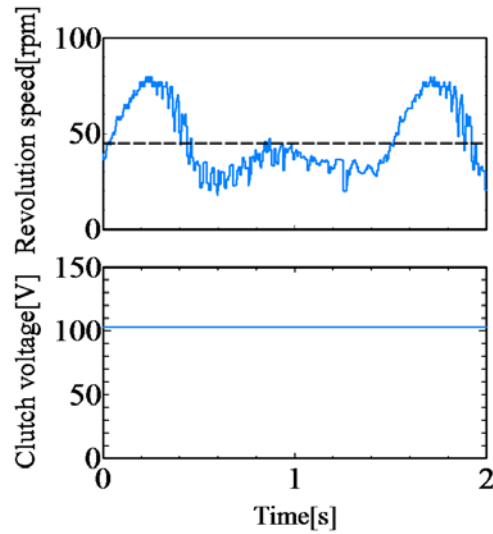


Fig. 3.3 Revolution speed of USM without control.

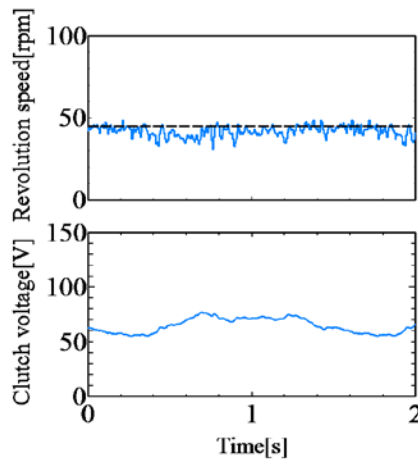


Fig. 3.4 Revolution speed of USM with PID control.

### 3.5 負荷変動に対する USM 回転速度一定制御

負荷を連続的に変化させ、予圧制御による回転速度一定制御を行った。Fig. 3.5 に示すようにシャフトに巻きつけたワイヤーの摩擦力を用いて負荷を加えた。ワイヤーの片端はフォースゲージに固定、他端は負荷調節用としてモータで引張力を加えた。

予圧を最大とし、圧電クラッチ部の MPA への印加電圧を 40 V 一定、超音波モータ部に 40 V<sub>p-p</sub>, 23.5 kHz の正弦波電圧を印加して超音波モータを駆動した。負荷用モータに印加する電圧を PWM 制御し、負荷を 0.1 Hz で正弦的に変化させたときの回転速度特性を測定した結果を Fig. 3.6 に示す。負荷の増減による

速度変化が確認された。また、超音波モータ先端とロータの摩擦ムラの影響により回転速度にもムラがみられた。

次に、MATLAB/Simulink による PID 制御を用いてクラッチ電圧を変化させ、回転速度を一定（15 rpm）に制御した状態で同様の測定を行った結果を Fig. 3.7 に示す。負荷の変化に対してクラッチ電圧を増減することで回転速度を一定に制御できることを確認した。これより加わった負荷に対してクラッチによりトルクを制御することで速度を一定に保つことが可能であることが分かった。

また、時間経過とともにクラッチ電圧の変化が大きくなっているのは超音波モータ部の発熱による出力減少が原因と考えられる。

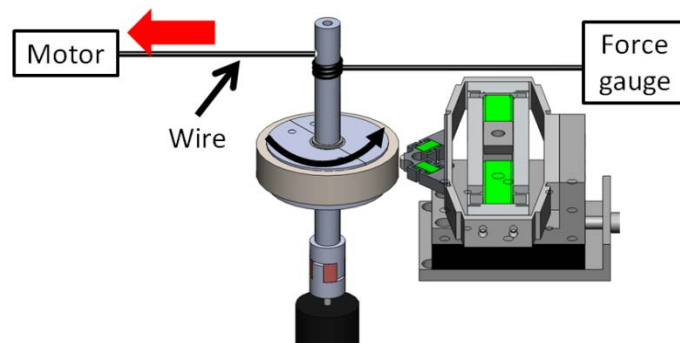


Fig. 3.5 Experiment method of measurement of load characteristics.

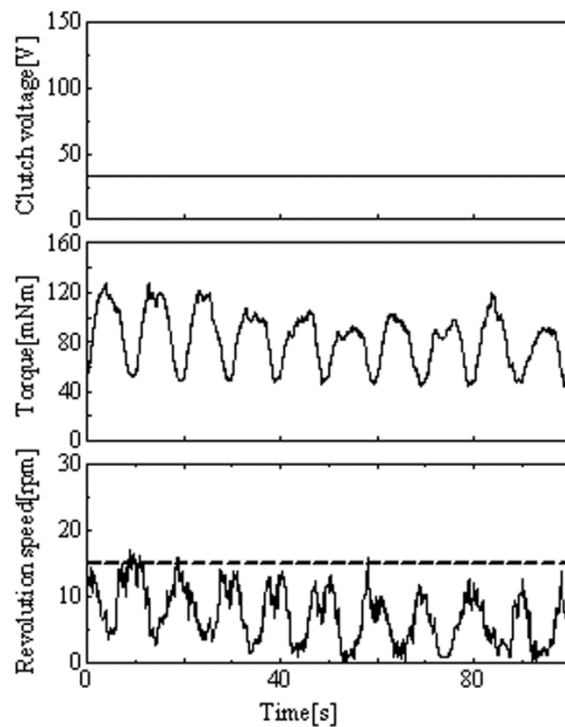


Fig. 3.6 Revolution speed and torque of USM without preload control.

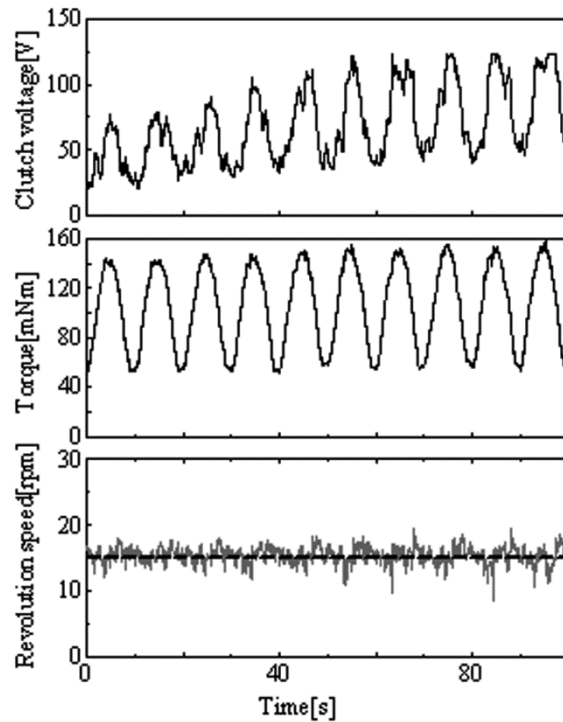


Fig. 3.7 Revolution speed and torque of USM with preload control by piezo-clutch.

### 3.6 超音波モータの予圧駆動の検討

前章の Fig. 2.15 に示した通り、超音波モータは予圧の増加に対して、回転速度が減少し、トルクが上昇する。一般的に回転速度の立ち上がり時間は予圧が大きいほど早くなる。このことより、超音波モータ駆動時に Fig. 3.8 のように予圧を大きい値から小さい値へ変更することで、短時間で最高速にすることが可能となる。

Fig. 3.9 は始動時に予圧を制御する予圧駆動の実験結果である。実験では回転速度が 25 rpm を超えた時に、高予圧(50 N)から低予圧(18 N)へ切り替えた。実験の結果、低予圧時の最高速度に至るまでの時間に対して 59%程度の削減効果があることを確認した。よって、予圧切り替えによる駆動は始動時間削減に効果的であると考えられる。また、本駆動方法は超音波モータの持つ駆動摩耗の軽減に有効であると考えられる。



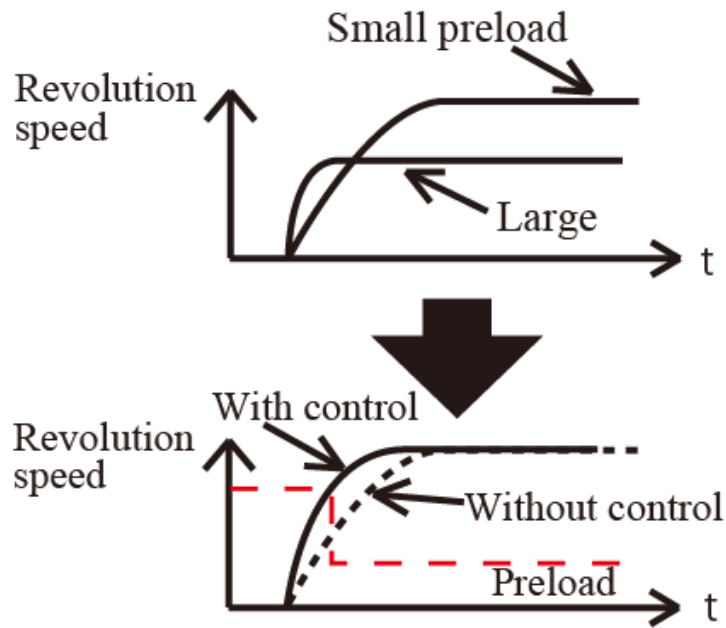


Fig. 3.8 Time chart of preload control drive.

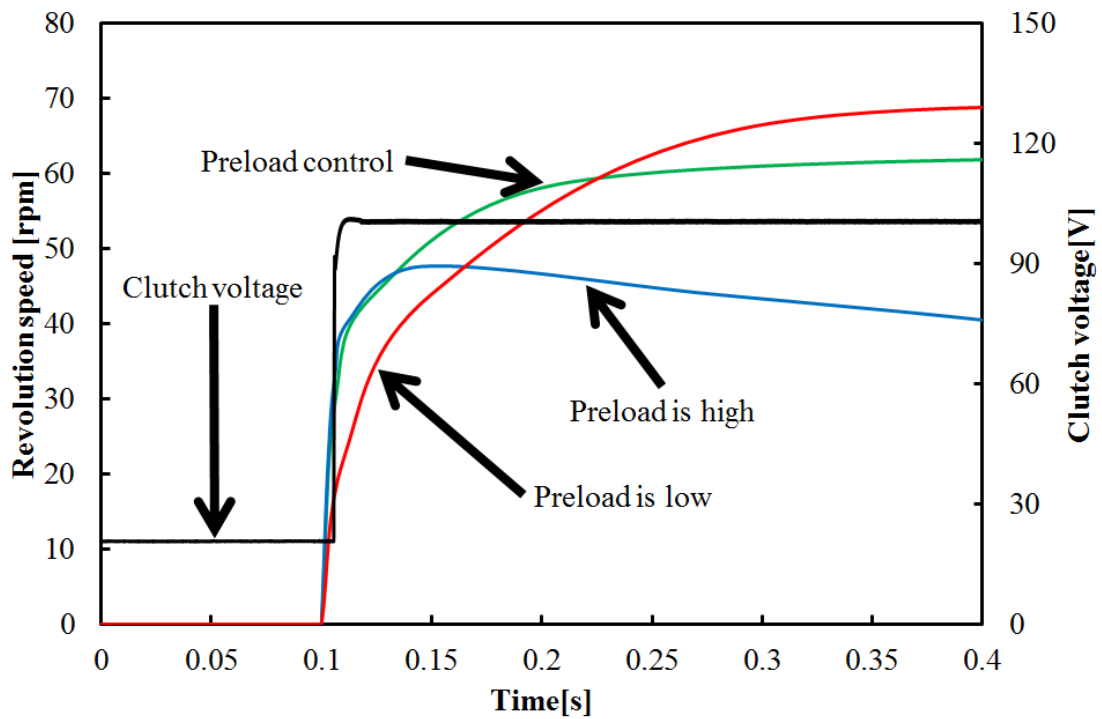


Fig. 3.9 Measured transient responses of revolution speed at starting USM with or without preload control.

### 3.7 ハイブリット駆動

試作したハイブリットアクチュエータシステムは、特性の異なる2つアクチュエータを備えており、この2つを組み合わせたアシスト駆動が可能である。ハイブリッドシステムとして一般的に知られているハイブリッドカーの場合、始動時にメインのエンジンにモータでのアシスト駆動するものと、急加速など大きな負荷がかかる時に2つの駆動源を同時使用する駆動がある。本システムの場合は電磁モータと超音波モータの速度差が非常に大きく、回転速度が超音波モータの最高速度を超えている場合、超音波モータはブレーキとして作用するため駆動中の加速に使用するのは有効ではない。そこで本研究では、始動時アシスト駆動の効果検討のためにハイブリット駆動の回転速度特性を測定した。

#### 3.7.1 駆動原理

電磁モータと超音波モータのハイブリット駆動方法について Fig. 3.10 に、制御フローを Fig. 3.11 に示す。まず、電磁モータ・超音波モータを同時に駆動する。回転速度が超音波モータ単独駆動時の最大を超えると、それ以上回転速度を上昇させることができないため、予め設定した回転速度に達したときに圧電クラッチによって超音波モータを切り離し、以降電磁モータ単独での駆動を行った。回転速度の測定および圧電クラッチのオフのタイミングは MATLAB/Simulink を用いて、測定・制御を行った。

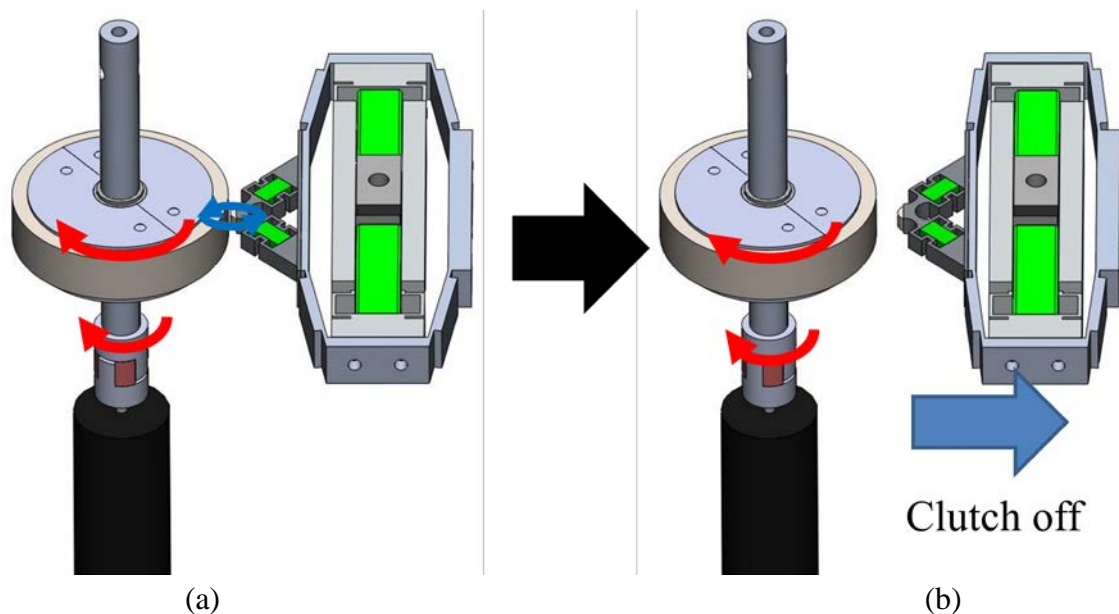


Fig. 3.10 Method of operation hybrid drive: (a)Clutch on (b) Clutch off.

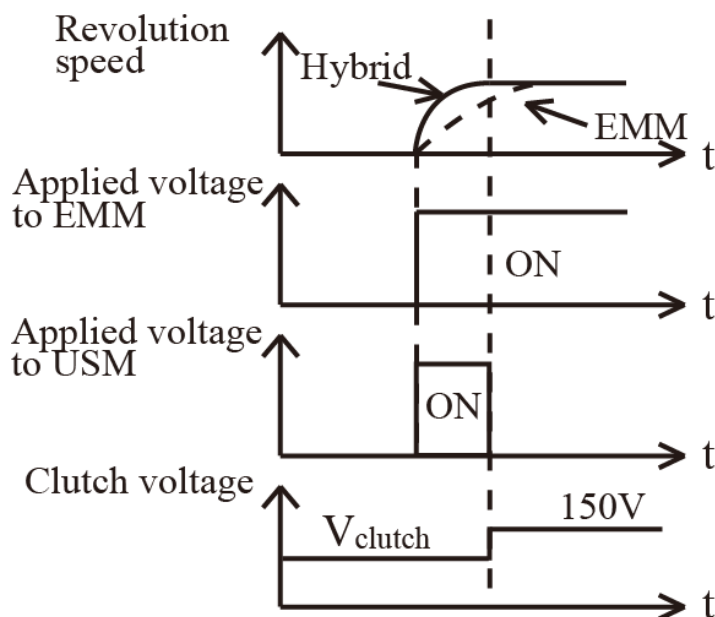


Fig. 3.11 Time chart of hybrid drive.

### 3.7.2 駆動実験結果

超音波モータを切り離す回転速度を 25 rpm と設定し、回転速度特性の測定を行った。電磁モータと超音波モータのハイブリット駆動、電磁モータ・超音波モータ単独駆動の回転速度特性を Fig. 3.12 に示す。

実験では、負荷を 13.2 mNm 加えた状態で、超音波モータと電磁モータの定常時の速度が同程度となる条件で行った。実験の結果、ハイブリット駆動の始動部分はほぼ超音波モータの立ち上がり特性と一致した。また電磁モータ単独で駆動するときと比較して、超音波モータを併用して駆動した場合には、立ち上がり時間がほぼ超音波モータの立ち上がりと同程度であった。

また、電磁モータについて別の駆動法として始動から 2ms の間 14[V]印加後、1.6[V]へ切り替えたときのシミュレーションを行った（付録 E 参照）。その結果立ち上がりは超音波モータと同程度の特性を得た。ただし、本シミュレーションでは、電源特性等を見逃している。

次に各駆動形態における定常状態までの消費電力 Fig. 3.13 を示す。グラフより、始動から定常状態までの電磁モータ側の消費電力が 78% という大幅な削減効果があることが分かった。またシミュレーションで用いた駆動法の場合とハイブリット駆動を比較すると 20% 程度の電力削減効果があった。これらのことからハイブリット駆動を用いることで、電磁モータ始動時に発生する電流を大幅に軽減可能であることが確認できた。

本研究で使用した超音波モータの平均電力はおよそ 20W，電磁モータの定常状態での電力は 0.9W であるので，超音波モータ単独駆動と比較するとハイブリッド駆動の方が全体の消費電力を削減し一定速回転を得ることが可能である。

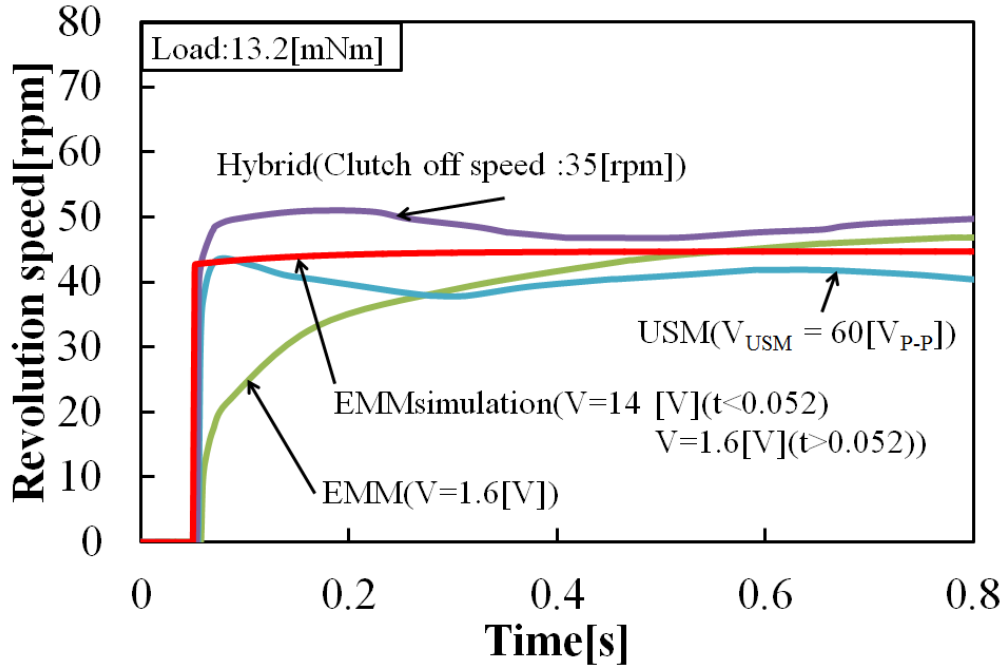


Fig. 3.12 Transient responses of revolution speed.

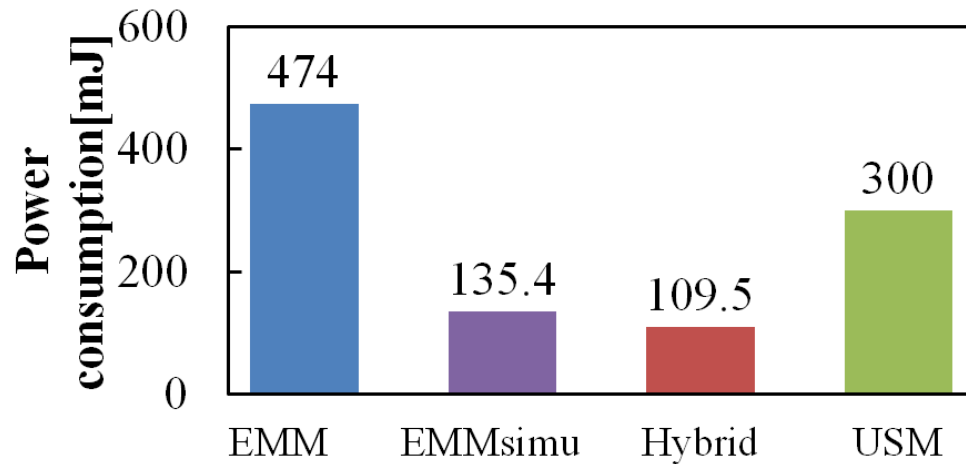


Fig. 3.13 Power consumption until steady state.

### 3.8 ハイブリッドアクチュエータシステムの制動特性

電磁モータにより一定速度回転（150 rpm）で駆動している状態から停止するまでの時間を電磁モータ端子開放時・短絡時および圧電ブレーキによる制動で比較した。

実験の結果を Fig. 3.14 に示す。0.5 s で制動を開始した結果、圧電ブレーキによる制動時間が最も短いことが分かる。これはほぼクラッチによる応答時間に等しいものであった。

力覚提示への応用を考えたときクラッチによる停止位置は重要な要素となる。まず、回転速度を 40 rpm、初期位置 90 deg とし、停止角度（0 deg）になったときにクラッチ電圧を 0 V にし、ブレーキをかけてロータを止めた。そのときのクラッチ電圧と回転角度を Fig. 3.15 に示す。ブレーキをかける直前のロータの角度は、ブレーキをかけてから約 8 ms 後にロータは停止した。停止した時のレバーの角度は -1.88 deg であった。

同様の実験を、回転速度を変えてロータが停止した時の角度を測定した。測定結果を Fig. 3.16（Control: OFF）に示す。速度が速いほど目標停止位置（0 deg）からの誤差が大きかった。

Fig. 3.15 からブレーキをかけてから約 19ms 後にクラッチ電圧が 0 V になるのに対して、約 8ms 後にロータの回転が停止した。これはクラッチ電圧低下とともに徐々にブレーキ力が増加しているためである。したがって、回転速度を監視し、目標停止位置に到達する 8ms 前にブレーキをかけるように制御することで目標停止位置に停止することができると考えた。ロータがブレーキをかけてからも等速で回転し、8ms 後に瞬間的に停止する場合は式(3.1)に示すような条件を満たすタイミングでブレーキをかけるとよい。

$$\text{Target [deg]} (0\text{deg}) = \text{angle [deg]} + \text{speed} \times T \quad (3.1)$$

Fig. 3.16 に制御した場合の結果（Control: ON）に示す。制御を行うことによって、停止位置の誤差を ±1 deg 以内に抑えることができた。速度の測定に使用したロータリエンコーダは、測定による誤差は最大で ±1.44 deg である。したがって、ブレーキ位置制御による停止位置の誤差は許容範囲であると考えられる。

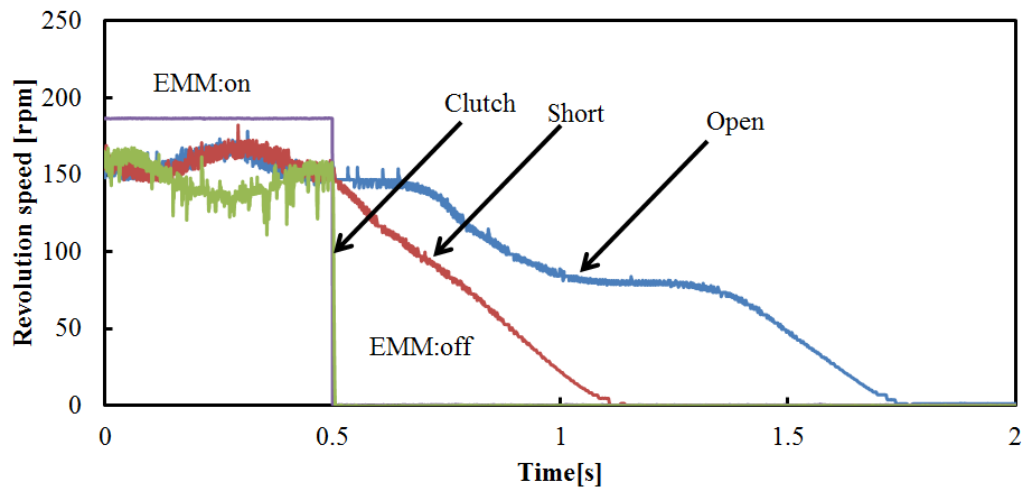


Fig. 3.14 Damping comparison of an actuator.

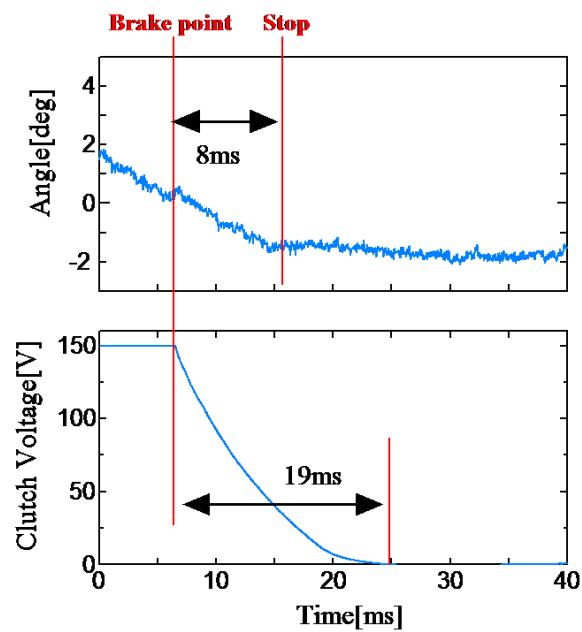


Fig. 3.15 Resulting clutch voltage and lever angle at brake point.  
 (Error angle = -2.22 deg, Rotation speed = -241 deg/s)

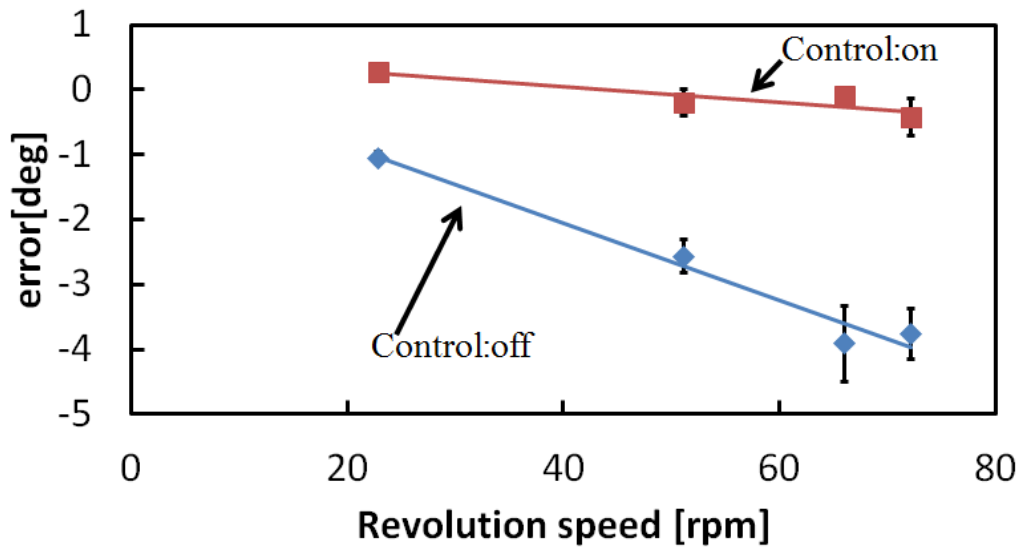


Fig. 3.16 Error angle vs. rotation speed.

### 3.9 結言

超音波アクチュエータシステムの回転速度およびトルク制御，ハイブリッド駆動による効果について検討しその結果について述べた。本章で得た結果について以下にまとめる。

- 圧電クラッチを用いることにより，新たな制御法として予圧による回転速度およびトルクの制御が可能となった。
- 予圧制御により負荷変動に対して速度一定制御を実現した。
- 始動時に予圧を切り替えることで，超音波モータの立ち上がり時間短縮が可能であった。
- 超音波モータと電磁モータで駆動状態を切り替えることで高速な始動・制動が可能で高速回転のアクチュエータシステムが実現可能であることを示した。
- ハイブリッド駆動により各アクチュエータ単独と比較してシステム全体での消費電力の削減が可能であることが分かった。

## 第4章 力覚提示への応用

### 4.1 緒言

力覚デバイスとは，コンピュータ画面上に表示される仮想物体に触れた感触などを再現するデバイスである。力覚デバイスには，ユーザの動作と仮想物体の状態に対応した感触を再現できることが要求される<sup>[7]</sup>。コンピュータ画面上の仮想物体の感触を提示するためには Fig. 4.1(a)-(c)に示すように主に 3 つの状態を表現できる必要がある。

- トルクフリー状態 [Fig. 4.1(a)]：仮想物体に触れず，自由に動くことができ，抗力・反発力を感じない。
- 抗力発生状態 [Fig. 4.1(b)]：仮想物体に触れることで動きが止まり，抗力を感じる。（例）壁，摩擦
- 反発力発生状態 [Fig. 4.1(c)]：仮想物体が元の形状に戻ろうとする弾性力を感じる。（例）弾性体

また，これら 3 つの状態をいくつか組み合わせることで，様々な力覚を再現することができる。

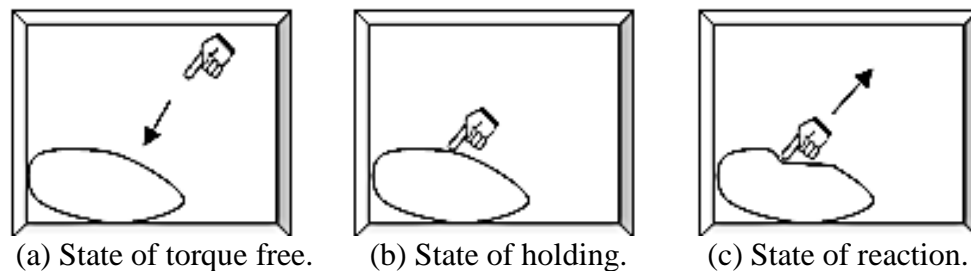


Fig. 4.1 Main states required in force-feedback device.

現在開発されている力覚デバイスは主に電磁モータを使用している。Table 4.1に示すように，電磁モータはこれら 3 つの状態を電気入力の ON/OFF で再現することができる。また，電磁モータはトルクフリー状態を有し，トルク制御も簡便である。そのため，トルクフリー状態と反発力発生状態の制御が容易であり，主に柔らかい感触の再現に優れる。しかし，電磁モータは外力に対する応答があまり速くないため，仮想物体の硬い感触や粗い感触の表現は困難である。もし，応答を速くするためにシステムのフィードバックゲインを増加や制御周期を上昇させたならば，フィードバックシステムは不安定になる。さらに，電磁モータは位置を保持するために大きな電力を消費する。

一方，超音波モータは振動子とロータやスライダー間の摩擦力によって駆動するため，高速応答である。さらに，超音波モータは位置を保持するために大きな電力を消費しない。そのため，超音波モータは仮想物体のリアルな硬い感触や粗い感触の再現に効果的であると考えられる。また圧電クラッチを有する超音波アクチュエータシステムの実現により，ブレーキ状態，超音波モータ動



作状態の他に、トルクフリー状態が実現でき、Table 4.1 に示すようにトルクフリー、抗力発生、反発力発生 of 3つの状態が再現可能である。

以上より、試作したハイブリッドアクチュエータシステムは、電磁モータと超音波モータ2つのアクチュエータの長所を生かすことで、幅広い出力範囲と高速な応答が実現可能である。本章では、ハイブリッドアクチュエータシステムを用いての力覚提示応用を幾つか検討し、その有用性について述べる。

Table 4.1 Operating statuses of EMM, USM and ultrasonic actuator with clutch under electrical driving conditions.

Device Status	EMM	USM	Ultrasonic actuator
Torque free	OFF	Unable	Clutch OFF
Holding	ON	OFF	OFF
Reaction	ON	ON	ON

## 4.2 力覚提示システム

1軸型ハイブリッドアクチュエータシステムを用いた力覚提示の様子を Fig. 4.2 に示す。システムに取り付けた操作レバーをつかみ、操作することで仮想空間内の操作点を動かし物体に接触させることで感触を得ることができる。ただし、レバーの回転操作は仮想空間上での回転動作だけではなく、直線動作を与えることもできる。例えば Fig. 4.2 中ののこぎり操作提示の場合、レバーの左回転・右回転はのこぎり操作の押し引きに対応する。このときディスプレイ上ののこぎりは動作に合わせて左右に移動する。

本研究での力覚提示システムのブロック線図を Fig. 4.3 に示す。ロータリエンコーダおよびレバーに取り付けたひずみゲージを用いて回転速度およびトルクを測定する。これらの測定値を、DAQ ボードを通じて MATLAB/Simulink 上で作成したプログラムへ取り込む。

力覚提示プログラムの動作を Fig. 4.4 に示す。作成したプログラムは提示する力覚に応じて制御方式を切り替えている。例えば Fig. 4.2 の場合は設定した間隔でブレーキを制御している。この時プログラムからの信号により電磁モータ・超音波モータ・圧電クラッチを制御し力覚を提示する。また、仮想物体は提示力覚に適したものをディスプレイ上に表示している。

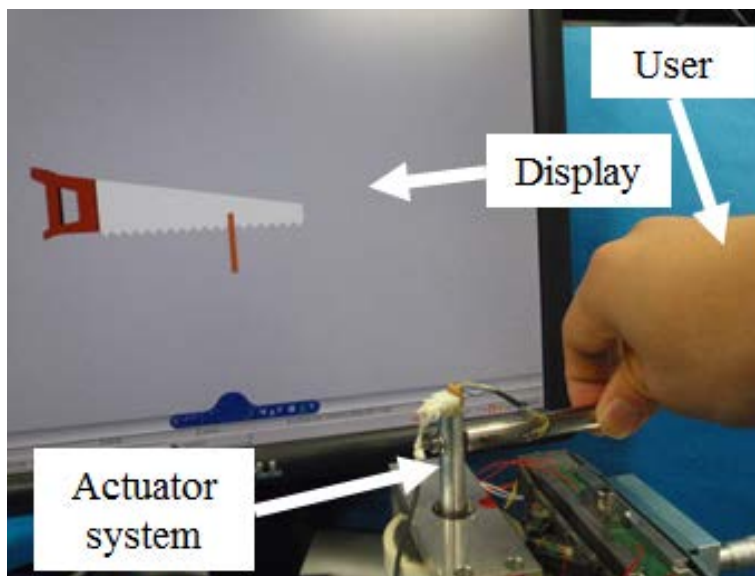


Fig. 4.2 The scene of use of force-feedback display system.

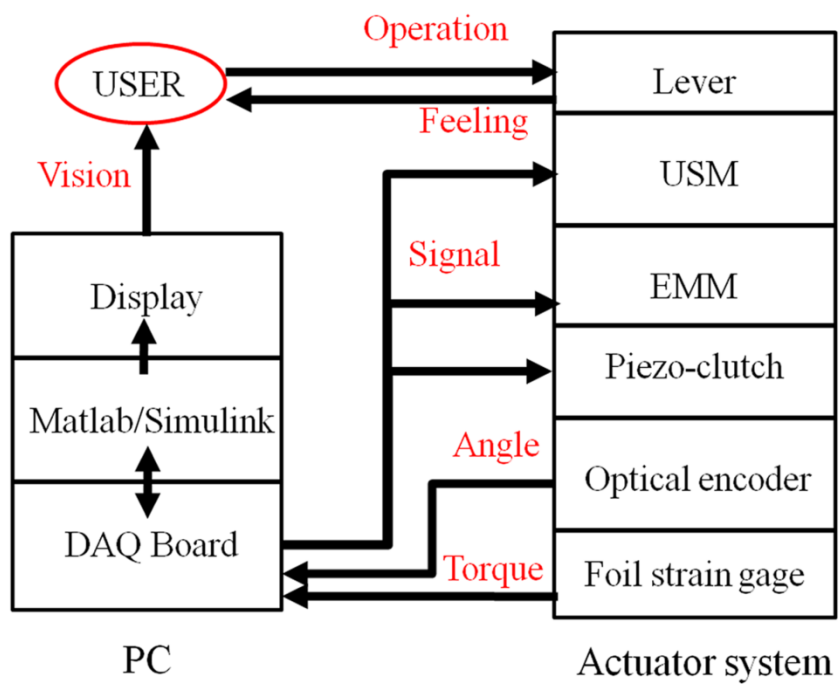


Fig. 4.3 Overview of force-feedback display system.

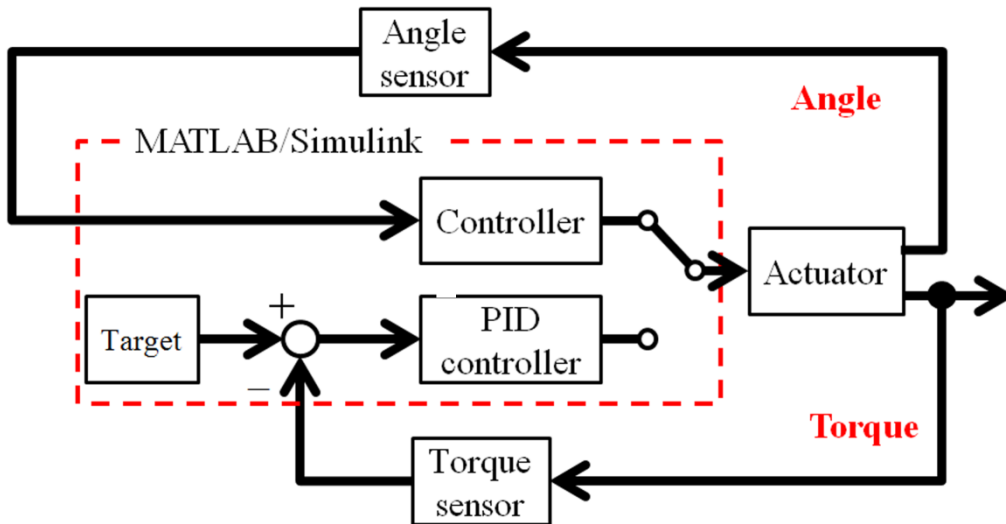


Fig. 4.4 Block diagram of force-feedback program in Matlab/Simulink.

### 4.3 力覚提示実験

ハイブリッドアクチュエータシステムを用いた力覚提示の効果検討のため幾つかの提示実験を行った。まず本研究では、「硬さ」「柔らかさ」「粗さ」を以下のように定義する。

- 硬さ : 高速な反力提示かつ高剛性 (例: 壁面)
- 柔らかさ: 連続的な反力提示 (例: ばね)
- 粗さ : 不連続な反力提示 (例: 摩擦・凹凸)

提示した力覚およびアクチュエータの組み合わせを Table 4.2 に示す。実験では抗力提示の例として壁面・摩擦・凹凸, 弾性感触の例としてばねの力覚を提示した。壁面は圧電クラッチでの操作制限によって提示した。凹凸は圧電クラッチのオンオフにより表現した。摩擦は圧電クラッチにより抗力制御で表現した。ばねの感触については, 電磁モータ・超音波モータそれぞれと圧電クラッチを併用して提示を行った。仮想空間上で手や指は質量・体積を持たない操作点と定義する。また, 各実験ではレバーを反時計方向へ動かしたときの反力・角度は正として示す。また本章では, 摩擦およびばね 2 種について説明する。壁面・凹凸については付録 F に示す。

Table 4.2 Combination method of force-feedback display.

Haptic	USM	EMM	Brake
Wall			○
Friction			○
Projections			○
Spring	○		(Clutch/Brake)
		○	○

## 4.4 質量移動の提示

抗力発生状態を利用した力覚提示の例として、Fig. 4.5 に示すような台の上に置かれたブロックを仮想物体として設定した。このモデルでは、圧電クラッチによる摩擦力制御によりブロックを移動させたときの感触を再現した。実験の結果を Fig. 4.6 に示す。この力覚は 5 つの状態に分けることができる。以下で各状態について示す。

- A 区間（トルクフリー状態）

レバー角度が 0deg より大きいとき、クラッチ電圧 150 V が印加され超音波モータ部の先端とロータが離れている。この時はトルクフリー状態であり、自由にレバーを動かすことができる。

- B1 区間（静止摩擦状態）

レバーがブロックのある位置(0 deg)にきた時、クラッチ電圧を 0V に下げブレーキをかけることで、床とブロック間の静止摩擦力を提示がする。

- B2 区間（動摩擦状態）

外力が大きくなり -2.5 N 以下になったとき、反力を一定に保ちながらブロックが移動する。このとき反力はクラッチ電圧を PID 制御することで調節する。反力は

$$f = m \frac{d^2x}{dt^2} + \mu mg \quad (4.1)$$

と定義する。このとき、 $m$  をブロックの質量、 $x$  を位置、 $\mu$  を摩擦係数とする。本実験では式(4.1)の第1項は省略している。ロータ表面の粗さやスティックスリップ現象により圧電クラッチと反力に微小振動がみられる。しかしこの振動は、操作者にほとんど感じることはなかった。

- B3 区間（静止摩擦状態）

加わる外力が小さくなり、-1 N 以上になると PID 制御を終了し、再び 0 V のクラッチ電圧とする。それにより、再び静止摩擦状態へ移行する。

- C 区間（トルクフリー状態）

ブロックから離れる方向に力を入れると反力が正方向に発生する。その瞬間にクラッチ電圧を 150 V にする。それによって再びトルクフリー状態となり、レバーを自由に動かすことができる。

提示実験の結果、圧電クラッチによりトルクを PID 制御することで質量移動による摩擦力の提示が可能であることを確認した。本手法を応用として、超音波モータを併用することで部分的な摩擦力の低減や粘性の提示も可能である。

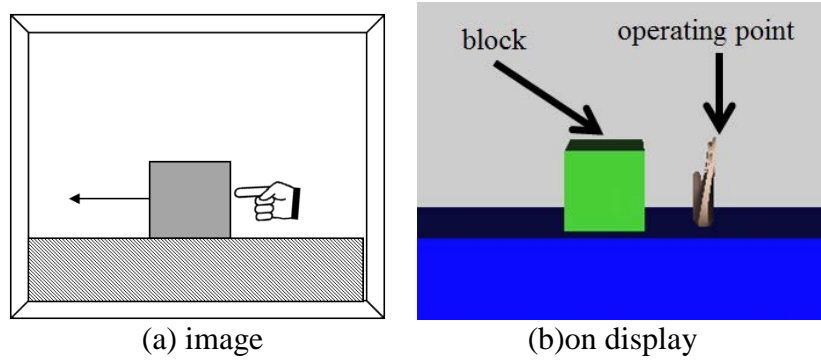


Fig. 4.5 Virtual block on display.

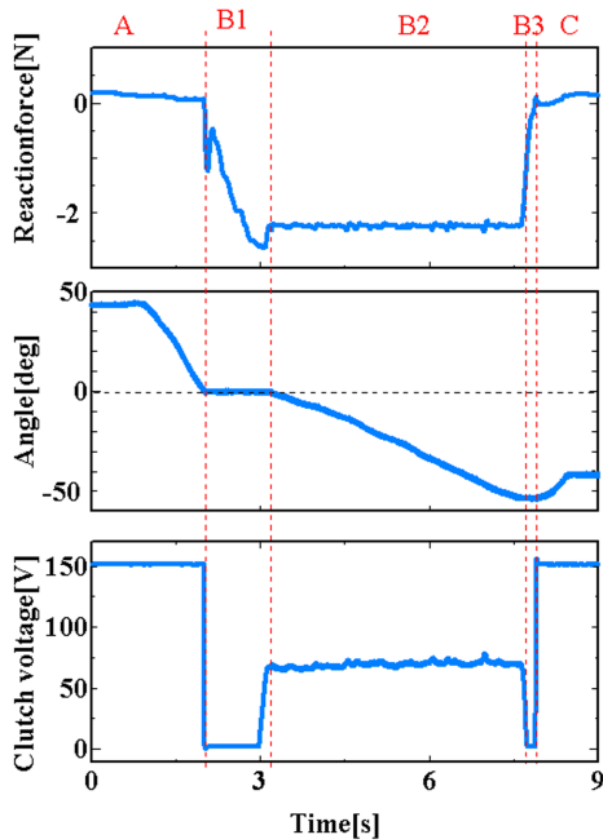


Fig. 4.6 Charts of reaction force, clutch voltage, and angle in the representation of friction force.

## 4.5 弾性提示

### 4.5.1 超音波アクチュエータによる再現

反発力発生状態の例として、Fig. 4.7に示すように平面上に仮想バネを設定した。まず超音波モータ・圧電クラッチを用いた場合におけるバネを押したときの感触を再現した。弾性反力の範囲を  $0 \text{ deg} \sim -30 \text{ deg}$  とし、 $-30 \text{ deg}$  のときブレーキにより平面接触を表現する。弾性反力は超音波モータに一定の電圧を印加した状態で、圧電クラッチにより制御する。

バネを押したときの反力、クラッチ電圧、レバーの角度、回転速度の測定結果を Fig. 4.8 に示す。この提示は5つの状態に分けることができる。

● A 区間 (トルクフリー状態)

クラッチ電圧 150 V が印加されており、超音波モータ部の先端とロータが離れている。この時はトルクフリー状態であり、自由にレバーを動かすことができる。

● B1 区間 (弾性力発生状態)

レバーがバネのある位置 (0 deg) に来たときから、超音波モータを駆動し、弾性反力を

$$F = kx \quad (4.2)$$

と定義する。ここで  $F$  を弾性反力、 $k$  を弾性定数、 $x$  を移動位置とする。本実験では  $k=12.8 \text{ N/m}$  とした。反発力は圧電クラッチで制御し、超音波モータには  $40 \text{ V}_{p-p}$ ,  $23.5 \text{ kHz}$  印加した。またクラッチ電圧  $V$  と回転角度  $\theta$  の関係は、

$$V = 132 - 0.6\theta \quad (4.3)$$

とした。

回転角度の滑らかな変化に対して、反力にはばらつきにより意図しない粗さを提示された。この原因としてはロータの摩耗が影響している。

● B2 区間 (抗力発生状態)

レバーが設定したバネの終端 (-30 deg) に来たとき、超音波モータへの印加電圧とクラッチ電圧を 0 V にすることによってブレーキ状態とし、レバー動作を制限することで、平面に触れた状態を提示する。

● B3 区間 (弾性力発生状態)

正の方向に力が加わったとき、超音波モータに再び電圧を印加し、圧電クラッチは式(4.3)で得られる電圧を印加することではばねの弾性力提示状態に移行する。

● C 区間 (トルクフリー状態)

レバーの位置が再び 0 deg に戻ったときに、超音波モータへの印加電圧が 0 V とすることでトルクフリー状態へ移行し、レバーを自由に動かすことができる。

実験結果より、超音波モータによる弾性提示はブレーキ状態から反力発生状態への瞬間的に大きな力を発生することは可能であった。しかし、推力の不均一さやロータ・超音波モータ間の摩擦の影響により角度に対してクラッチ電圧を一意的に制御する方法では滑らかな反力制御は困難であった。制御などで摩擦むらなどの影響を軽減することでより滑らかな提示が可能であると考ええる。

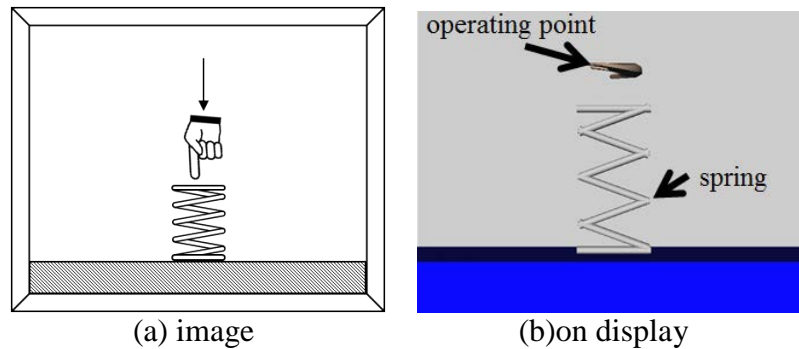


Fig. 4.7 Virtual spring on display.

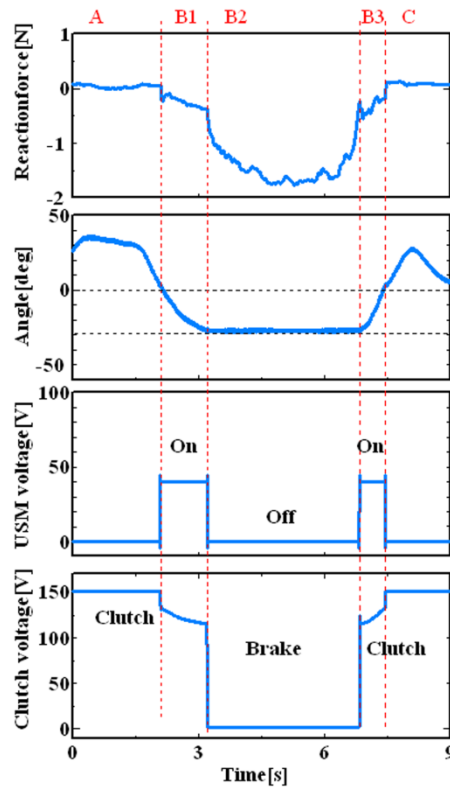


Fig. 4.8 Charts of reaction force, clutch voltage, and angle in the representation of the elastic reaction force by the USM.

#### 4.5.2 電磁モータ・圧電クラッチ併用による再現

前節で行ったバネ感触提示を同様の条件で、電磁モータと圧電ブレーキを用いて行った。反力、クラッチ電圧、レバーの角度、デューティ比の測定結果を Fig. 4.9 に示す。このモデルは5つの状態に分けることができ、各状態について以下に述べる。

- A 区間（トルクフリー状態）  
クラッチ電圧 150 V が印加されており、トルクフリー状態である。
- B1 区間（弾性力発生状態）  
レバーがバネのある位置 (0 deg) を超えたとき、電磁モータにより弾性反発力を提示する。反発力は回転角度を変数として電磁モータを PWM 制御でコントロールした。弾性反力の提示範囲は 0 deg ~ -30 deg であり、反力とデューティ比の関係は 0.02 N/% である。
- B2 区間（ブレーキ状態）  
レバーが設定したバネの終端がある位置 (-30 deg) に来たとき、クラッチ電圧を 0V にすることによってレバーの動きを止め、抗力を感じることができる。このとき電磁モータには電圧は印加しない。
- B3 区間（弾性力発生状態）  
正方向に力が加わったとき、クラッチに再び 150 V、電磁モータに電圧を印加することでばねの弾性力を感じることのできる状態に移行する。
- C 区間（トルクフリー状態）  
レバーの位置が再び 0 deg に戻ったとき、電磁モータへの印加電圧が 0 V とし再びトルクフリー状態へ移行する。

実験の結果、電磁モータにより弾性提示が可能であることを確認した。また、超音波モータでの提示と比較して電磁モータでの提示の方がより滑らかな提示が可能であった。圧電クラッチを併用することで、弾性から剛性への力覚の切り替わりを安定して提示可能であることを確認した。

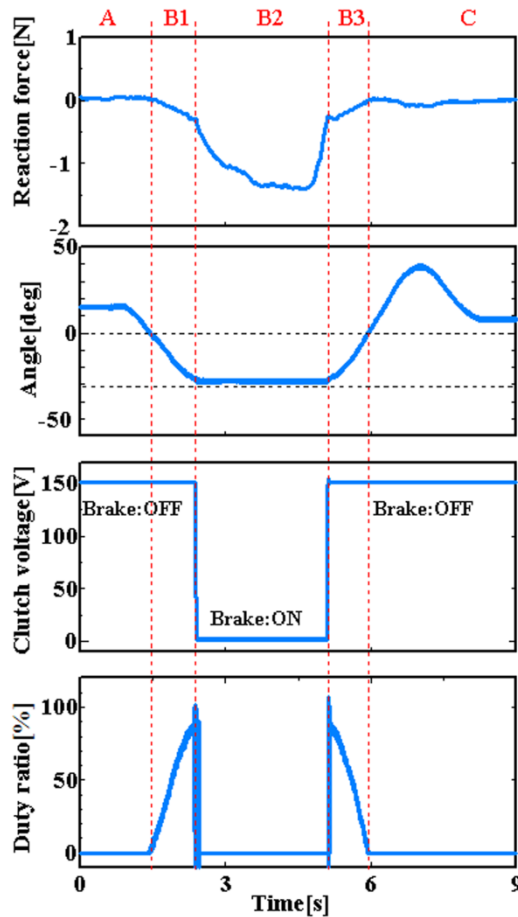


Fig. 4.9 Charts of reaction force, clutch voltage, and angle in the representation of the elastic reaction force by the EMM.

## 4.6 2自由度デバイスへの拡張

ここまで、一軸型ハイブリッドアクチュエータシステムでの力覚提示を実現した。実験において各感触とも十分な提示が可能であることを確認した。しかし、試作したアクチュエータシステムは軸回転方向にしか力覚を提示できない。これは、視覚による提示を併用したバーチャルリアリティにおいては、操作者に違和感を与え、提示感触のリアリティを低減すると考えられる。より現実の操作と仮想空間の描写を一致させるためにはハイブリッドアクチュエータシステムの多自由度化が必要であると考えられる。多自由度デバイスについては既に多くの研究がなされており、様々な手法が存在する。その中に、パラレルリンク機構<sup>[50]</sup>による多自由度機構がある。パラレルリンク機構の主な特徴として以下のことがあげられる。



### 長所

- 複数のリンクで構成され、曲げ応力を受けにくいいため剛性が高い。
- 複数のアクチュエータの力の合力が出力されるため最大力が大きい。
- リンク間での誤差が平均化され、高精度である。
- 可動部にアクチュエータを持たないため軽量で高速動作が可能。
- 機構が単純で多自由度構成が容易。

### 短所

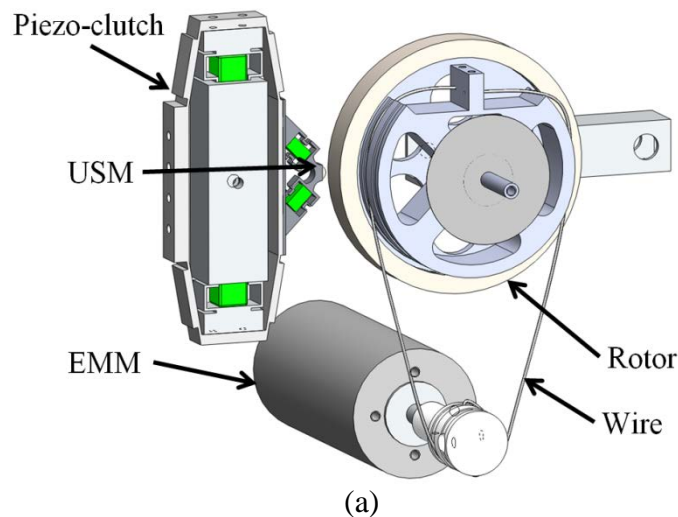
- 一般的に操作範囲が小さい。
- 特異点が多く動作に制限がある。

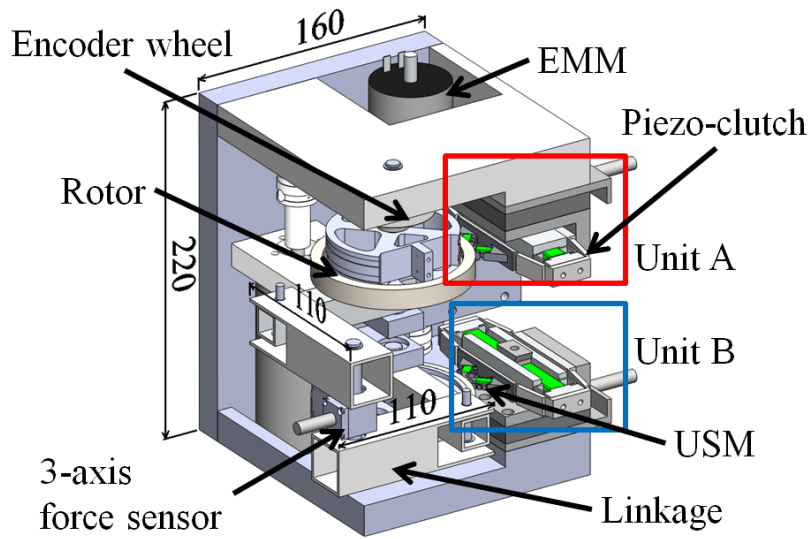
そこで、1軸ハイブリッドアクチュエータシステムと平行リンク機構を用いて、2自由度ハイブリッドアクチュエータシステムを試作し、いくつかの力覚提示実験を行い、力覚提示への応用に対する効果について検討する。

## 4.7 2自由度ハイブリッドアクチュエータシステムの構成

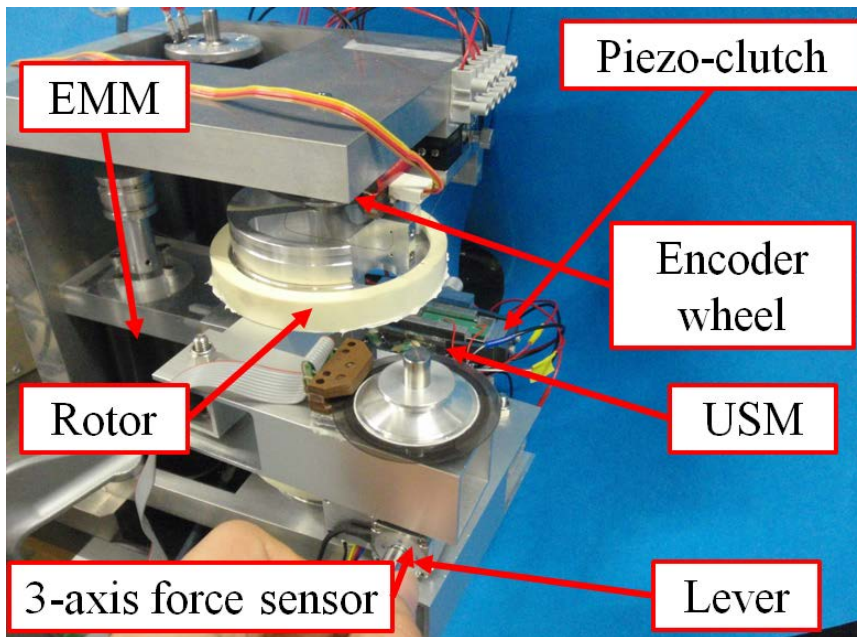
Fig. 4.10 に試作した2自由度ハイブリッドアクチュエータシステムの構成モデルとその写真をそれぞれ示す。本システムは、出力部としてハイブリッドアクチュエータシステムを Fig. 4.10(a)に示すように再構成したものを使用する。本論文ではこれをハイブリッドアクチュエータシステムユニット (AS ユニット) と呼称し、本システムでは2組使用する。超音波アクチュエータ部は一軸回転型と同様の物を用いている。電磁モータ部はコアレス DC モータ (Maxon, RE50) を用い、超音波モータのロータとワイヤーでつなぐことでモータ出力を伝達する。

2つの AS ユニットをつなぐ機構として前述の通り平行リンク機構を採用し2自由度のシステムの構成をした。試作したシステムを Fig. 4.10(b)に、実際のシステムの写真を Fig. 4.10(c)に示す。本システムではレバー位置の測定に二組のロータリエンコーダを、操作時の力測定のために3軸力覚センサを備えている。





(b)



(c)

Fig. 4.10 2-DOF hybrid actuator system: Hybrid AS unit, (b) combined system containing Units A and B, (c) photograph of constructed device.

## 4.8 操作範囲

力覚提示を行う際、装置の操作範囲を把握している必要がある。そこですべてのアクチュエータを駆動せず、操作部のレバーを動かすことにより本装置の操作可能範囲を測定した。操作範囲は、2つのユニットの軸に取り付けたロー

タリエンコーダを用いて回転角度を測定し、それぞれの値から直交座標に変換して求めた。測定した軌跡を Fig. 4.11 に示す。

初期位置は同図に示すように各リンクが互いに直角をなしている状態である。測定の結果、最大で半径 40 mm の円を描けることが分かった。また、同図中の実践・破線は操作範囲の外縁を示している。しかし、破線部上は特異点であり、各リンク重なり力覚提示が不可能となる。また、実線部上ではリンクとアクチュエータやロータが接触することで、それ以上の操作が不可能となる。

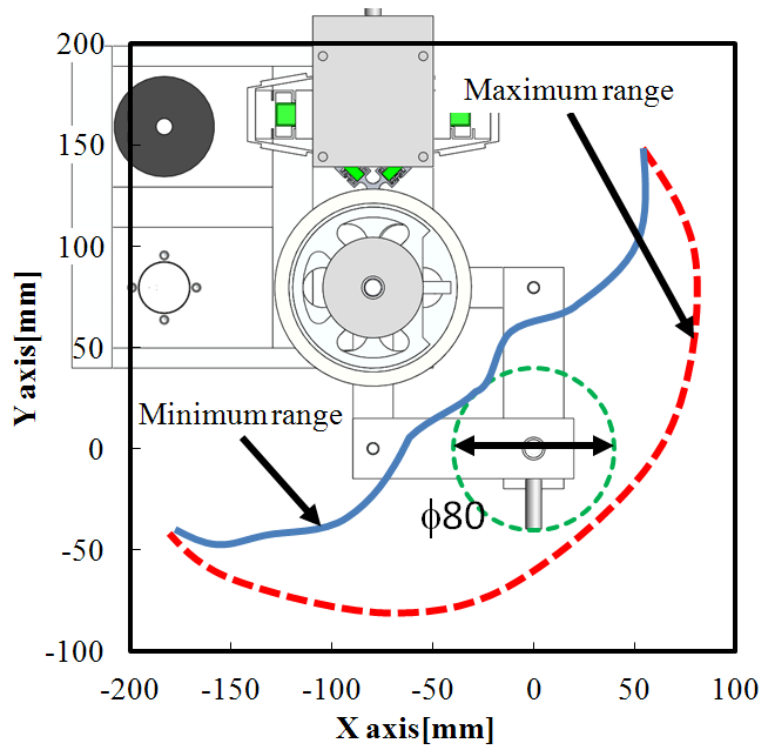


Fig. 4.11 Operational area outlined by solid and broken lines.

## 4.9 出力特性

### 4.9.1 USM印加電圧に対する出力特性

超音波モータ部の先端とロータ間に 19N の初期予圧を与え、各 AS ユニットの超音波モータに加える電圧 (23.5kHz) の大きさを変化させたときの推力の結果を Fig. 4.12 に示す。図中より各ユニットとも  $20V_{p-p}$  から印加電圧に対して直線的に増加することを確認した。またロータの大型化により 1 軸回転型と比較して推力の向上を確認した。

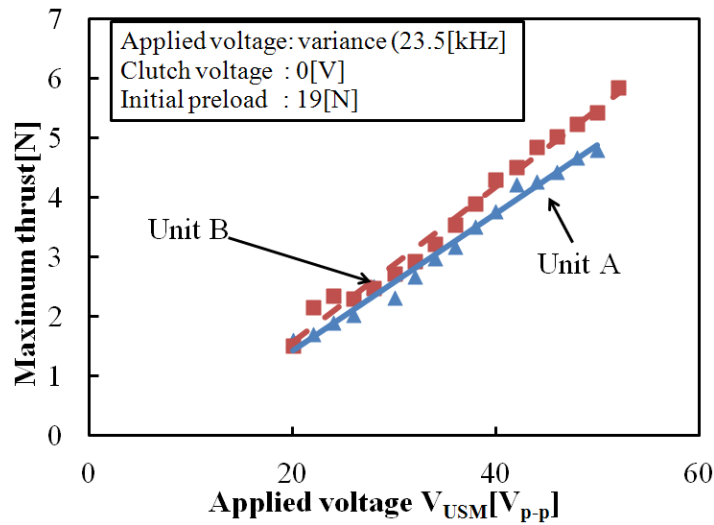


Fig. 4.12 Dependence of maximum thrust on voltage applied to USM.

#### 4.10 最大静止摩擦力特性

抗力発生時の最大値把握のために最大静止摩擦力の測定を行った。まず、超音波モータを駆動せずに、超音波モータ部の先端とロータ間に 65 N の初期予圧を与えた。そして、レバーを手動で動かし、ロータが回転するまでの最大静止トルクを測定した。クラッチ電圧の大きさを変化させたときの最大静止トルクを Fig. 4.13 に示す。それぞれ、最大で 18 N, 16 N の最大静止摩擦力が発生し、クラッチ電圧に対して直線的に減少した。しかし、各ユニットで特性に差異があった。これは、組立誤差や接触部の摩耗具合による影響と考えられる。

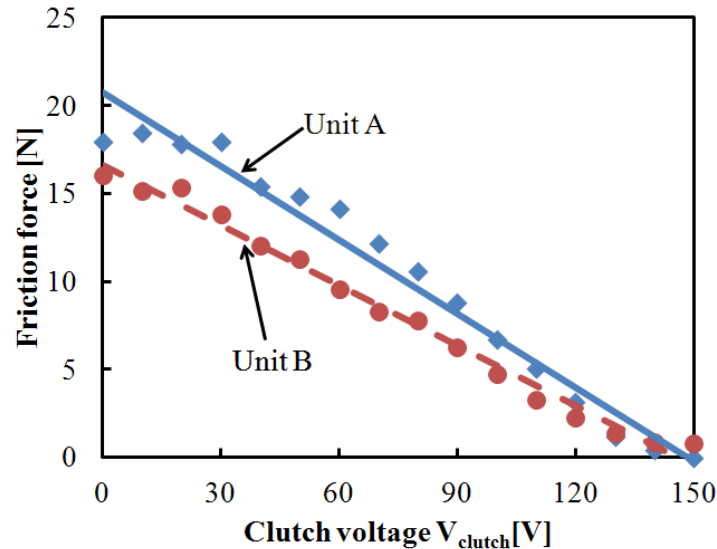


Fig. 4.13 Dependence of static friction force on voltage applied to piezo-clutch functioning as a brake.

## 4.11 壁なぞり操作の提示

力覚提示の中で物体表面をなぞる動作は、仮想空間上の動作の中でも基本的な動作の一つにあげられる。古荘氏らによるパッシブアクチュエータであるERブレーキによるなぞり動作の実現法を用いて<sup>[51]</sup>、試作した2自由度アクチュエータシステムの圧電ブレーキを用いてなぞり動作の再現を試みた。

### 4.11.1 なぞり動作における力の釣り合い

実際に平面をなぞる動作における力関係を Fig. 4.14(a)に示す。操作側（指など）には、加える力を  $F_{in}$ 、平面からの反力  $F_n$  および平面との摩擦力  $F_f$  の3つが働く。この時、操作側に作用する合力は平面に対して水平であり、大きさは  $F_{in}$  の水平成分と  $F_f$  との差である。

次に仮想空間上で考える。ある時の力のつり合いを Fig. 4.14(b)に示す。ASユニット A および B で発生するブレーキ力の合力を  $F_b$  とすると、 $F_{in}$  と  $F_b$  の合力が水平方向のみになったとき、仮想壁上をなぞる動作が可能となる。

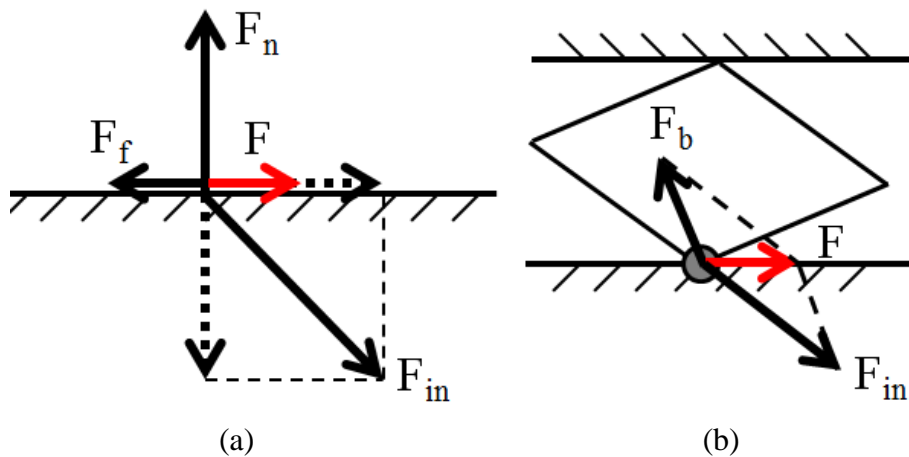


Fig. 4.14 Balance of force: (a) Tracing on flat surface, (b) Tracing by virtual reality.

### 4.11.2 領域内でのブレーキ力制御法

Fig. 4.15 に制御の概略図を示す。同図中において、上方を抗力が発生しない自由空間、自由空間と仮想物体との境界を仮想壁、物体内部で操作部の進入をそれ以上認めない境界を基底壁とし、仮想壁と基底壁の間の領域幅  $D$  [mm] をなぞり領域とする。以降では、仮想物体内に進入することは仕方ないものとする。

ある時刻における操作部の仮想壁からの位置をめり込み量  $h$  [mm] とするとき、抗力であるブレーキ力  $F_b$  を次のように定める。

$$F_b = \frac{h}{D} \times F_{max}, (0 \leq h \leq D) \quad (4.4)$$

ここで、 $F_{max}$  はブレーキより操作位置で発生できる最大抗力である。ただし、 $F_{max}$  はリンクの姿勢により変動する。(4.4)式より仮想壁から基底壁へと勾配を設定し、この範囲内で操作力と釣り合う位置で壁と平行に操作することができる。

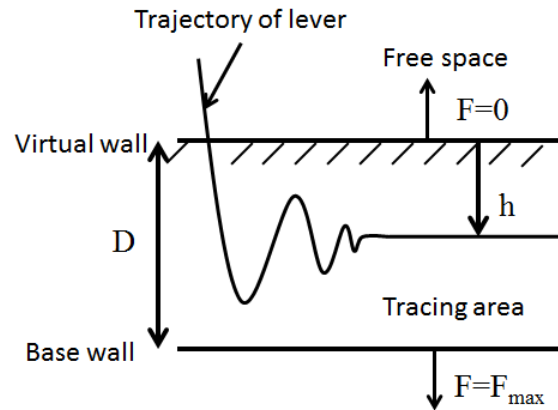


Fig. 4.15 Trajectory by brake control.

### 4.11.3 なぞり動作提示実験

Fig. 4.16 に再現実験の環境設定を示す。条件は以下のようにした。

- 初期位置 : Fig. 4.16(a)に示すように各リンクが互いに直交配置
- 仮想壁 : Fig. 4.16(b)に示すように x 軸より 45 deg 回転
- 自由空間 :  $y < 0$
- なぞり領域 :  $D = 0.5 \text{ mm}$
- 最大ブレーキ力 :  $F_{max} = 8 \text{ N}$

実験では、自由空間からレバーを操作し壁接触後 Fig. 4.16(b)に示すように力を加えながら操作した。この時、Unit B の圧電ブレーキのみを使用し制御を行った。

Fig. 4.17 になぞり動作の軌跡を示す。また、Fig. 4.18 に座標軸を仮想壁と水平となるよう座標変換した結果を示す。実験の結果、ブレーキ力制御による直線動作を確認した。なぞり動作に対するめり込み量は  $0.2 \text{ mm}$  程度であり、操作軌跡の誤差は  $\pm 0.1 \text{ mm}$  程度であった。この誤差は十分許容できる範囲であった。また、めり込み量はなぞり領域  $D$  を変更することで調節が可能である。Unit A のブレーキを使用することで逆方向へのなぞり動作が可能である。また、操作した感覚はブレーキ力の逐次変化による微小振動はあるもののブレーキによる摩擦は非常に小さく滑らかな操作感であった。

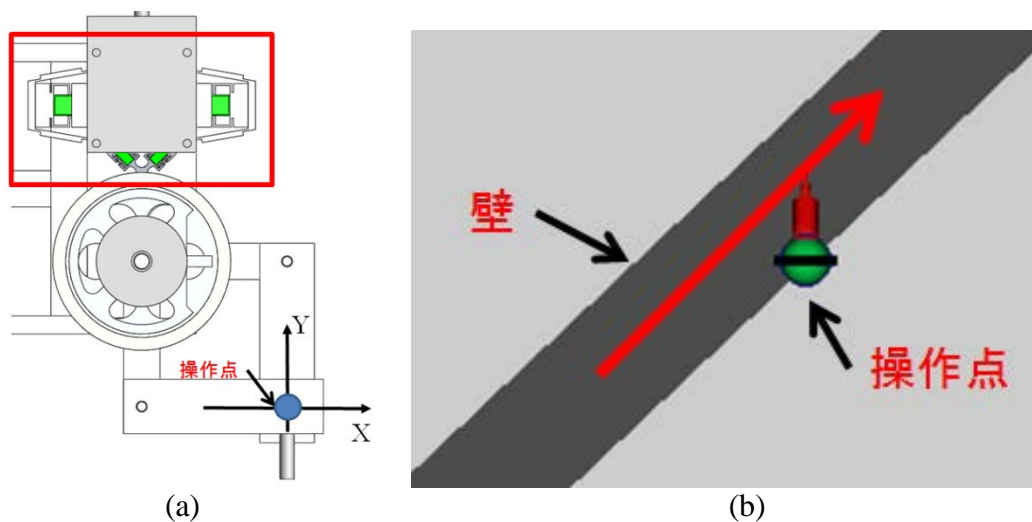


Fig. 4.16 Experimental environment of tracing a wall.

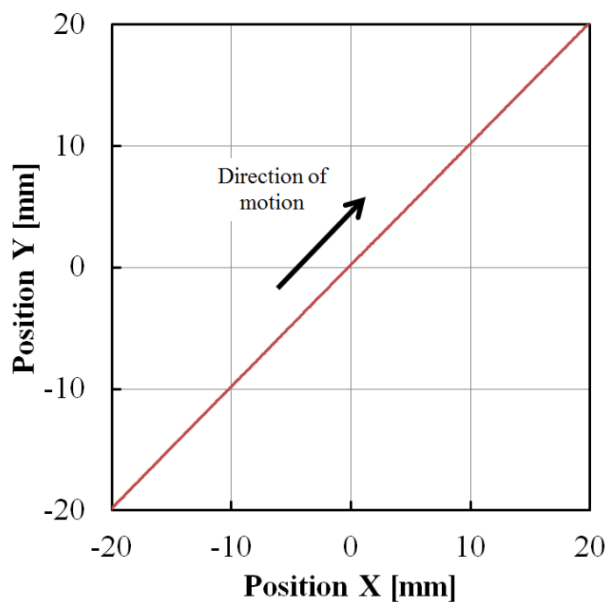


Fig. 4.17 Trajectory by tracing a wall.



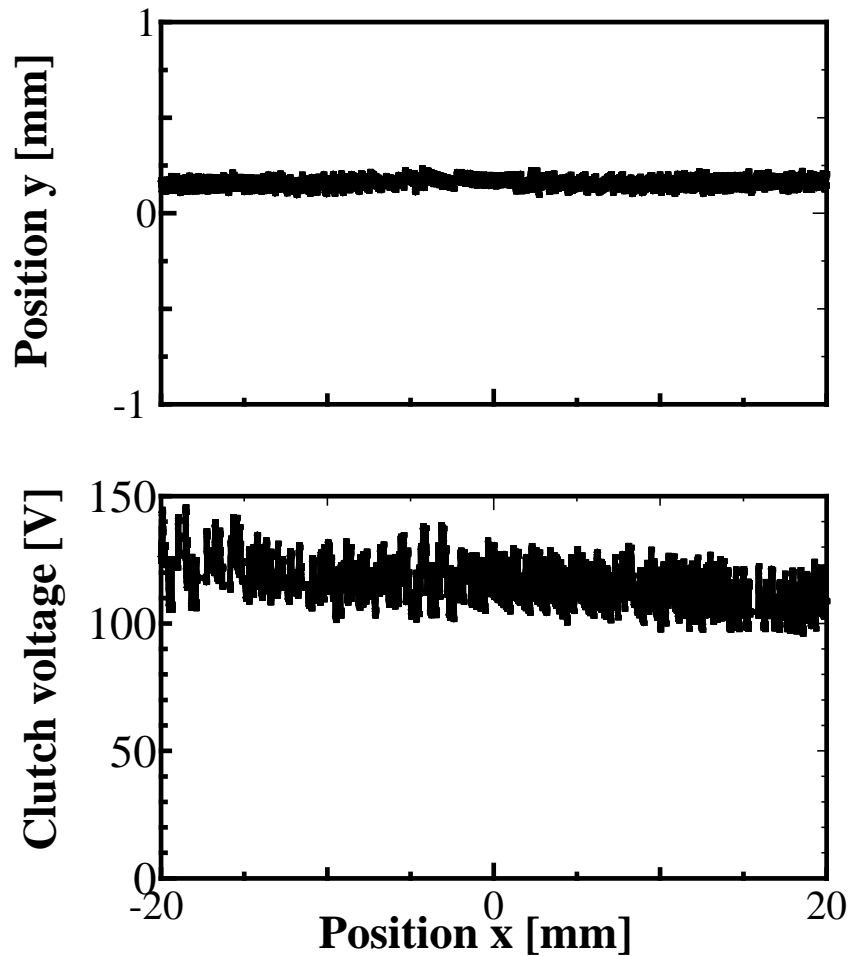


Fig. 4.18 Trajectory by tracing a wall.

#### 4.11.4 水平方向へのなぞり動作提示実験

前節と同様の実験を以下の条件で行った。

- 仮想壁位置：x 軸上
- 操作軌道：負から正の方向
- 使用アクチュエータ：Unit B のクラッチのみ

実験で得た軌跡を Fig. 4.19 に示す。x < 0 では、仮想壁に沿った軌跡を描けているが、x = 0 を超えるリンクの自由度に従って弧を描く軌跡となった。

実験中の力の釣り合いモデルは、Fig. 4.20 のようになる。x < 0 の場合は、Fig. 4.14 で示したものと同様に y 軸方向の力が釣り合うことでレバー x 軸方向への移動する状態となる。しかし、x > 0 の場合、加えられる操作量に対して、Unit B で発生する抗力が図中のリンク A' へ伝わらず、リンクが回転した。このことから今回の実験の場合は、ブレーキのみではリンク B と A' のなす角が 90° 以下の範囲でのみ提示可能であった。

先ほどと同じ実験を以下の条件下で再度行った。



- 仮想壁位置：x 軸上
- 操作軌道：負から正の方向
- 使用アクチュエータ：Unit B のクラッチおよび超音波モータ
- 超音波モータ推力方向：-y 方向

提示結果を Fig. 4.21 に示す。超音波モータを併用することにより， $x > 0$  の範囲においてもなぞり操作を可能となった。

以上より，クラッチの切り替え，または超音波モータ併用によりすべての方向への併進提示が可能であると考えられる。

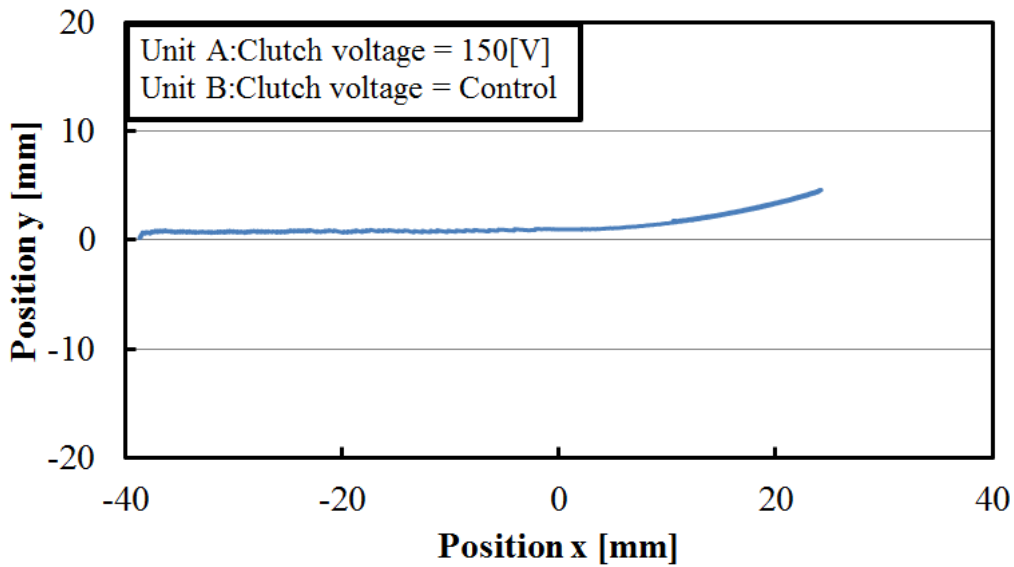


Fig. 4.19 Trajectory by tracing a wall with piezo-clutch.

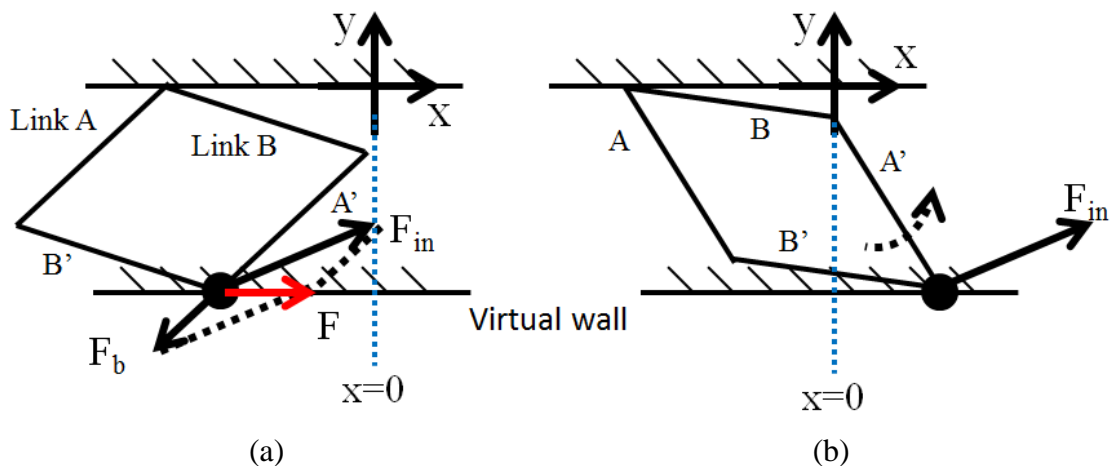


Fig. 4.20 Balance of force: (a)  $x < 0$ , (b)  $x > 0$ .

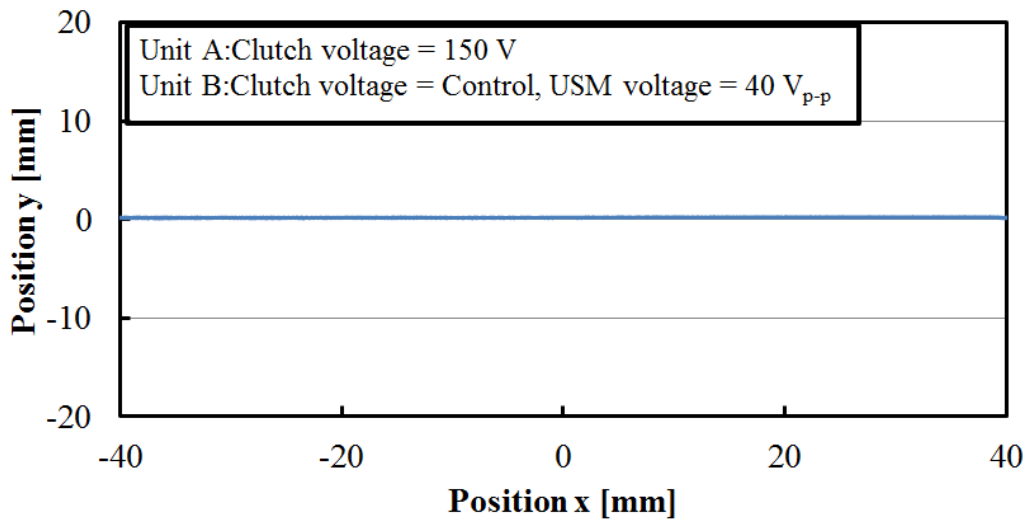


Fig. 4.21 Trajectory by tracing a wall with piezo-clutch and USM.

## 4.12 ブロック移動の提示

一軸型での提示と同様に平面上に配置したブロックを仮想物体として設定し、2自由度ハイブリッドアクチュエータシステムでのブロック移動による摩擦感の提示を行った。本実験では、静止摩擦については考慮せず、動摩擦状態のみを提示し、移動方向はx軸より $60^\circ$ 傾けた直線状とし、動摩擦力の大きさは3 N、発生方向は移動軸上に固定した。Fig. 4.22 にレバーの軌跡と移動中の反力を、Fig. 4.23 に反力、クラッチ電圧についてのタイムチャートを示す。ここではレバーを押すときの力を正として考える。この提示ではブロックの移動状態と方向切換状態の2状態が存在する。以下にそれぞれの状態について説明する。

- ブロックの移動状態 ( $T_1 \sim T_2, T_2 \sim T_3$ )

レバーにある程度の力を加えることでブロック移動状態となる。移動中は操作者の加える力の絶対値を、PID制御を用いて一定に制御した。デバイスに加わる力の絶対値を制御量とすることで、双方向移動時も安定操作を実現した。

- 方向切換状態 ( $T_1, T_2, T_3$ )

ブロックの移動状態時加わる力が2 N以下となったとき、両クラッチ電圧を0 Vとし、ブレーキ状態とした。

実験の結果、進行方向を切り替えながらの反力一定提示が可能であることを確認した。また実験では抵抗力の方向を固定したが、ユニット毎に反力を制御することで抵抗力の方向を制御しつつ、レバー操作が可能であることも確認した。ただし、レバーの移動・回転角度を急に変化させると制御不能状態となることがあるため、フィルタなどの対策が必要である。

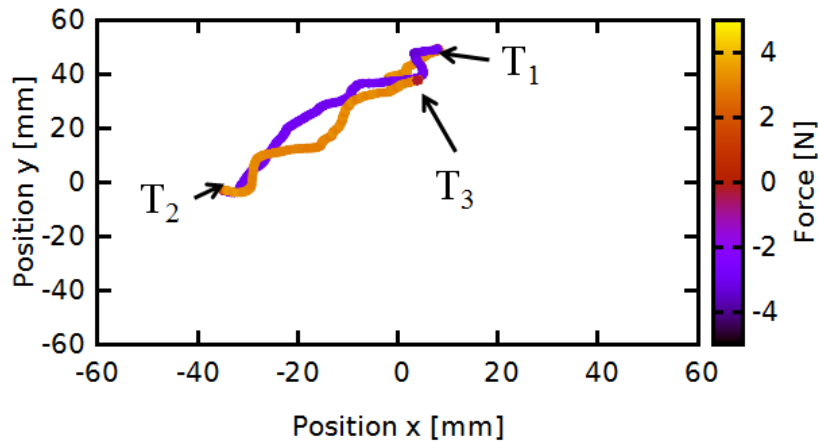


Fig. 4.22 Trajectory in the representation of friction force.

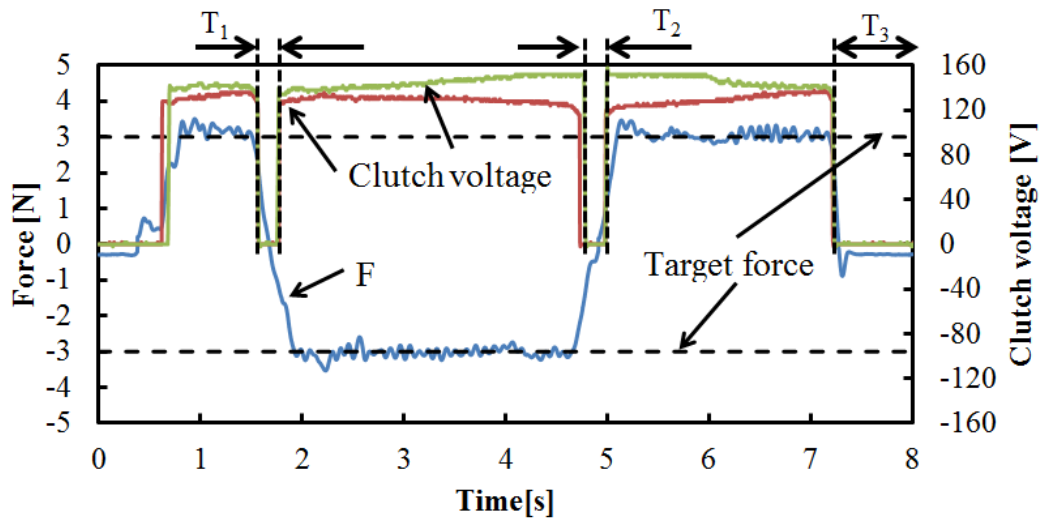


Fig. 4.23 Charts of reaction force and clutch voltage in the representation of friction force.

### 4.13 弾性提示

平面上での弾性感触の提示実験を行った。提示条件としては、Fig. 4.7に示すように平面にバネを配置した状態とし、弾性係数を  $250 \text{ N/m}$  とし、反力は電磁モータを用いて発生させた。本実験では、 $y$  軸方向のみの提示を行った。Fig. 4.24に示すような軌跡でレバーを操作しバネ感触を再現した。

レバーを操作してバネを押ししたときの、反力  $F_y$ 、クラッチ電圧、レバー位置  $y$ 、デューティ比の測定結果を Fig. 4.25に示す。

- A 区間 (トルクフリー状態)  
クラッチ電圧に  $150 \text{ V}$  が印加し、トルクフリー状態としている。このときは1軸型と同様に自由にレバーを動かすことができる。
- B 区間 (弾性力発生状態)

レバーがバネのある位置 ( $y=0$ ) に来たときから、電磁モータを PWM 制御し、レバーの位置に対して

$$F = ky, (F \leq 5) \quad (4.5)$$

でデューティ比を変化させ、バネの弾性力を提示する。

● C 区間 (ブレーキ状態)

レバーが設定したバネの終端がある位置 ( $y = 20$ ) に来たとき、クラッチ電圧を 0V にすることによってレバーの動きを止め、抗力を感じることができる。このとき超音波モータには電圧は印加しない。

Fig. 4.26 にレバー位置  $y$  に対する反力  $F_y$  の関係を示す。また同図に設定した弾性定数による理想的な反力を示す。理論値と比較するとほぼ理論値に近い値で表現できている。しかし 20 mm 付近で大きく離れるところがある。これは、ブレーキ離脱による反動が影響していると考えられる。

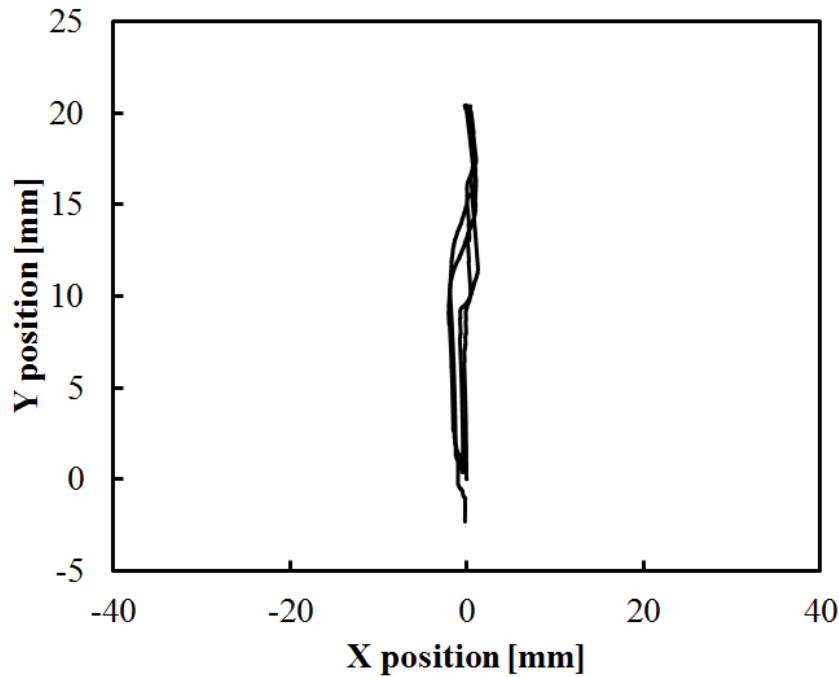


Fig. 4.24 Trajectory in the representation of spring.

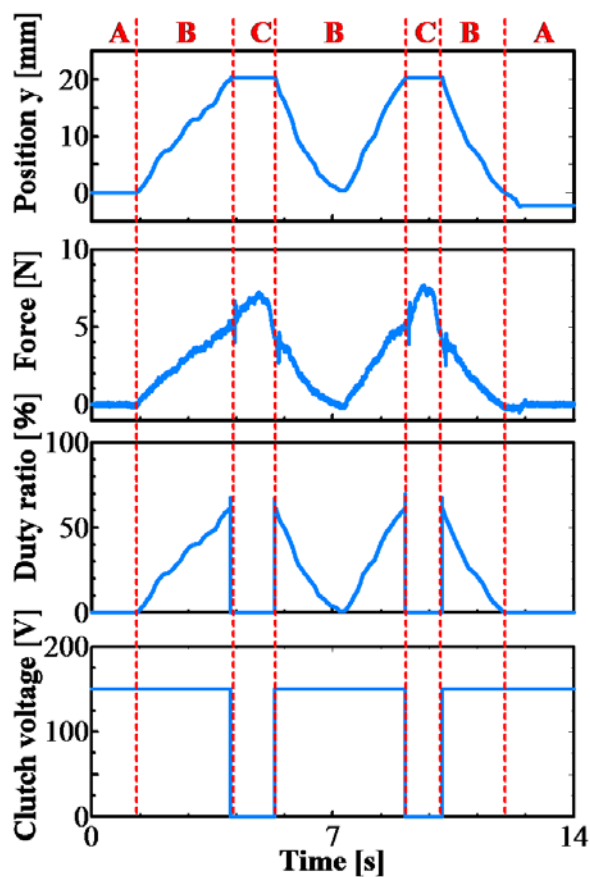


Fig. 4.25 Charts of reaction force, clutch voltage, duty rate and lever position in the representation of the elastic reaction force.

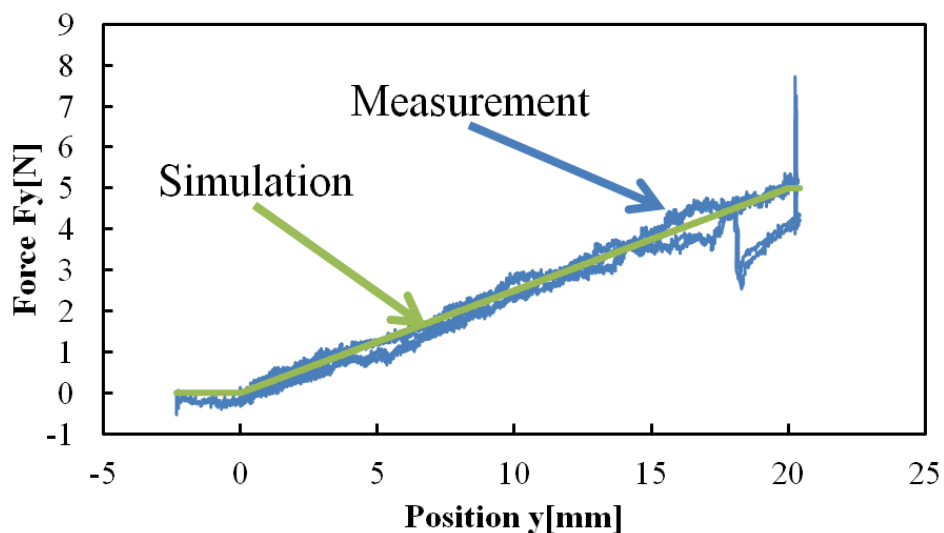


Fig. 4.26 Compare of the elastic reaction force.

## 4.14 結言

試作したハイブリッドアクチュエータシステムの特性を活かす応用例として力覚提示デバイスへの効果の有無について検討した。本章で得た結果について以下にまとめる。

- 圧電ブレーキを用いることで摩擦感、衝突などの応答が速い力覚の提示に対して有用であると分かった。
- 超音波モータ・圧電クラッチにより弾性感触の提示が可能であるが、本システムの超音波モータは表現可能範囲が狭く、摩擦駆動による感触が提示された。
- 電磁モータと圧電クラッチを用いることで、電磁モータ単独では実現困難な弾性感触から高剛性感触への切り替え提示を実現した。また、複数人による提示実験の結果、力覚変化の識別が可能であった。（付録 G 参照）
- より実空間の動作と仮想空間の動作を近づけるため 2 自由度ハイブリッドアクチュエータシステムの試作を行った。
- 試作した 2 自由度ハイブリッドアクチュエータシステムにより従来表現できていた力覚が再現可能であることを実現した。ただし、2 次元空間上での表現の場合には新たなアルゴリズムが必要である。
- 平面上での動作の例として、圧電クラッチを用いることで平面をなぞる動作の提示を実現した。また、超音波モータを併用することで双方向のなぞり動作を実現可能であることを確認した。
- 1 軸回転型で実現出来ていた力覚は、2 自由度でも同様に提示可能であるが、直進運動以外については、レバーの位置による力の向き、リンクの関係性を考慮した制御が必要である。

本章で試作したハイブリッドアクチュエータシステムの性能例の一覧および PHANTOM Premium1.5 との比較を Table 4.3 に示す。試作したシステムは平面操作のみであるが、小型で、高出力を実現した。

Table 4.3 Performance comparison of PHANTOM and Hybrid AS.

	PHANTOM Premium1.5 (Standard type)	2-DOF hybrid AS
Workspace	381W×267H×191D mm	58W×0H×58D mm
Footprint	330W×254D mm	180W×160D mm
Maximum exertable force (nominal position)	8.5 N	18N(using brake) 7N(using USM)
Continuous exertable force (nominal position)	1.4 N	18N (using brake) 7N ( using USM)
Force feedback	x, y, z	x,y
Position sensing	x, y, z (roll, pitch, yaw optional)	x,y(yaw)

## 第5章 結 論

### 5.1 研究成果

本研究では電磁モータと圧電アクチュエータを組み合わせることにより、広範な出力範囲を有するハイブリッドアクチュエータシステムを開発した。その結果として、従来の超音波アクチュエータシステムの特性を有したまま、電磁モータの特性を組み合わせることを実現した。試作したアクチュエータシステムを用いて電磁モータ、超音波モータのハイブリット駆動により及び各種力覚提示を行った。

得られた結果については各章ごと述べてあるが、本章では構成・制御特性・応用のキーワードごとにまとめる。

#### 「構成」

- 超音波モータ・圧電クラッチ・電磁モータによるハイブリッドアクチュエータシステムの構成を実現した。圧電クラッチを介することで、応用の幅を広げることが可能であった。
- 試作システムで用いた超音波アクチュエータシステムは最大発生抗力 4 N、推力はおよそ 300 mNm 程度であった。
- 試作したハイブリッドアクチュエータシステムを2組用いて、パラレルリンク機構による 2 自由度ハイブリッドアクチュエータシステムを実現した。

#### 「制御特性」

- ロータの回転速度および発生トルクを USM 電圧の大きさまたはクラッチ電圧の大きさを変えることで制御することが可能である。したがって、力覚提示において超音波モータおよび圧電クラッチにより反発力の制御が可能。
- クラッチ電圧の大きさを変えることにより超音波モータ部の先端とロータ間の最大静止トルクを制御できた。
- 超音波アクチュエータの負荷特性は、直流機の電圧制御および界磁制御特性に類似する特性であった。またハイブリッドアクチュエータシステムを構成することで、使用可能な出力範囲の広範囲化が見込める。
- 圧電クラッチを用いた予圧制御法により回転速度およびトルクの制御が可能であることを示した。
- 始動時に予圧を切り替えることで、超音波モータの立ち上がり時間短縮が可能であることを示した。本研究では 59% 程度の削減効果を実現した。
- ハイブリット駆動により各アクチュエータ単独と比較して最高速度までの到達時間及びシステム全体での消費電力の削減が可能であることが分かった。電磁モータ、超音波モータの最高速度を同程度とした場合、最高速度

到達時間は超音波モータの到達時間と同程度となり、消費電力は 78%程度の削減効果を確認した。

### 「応用」

- 圧電ブレーキを用いることで摩擦、衝突などの速い応答が求められる力覚の提示に対して有用であると分かった。
- 超音波モータ・圧電クラッチにより弾性感触の提示が可能であるが、本システムの超音波モータは表現可能範囲が狭く、摩擦駆動による感触が提示された。
- 電磁モータと圧電クラッチを用いることで、電磁モータ単独では実現困難な弾性感触から高剛性感触への切り替え提示を実現した。
- 試作した 2 自由度ハイブリッドアクチュエータシステムにより一軸で表現できていた力覚が再現可能であることを実現した。ただし、2 次元平面上での表現の場合には新たなアルゴリズムが必要である。
- 平面上での動作の例として、圧電クラッチを用いることで平面をなぞる動作の提示を実現した。また、超音波モータを併用することで双方向およびブレーキのみでは表現不可能な位置でのなぞり動作を実現可能であることを確認した。
- なぞり動作を実現している ER ブレーキを用いたシステムと比較すると、最大発生力は劣るものの、同程度の動作が可能であると考えられる<sup>[51]</sup>。

## 5.2 課題

ハイブリッドアクチュエータシステムは、電磁モータと超音波モータを切り替えることで広いレンジでの動作が可能である。しかし、電磁モータ・超音波モータの組み合わせ、制御システムなどに課題がある。

以下に、今後の課題について簡単に述べる。

- (1) アクチュエータの選定：電磁モータ・超音波モータの発生力に著しい差がある場合には十分な効果を得ることが難しい。電磁モータ・超音波モータで最も効果的な組み合わせを用いて検討する。
- (2) 圧電クラッチの設計：予圧力・推力上昇に際し、装置サイズが大型化した結果、クラッチの応答性能が低下した。装置の軽量化と推力・応答性を向上させる必要がある。
- (3) 超音波モータの安定化：動作不安定となる要因として、ロータ・ステータ間の摩擦、変位拡大機構の変形などによる予圧の変動などがある。耐摩擦材の検討など超音波モータの回転速度および推力の安定化の必要がある。
- (4) 超音波モータの制御：PID 制御により回転速度などを制御した。しかし、超音波モータ・圧電クラッチ共に摩擦や変形により特性が安定しないため、PID 制御では限界があると考えられる。そのため、特性の変化に追従可能なロバストな制御の検討が必要である。



- (5) ハイブリッド駆動の制御：始動および制動時について実験的に検討したが、より高効率となる駆動法について、シミュレーションなどを用いて検討する必要がある。
- (6) 力覚提示の改善：位置に対する線形的な制御や PID 制御を用いて力覚を表現したが、表現力覚ごとに最適な制御法を検討し、安定化、再現性向上する必要がある。また、2 自由度ハイブリッドアクチュエータシステムについては、一方向への移動に対する提示を行ったが、多方向移動に対する提示について検討する必要がある。
- (7) アクチュエータシステム応用の検討：本研究では、力覚提示への応用について検討したが、他の用途に対する応用についての検討が必要である。

## 謝 辞

本研究は、筆者が 2009 年に室蘭工業大学大学院博士前期課程入学より着手し、これまで、指導教員の青柳学教授の終始懇切丁寧に御指導・御鞭撻を賜って行われたものである。青柳学教授には、興味深いテーマを与えて頂き、研究の機会および全ての面でご支援をいただき、心より感謝致します。

本論文をまとめるにあたって、有益な御意見、御助言と励ましをいただきました審査教員の長谷川弘治教授、渡邊浩太准教授に深く感謝申し上げます。また、本研究を遂行するにあたり、貴重な御助力、御助言をいただきました東北工業大学高野剛浩名誉教授、田村英樹准教授に深く感謝申し上げます。

また、室蘭工業大学の超音波・アクチュエータシステム研究室において、研究室生活を共に過ごした先輩方、後輩の皆さんには数多くの場面で助けていただき、充実した 5 年間となり、心から感謝致します。

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)(21360106)によるものである。

## 参考文献

- [1] 武藤高義: “アクチュエータの駆動と制御”, コロナ社, 1992.
- [2] 黒澤実: “複合振動子型超音波モータに関する基礎的研究”, 東京工業大学博士論文, 1990.
- [3] 広瀬茂男, 生田幸士, 梅谷陽二: “形状記憶合金アクチュエータの開発 (性能評価とその新構成法の導入)”, 日本ロボット学会誌, Vol.4, No.2, 1986.
- [4] P. Krulevitch, A. P. Lee, P. B. Ramsey, J. C. Trevino, J. Hamilton and M. A. Northrup: “Thin film shape memory alloy microactuators”, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.5, No.4, 270-282, 1996.
- [5] 内野研二: “圧電/電歪アクチュエータ 基礎から応用まで”, 森北出版株式会社
- [6] S. Ueha and Y. Tomikawa: *Ultrasonic Motor—Theory and Applications* (Clarendon Press, Oxford, U.K., 1993).
- [7] M. Aoyagi, T. Tomikawa, and T. Takano: *Proc. 2004 IEEE Ultrasonics Symp.*, 2004, p. 899.
- [8] 黒澤実, 上羽貞行: “超音波モータの研究開発と実用化の進展”, 日本音響学会誌, 52巻, 11号, pp. 910-914, 1996.
- [9] 指田年生: “超音波駆動モータの試作—原理の理論および実験的検討—”, 応用物理, 51巻, 6号, pp. 713-720, 1982.
- [10] 湯浅智行, 吉田龍一, 磯野雅史, 小西啓俊: “マイクロ圧電アクチュエータSIDMの応用: 携帯電話用カメラのレンズ駆動”, *精密工学会誌*, Vol. 75, No. 1, pp. 144-145, 2009.
- [11] T. Maeno, T. Tsukimoto, and A. Miyake, “Finite-element analysis of the rotor/stator contact in a ring-type ultrasonic motor”, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*. Vol. 39, No. 6, pp. 668-674, 1992.
- [12] T. Funakubo, T. Tsubata, Y. Taniguchi, K. Kumei, T. Fujimura, and C. Abe, “Ultrasonic linear motor using multilayer piezoelectric actuator”, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol.34, pp. 2756-2759, 1995.
- [13] 技術紹介 / 超音波モータ - 新生工業 [http://www.shinsei-motor.com/techno/ultrasonic\\_motor.html](http://www.shinsei-motor.com/techno/ultrasonic_motor.html)
- [14] 武村剛志, “力触覚提示用超音波アクチュエータに関する研究”, 平成20年度修士論文, 室蘭工業大学, 2009.
- [15] 製品カタログ / NEC トーキョー  
[http://www.nec-tokin.com/product/dl\\_piezo.html](http://www.nec-tokin.com/product/dl_piezo.html)
- [16] A. Kirecci and L. C. Dulger, “A study on a hybrid actuator”, *Mechanism and Machine Theory* 35 (2000) 1141-1149.
- [17] 肥後寛, 桜井康雄, 田中和博, 中田毅, “電空ハイブリッドアクチュエータのシステムモデルとその動特性解析”, *日本フルードパワーシステム学会論文集*, 第39巻, 第6号, pp.103-109, 2008.
- [18] 落合志信, 内堀憲治, 原一広, 轟見隆史, 鈴木実, “ハイブリッドカー「インサイト」用モータアシストシステムの開発”, *Honda R&D Technical Review* Vol.12 No.1, 2000
- [19] <http://www.sensable.com/>
- [20] S. Tachi, K. Komoriya, K. Sawada, T. Nishiyama, T. Itoko, M. Kobayashi, and K. Inoue: *Adv. Robotics* 17 (2003) 199.

- [21] K. Vlachos, E. Papadopoulos, D.N. Mitropoulos, Design and implementation of a haptic device for training in urological operations, *IEEE Trans. Rob. Autom.* 19 (5) (2003) 801–809.
- [22] S. Suebnukarn, N. Phatthanasathiankul, S. Sombatweroje, P. Rhienmora, P. Haddawy, Process and outcome measures of expert/novice performance on a haptic virtual reality system, *J. Dent.* 37 (2009) 658–665.
- [23] U. Buck, S. Naether, M. Braun, M. Thali, Haptics in forensics: the possibilities and advantages in using the haptic device for reconstruction approaches in forensic science, *Forensic Sci. Int.* 180 (2008) 86–92.
- [24] 佐藤克成, 神山和人, 梶本裕之, 上川直樹, 舘暲: “レイグジスタンスの研究(第48報)光学式触覚センサ情報を提示するマスタハンド”, 日本バーチャルリアリティ学会第11回大会, pp.21-24, 2006.
- [25] <http://www.alps.com/>
- [26] アクチュエータシステム技術企画委員会編: “アクチュエータ工学”, 養賢堂, 2004.
- [27] 大岡昌博, 古賀浩嗣, 宮岡徹, 三矢保永: “高密度ピンアレイ形触覚マウスによる格子状仮想テクスチャ提示 (第1報: 高密度ピンアレイ形触覚マウスの試作と性能評価実験方法の確立)”, 日本機械学会論文集 (C編), 71巻, 711号, pp. 3174-3180, 2005.
- [28] 池井寧, 宇高正憲, 小山治美: “触覚テクスチャディスプレイTD44FXに関する研究”, 日本機械学会第16回設計工学・システム部門講演会講演論文集, pp. 347-348, 2006.
- [29] 山内久幸, 田中豊: “空気圧ベローズによる装着型力感覚提示ディスプレイ”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'00講演論文集, 1A1-36-048 (1), 2000.
- [30] U. Mali, M. Munih: “HIFE–haptic interface for finger exercise”, *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 11 (1) (2006) 93–102.
- [31] H. Kawasaki, T. Mouri: “Design and control of five-fingered haptic interface opposite to human hand”, *IEEE Trans. Robot.* 23 (5) (2007) 909–918.
- [32] P. García-Robledo, J. Ortego, M. Ferre, J. Barrio, M.A. Sánchez-Urán: “Segmentation of bimanual virtual object manipulation tasks using multifinger haptic interfaces”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 60 (1) (2011) 69–80.
- [33] 坂口正道, 古荘純次: “ERアクチュエータを用いた2次元力覚提示システムの開発”, 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol.3, No.3, 1998.
- [34] S. Ueha and Y. Tomikawa: *Ultrasonic Motor—Theory and Applications* (Clarendon Press, Oxford, U.K., 1993).
- [35] M. Aoyagi and Y. Tomikawa: *Jpn. J. Appl. Phys.* 32 (1993) 4190.
- [36] M. Aoyagi and Y. Tomikawa: *Electron. Commun. Jpn.* 79 (1996) 60.
- [37] T. Sashida: Japanese Patent Disclosure 58-148682 (1983).
- [38] T. Kenjo and T. Sashida: *Ultrasonic Motors: Theory and Design* (Clarendon Press, Oxford, U.K., 1993).
- [39] T. Takano, Y. Tomikawa, and C. Kusakabe: *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 39 (1992) 180.
- [40] M. Kurosawa and S. Ueha: *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 38 (1998) 89.
- [41] M. Kurosawa, K. Nakamura, T. Okamoto, and S. Ueha: *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 36 (1989) 517.
- [42] A. Endo, N. Sasaki, and Y. Tomikawa: In 1988 Natl. Conv. Rec., Institute of

- Electrical Engineers of Japan, No. 733, pp. 899-900 [in Japanese].
- [43] K. Mori, T. Kumagae, and H. Hirai: Proc. IEEE 1989 Ultrasonics Symp., 1989, p. 3.
  - [44] M. K. Kurosawa, O. Kodaira, Y. Tsuchitoi, and T. Higuchi: IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 45 (1998) 1188.
  - [45] K.-T. Chang: Ultrasonics 43 (2004) 49.
  - [46] T. Koyama, K. Takemura, and T. Maeno: IEEE Symp., 2003, Vol. 2, p. 1141.
  - [47] 青柳学, 秋庭啓次郎, 武村剛志, 高野剛浩, 田村英樹, 富川善朗, “クラッチ機構を備えた超音波アクチュエータの構成 (第3報) —予圧制御と負荷特性—”, 2008年度精密工学会秋季大会, L44, 2008
  - [48] M. Takano, et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 50 (2011) 07HE25
  - [49] K. Asumi, et al.: Acoust. Sci. Tech. 30 (2009) 180
  - [50] 楠田喜宏, パラレルメカニズム実用化の展望, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.2, pp118-122, 2012
  - [51] 小柳健一, 古荘純次, “パッシブ型力覚提示における仮想物体のなぞりに関する研究,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 9(4), PP.423-429, 2004.

## 筆者による発表文献

1. 学術論文	2 編
2. 国際会議での発表	2 編
3. 学会・研究会での発表	8 編

### 1. 学術論文 (査読付き)

- [1] Ryota Okeya, Manabu Aoyagi: "Development of 2-DOF hybrid actuator system", Key Engineering Materials, Vols.523-524, pp.733-738 (2012.11)
- [2] Ryota Okeya, Manabu Aoyagi, Takehiro Takano, Hideki Tamura: "Development of electromagnetic and piezoelectric hybrid actuator system", Sensors and Actuators A: Physical, Vol.200, pp.155-161, (2013.10)

### 2. 国際会議での発表

- [1] Ryota Okeya, Manabu Aoyagi, Takehiro Takano, Hideki Tamura: "Development of electromagnetic and piezoelectric hybrid actuator system", the 9th International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators, 3aOB01, (2012.4)
- [2] Ryota Okeya, Manabu Aoyagi: "Development of 2-DOF hybrid actuator system", 14th International Conference on Precision Engineering, C08, (2012.11)

### 3. 学会・研究会での発表

- [1] 桶谷涼太, 青柳学, 高野剛浩, 田村英樹: "電磁一圧電ハイブリットアクチュエータシステムの研究 (1)", 第28回日本ロボット学会学術講演会講演概要集, pp. 291, (2010.9)
- [2] 桶谷涼太, 青柳学, 高野剛浩, 田村英樹: "ハイブリットアクチュエータシステムの開発とその応用", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2011, 1A2-F07. (2011.5)
- [3] 桶谷涼太, 青柳学, 高野剛浩, 田村英樹: "電磁一圧電ハイブリットアクチュエータシステムの研究 (2)", 第29回日本ロボット学会学術講演会, 3K1-3. (2011.9)
- [4] 桶谷涼太, 青柳学, 高野剛浩, 田村英樹: "クラッチ機能を備えた超音波アクチュエータの構成 (第5報) —電磁モータとのハイブリット化の試み—", 2011年度精密工学会春季大会学術講演会, (2011.3)
- [5] 桶谷涼太, 青柳学, 高野剛浩, 田村英樹: "圧電クラッチによるトルク制御の検討", 2012年精密工学会北海道支部学術講演会, 307, (2012.9)
- [6] 桶谷涼太, 青柳学, 高野剛浩, 田村英樹: "クラッチ機能を備えた超音波アクチュエータの構成 (第6報) —予圧制御およびハイブリット駆動の検討—", 2012年度精密工学会秋季大会, B01, (2012.9)
- [7] 桶谷涼太, 青柳学, 高野剛浩, 田村英樹: "クラッチ機能を備えた超音波

- アクチュエータの構成（第7報）— 2自由度デバイスの構成および力覚提示の試み—”，2013年度精密工学会秋季大会，D23，（2013,9）
- [8] 桶谷涼太, 青柳学, “圧電クラッチによる超音波アクチュエータの予圧制御”, 第34回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 2P4-17. (2013,11)

## 付録A 変位拡大機構の拡大率の算出

本論文で用いた変位拡大機構の拡大率算出法について述べる。変位拡大機構は台形を上下に2つ組み合わせた形となっている。ここでは、MPAの発生力により変位拡大機構が歪まないものと仮定する。

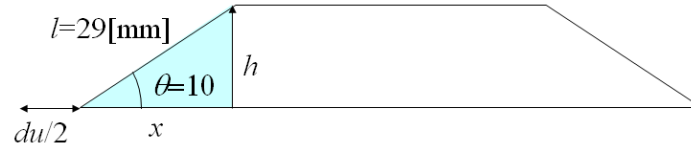


Fig. A.1 Simple model of mechanical amplifier.

Fig. A.1 に示すように、台形の片側の三角形の部分について考える。斜辺と底辺の成す角は MPA に電圧が印加されていない状態で、 $10^\circ$  とした。この時の三角形の斜辺の長さを  $l$ 、高さを  $h$ 、底辺の長さを  $x$  とすると以下の式が成り立つ。

$$h=l \times \sin(10^\circ), x=l \times \cos(10^\circ), h = \sqrt{l^2 - x^2}$$

次に MPA に電圧が印加されて MPA が伸び、変位拡大機構が両サイドに押し広げられた場合について考える。2 個の MPA が発生した合計の変位を  $du$  とし、高さの変位を  $dh$  とする。また、変位拡大機構が両サイドに均等に押し広げられたとして考えると片側の三角形の底辺の変位は  $du/2$  となる。この時以下の式が成り立つ。

$$h - dh = \sqrt{l^2 + (x + du/2)^2}$$

この式を変形すると高さの変位が求まり

$$dh = h - \sqrt{l^2 + (x + du/2)^2}$$

となる。変位拡大機構は台形を上下に2つ組み合わせた形なので三角形の高さの変位を2倍したものが変位拡大機構の高さの変位となり、以下の式で表される。

$$2 \times dh = 2 \times \left( h - \sqrt{l^2 + (x + du/2)^2} \right)$$

よって、変位拡大機構の拡大率は以下の式によって表される。

$$\frac{2 \times dh}{du} = \frac{2 \times \left( h - \sqrt{l^2 + (x + du/2)^2} \right)}{du}$$

ここで、 $h=l \times \sin(10^\circ)$ 、 $x=l \times \cos(10^\circ)$  より、上式は以下のようなになる。

$$\frac{2 \times dh}{du} = \frac{2 \times \left( l \times \sin(10^\circ) - \sqrt{l^2 + (l \times \cos(10^\circ) + du/2)^2} \right)}{du}$$

斜辺の長さは  $l=29\text{mm}$  なので、



$$\frac{2 \times dh}{du} = \frac{2 \times \left( 29000 \times \sin(10^\circ) - \sqrt{29000^2 + (29000 \times \cos(10^\circ) + du/2)^2} \right)}{du}$$

となり，変位拡大機構の拡大率が求められる。

MPA が発生した変位は  $49.1\mu\text{m}$  であったので，拡大率は以下のように求まる。

$$\begin{aligned} \frac{2 \times dh}{du} &= \frac{2 \times \left( 29000 \times \sin(10^\circ) - \sqrt{29000^2 + (29000 \times \cos(10^\circ) + 49.1/2)^2} \right)}{49.1} \\ &= 5.23 \end{aligned}$$

## 付録B 変位拡大機構の離脱条件の算出

本論文で用いた変位拡大機構の離脱条件の算出方法について述べる。Fig. B.1 に変位拡大機構の拡大率 $\alpha$ を梘子，変位拡大機構の変位方向の弾性係数を $k_1$ ，MPAの変位方向の弾性係数を $k_2$ とする2つのバネ $S_1$ ， $S_2$ と仮定した圧電クラッチの力学モデルを示す。無通電時に圧電クラッチを押し付けて初期予圧を与えるため，バネ $S_1$ は縮み復元力（初期予圧） $F_0$ を発生する。電圧印加時にはMPAが伸びて梘子が左に傾くため，バネ $S_1$ は元の状態へ戻る変位量 $x$ に比例する復元力 $F_e$ を失う。したがって，ステータとロータの予圧 $F_c$ は次式で表される。

$$F_c = F_0 - F_e = F_0 - k_1 x \quad (\text{B.1})$$

$n$ 個のMPAの変位量 $nd$ は $\alpha$ 倍に拡大されるのでバネ $S_1$ の変位は $x=na\alpha d$ となる。よって，ロータから分離する条件は $F_c \leq 0$ より次式で与えられる。

$$1 \geq \frac{F_0}{k_1 na\alpha d} \quad (\text{B.2})$$

また，MPAの変位量 $d$ に対する発生力 $F$ は次式で表される。

$$F = F_{max} - F_{max} \times \frac{d}{d_{max}} \quad [\text{N}] \quad (\text{B.3})$$

ここで $F_{max}$ は最大発生力， $d_{max}$ は無負荷最大変位量である。1つのMPAが変位拡大機構に加える横方向の力はバネ $S_2$ の復元力 $F=k_2d$ と与えられるので，この式に(B.3)式を代入すると変位拡大機構内MPAの最大変位量 $d_1$ を求めることができる。

$$d_1 = \frac{F_{max}}{k_2 + \frac{F_{max}}{d_{max}}} \quad [\mu\text{m}] \quad (\text{B.4})$$

(B.2)式および(B.4)式から，圧電クラッチの条件式が与えられる。

$$1 \geq \frac{F_0(k_2 + \frac{F_{max}}{d_{max}})}{k_1 na\alpha \times F_{max}} \quad (\text{B.5})$$

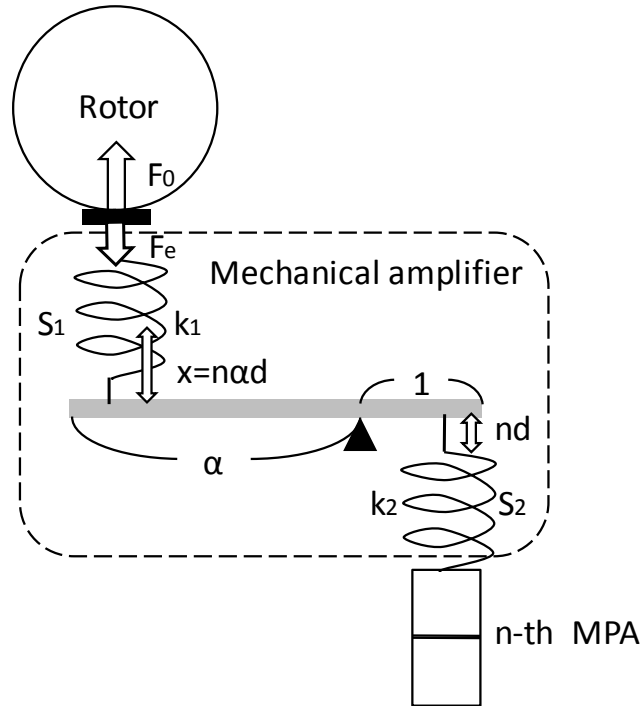


Fig. B.1 Mechanics model of piezoelectric-clutch

本研究では、MPA (AE1010D16)を、2個で1組として2組用いている。MPAの最大発生力  $F_{max}=3500\text{N}$ ，無負荷最大変位量  $d_{max}=18.4 \times 2 \mu\text{m}$  である。変位拡大機構は対称性があるため、対称軸を中央にとり、変位拡大機構の片側のみで考えた時、式(B.5)は以下のようなになる。

$$1 \geq \frac{F_0(k_2 + \frac{3500}{18.4 \times 2})}{k_1 n \alpha \times 3500} \quad (\text{B.6})$$

弾性係数  $k_1, k_2$  は、有限要素法解析を用いて推定する。Fig. B.2 に解析に用いたモデルを示す。

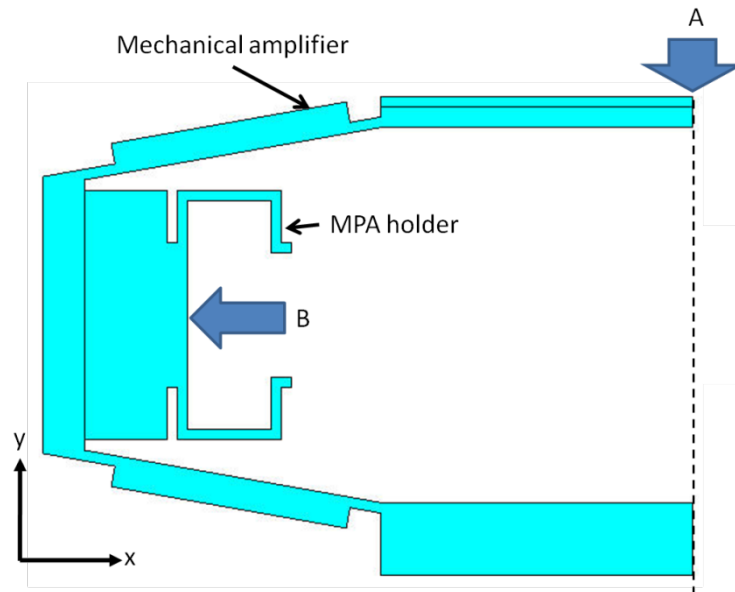


Fig. B.2 ANSYS model.

用いたモデルは 2 次元モデルであり，変位拡大機構が対称の構造であることから半分のみをモデル化している。境界条件は，変位拡大機構の底面を  $x$ ,  $y$  方向変位，変位拡大機構の対称軸および MPA 治具のヒンジの端部を  $x$  方向変位を拘束する。

A 点に任意の力を加えたときの変位から弾性係数  $k_1$  を，B 点に力を加えたときの変位から弾性係数  $k_2$  および  $x$  方向， $y$  方向の変位の比から拡大率  $\alpha$  を求める。

以上解析の結果， $k_1=0.169 \text{ N}/\mu\text{m}$ ， $k_2=8.26 \text{ N}/\mu\text{m}$ ， $\alpha=5.18$  となり， $F_0=50 \text{ N}$ ， $n=2$  とすると，式(B.6)は以下のようなになる。

$$\frac{F_0(k_2 + \frac{F_{max}}{d_{max}})}{k_1 n \alpha \times F_{max}} = \frac{50 \times (8.26 + \frac{3500}{18.4 \times 2})}{0.169 \times 2 \times 5.18 \times 3500} = 0.84 < 1$$

以上より，解析したモデルは， $F_0=50 \text{ N}$  の条件下ではロータより分離可能である。また，設計した変位拡大機構での  $F_0$  の最大は  $59.3 \text{ N}$  である。

## 付録C 超音波アクチュエータシステムの特性測定

### C.1変位特性

試作した圧電クラッチの変位特性の測定を行った。Fig. C.1 に示すように、圧電クラッチ部の MPA に 150V, 100mHz の三角波を印加したときの、A 点（圧電クラッチ左側）、B 点（圧電クラッチ右側）、O 点（超音波モータ部の先端）の変位をレーザードップラー振動計（LDV）（LV-1710, 小野測機）とデジタル変位計ユニット（LV-0121, 小野測機）を用いて測定した。測定した変位特性を Fig. C.2 に示す。また解析値との比較を Table C.1 に示す。光学変位計から超音波モータ部の先端が離れる方向の変位をマイナスとした。各点においてクラッチ電圧に比例して変位は変化した。しかし、MPA の持つヒステリシス特性を増幅された。解析結果と比較すると、最大変位は解析よりも小さいが、拡大率は解析と同程度であった。実験で得た A 点の変位  $24.5\mu\text{m}$  から O 点の変位量を解析にて求めた結果、実験値に近い値となった。以上よりとして圧電クラッチ用 MPA 取り付け時の予圧による変位量の損失、解析時より変位拡大機構の剛性が高かったことなどが考えられる。しかし、十分なクラッチ動作が得られることがわかった。

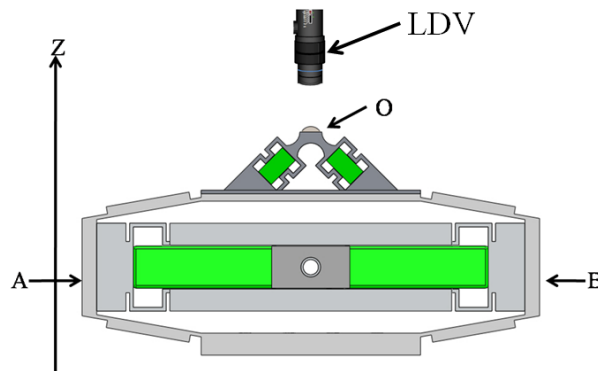


Fig. C.1 Measurements of displacement at point A, B, and O.

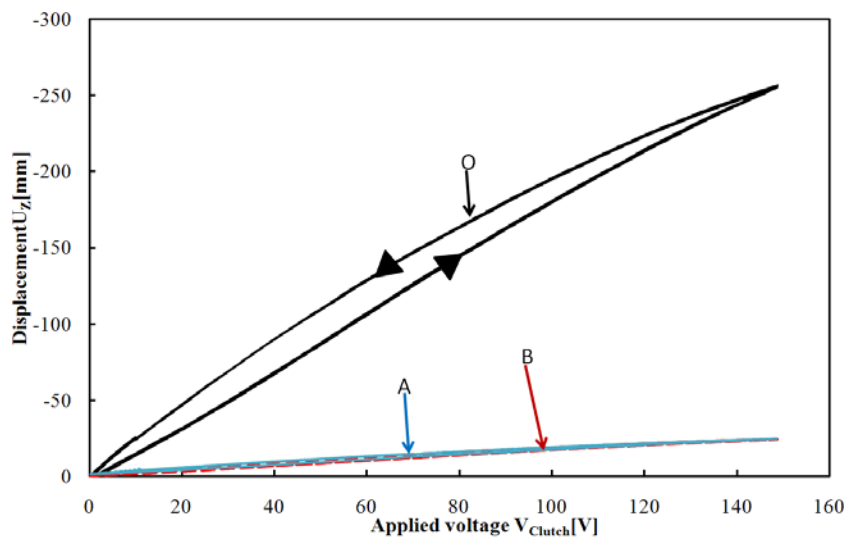


Fig. C.2 Measured displacement at each point plotted against applied voltage.

Table C.1 Result of displacement

	Analysis [ $\mu\text{m}$ ]	Measure [ $\mu\text{m}$ ]	error [%]
A	33.9	24.5	-27.73
B	33.9	24.6	-27.43
A+B	67.8	49.1	-27.58
O	351	256.7	-26.87
magnification	5.18	5.23	0.99

## C.2変位時間応答特性

圧電クラッチ部のMPAに150V、1Hzの矩形波を印加してO点の変位時間応答特性を測定した。O点の変位とクラッチ電圧をFig. C.3に示す。クラッチ電圧の変化直後に変位も変化していることがわかる。しかし、Fig. C.4に示すようにクラッチ電圧の変化直後は振動により安定しない。この変位拡大機構に発生する残留振動は圧電クラッチには望ましくないが、実際にはロータと接触状態で使用するため振動影響は少ないと考える。変位が収束する値(-273 $\mu\text{m}$ )を目標値として、電圧が印加されてから変位が目標値に達するまでの時間を応答時間とした。圧電クラッチの変位応答時間は1.4msであった。ただし、通常超音波モータ先端とロータ間のギャップは非常に小さくため実際の応答時間は短くなる。

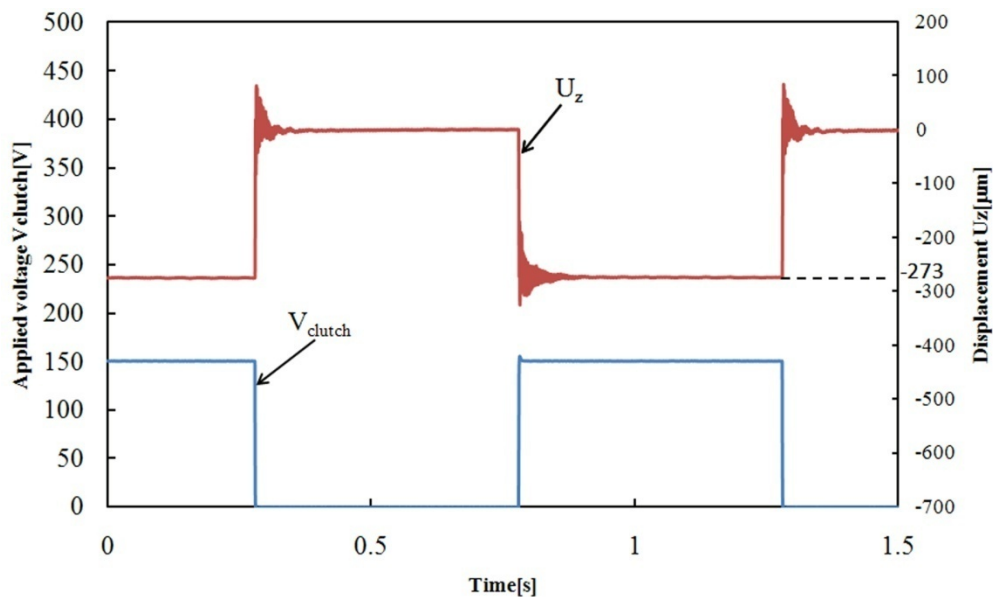


Fig. C.3 Displacement measured at point O.

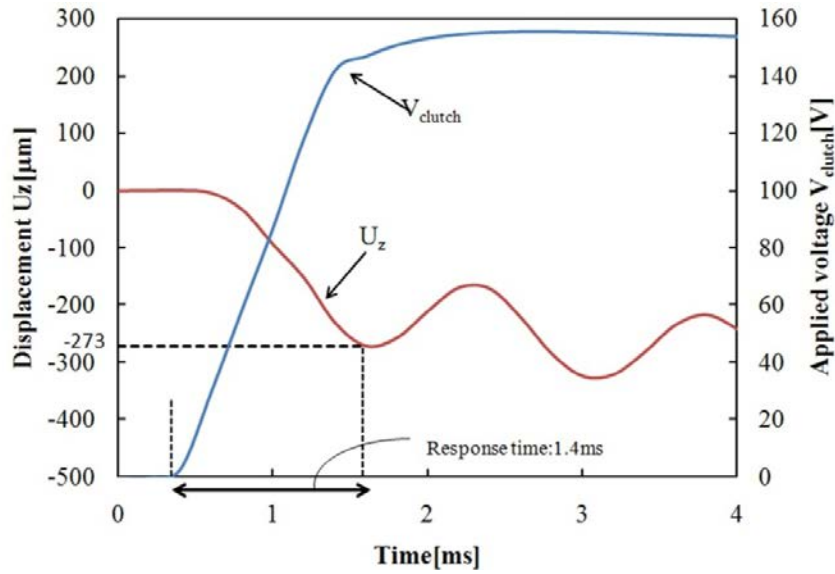


Fig. C.4 Response time of displacement measured at point O immediately after input pulse.

### C.3 圧接力特性

#### C.3.1 ステージ位置－圧接力特性

Fig. C.5 に示すように荷重計（9E01-L42-50K, NEC 三栄）に超音波モータ部の先端を接触させて配置し、ステージの位置を変えたときの荷重計と超音波モータ部の先端間の圧接力を測定した。その測定結果を Fig. C.6 に示す。ステージの位置に圧接力は比例しており、ステージの位置 270 $\mu\text{m}$  のとき圧接力は 64N であった。この結果から、ステージの位置を変えることでロータと超音波モータ部の先端間の初期予圧の調節が可能であることを確認できた。

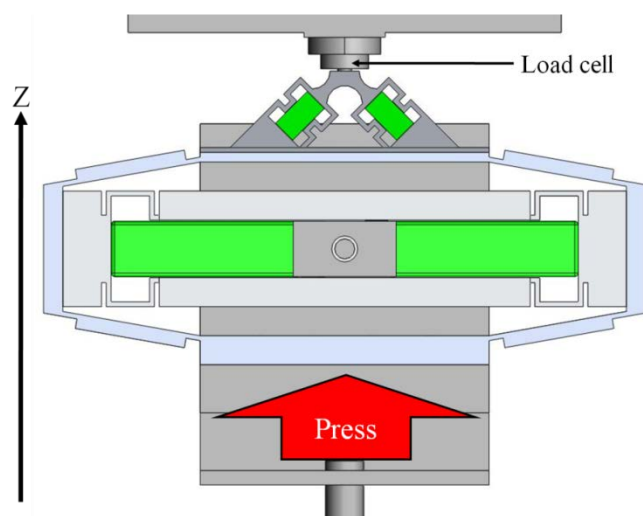


Fig. C.5 Measurement of contact force.

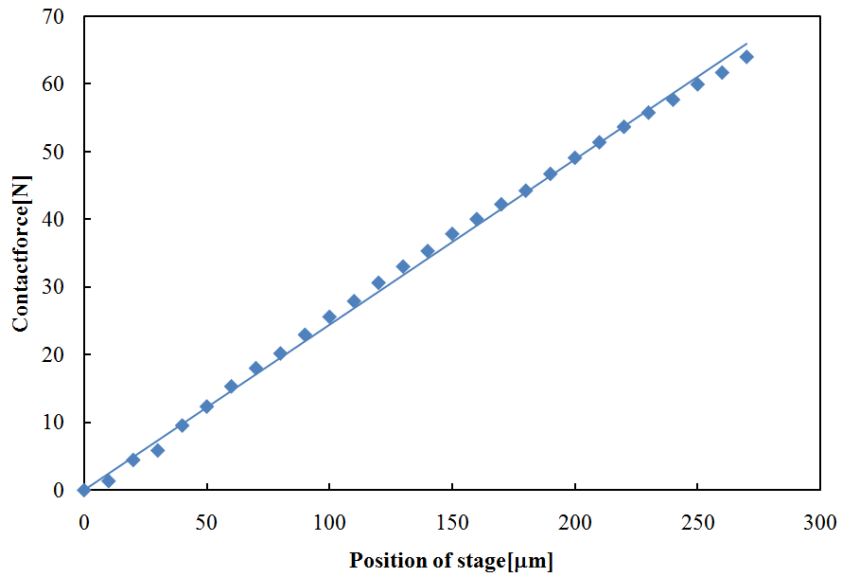


Fig. C.6 Contact force vs position of stage.



## 付録D 自動整合 PID 制御

以下に自動整合 PID 制御について述べる。現実の制御では操作量に上下限制約が課せられる。本研究では DAQ ボードの出力, MPA・電磁モータの定格電圧に当たる。このようなものに対して偏差の積分量が上下限を超えたときにリセットウィンドアップと呼ばれる問題が生じる。積分器の動作のみを用いて説明すると, Fig. D.1 (a) に示すように偏差が変化した場合, 上下限がない場合には操作量は Fig. D.1(b)の 0ABCD と推移する。しかし, 操作量が L という値で飽和する場合には, 積分器の出力は先ほど同様の变化をするが, 実際には 0AECD と推移する。このとき, AE 間では, 偏差の積分量の増加に比例して操作量も増加するという機能が失われているが, それは制約のためやむを得ない。一方, EC 間では, 偏差の積分量が減少するにもかかわらず, 操作量は減少しない。それは, 積分器出力が AB とあがっているため, BC と戻るまでは, 偏差の積分量の減少に比例して操作量も減少するという機能が回復しないためである。

リセットウィンドアップ対策として, 自動整合制御系が提案されている。自動整合 PID コントローラのブロック線図を図 5 に示す。このコントローラは, 入力に上下限制約の範囲内にあるとき, すなわち  $u=x$  であるときには, 通常の PID 制御となる。一方, 入力に飽和している場合には, 以下の関係式が成り立つ。

$$z = e - \frac{1}{K_p T_D s + K_p} (u - x) \quad (\text{D.1})$$

$$u = K_p (1 - T_D s) e + \frac{K_p}{T_I s} z \quad (\text{D.2})$$

この 2 式から  $u$  を消去すると,

$$z = \frac{T_I s}{(T_D T_D s^2 + T_I s + 1) K_p} x \quad (\text{D.3})$$

となることから, 最終値定理を用いて,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} z(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} s z(s) = \lim_{s \rightarrow \infty} s \frac{T_I s}{(T_D T_D s^2 + T_I s + 1) K_p} \frac{x_{\text{limit}}}{s} = 0 \quad (\text{D.4})$$

となることがわかる。ここで,  $x_{\text{limit}}$  は入力の上限值あるいは下限値である。この式は, 積分器への入力信号がゼロに漸近することを意味している。すなわち, 入力に飽和している場合に, 積分動作を切ることに対応している。

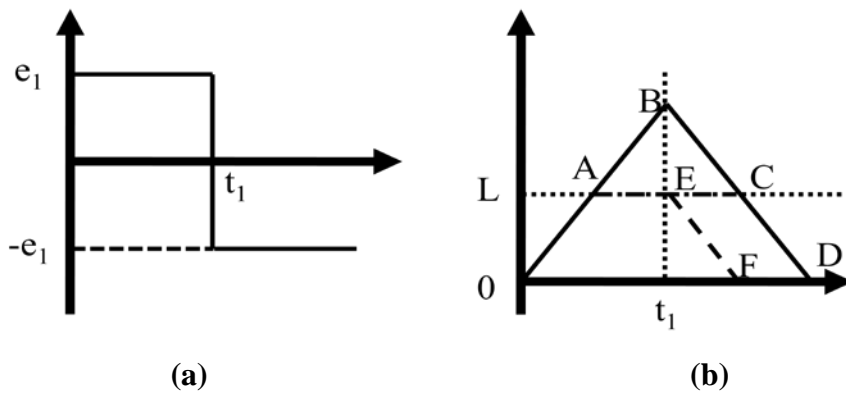


Fig. D.1 Reset windup

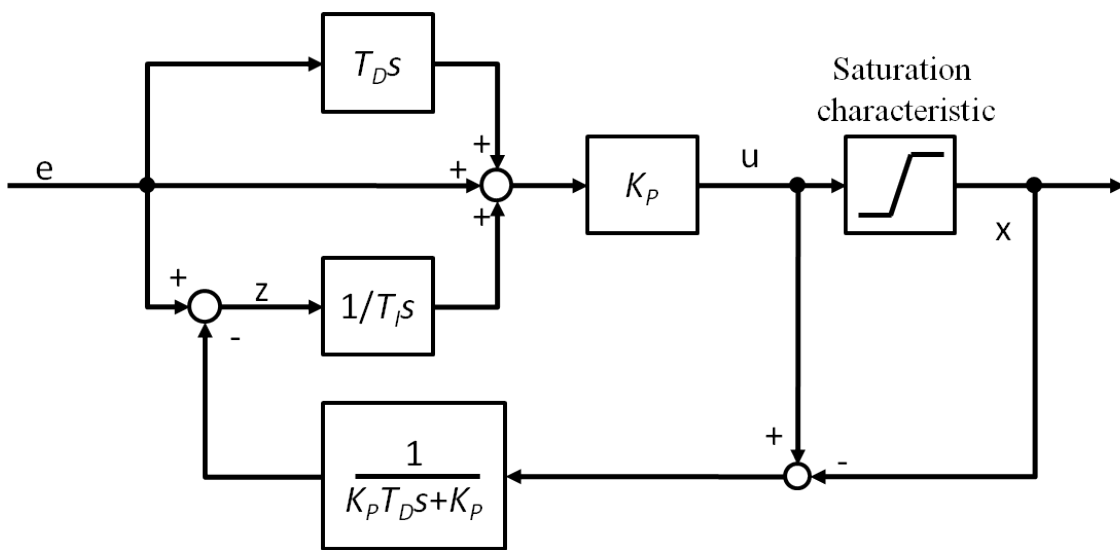


Fig. D.2 Block diagram of automatic PID controller.

## 付録E 電磁モータシミュレーション

ハイブリッド駆動の実験のとき、電磁モータは定電圧で駆動し検討した。しかし、始動時に電流を制御することで急峻に立ち上げることができる。そこで、Fig. E.1 に示すモデルを用いて始動制御の検討を行った。シミュレーションに用いたパラメータは Table E.1 の通りであり、サンプリング周波数は 20kHz で維持した。印加電圧をタイミングは定常状態の回転速度（44.7rpm）の 95%のタイミングで切り替えた。結果を Fig. E.2 に示す。定電圧駆動したときと比較すると大幅な立ち上がりの改善を確認した。ただし、本シミュレーションでは電源特性などを考慮していない。また、このとき定常状態までの消費電力は 135.4mJ であった。

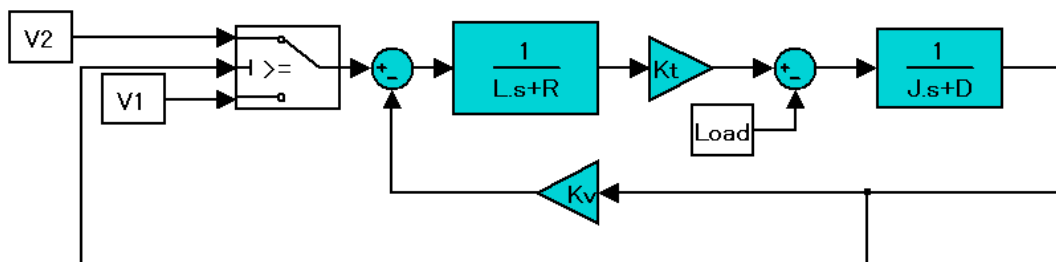


Fig. E.1 Block diagram of EMM simulation.

Table E.1 Parameter of simulation.

R	2.41	L	$0.238 \times 10^{-3}$	kt	$23.5 \times 10^{-3}$
J	$5 \times 10^{-6}$	D	$23 \times 10^{-6}$	Kv	1/406
Load	$13.5 \times 10^{-3}$	V1	14.08	V2	1.6

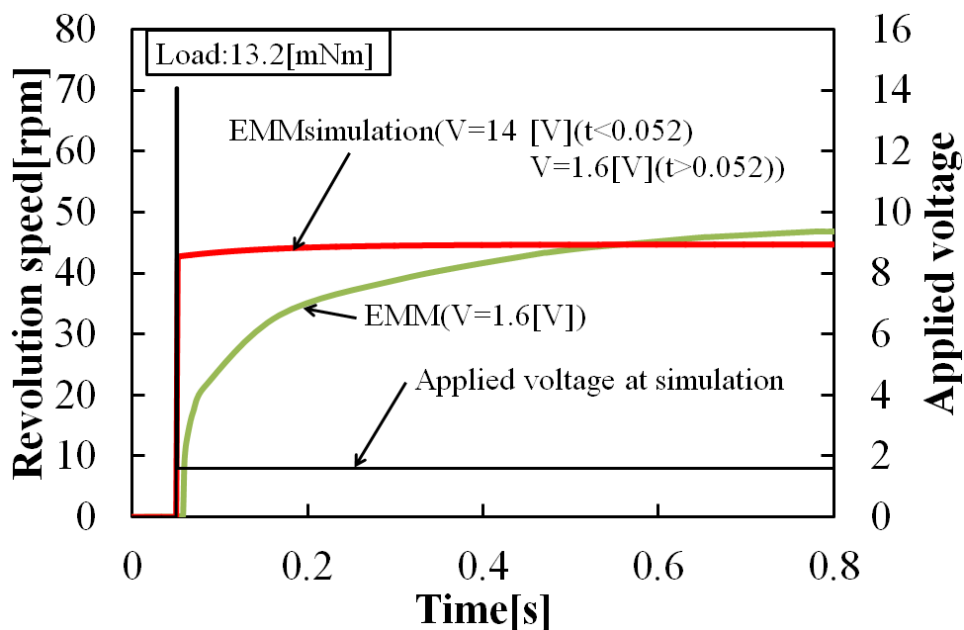


Fig. E.2 Transient responses of EMM.

## 付録F 力覚提示例

### F.1壁面提示

Fig. F.1に示すような壁を仮想物体として設定し，壁に触れたときの感触を再現した。このモデルでは，圧電クラッチにより壁面との接触を表現した。レバーを操作して壁に触れたときの反力，クラッチ電圧，レバーの角度，回転速度の測定結果を Fig. F.2 に示す。この提示は3つの状態に分けることができる。下記で各状態について述べる。

- A 区間（トルクフリー状態）

クラッチ電圧 150V が印加されており，超音波モータ部の先端とロータが離れている。この時はトルクフリー状態であり，自由にレバーを動かすことができる。

- B 区間（ブレーキ状態）

レバーが壁のある位置(0deg)にきた時に，クラッチ電圧を 0V に下げることでブレーキがかかり撃力を感じると共にレバー操作を制限され壁を押している感触を提示する。

- C 区間（トルクフリー状態）

壁から離れる方向に力を加えたとき，圧電クラッチに再び 150V の電圧を印加する。それによって再びトルクフリー状態となり，レバーを自由に動かすことができる。

実験の結果，圧電クラッチにより壁面安定しての提示可能であることを確認した。ただし，壁面接触状態から離脱する際に少量力を加える必要があり，これが，壁面に張り付いた感触を与えることがある。

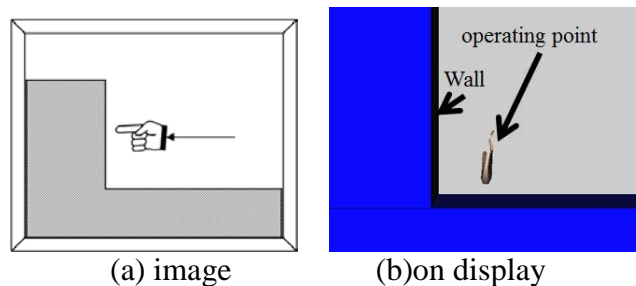


Fig. F.1 Virtual wall on display

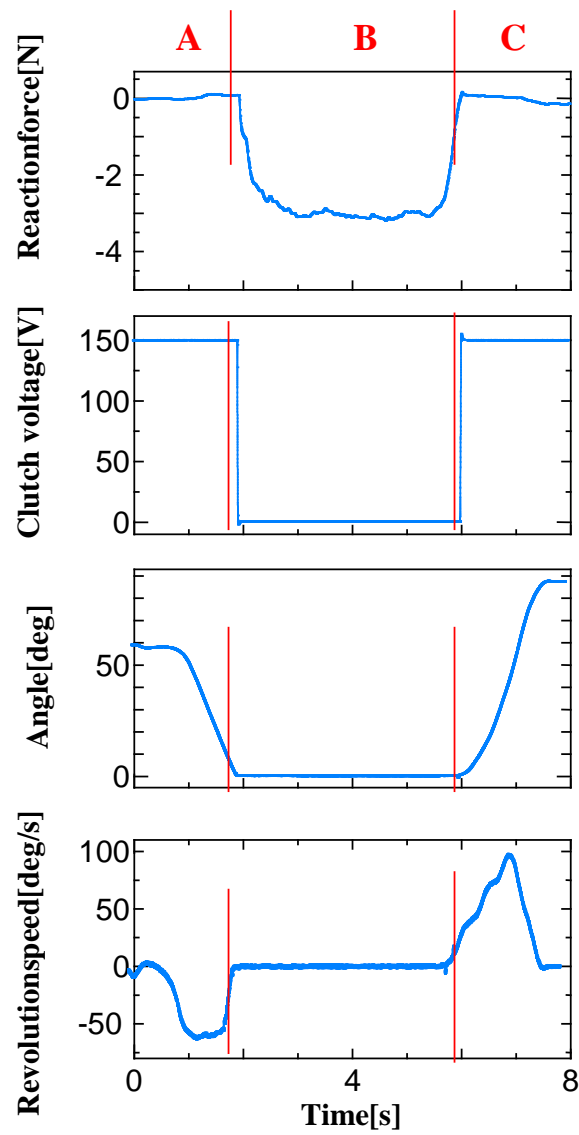


Fig. F.2 Charts of reaction force, clutch voltage, angle, and revolution speed for wall representation.

## F.2凹凸提示

Fig. F.3 に示すような 5 つの突起を仮想物体として設定した。突起は幅 1 deg, 間隔 1 deg とした。各突起の塑性変形は考慮せず, 圧電クラッチのみを用いて突起の頂点をなぞる動作を提示した。よって, 操作者は 1 deg ごとに衝突とトルクフリー状態を感じることができる。レバーを操作して突起に触れたときの, 反力, クラッチ電圧, レバーの角度の測定結果を Fig. F.4 に示す。提示は 3 つの状態に分けることができる。以下に各状態の説明を行う。

- A 区間 (トルクフリー状態)  
クラッチ電圧 150V が印加されており, 超音波モータ部の先端とロータが離れている。この時はトルクフリー状態であり, 操作者は抗力を感じることなく自由にレバーを動かすことができる。
- B 区間 (ブレーキ状態とトルクフリー状態の連続)  
操作点が 0 deg の時にクラッチ電圧を 40 V に下げることで, 超音波モータ部の先端とロータが接触しブレーキがかかる。この時瞬間的な撃力を感じる。超音波モータ部の先端とロータ間の最大静止トルクを超えるとレバーが動き, 突起幅 1 deg 分移動したとき, 再び 150V のクラッチ電圧を印加しトルクフリー状態となる。この動作を連続で繰り返すことで, 操作者に凹凸をなぞった感触を与える。
- C 区間 (トルクフリー状態)  
レバーが 5 つ目の突起のある位置(-9 deg)を過ぎると, 150 V のクラッチ電圧が印加されてトルクフリー状態となるため, レバーを自由に動かすことができる。

実験の結果, 圧電クラッチの高速応答性を用いることで, 高剛性の凹凸をなぞる感触の実現が可能であることを確認した。よって圧電クラッチにより粗い感触の提示が可能である。提示感触は圧電クラッチへ印加電圧, 突起間隔などで変更可能である。

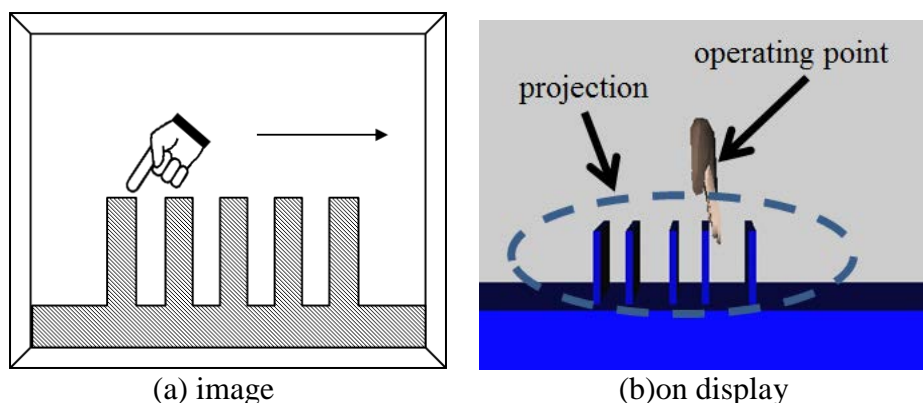


Fig. F.3 Virtual asperity on display.

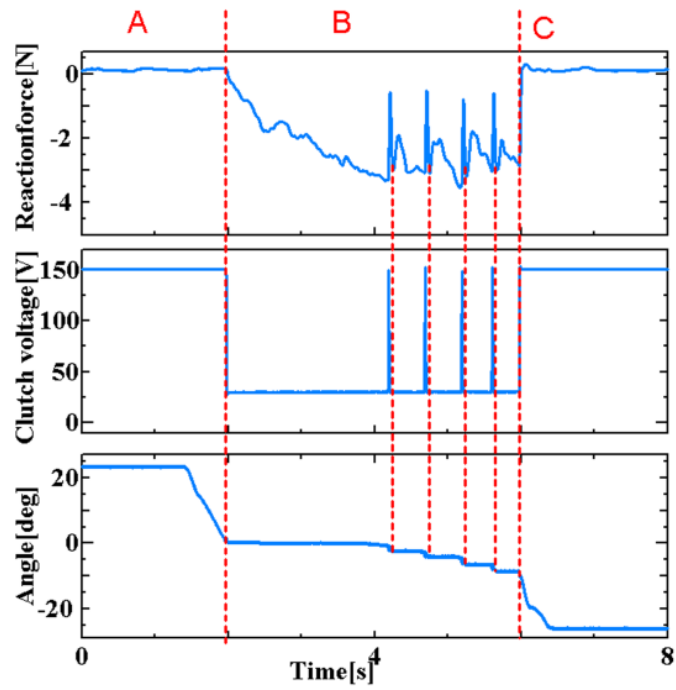


Fig. F.4 Charts of reaction force, clutch voltage, and angle for roughness representation.

## 付録G 力覚提示の再現度評価

### G.1実験方法

試作した力覚提示システムを用いて力覚提示実験を行った。実験では、視覚情報がない状態での力覚の識別およびディスプレイ上に仮想物体を表示した状態で、力覚を提示し、再現度の評価を行った。被験者は、20歳代から30歳代までの男性11名で行った。本実験で被験者に提示した力覚およびアクチュエータの組み合わせをTable G.1に示す。

Table G.1 Combination method of force-feedback display.

	Haptic	USM	EMM	Brake
A	Wall			○
B	Block + Friction			○
C	Projections			○
D	Spring	○		(Clutch/Brake)
			○	○

### G.2感触のみによる力覚識別

被験者には、提示する力覚の順番を知らせず、提示された力覚を識別する実験を行った。今回の実験で提示した力覚の順番はブロック移動→バネ→壁→突起で、これらを連続して行った。またバネについては、超音波モータを使用した場合のみとした。

実験の結果をFig. G.2に示す。全問正解は6人/11人中であった。項目別には突起が全員正解であり、ほか3つの正解率も70%以上であった。突起とその他で正解率に違いが出た原因として、操作量過剰または不足により感触の誤認があったものと考えられる。また突起の正解率が高い要因としては、突起に当たる→離れるという感触を繰り返すイメージが分かりやすいためと考えられる。

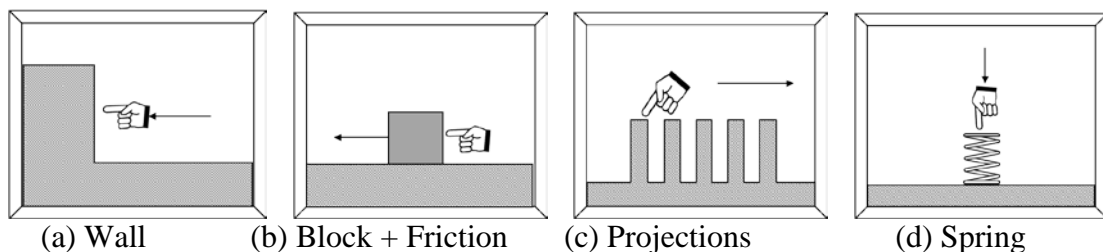


Fig. G.1 Represented feeling of force-feed-back.



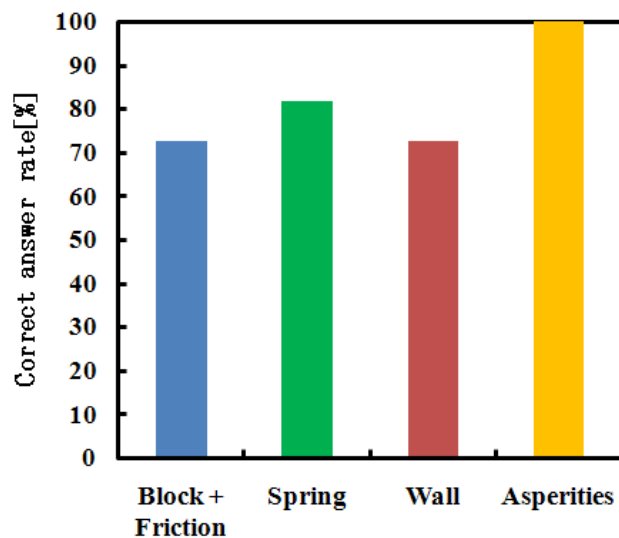


Fig. G.2 Percentage of correct identification of the force-feedback display.

### G.3 視覚情報を含めての再現度の評価

前節で提示した力覚に対応した画像をディスプレイに表示した状態で再度力覚提示し、被験者にその再現度を 5 段階（5：とてもよく再現できている～1：まったく再現されていない）で評価した。再現度評価の平均値を表 2 に示す。なお、バネについては、超音波モータとともに電磁モータで提示した場合についても評価した。

評価の結果を Table G.2 に示す。いずれの感触についても 4 以上の高評価を得た。その中でも『壁』の感触が最も評価が高かった。

突起の評価が正答率に対してそれほど高くなかった原因として、ブレーキ力を低めに設定していたため、ディスプレイから得られる情報と感触との不一致があったためだと考えられる。また、バネの感触については超音波モータの評価が低かった。これは、ロータと超音波モータ先端の摩擦による不均一な感触などが原因と考えられる。また今回ばねの提示についてブレーキによる床面の提示を行わなかった。これも評価が低かった原因と考える。

Table G.2 Survey results of the force-feedback display.

Wall	Block + Friction	Asperities	Spring	
			USM	EMM
4.6	4.2	4.3	4.0	4.2