

指先凹凸動態ディスプレイ

2018年3月

山田恵之

指先凹凸動態ディスプレイ

山田恵之

概要

立体映像提示装置が発展し、表示された立体との触体験への要求が高まっている。仮想空間にある物体との触体験を可能にする装置として、力触覚提示装置が提案されているが、従来の装置はユーザとの接触部の形状が不変であり、形状が動的に変化する物体の表現が困難であった。

本研究では、指腹部における動的な凹凸形状（凹凸動態）を表現可能な凹凸動態ディスプレイを開発することを目的とする。形状提示のために、ピンをユーザの皮膚に接触させることで、物体形状を表現するピンアレイ型凹凸動態ディスプレイを構築する。アクチュエータとして、圧電素子の機械的な振動を用いて並進運動を可能にする超音波リニアモータを用いることで小型、軽量の凹凸動態ディスプレイを開発する。更に、センサ間干渉がなく、小型に実装可能な電気抵抗体を用いて、分圧変化によるピン変位計測に基づき変位制御を行うことで、ユーザと接触した際においても正確な凹凸形状の提示を行う。

本論文では、凹凸動態ディスプレイの周波数応答を測定し、ユーザに凹凸を提示した結果を報告する。遮断周波数は約 5 Hz であり、凹凸動態として知覚される周波数の上限である 3 Hz を達成した。更に、利得余裕 6 dB 以上、位相余裕 $5\pi/6$ であったため、システムの開ループ利得を大きくして利得補償を行うことで、遮断周波数を高くすることが可能である。凹凸動態提示実験では、ユーザは提示された波の方向を $\pm\pi/4$ の誤差範囲内で知覚した。本研究で提案した装置を用いることで、物体の動特性を触覚により知覚することが可能になり、ゲームにおける触覚提示や医療用シミュレータなどの分野へ応用が期待される。

キーワード：超音波リニアモータ，ピンアレイ，触覚，凹凸提示，変位制御，
指先サイズ，動体

Dynamic tactile shape display for fingertip

Yasuyuki Yamada

Abstract

The demand on haptic interaction with virtual objects in cyberspace is rising based on development of stereoscopic image presentation device. Devices to present haptic interaction between users and the objects have been proposed. Conventional haptic devices cannot change their surface shape and they are not able to represent local shape on users' fingertips, which is important for force/tactile interaction.

This research aims to develop a haptic shape display to present the local shape of an object. Particularly, the author uses a pin-array device for the shape display with ultrasonic linear motors in order to make the device smaller. In addition, implementation of small displacement sensor with resistors enables precise shape representation even in interaction with user.

The author produced a height-variable pin module composed of an ultrasonic linear motor, a resistor and a feedback controller. As an evaluation of the device, the author investigated the frequency response. The cutoff frequency was 5 Hz which is high enough for dynamic shape representation. Additionally, system response can improve because the gain margin was more than 6 dB and phase margin was $5\pi/6$. In dynamic shape presentation experiment, participants perceived wave direction within error of $\pi/4$. The proposed device enables us to perceive virtual objects' dynamics with our tactile sensation and is expected to present haptics in game or medical simulator.

Keywords : ultrasonic linear motor, pin-array, tactile, shape display, displacement control, fingertip size, dynamic body

目次

第1章	初めに	1
第2章	触覚受容器と凹凸動態の知覚	3
2.1	受容器	3
2.2	凹凸動態の触知	5
2.3	指腹部の性質	6
第3章	力触覚提示装置	8
3.1	装着型	8
3.2	把持型	9
3.3	対象型	9
3.4	遭遇型	10
第4章	アクチュエータと凹凸提示装置	11
4.1	アクチュエータ	11
4.2	凹凸提示装置	14
4.3	本研究の位置づけ	18
第5章	凹凸動態提示システム	19
5.1	凹凸動態ディスプレイ構造	19
5.2	電気抵抗体による分圧変化を利用した変位計測	21
5.3	超音波リニアモータ	22
5.4	ピン変位制御	23
第6章	凹凸動態ディスプレイ	25
6.1	ディスプレイの実装	25

6.2	超音波モータへの入力信号	26
6.3	ピン変位制御システムの較正	27
6.4	周波数応答実験	28
6.5	複数ピン駆動実験	30
第7章	凹凸動態提示実験	31
7.1	実験環境	31
7.2	考察	34
第8章	終わりに	36
	謝辞	37
	参考文献	38
	業績	43

目 次

1.1	凹凸動態提示の概念	2
2.1	機械受容器	4
2.2	凹凸動態提示と受容器発火	5
2.3	指先に加わる力と皮膚変位	6
2.4	力と皮膚変位の関係	6
2.5	指先の二点における刺激	7
2.6	二点弁別精度と刺激間の距離	7
3.1	装着型力触覚提示装置	8
3.2	把持型力触覚提示装置	9
3.3	対象型力触覚提示装置	9
3.4	遭遇型力触覚提示装置	10
4.1	直流モータ	12
4.2	交流モータ	12
4.3	超音波モータ	13
4.4	空気圧アクチュエータ	13
4.5	空気圧アクチュエータ構造	13
4.6	ピンアレイ型凹凸提示装置概念	14
4.7	ピンアレイ型凹凸提示装置の例	15
4.8	小型ピンアレイ型凹凸提示装置の例	15
4.9	セル型凹凸提示装置概念	16
4.10	セル型凹凸提示装置の例	16
4.11	軽量セル型凹凸提示装置の例	17

4.12	先行研究の比較	18
5.1	凹凸動態ディスプレイ構成	19
5.2	超音波リニアモータ構成	19
5.3	ピン変位制御システム	20
5.4	変位計測手法	21
5.5	超音波リニアモータの駆動	22
5.6	超音波リニアモータの動作原理	22
5.7	システム図	24
5.8	システムの等価ブロック線図	24
5.9	変位制御モデルの周波数特性	24
6.1	凹凸動態提示装置	25
6.2	実装回路図	26
6.3	変位計測環境	27
6.4	ピン変位と計測電圧の関係	27
6.5	変位計測データの例	28
6.6	周波数特性測定結果	29
6.7	初期位相 θ が同一の場合のピン駆動	30
6.8	初期位相 θ が異なる場合のピン駆動	30
7.1	凹凸動態提示実験環境	31
7.2	波の進行方向	32
7.3	全被験者の提示刺激に対する回答の頻度	33

表 目 次

4.1	アクチュエータ性能比較	14
7.1	波の進行方向とパラメータ	32

第1章 初めに

ヒトは物体に触れる際、取得される視覚情報・力覚情報・触覚情報・聴覚情報を統合することにより、物体の物理的性質や状態を認識している。キーボードのタイピングや楽器の演奏などに代表される習熟した行動においては、主として力覚情報・触覚情報を取得することで、効率的に作業を行うことが可能である。力覚・触覚は合わせて力触覚と呼ばれ、仮想空間などの対象物が実在しない環境においても物体の力触覚情報を伝達し、作業を効率化する力触覚提示システムが開発されている [1-4]。

ヒトは指の侵入空間制約と力の印加によって生じる指先の皮膚変形により物体形状を知覚することで、適切に物体の探索・認識を行うことが可能であり [5]、力触覚提示システムによって指先における物体形状提示を行うことで、ユーザの作業効率の向上が期待される [6-8]。更に、心臓などの物体の性質・状態が動的に変化する対象物を表現するためには、力触覚提示システムによる刺激を動的に更新する必要がある。

手指に加わる力分布や対象物の一部の形状を再現して提示することにより、ユーザに物体形状を知覚させることを凹凸提示と呼ぶ。更に、対象物の形状を動的に変化させ、ユーザに物体の性質変化を知覚させることを凹凸動態提示と呼ぶ。図 1.1 に凹凸動態提示の概念を示す。代表的な凹凸動態として、物体の脈動が挙げられる。脈動は平面を伝わる横波として、凹凸動態提示することが可能であり、波の進行方向、振幅の提示により、物体の性質をユーザに知覚させることができる。従来、二次元に配列されたピンの変位に差をつけることによって物体の形状を表現するピンアレイ型凹凸提示装置が提案されてきた。ピンの駆動には電磁モータが使用されており、ピンの直動運動を可能にするためには、モータとピンのリンク機構が必要であるため、ピンアレイ型凹凸提示装置は提示刺激の空間分解能が高いが、装置の大きさ、重さに課題がある [9, 10]。その他に、複数のバルーンを要素として、バルーンの内圧を制御することによって形状を提示する装置 [11] や、粉体が高圧環境下で

は硬化する性質を利用し，任意の形状において粉体を硬化させ，形状を提示する装置 [12] などがある．これらの装置は指腹部の形状提示にとっては提示刺激の空間分解能が低いという欠点を持つ．

小型なピンアレイ型凹凸提示装置として，超音波リニアモータを用いたピンアレイ型凹凸動態提示装置が提案されてきた [13]．超音波リニアモータは圧電素子の振動を用いて並進運動するアクチュエータであり，簡便な機構を持つ．しかし，従来の小型なピンアレイ型凹凸提示装置はピンの変位量が小さく，指先への形状提示に対しては不十分であった．更に，変位計測が実現されておらず，ユーザが接触した際は正確な形状提示ができなかった．

本研究では，指先において凹凸動態を提示可能な凹凸動態ディスプレイの開発を目的とする．ユーザの指腹部に対象物の形状を提示するピンアレイ型凹凸動態ディスプレイを製作し，凹凸動態表現を行う．小型かつ高分解な凹凸動態提示を実現するため，ピンアレイ型凹凸動態ディスプレイのピンのアクチュエータとして，小型化，軽量化が容易な超音波リニアモータ (Ultrasonic linear motor, USM) [14] に着目する．本論文では，ピン変位を計測することで超音波リニアモータを用いたピンアレイ型凹凸動態ディスプレイの高分解な変位制御を可能にするシステムを提案し，凹凸動態を提示する．

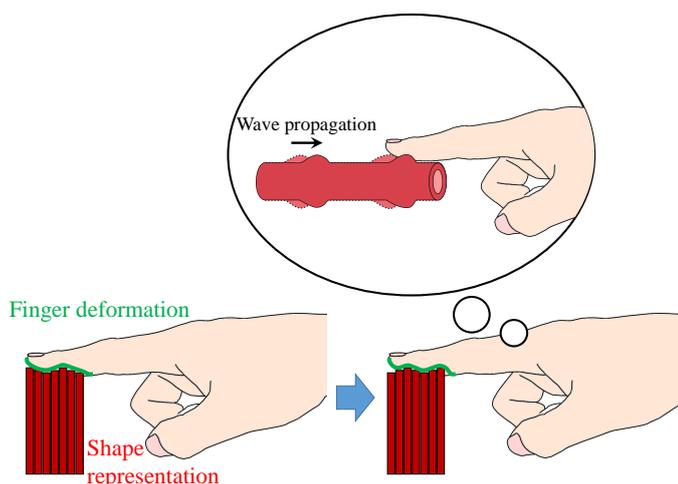


図 1.1: 凹凸動態提示の概念

第2章 触覚受容器と凹凸動態の知覚

本章では，初めに，指先における触覚受容器について述べる．次に，触覚受容器による凹凸動態の知覚について述べる．更に，物体との接触時におけるヒトの指腹部の性質について述べる．

2.1 受容器

ヒトは物体に触れた時，体性感覚によって物体の情報を得る．体性感覚は皮膚感覚と深部感覚に分類される．更に，皮膚感覚は触覚，圧覚，痛覚などに分類され，深部感覚は筋覚や運動覚，関節覚などに分類される [15]．本論文では，主として触覚，圧覚を触覚と呼び，筋覚や運動覚，関節覚を力覚と呼ぶ．

凹凸形状は触覚として感知されるため，触覚受容器について説明する．触覚受容器は機械的な刺激により発火することから，機械受容器と呼ばれる [5]．図 2.1 に，皮膚構造を示す．指腹部などの無毛部皮膚に存在する機械受容器はマイスナ小体，パチニ小体，メルケル触盤，ルフィニ終末の四種類に分類される [16]．指先の皮膚では，マイスナ小体，メルケル触盤は高い密度で分布しているが，パチニ小体，ルフィニ終末は密度が低い [17]．更に，マイスナ小体，メルケル触盤は受容野が小さいが，パチニ小体，ルフィニ終末は受容野が大きい [18]．

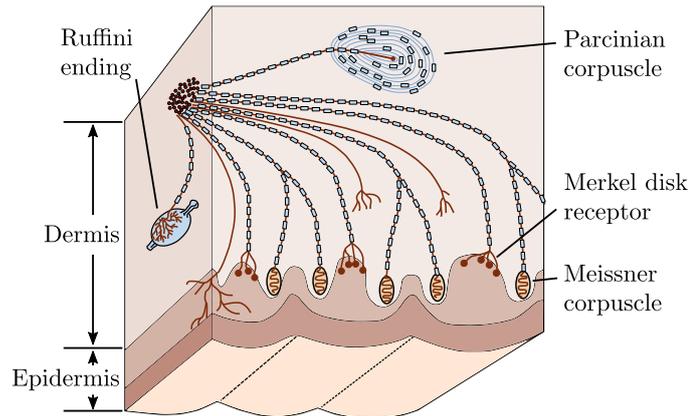


図 2.1: 機械受容器

マイスナ小体

3 - 40 Hz の周波数に反応することで、振動感覚を引き起こし、高い分解能で周波数変化を知覚することができる [19]。特にマイスナ小体は物体の端や低い不規則性など細かい変化に反応して発火する。

パチニ小体

40 - 500 Hz の周波数に反応し、300 Hz 付近で共振特性を持つ [20]。パチニ小体は振動感覚を引き起こすことが知られており、物体の表面をなぞった時の振動の感受に関わる。

メルケル触盤

メルケル触盤は広範囲の周波数で感度が高く、順応が遅いため、刺激の直流成分に反応するが [21]、特に 4 Hz 以下の周波数において顕著に反応する。発火頻度は皮膚に付加した圧力に対応しており、圧覚を引き起こす。メルケル触盤は持続した刺激による軽い圧刺激を検出し、凹凸や輪郭を感受する。

ルフィニ終末

刺激の直流成分に反応し、刺激がない場合も自発的な神経発火を繰り返す。ルフィニ終末は皮膚の曲げや圧縮に反応し、物体を掴んだ時の感覚が生じる。

2.2 凹凸動態の触知

ヒトは触覚により，形状を知覚することで物体を認識する．物体との接触領域においてユーザの皮膚に加わる力の分布変化により皮膚が変形し，メルケル触盤が発火することでユーザは物体形状を知覚する．

更に，性質・状態が動的に変化する物質をユーザに知覚させるためには，物体形状が動的に変化することが重要である．図 2.2 に示すように，皮膚上で経時的に変化する形状に従ってメルケル触盤の発火の空間分布も変化し，ユーザは凹凸動態を知覚することが可能である [18]．

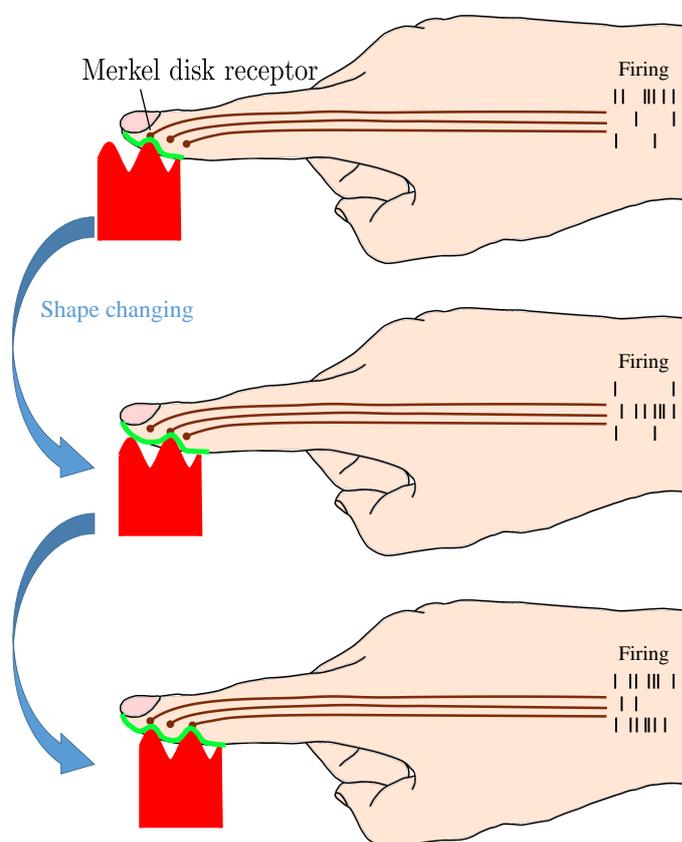


図 2.2: 凹凸動態提示と受容器発火

2.3 指腹部の性質

本節では，凹凸動態提示に關与する指腹部の性質について述べる．

2.3.1 力提示と指の変形

ヒトは，皮膚上の圧力分布による皮膚変形によって物体の形状を知覚している．Serina らにより，指の構造モデルを用いて指の変形と指先に加わる力の関係（図 2.3）が調査された [22]．図 2.4 に，皮膚変位が 5 N 程度の力に対し 2.5 mm 程度で飽和した結果を示す．

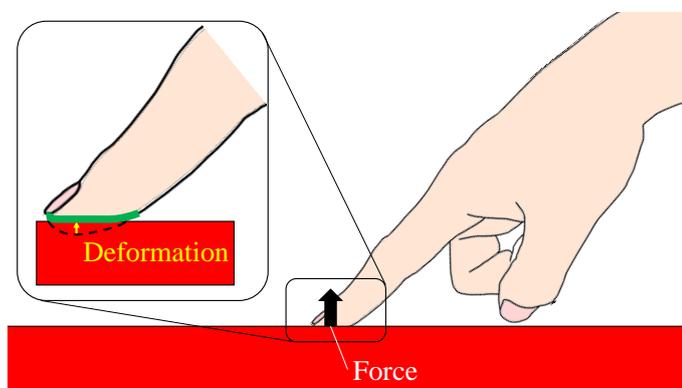


図 2.3: 指先に加わる力と皮膚変位

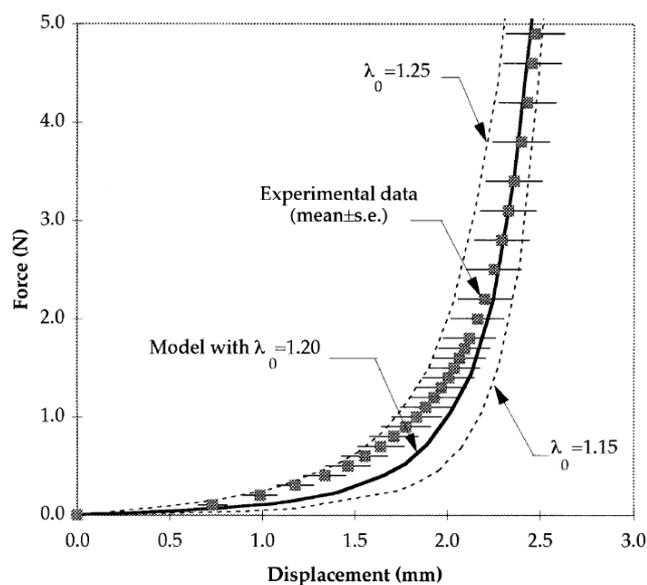


図 2.4: 力と皮膚変位の関係 [22]

2.3.2 触知覚可能な刺激間隔

Weinstein は、皮膚上の二点における刺激を区別できる最小距離である二点弁別閾（図 2.5）を定義した [23]。図 2.6 に、ヒトの指腹部における二点弁別閾が 2 - 4 mm であった結果を示す [24]。

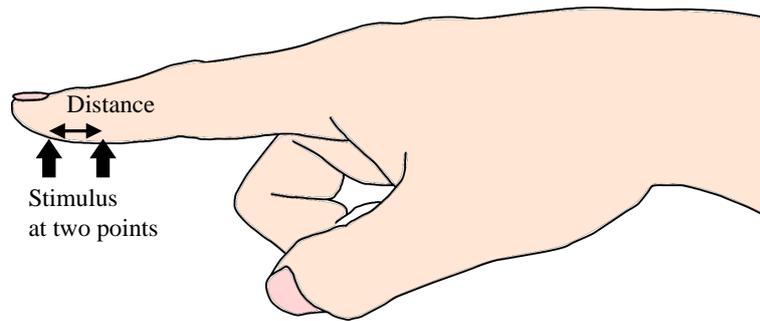


図 2.5: 指先の二点における刺激

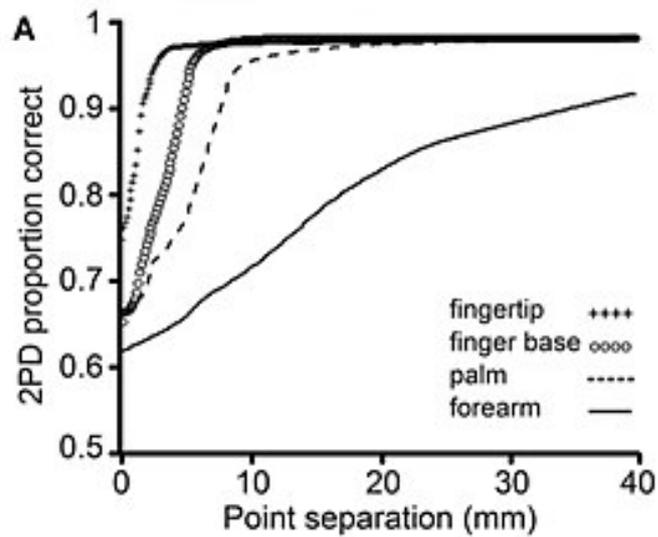


図 2.6: 二点弁別精度と刺激間の距離 [24]

第3章 力触覚提示装置

本章では、初めに、多関節アクチュエータを装着して力触覚提示が行われる装着型について説明する。次に、ユーザがペンやボールを握るようにして力触覚提示が行われる把持型について説明する。更に、装置が空間に固定され、ユーザが自発的に接触することで力触覚提示が行われる対象型について説明する。最後に、対象型をロボットアームなどにより移動することで有限空間の任意の位置における力触覚提示を可能にする遭遇型について説明する。

3.1 装着型

装着型力触覚提示装置の例を図 3.1 に示す。装着型は、力を加えることで手指の動きを制約し、把持感覚を知覚させることが可能である [25]。しかし、装着することにより不必要な刺激が提示される欠点を持つ。



図 3.1: 装着型力触覚提示装置 [1]

3.2 把持型

把持型力触覚提示装置の例を図 3.2 に示す．ユーザは装置の取っ手を介して，手指の運動が制約されることで力覚を知覚することができる [26,27]．しかし，ユーザは常に取っ手を把持する必要があるため，提示する物体を掴む動作を再現することが困難である．



図 3.2: 把持型力触覚提示装置 [2]

3.3 対象型

対象型力触覚提示装置の例を図 3.3 に示す．対象型は物体の一部の曲面を生成し，ユーザが物体に接触した際に生じるユーザの皮膚変形を再現することによって力触覚を提示することが可能である．



図 3.3: 対象型力触覚提示装置 [28]

3.4 遭遇型

遭遇型力触覚提示装置は，ユーザの動きを追従し，物体の存在する領域への指の侵入を制約することで力触覚を提示することができる [29]．遭遇型力触覚提示装置の例を図 3.4 に示す．ユーザの手指と遭遇型力触覚提示装置の接触部の位置が計測され，ユーザの手指が仮想空間で目的物体に接触すると，現実空間で遭遇型力触覚提示装置が手指に接触し，ユーザは目的物体を触知することができる．しかし，遭遇型の装置においてユーザの皮膚に提示される刺激は，接触部の形状に制限されており，凹凸形状の再現には至っていない．

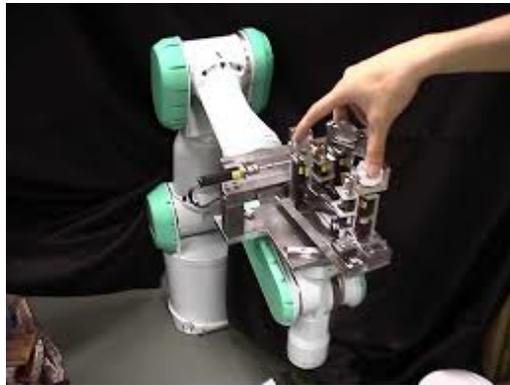


図 3.4: 遭遇型力触覚提示装置 [30]

第4章 アクチュエータと凹凸提示装置

本章では，初めに，凹凸提示装置の要素技術であるアクチュエータについて説明する．次に，従来開発された凹凸提示装置について述べる．更に，先行研究を比較し，本研究の位置づけを述べる．

4.1 アクチュエータ

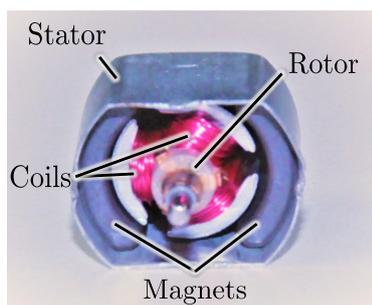
本節では，小型な装置の開発にとって最も重要であるアクチュエータについて説明する．小型な凹凸提示装置の製作のためには，アクチュエータが単位体積あたりに発生する出力が大きいことが重要である．

4.1.1 電磁モータ

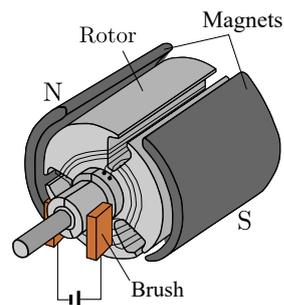
電磁モータは，永久磁石やコイルによって構成され，磁気の反発力や吸引力を用いて動作する．電磁モータの発生力は電磁石やコイルの大きさに依存している．電源によって，直流モータと交流モータに分類される．

直流モータ

直流モータと構造を図 4.1 に示す．コイルに流れる電流の大きさと磁石により発生する磁場の強さに応じて，コイルにローレンツ力が働き，トルクが発生する．ロータが一定角度回転するとブラシと呼ばれる機構によりコイルに流れる電流の向きが変わり，回転方向は一定に保たれる．直流モータは定電圧での駆動が可能であり，回転速度の制御が容易である [31] ．



(a) 直流モータの例

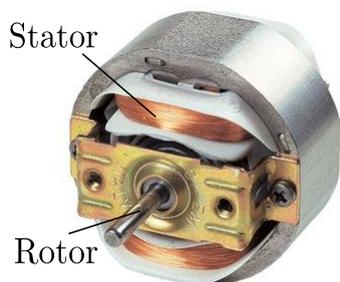


(b) 直流モータ構造

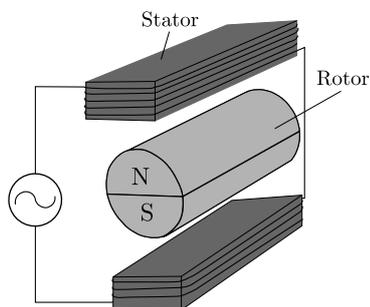
図 4.1: 直流モータ

交流モータ

交流モータと構造を図 4.2 に示す．直流モータがブラシを用いて電流の向きを変更することに対して，交流電源を用いることでコイルに流れる電流が変化するため，交流モータは持続的に回転する．交流モータは電源の周波数により回転速度が定まるため，発生するトルクや回転速度が安定する [32] ．



(a) 交流モータの例



(b) 交流モータ構造

図 4.2: 交流モータ [33]

4.1.2 超音波モータ

超音波モータと構造を図 4.3 に示す．超音波モータは圧電素子の変形を用いて，電気エネルギーを並進運動や回転運動などの機械エネルギーに変換する．超音波モータは小型，軽量であり，同じ大きさの直流モータと比較すると，高い効率での駆動が可能である [34] ．

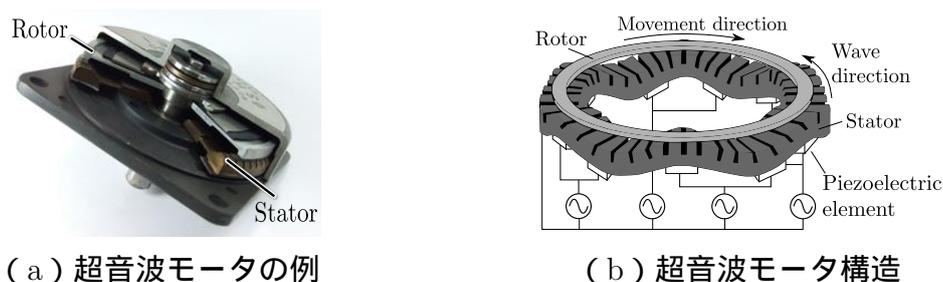


図 4.3: 超音波モータ [35]

4.1.3 空気圧アクチュエータ

空気圧アクチュエータの例を図 4.4 に，構造を図 4.5 に示す．空気圧アクチュエータは，異方伸縮性の弾性膜に圧縮された空気を入力することで膜内の気圧を上昇させ，弾性膜が膨張することによって，変位，力を発生する．しかし，体積，質量の大きい空気圧縮機が必要である．



図 4.4: 空気圧アクチュエータ [36]



図 4.5: 空気圧アクチュエータ構造

4.1.4 アクチュエータ性能比較

アクチュエータの性能を表 4.1 にまとめる [37] . 空気圧アクチュエータの密度が最も低い , アクチュエータとは別に空気圧縮機を必要とするため , 空気圧アクチュエータを組み込んだシステムは質量が大きくなると考えられる . 超音波モータは次点で密度が低く , 電磁モータが最も密度が高い . 単位体積あたりの出力密度は超音波モータが最も高く , 小型化に適している .

表 4.1: アクチュエータ性能比較 [37]

種類	密度 [kg/m ³]	出力密度 [W/m ³]
電磁モータ	1.5×10^7	1.0×10^6
空気圧アクチュエータ	1.8×10^2 - 2.5×10^2	5.0×10^6
超音波モータ	2.6×10^3 - 7.8×10^3	1.0×10^8 - 1.0×10^9

4.2 凹凸提示装置

凹凸提示装置はユーザの皮膚を変形させ , 目的物体の形状を知覚させる対象型の力触覚提示装置である . 凹凸提示装置はピンアレイ型とセル型に分類される .

4.2.1 ピンアレイ型凹凸提示装置

図 4.6 にピンアレイ型凹凸提示装置の概念を示す . ピンアレイ型凹凸提示装置とは , アクチュエータを用いて平面上に配列されたピンを上下させることにより物体形状を提示する装置である .

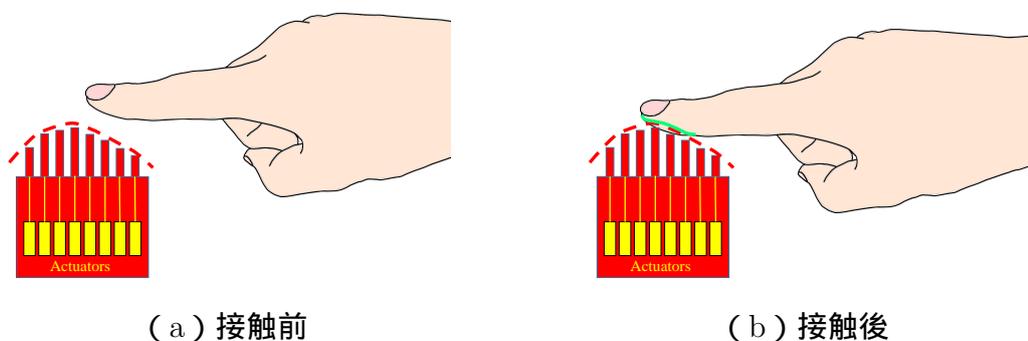


図 4.6: ピンアレイ型凹凸提示装置概念

図 4.7 に示したピンアレイ型凹凸提示装置の例では，アクチュエータとして電磁モータを用いており，ピンの最大変位は 100 mm，ピン間隔は 12.675 mm である．ピンアレイ型凹凸提示装置は高空間分解な形状表現が可能であるが，一つのピンに対し，一つのアクチュエータを搭載する必要があるため，過度に重く，または大きくなる傾向がある．

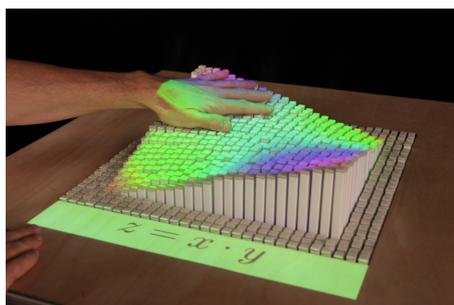
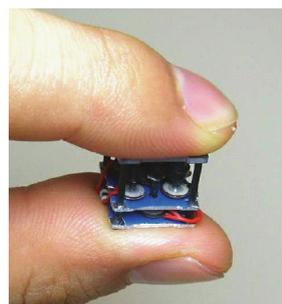


図 4.7: ピンアレイ型凹凸提示装置の例 [9]

ピンアレイ型凹凸提示装置の大きさ，質量の課題を解決するために，小型なアクチュエータを用いたピンアレイ型凹凸提示装置が開発された [13, 38, 39]．図 4.8 に示した例では，ピンのアクチュエータに圧電素子の振動を利用して並進運動を実現する超音波リニアモータを使用している．ピンの最大変位は 1 mm，ピン間隔は 3 mm であり，装置の軽量化，小型化が実現されているが，ピンの変位量が小さいため，ユーザの指腹部への物体形状提示が困難である．



(a) 装置全体像



(b) 装置使用時

図 4.8: 小型ピンアレイ型凹凸提示装置の例 [13]

4.2.2 セル型凹凸提示装置

図 4.9 にセル型凹凸提示装置の概念を示す．セル型凹凸提示装置はバルーンのようなセルを要素として持ち，セルの体積を電磁弁と空気圧縮機によって制御することで，物体の形状を表現する．

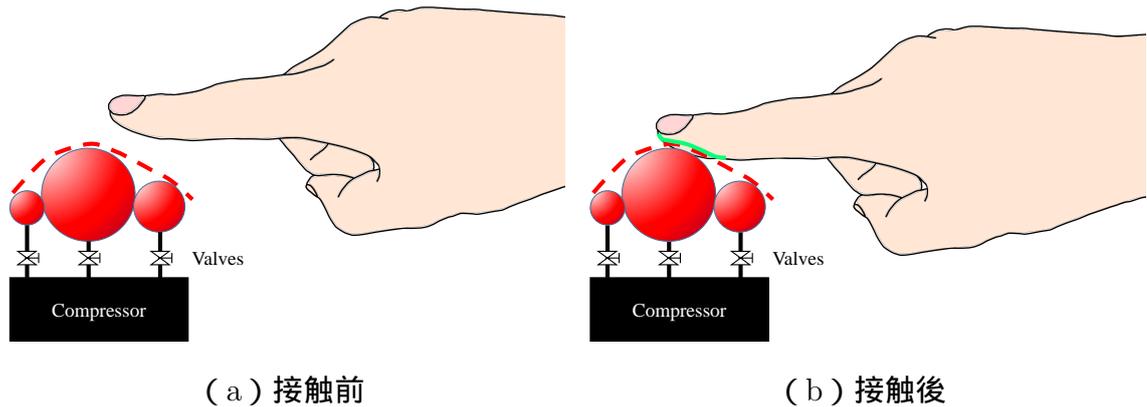


図 4.9: セル型凹凸提示装置概念

セル型凹凸提示装置は滑かな曲面を表現することが可能である．図 4.10 に示したセル型凹凸提示装置の例では，セルの鉛直方向の最大変位は 25 mm，セル間の間隔が 38 mm である [12]．このシステムにおいては，シリコン膜によって区切られたセルの中に粉体が入っている．セル内の空気圧を制御することで，面の形状を平面や凸面に変化させることやセルの硬さを変化させることができる．しかし，質量の大きい空気圧縮機やセルと同数の電磁弁が必要であり，多様な形状表現が可能な装置は質量，体積に課題がある．



図 4.10: セル型凹凸提示装置の例 [12]

図 4.11 に、従来開発された軽量なセル型凹凸提示装置を示す [11]。この装置では、バルーンをセルとして使用し、空気圧を印加して各セルの体積を制御することで、物体の形状表現が可能となる。しかし、セルの体積は大きく、多様な形状表現が困難である。更に、一つのセルに空気圧を印加して体積を制御すると、隣り合うセルに影響を与えるため、独立したセル体積の制御が困難である。

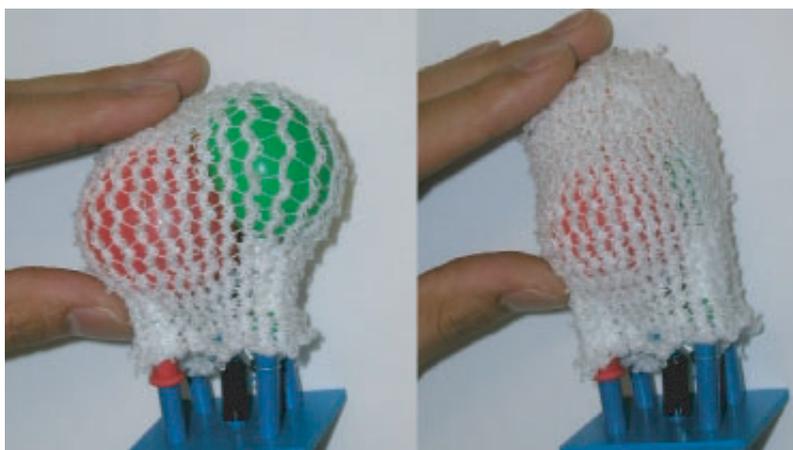


図 4.11: 軽量セル型凹凸提示装置の例 [40]

4.3 本研究の位置づけ

凹凸提示装置に関する研究を図 4.12 にまとめる．装置による触覚刺激の提示要素の中心間の距離を刺激提示間隔，単一の要素が鉛直方向に再現可能な変位を刺激提示変位と呼ぶ．従来，凹凸形状提示を目的として提案されてきた力触覚提示装置は大きく，指先への凹凸形状提示のためには接触子が十分に高密度に配置されていなかった．二次元配列したピンに接触させることで凹凸形状を提示するピンアレイ型凹凸提示装置において，小型な装置が開発されてきたが，変位計測が実装されていないため，ユーザとの接触により，変位が目標と異なり，形状提示が困難であった．

本研究では，小型かつ動的な形状を表現可能なピンアレイ型凹凸動態ディスプレイを開発し，指先における物体の凹凸形状提示を実現する．指腹部の性質から，凹凸動態ディスプレイの刺激提示間隔は 4 mm 以下，刺激提示変位は 2.5 mm 以上であることが望ましい．更に，凹凸動態を知覚するメルケル触盤が 4 Hz 以下の刺激に対して応答することや 3 Hz 以上の周波数を持つ刺激はパチニ小体によって振動感覚として知覚されることから，3 Hz 以下の周波数を持つ凹凸動態を表現することを目的とする．小型化かつ軽量化の容易な超音波リニアモータを用いてピンアレイ型凹凸動態ディスプレイを構築し，ピン変位を抵抗体による分圧変化によって計測することで，高分解に制御する手法を提案する．提案するシステムによって，従来の凹凸提示装置では困難であった指腹部における凹凸動態提示を可能にする．

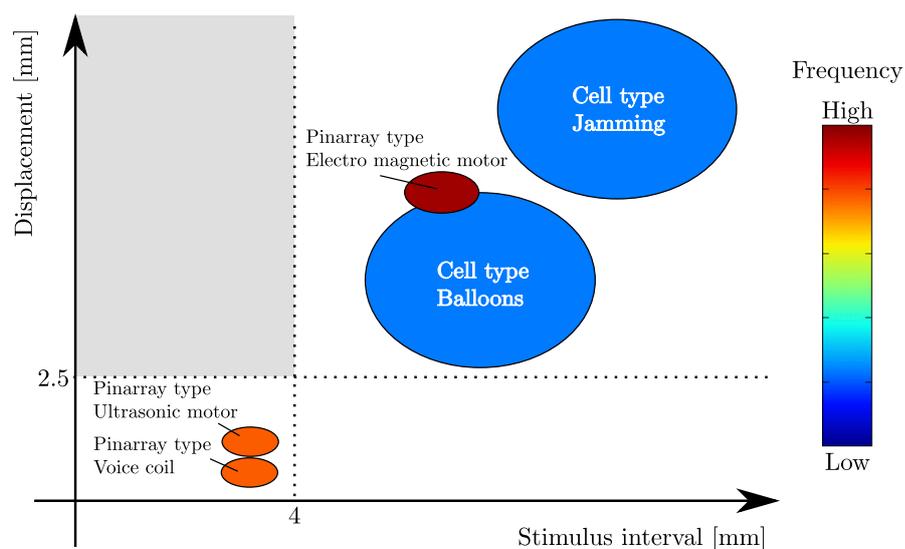


図 4.12: 先行研究の比較

第5章 凹凸動態提示システム

本章では，初めに，凹凸動態ディスプレイの構造について述べる．次に，提案するピンアレイ型凹凸動態ディスプレイのピン変位計測手法について述べる．更に，超音波リニアモータの駆動原理を述べる．最後に，提案するピンアレイ型凹凸動態ディスプレイのピン変位制御手法について述べる．

5.1 凹凸動態ディスプレイ構造

提案する凹凸動態ディスプレイの構成を図 5.1 に示す．凹凸動態ディスプレイは，超音波リニアモータ (UltraSonic linear Motor, USM) と変位センサ (Sensor) により構成される．図 5.2 に示すように，超音波リニアモータはシャフト (Shaft), 移動子 (Moving element), 圧電素子 (Piezoelectric element) によって構成される．

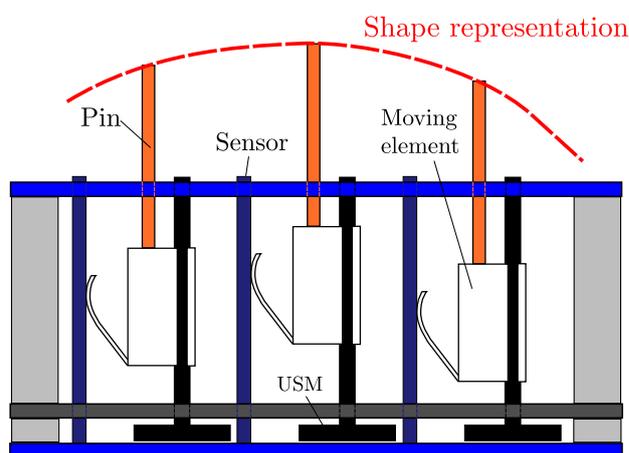


図 5.1: 凹凸動態ディスプレイ構成

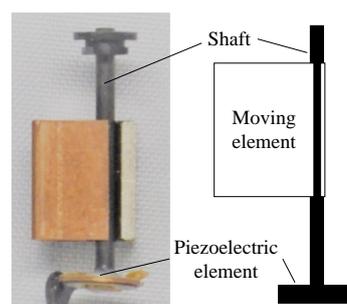


図 5.2: 超音波リニアモータ構成

シャフトは圧電素子に設置されており，圧電素子の機械振動に連動する．シャフトを挟みこむように移動子が配置されており，静止摩擦力によって固定されている．単一ピンの変位制御システムの構成を図 5.3 に示す．PC よりマイクロコントローラ (Micro Controller , MC) に変位入力を与えられ，MC が計測信号に基づいて駆動信号を出力することで凹凸動態ディスプレイのピン変位制御を行う．

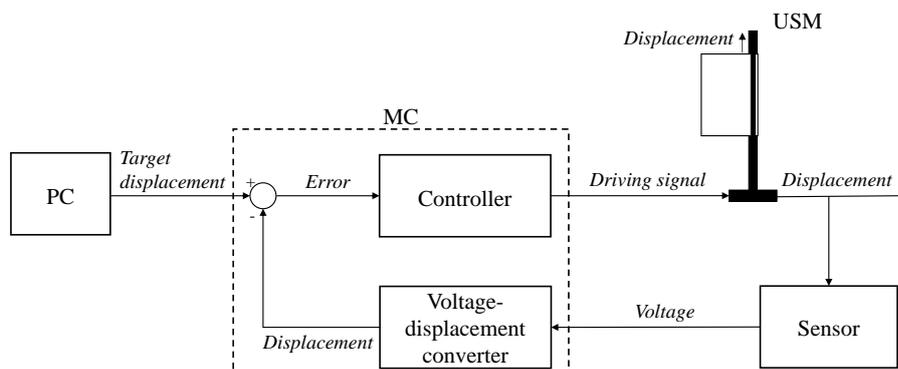


図 5.3: ピン変位制御システム

5.2 電気抵抗体による分圧変化を利用した変位計測

小さな凹凸動態ディスプレイのために、電気抵抗体を用いたセンサ間干渉がない変位計測手法を提案する。図 5.4 に抵抗体による変位計測手法を示す。抵抗体 (Sensor) には直流電圧 V_{cc} が印加され、移動子が抵抗体に接触している。接触点で分割される抵抗値はそれぞれ R_1 , R_2 であり、接触点において出力される電位によってピン変位を計測することができる。出力電位 V_o を式 (5.1) に表す。

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{cc} \quad (5.1)$$

R_2 は k_p を比例係数として、ピン変位 u と線形の関係 $R_2 = k_p u$ を持つ抵抗値である。 $R_1 + R_2$, V_{cc} はともに定数であり、式 (5.2) に示すように $R_1 + R_2$ と V_{cc} の比が I_d で表される。抵抗体の導電率が一樣であると仮定すると、出力電位 V_o は式 (5.1) を用いて、式 (5.3) で表される。

$$\frac{V_{cc}}{R_1 + R_2} = I_d \quad (5.2)$$

$$V_o = k_p I_d u \quad (5.3)$$

以上より、出力電位とピン変位は線形関係にある。

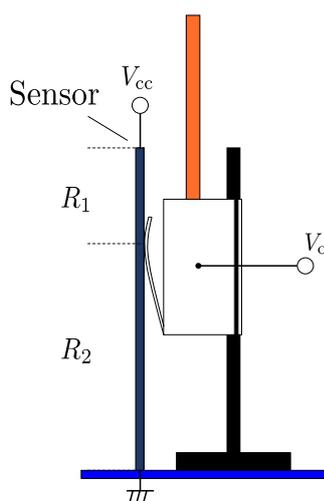


図 5.4: 変位計測手法

5.3 超音波リニアモータ

超音波リニアモータが動作する様子を図 5.5 に，動作原理を図 5.6 に示す [14] . 超音波リニアモータにおける圧電素子は入力端子を二つ持つ．PWM (Pulse width modulation) 信号を二つの入力端子間に入力することで，超音波リニアモータに設置された圧電素子が伸長と収縮を繰り返す．圧電素子が伸長する際，シャフトは静止摩擦力によって移動子に固定されている．反対に，圧電素子が収縮する際，シャフトに十分大きい加速度を与えると，シャフトは上に移動するが，移動子は慣性力により静止し，相対的に負の方向に変位する．圧電素子が伸長する際，シャフトに大きい加速度を与え，収縮する際にシャフトと移動子の固定を保つと，移動子は相対的に正の方向に変位する．デューティ比 r を変更することで，圧電素子の伸長と収縮によって働く慣性力が変わり，シャフトの移動方向を変えることができる．デューティ比が 0.5 の場合，圧電素子の伸長の際にシャフトに与える加速度と収縮の際にシャフトに与える加速度が等しくなるため，シャフトは移動せず，デューティ比が 0.25 または 0.75 の時，シャフトの推進力は最大となる [41] . シャフトと移動子の相対的な移動を用いてピンアレイによる凹凸提示を可能にする．



図 5.5: 超音波リニアモータの駆動

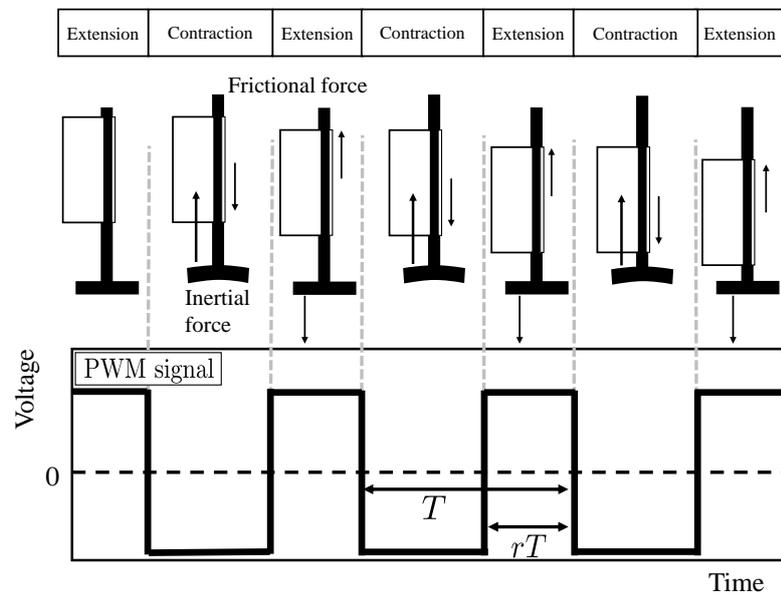


図 5.6: 超音波リニアモータの動作原理

5.4 ピン変位制御

単一ピンの変位制御システムについて説明する．図 5.3 に示したように，凹凸動態ディスプレイは超音波リニアモータ (USM)，変位センサ，PC，MC により構成される．変位センサはピン変位に応じた電位を出力し，AD 変換器を介して MC に入力されることによってピン変位を計測する．PC から MC には目標変位を送信可能であり，MC は計測されたピンの変位と目標変位を比較する．計測したピン変位が目標変位よりも小さい場合，デューティ比が 0.51 以上の PWM 信号を出力し，計測したピン変位が目標変位よりも大きい場合にはデューティ比が 0.49 以下の PWM 信号を出力する．MC からの出力信号をモータドライバにより増幅し，超音波リニアモータに入力して駆動することで，ピンが変位する．超音波リニアモータは積分器としての役割を持ち，電圧信号をピン変位信号に変換する．ピン変位 $u(t)$ と電圧信号 $V(t)$ は係数 k_v ，連続時間 t ，PWM 信号の周期 T ，PWM 信号のデューティ比 r ，非負の整数 m を用いて式 (5.4)，(5.5) で表される．

$$u(t) = k_v \int_0^t V(\tau) d\tau \quad (5.4)$$

$$V(t) = \begin{cases} V_{\text{on}} & mT < t \leq (m+r)T \\ -V_{\text{on}} & (m+r)T < t \leq (m+1)T \end{cases} \quad (5.5)$$

提案したシステムの構成を図 5.7 に，等価ブロック線図を図 5.8 に示す．DA 変換器は，入力値を一定時間保持する機能を持ち，離散信号を連続信号に変換する役割を持つ．コントローラの演算速度周期 T_c を離散時間間隔の単位，離散時間間隔の単位数を n として， $e_s[n]$ は変位信号を MC に取得する際に発生する量子化雑音を表す． k_c はシステムの較正により求まる係数である．コントローラの演算速度周期 T_c に応じてシステムは変位を出力するため，偏差信号は AD 変換器によりデジタル信号として扱われる．MC が比例制御器，超音波リニアモータが積分制御器の役割を担う．提案システムの伝達関数を式 (5.6) に示す．

$$\frac{U}{U_r} = \frac{k_o k_a (1 - e^{-sT_c})}{T_c s^2 + T_c a s + (1 - e^{-sT_c}) k_o k_a k_c} \quad (5.6)$$

$k_c = 1$, $a = 0.01$, $T_c = 0.025$ s として, $k_o k_a$ を変化させた時の周波数特性を図 5.9 に示す. 目標の遮断周波数 3 Hz 以上を達成するためには, $1 < k_o k_a < 10$ を満たす必要がある.

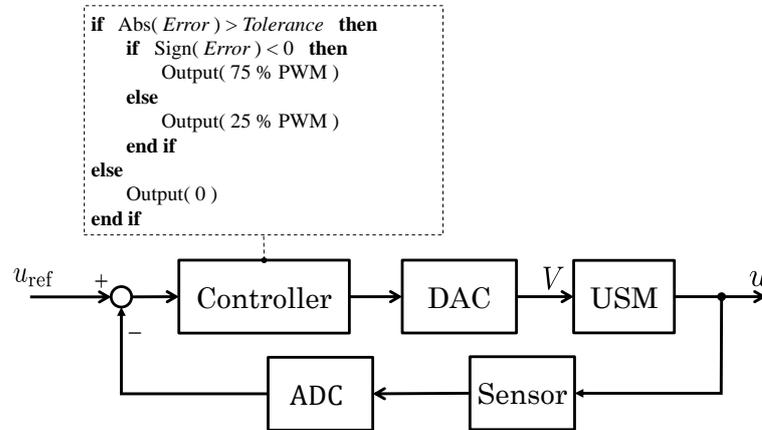


図 5.7: システム図

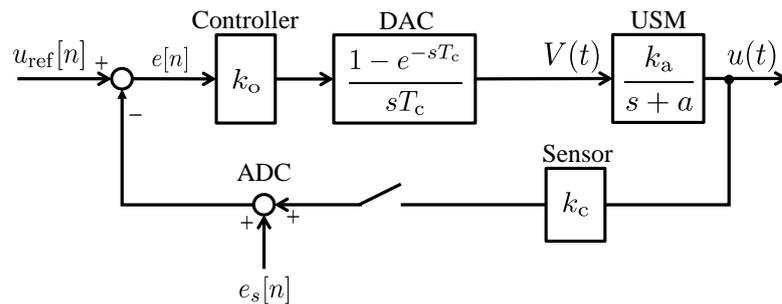
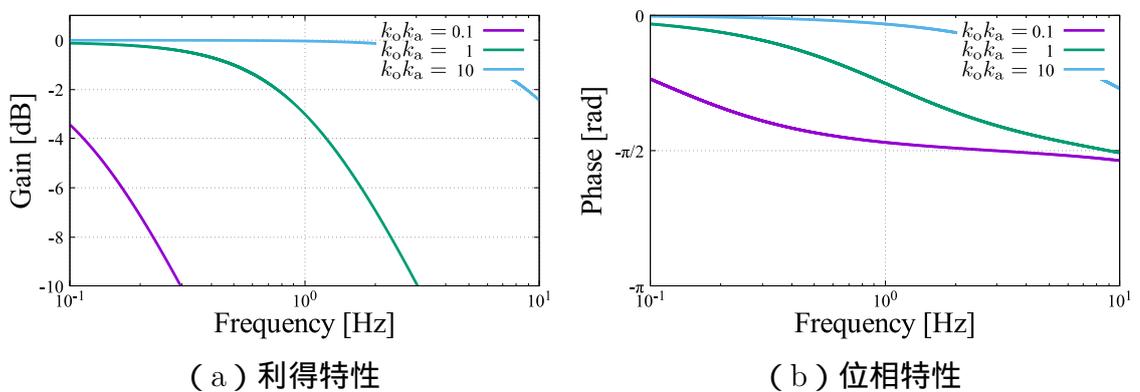


図 5.8: システムの等価ブロック線図



(a) 利得特性

(b) 位相特性

図 5.9: 変位制御モデルの周波数特性

第6章 凹凸動態ディスプレイ

本章では、初めに、超音波リニアモータを用いたピン変位制御回路の実装について述べる。次に、凹凸動態ディスプレイの変位制御のための較正について述べる。更に、凹凸動態ディスプレイの変位制御実験について述べる。ピンアレイ型凹凸動態ディスプレイによる凹凸動態提示は各ピンの変位制御を独立して行うことで実現する。

6.1 ディスプレイの実装

図 6.1 に実装した凹凸動態ディスプレイを示す。アクリル棒 (FFO-40, Plastruct) に導電性塗料 (PTP-EG121CG, プラスコート) を塗布し抵抗体として使用する。超音波リニアモータはアクリル板に固定されており、駆動することで移動子が上下に運動する。移動子に触覚提示のためのピンを取り付け、ユーザとピンが接触することで刺激を提示する。ディスプレイの寸法は 38 mm × 38 mm × 26 mm であった。超音波リニアモータの要素である圧電素子の直径が 5.5 mm であるため、隣接するピン同士の間隔は 6 mm であった。

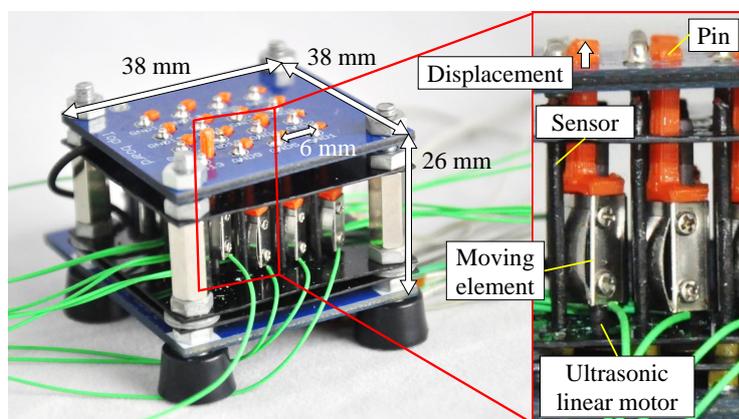


図 6.1: 凹凸動態提示装置

図 6.2 に単一ピン変位制御のための回路図を示す．抵抗体には電源電圧 V_{cc} が印加されており，移動子が抵抗体に接触した点において，電源電圧は抵抗体により分圧され，移動子の位置により電位が変化する．出力される電位をセンサにより取得し，変位計測が可能となる．

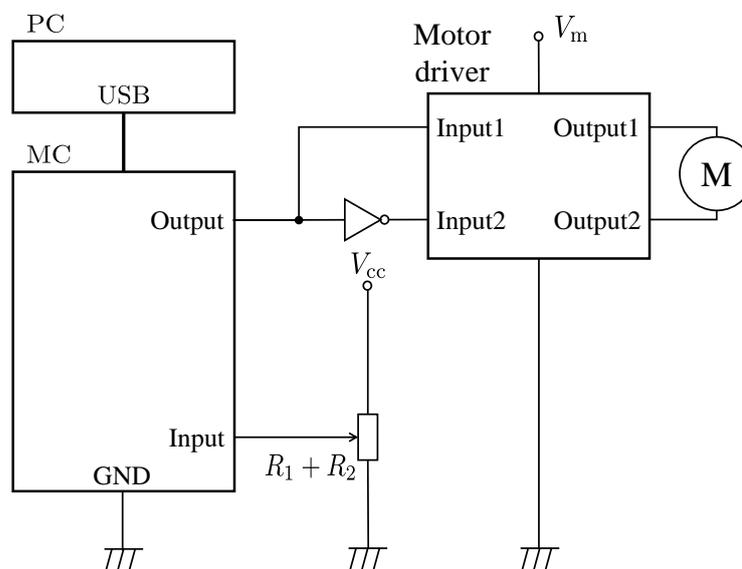


図 6.2: 実装回路図

6.2 超音波モータへの入力信号

超音波モータの動作が確認された電圧振幅 30 V，周波数 70 kHz の PWM 信号を用いて超音波リニアモータの制御を行う．図 6.2 において，MC の出力は電圧振幅 3.3 V の PWM 信号であり，デューティ比は 0.25 である．インバータにより，位相を反転させることでデューティ比が 0.25/0.75 の PWM 信号が一つずつ生成され，モータドライバによって，電圧振幅 30 V に増幅された信号が超音波リニアモータに入力される．MC の出力信号のデューティ比を 0.75 に変更することで，ピンの進行方向を変更することができる．

6.3 ピン変位制御システムの較正

実験を行う前に、計測部の出力電位とピン変位の関係を求める必要がある。図 6.3 にピン変位計測環境と計測される変位による深度画像，各ピン区別のための番号配置を示す。赤外線のパターン光を投影し，物体の形状やカメラとの距離に応じてパターンが変化することで深度情報を取得することが可能なデプスカメラを用いてピン変位を計測する [42]。凹凸動態ディスプレイ (Shape display) 直上よりデプスカメラで撮影することで，制御したピン変位を計測する。デプスカメラと凹凸動態ディスプレイの上面の距離は 200 mm とした。本実験では，デプスカメラとして Intel 社の RealSense SR300 を使用した。図 6.4 に最大，最小のピン変位において，計測部の出力電圧を MC により計測し，直線近似することで，センサの出力電位と変位の対応づけを行った結果を示す。

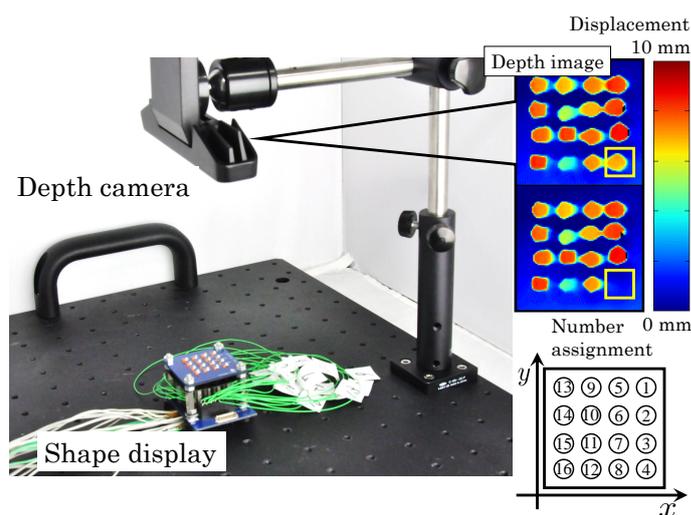


図 6.3: 変位計測環境

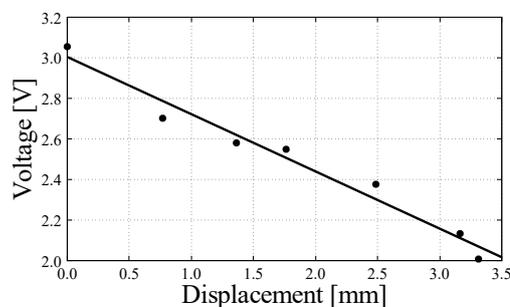


図 6.4: ピン変位と計測電圧の関係

6.4 周波数応答実験

システムの動特性を評価するため，周波数応答を測定する．周波数応答実験では，初期変位を 3.5 mm とし，目標変位を動的に変化させた際の変位を計測した．目標変位 u_r は振幅 A ，周波数 $f = \omega/2\pi$ ，時刻 t ，オフセット A_0 を用いて式 (6.1) で与えた．

$$u_r = A \cos \omega t + A_0 \quad (6.1)$$

本実験では， $A = 1.75$ mm， $A_0 = 1.75$ mm とした． f の値を 0.1 - 10 Hz で変化させ，それぞれの周波数においてピン変位を計測した．結果を図 6.5 に示す． $f = 0.5$ Hz では，制御変位が目標変位と同期して変動している (図 6.5 (a))． $f = 5$ Hz では，制御変位が目標変位と同期して変動しているが，利得の低下，位相の遅れが生じた (図 6.5 (b))．

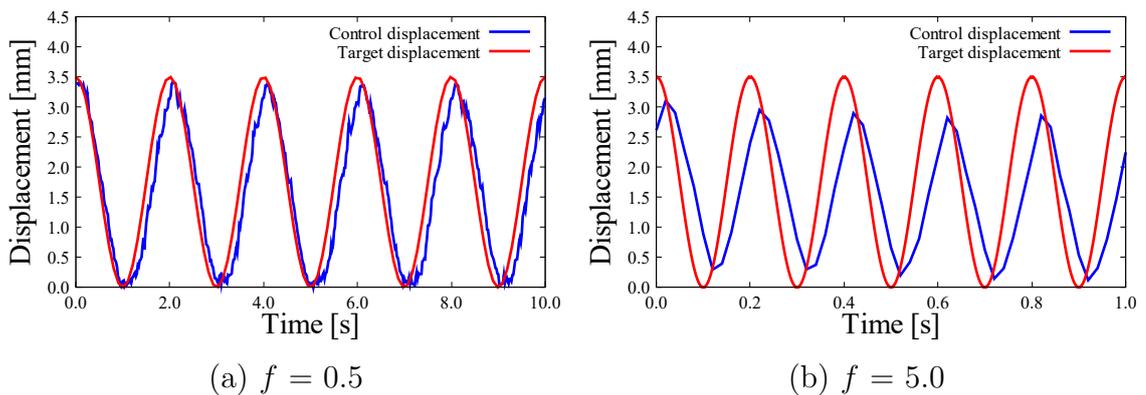


図 6.5: 変位計測データの例

更に，各周期における最大値を $2A_m$ とし， A_m を目標変位の振幅と比較することで周波数特性を測定した．利得は式 (6.2) で表され，位相遅れは f を周波数， t_d を時間遅れとして式 (6.3) で表される．

$$\text{Gain} = 20 \log \frac{A_m}{A} \quad (6.2)$$

$$\text{Phase} = -2\pi f t_d \quad (6.3)$$

周波数応答の測定結果を図 6.6 に示す．点は計測された利得，位相を表し，実線は提案モデルである式 (5.6) を計測データに近似した結果である．近似パラメータは $a = 0.16879$, $k_o k_a = 4.81939$, $k_c = 0.919306$ であった．利得の傾きはモデルと一致するが，位相特性は 4 Hz 以上の高周波帯域ではモデルから大きく外れる．

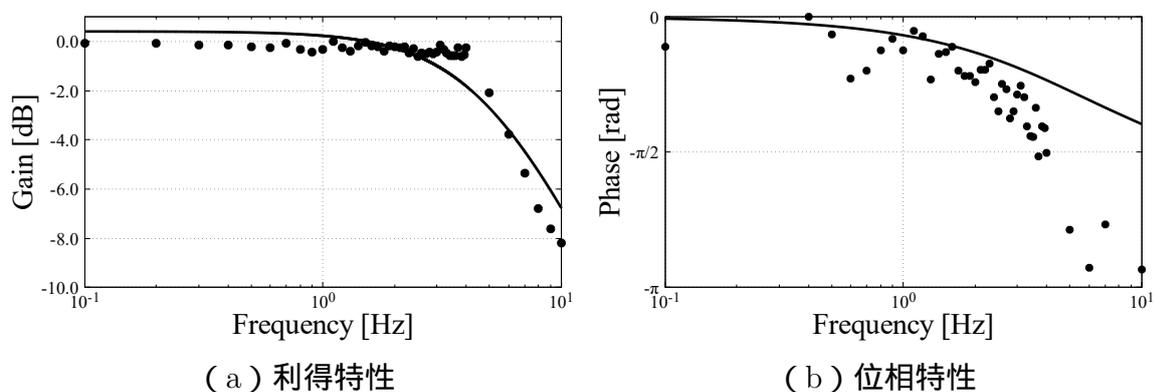


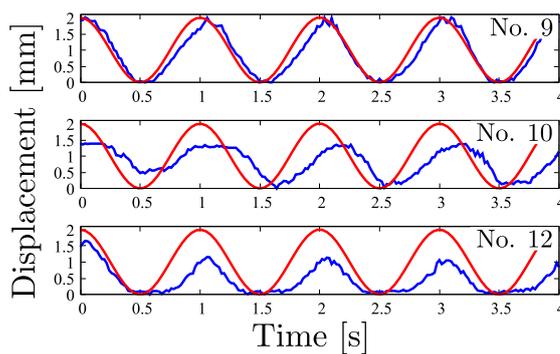
図 6.6: 周波数特性測定結果

6.5 複数ピン駆動実験

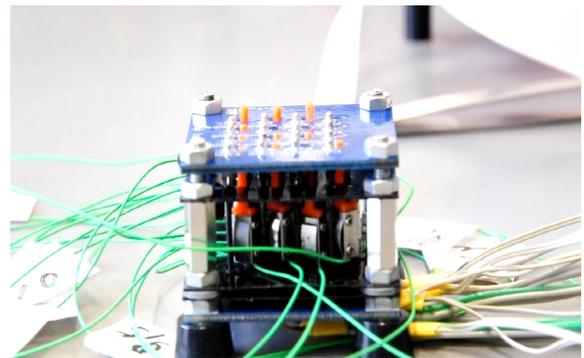
複数ピンの同時駆動による各ピン間の相互干渉の有無を確認するため、複数ピン駆動実験を行う。複数ピン駆動実験では、図 6.3 における 9, 10, 12 番のピン変位を同時に計測した。目標変位 u_r は、振幅 A 、周波数 $f = \omega/2\pi$ 、時刻 t 、オフセット A_0 、初期位相 θ を用いて式 (6.4) で与えた。

$$u_r = A \cos(\omega t + \theta) + A_0 \quad (6.4)$$

本実験では、 $A = 1.0 \text{ mm}$ 、 $A_0 = 1.0 \text{ mm}$ 、 $f = 1.0 \text{ Hz}$ とし、複数ピンの目標変位の初期位相が同一の場合と、初期位相が異なる場合について変位計測を行った。図 6.7 に初期位相が同一の場合、図 6.8 に 9 番ピンにおいて $\theta = 0$ 、10 番ピンにおいて $\theta = \pi/2$ 、12 番ピンに $\theta = 3\pi/2$ として入力を与えた結果を示す。各ピンにおいて変位の振幅が異なったが、目標入力を追従した。

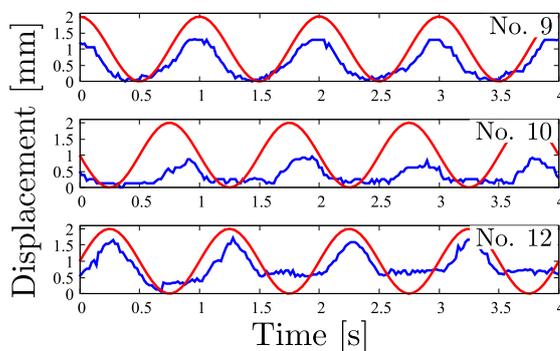


(a) 変位データ

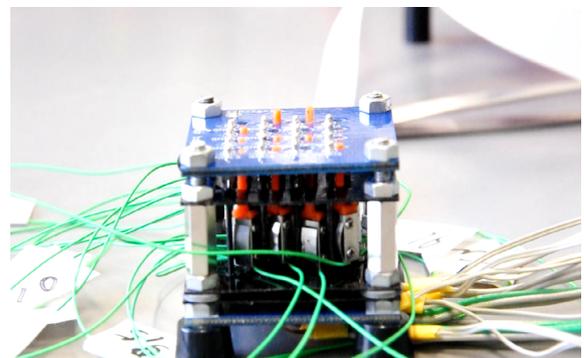


(b) 駆動の様子

図 6.7: 初期位相 θ が同一の場合のピン駆動



(a) 変位データ



(b) 駆動の様子

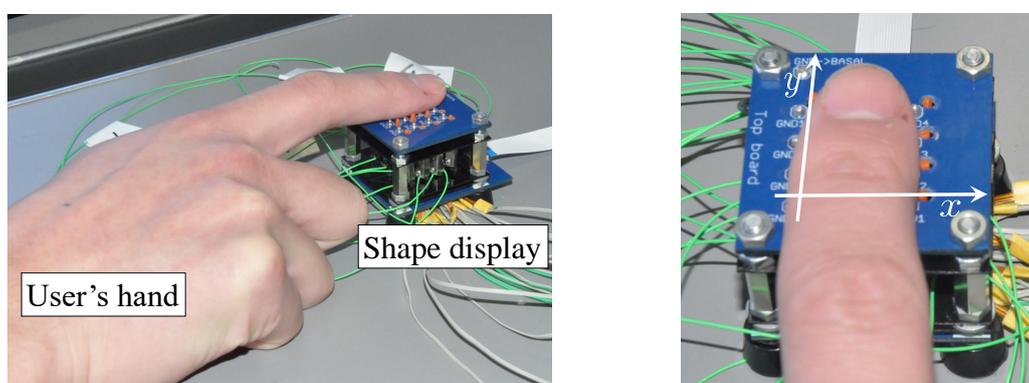
図 6.8: 初期位相 θ が異なる場合のピン駆動

第7章 凹凸動態提示実験

本章では、初めに、ピン変位制御システム評価実験の実験環境について述べる。次に、実験結果に対する考察を示す。

7.1 実験環境

製作した装置による凹凸動態提示の精度を評価するため、凹凸動態提示実験を行う。図 7.1 に凹凸動態提示実験環境を示す。被験者は y 軸に沿って右手人差し指を凹凸動態提示ディスプレイに接触させる。代表的な凹凸動態である波を被験者に提示し、波の進行方向を回答する実験を行う。



(a) ユーザと凹凸動態ディスプレイ

(b) ユーザと x, y 軸の関係

図 7.1: 凹凸動態提示実験環境

A を振幅, $f = \omega/2\pi$ を周波数, t を時刻, x, y を各ピンの位置, x 軸, y 軸に沿った各方向の波の速さを v_x, v_y , 変位のオフセットを A_0 として, 各ピンに式 (7.1) で表される余弦波入力 u_r を与える。

$$u_r = A \cos \omega \left(t + \frac{x}{v_x} + \frac{y}{v_y} \right) + A_0 \quad (7.1)$$

図 7.2 に示すように，提示する波の進行方向 θ_w は $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi, 5\pi/4, 3\pi/2, 7\pi/4$ の八つとした． $A = 1.0 \text{ mm}$ ， $A_o = 1.0 \text{ mm}$ ， $f = 1.0 \text{ Hz}$ ， x, y は各ピンの位置に応じて， $0, 1, 2, 3$ とした．表 7.1 に示すように，波の速さ v_x, v_y を変更することで，波の進行方向 θ_w を定める．

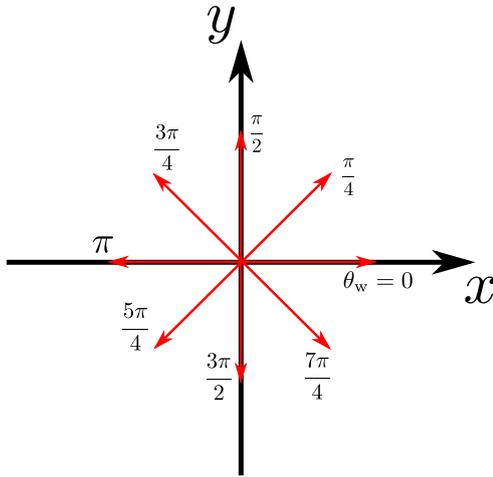
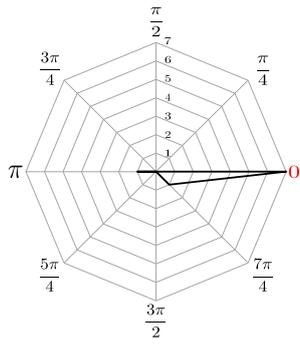


図 7.2: 波の進行方向

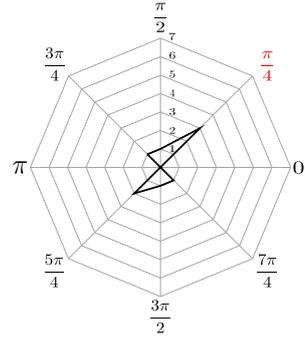
表 7.1: 波の進行方向とパラメータ

θ_w	v_x	v_y
0	-10	100000
$\pi/4$	-10	-10
$\pi/2$	100000	-10
$3\pi/4$	10	-10
π	10	100000
$5\pi/4$	10	10
$3\pi/2$	100000	10
$7\pi/4$	-10	10

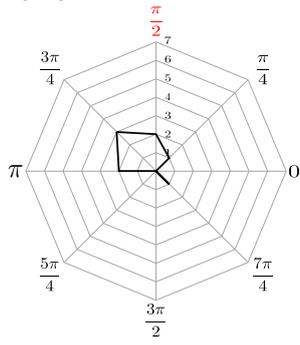
被験者は人差し指で凹凸動態ディスプレイに接触し，自然な状態で待機した．被験者は無作為に決定された進行方向 θ_w を持つ八つの刺激を三回ずつ提示され，知覚した波の進行方向を口頭で回答した．システムを質問の正答率を用いて評価する．凹凸動態提示実験は 20 代の健康な被験者 3 名 に対して行った．提示角度別の回答結果を図 7.3 に示す．波の進行方向が $0, \pi$ の時，正答率が高かった．提示された進行方向に対して逆方向を回答する場合や， $\pi/4$ 誤って回答することがあった．



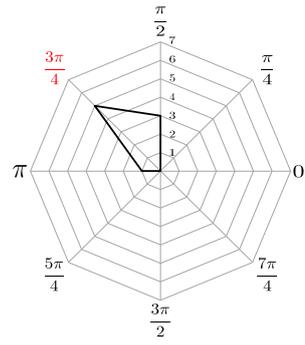
(a) 進行方向 : 0 rad



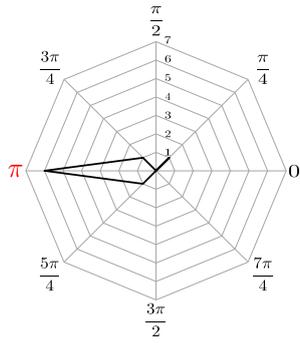
(b) 進行方向 : $\pi/4$ rad



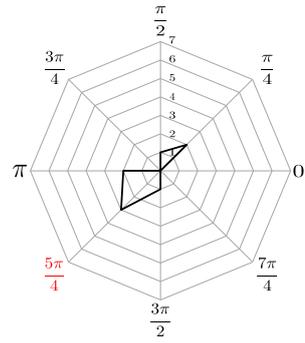
(c) 進行方向 : $\pi/2$ rad



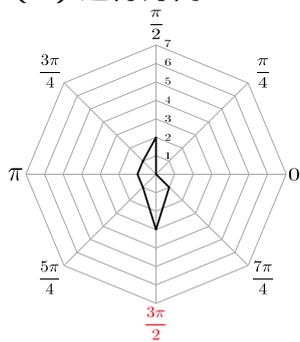
(d) 進行方向 : $3\pi/4$ rad



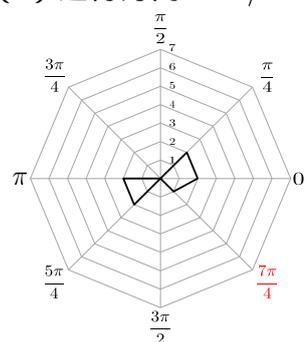
(e) 進行方向 : π rad



(f) 進行方向 : $5\pi/4$ rad



(g) 進行方向 : $3\pi/2$ rad



(h) 進行方向 : $7\pi/4$ rad

図 7.3: 全被験者の提示刺激に対する回答の頻度

7.2 考察

周波数応答実験では，余弦波入力を与えた場合のピン変位を計測した． $f = 0.5$ Hz の時，一定の誤差範囲内で制御変位が目標変位を追従しており，遅延も確認されない．超音波リニアモータが駆動に慣性力を利用しており，移動子への重力の影響により，ピンの上昇中に目標変位と制御変位の誤差が大きくなっていると考えられる．更に，ピン変位と計測電位の線形性を仮定して較正を行ったが，実際は非線形な関係を持つことも誤差の要因として考えられる． $f = 5.0$ Hz の時，利得の低下，位相の遅れが確認された．目標変位がピンの移動よりも十分に速いため，ピン変位が目標変位に達しない状態で目標変位が変動することが原因として考えられる．更に，超音波リニアモータが積分器として働き，システムが遅れ要素を持つことも原因として考えられる．周波数応答実験により，変位制御システムの周波数応答が得られた．遮断周波数は約 5 Hz であり，目標の周波数 3 Hz を達成した．更に，利得余裕は 6 dB 以上，位相余裕は $5\pi/6$ rad であり，開ループ利得を大きくすることでシステムの応答性を向上させることが可能である．周波数 4 Hz 以上における位相特性が同定したモデルと一致しなかったが，システムが変位を出力してから再び出力するまでの時間間隔がコントローラに与えられる目標変位の離散時間単位と異なる一定の値に設定されたことが原因として考えられる．以上より，目標変位がピンに要求する速度が十分に小さい時，ピン変位を目標変位に整定することができた．目標変位の変動が速い時，ピンが目標変位を追従することはできなかった．

複数ピン駆動実験では，各ピンに対する余弦波入力の初期位相が同一の場合と初期位相が異なる場合のピン変位を計測した．初期位相に関係なく，ピン変位の位相を再現することができたが，変位振幅は目標変位の振幅より小さくなった．原因として，ピンが装置表面の穴に接触し，運動を阻害する力がピンによって異なることが挙げられる．更に，複数のピンを同時に駆動することによって，機械的な振動が干渉し，相互に運動を阻害することも原因として挙げられる．入力電圧が相互に干渉することも考えられるが，全ピンを同時に一方向に移動させた場合には，顕著な速度変化は確認されなかったため，隣接するピンに入力される電気信号同士の干渉による影響は小さいと考えられる．

図 7.3 (c)(d) に顕著に見られるように，凹凸動態提示実験では， $\pi/4$ の誤差で

波の進行方向を回答する場合があった．波の進行方向 $\theta_w + \pi/4$ は θ_w と $\theta_w + \pi/2$ の両方向に波が進むため，誤答が発生したと考えられる．また，提示された進行方向に対して逆方向を回答する場合があったが，各ピンに与えた初期位相が遅れと進みの両方として捉えることが可能であるためだと考えられる．提案した装置は目標の変位を一定誤差範囲内で再現可能であるため，波に代表される凹凸動態提示の目的は達成したと考えられる．

第8章 終わりに

本論文では、超音波リニアモータを使用した小型である凹凸動態ディスプレイとピン変位の高分解変位制御手法を提案した。製作した凹凸動態ディスプレイは刺激提示変位が 3.5 mm，刺激提示間隔が 6 mm であった。刺激提示間隔は 4 mm 以下である必要があるため、ピンの密度を高くする必要がある。単一のピンに対して、目標変位を余弦波入力で与え、凹凸動態ディスプレイのピン変位制御を行い、システムの動特性を評価した。その結果、目標変位の変動速度が十分に小さい時は、制御変位を目標変位に整定することができた。遮断周波数は約 5 Hz であり、目標である 3 Hz 以上の周波数を達成した。更に、複数ピンの駆動を行い、ピン変位の挙動を確認した。凹凸動態提示実験では、提示される波の向きは正確な回答が得られなかったが、波の方向は $\pm\pi/4$ の誤差範囲内で知覚された。本研究において開発された装置を用いることで、物体の動特性を触覚により知覚することが可能になり、ゲームおける触覚提示や医療用シミュレータなどの分野において、伝達される触覚情報の拡充が期待される。

謝 辞

研究環境を提供して頂き、また本研究の執筆における添削や輪講など、多大なご指導を頂きました大阪大学大学院基礎工学研究科 大城理 教授に深く感謝すると共に、厚くお礼申し上げます。本論文の副査として様々なご指導を頂いた大阪大学大学院基礎工学研究科 小林秀敏 教授に心より感謝いたします。本研究を進めるにあたって、様々な視点からご指導、ご助言いただきました大阪大学大学院基礎工学研究科 黒田嘉宏 准教授に心から深く感謝いたします。研究テーマの相談や研究内容に関して多くのご指導をいただきました大阪大学大学院基礎工学研究科 吉元俊輔 助教に心から深く感謝申し上げます。学会参加の手続きや物品の購入にご助力いただきました秘書の 杉浦延予氏 に心から深く感謝いたします。

大城研究室の先輩方である加藤雄樹氏、北島利浩氏、朝野美穂氏には、研究のみならず、日常生活においても相談やご助言いただいたことに深く感謝申し上げます。研究室の同期である原口亮文氏は、研究や授業、ゼミなどの相談を通じて、知識を与えていただきました。感謝いたします。研究室の後輩である加藤拓実氏、北川湧麻氏、夏目翔太氏、吉村優輝氏、池本尚生氏、片山雄太氏、澤井智紀氏、高溝周眞氏、広瀬颯氏には、指導や相談などを通して、指導する立場として多くのことを学びました。私の研究に関わる全ての方々に深く感謝いたします。

本研究における被験者実験は、大阪大学 大学院基礎工学研究科 ヒトを対象とした研究に関する倫理委員会の承認（29-11）を得て行っており、被験者に実験内容について説明し、書面にて同意を得られた場合にのみ測定した。

参考文献

- [1] Cyber Glove Systems. ”Cyber Grasp”.
<http://www.cyberglovesystems.com/cybergrasp>, 2016.7.24.
- [2] Geomagic. ”Geomagic Touch”.
<http://www.geomagic.com/ja/products/sculpt/overview>, 2017.01.13.
- [3] Kouta Minamisawa, Souichiro Fukamachi, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. Gravity grabber: wearable haptic display to present virtual mass sensation. New York, 2007. SIGGRAPH ’07 emerging technologies.
- [4] Quan-Zen Ang, Ben Horan, Zoran Najdovski, and Saeid Nahavandi. Grasping virtual objects with multi-point haptics. In *proceedings of IEEE Virtual Reality 2011*, pp. 189–190, 2011, Singapore.
- [5] 下条誠, 前野隆司, 篠田裕之, 佐野明人. 触覚認識メカニズムと応用技術 - 触覚センサ・触覚ディスプレイ -. S & T 出版, 東京, 2014.
- [6] Janes Podobnik and Matjaz Mihelj. *Haptics for virtual reality and teleoperation*, Vol. 67. Springer Science & Business Media, New York, 2012.
- [7] Ming Lin and Miguel Otaduy. *Haptic Rendering: Foundations, Algorithms, and Applications*. A k Peters, Natick, 2008.
- [8] 舘暲, 佐藤誠, 廣瀬通孝. バーチャルリアリティ学. 工業調査会, 東京, 2010.
- [9] Daniel Leithinger, Sean Follmer, Alex Olwal, and Hiroshi Ishii. Physical telepresence: shape capture and display for embodied, computer-mediated remote

- collaboration. In *proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 461–470, New York, 2014.
- [10] Christopher Wagner, Susan Lederman, and Robert Howe. A tactile shape display using rc servomotors. In *proceedings of Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 354–355, Orlando, 2002.
- [11] 圓崎祐貴, 矢野博明, 岩田洋夫. 直動アクチュエータと空気圧バルーンを用いた体積型ハプティックディスプレイ volflex+ の開発. Vol. 16, No. 3, pp. 20–30, 2011.
- [12] Andrew Stanley, Gwilliam James, and Alison Okamura. Haptic jamming: A deformable geometry, variable stiffness tactile display using pneumatics and particle jamming. In *proceedings of World Haptics Conference*, pp. 25–30, 2013, Daejeon, 2013.
- [13] Ki-Uk Kyung, Jun-Young Lee, and Junseok Park. Haptic stylus and empirical studies on braille, button, and texture display. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, pp. 1 – 11, 2008.
- [14] Hyun-Phill Ko, Sangsig Kim, Sergjus Borodinas, Piotr Vasiljev, Chong-Yun Kang, and Seok-Jin Yoon. A novel ultrasonic linear motor using the radial mode of a bimorph. *Sensors and Actuators A*, Vol. 125, pp. 477 – 481, 2006.
- [15] Georg Geiser. *Mensch-Maschine-Kommunikation*. Oldenbourg, München, 1990.
- [16] Roland Johansson and Ake Vallbo. Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand. *Trends in neurosciences*, Vol. 6, pp. 27 – 32, 1983.
- [17] Roland Johansson and Ake Vallbo. Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin. *The Journal of physiology*, Vol. 286, No. 1, pp. 283–300, 1979.

- [18] Ake Vallbo, Johansson, and Roland Johansson. Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation. *Hum Neurobiol*, Vol. 3, No. 1, pp. 3–14, 1984.
- [19] William Talbot, Ian Darian-Smith, Hans Kornhuber, and Vernon Mountcastle. The sense of flutter-vibration: comparison of the human capacity with response patterns of mechanoreceptive afferents from the monkey hand. *Journal of neurophysiology*, Vol. 31, No. 2, pp. 301–334, 1968.
- [20] Stanley Bolanowski, George Gescheider, Ronald Verrillo, and Christin Checkosky. Four channels mediate the mechanical aspects of touch. *The Journal of the Acoustical society of America*, Vol. 84, No. 5, pp. 1680–1694, 1988.
- [21] George Gescheider, Stanley Bolanowski, and Kathleen Hardick. The frequency selectivity of information-processing channels in the tactile sensory system. *Somatosensory & Motor Research*, Vol. 18, No. 3, pp. 191–201, 2001.
- [22] Elaine Serina, Eric Mockensturm, Daniel Mote, and David Rempel. A structural model of the forced compression of the fingertip pulp. *Journal of Biomechanics*, Vol. 31, pp. 639–646, 1998.
- [23] Sidney Weinstein. Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex and laterality. In *the First International symposium on the Skin Senses*, pp. 195–222, 1968.
- [24] Jonathan Tong, Oliver Mao, and Daniel Goldreich. Two-point orientation discrimination versus the traditional two-point test for tactile spatial acuity assessment. *Frontiers in human neuroscience*, Vol. 7, No. 579, pp. 1–11, 2013.
- [25] Alvaro Perez, Daniel Lobo, Francesco Chinello, Gabriel Cirio, Monica Malvezzi, José San, Domenico Prattichizzo, and Miguel Otaduy. Soft finger tactile rendering for wearable haptics. In *proceedings of World Haptics Conference (WHC), 2015 IEEE*, pp. 327–332. IEEE, 2015.

- [26] Claudio Pacchierotti, Francesco Chinello, Monica Malvezzi, Leonardo Meli, and Domenico Prattichizzo. Two finger grasping simulation with cutaneous and kinesthetic force feedback. In *proceedings of Eurohaptics 2012*, pp. 373–382, 2012, Berlin, 2012.
- [27] Zoran Najdovski, Saeid Nahavandi, and Toshio Fukuda. Design, development, and evaluation of a pinch-grasp haptic interface. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 19, No. 1, pp. 45–54, 2014.
- [28] Hiroo Iwata, Hiroaki Yano, Fumitaka Nakaizumi, and Ryo Kawamura. Project feelex: adding haptic surface to graphics. In *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 469–476. ACM, 2001.
- [29] Takahiro Endo, Haruhisa Kawasaki, Tetsuya Mouri, Yasuhiko Ishigure, Hisayuki Shimomura, Masato Matsumura, and Kazumi Koketsu. Five-fingered haptic interface robot: Hiro iii. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 4, No. 1, pp. 14–27, 2011.
- [30] Yasuyoshi Yokokohji, Nobuhiko Muramori, Yuji Sato, and Tsuneo Yoshikawa. Designing an encountered-type haptic display for multiple fingertip contacts based on the observation of human grasping behaviours. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 24, No. 9, pp. 717–729, 2005.
- [31] 高橋寛, 飯高成男, 岡本裕生. モータ技術. 株式会社オーム社, 東京, 2002.
- [32] 谷越欣司. モータのはなし. 日刊工業新聞社, 東京, 1990.
- [33] Everel Group S.p.A.
<https://www.everelgroup.com/en/products/motors-and-ventilation-units>,
2017.8.1.
- [34] 内野研二. 圧電 / 電歪アクチュエータ. 森北出版株式会社, 東京, 1990.

- [35] 株式会社新生工業. ”USR60”.
<http://www.shinsei-motor.com/techno/ultrasonic-motor.html>, 2017.01.13.
- [36] スキューズ株式会社. ”空気圧アクチュエータ”
. <http://www.squse.co.jp/robot/index.php>, 2017.01.13.
- [37] John Huber, Norman Fleck, and Michael Ashby. The selection of mechanical actuators based on performance indices. In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 453, pp. 2185–2205. The Royal Society, 1997.
- [38] BlindPAD. ”BlindPAD”. <https://www.blindpad.eu/>, 2016.7.24.
- [39] Sungjune Jang, Lawrence Kim, Kesler Tanner, Hiroshi Ishii, and Sean Follmer. Haptic edge display for mobile tactile interaction. In *proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 3706–3716. ACM, 2016.
- [40] 阿部幸司, 矢野博明, 岩田洋夫. 空気圧バルーンを用いた体積型ハプティックディスプレイ. ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol. 4, No. 3, pp. 3.67–3.70, 2002.
- [41] Ramiro Velázquez, Hermes Hernández, Carlos A Gutiérrez, and Pedro Rodrigo. An analytical and experimental study of ultrasonic linear motors. *Tehnički vjesnik*, Vol. 22, No. 4, pp. 1057–1063, 2015.
- [42] Intel. <https://software.intel.com/en-us/realsense/sr300>, 2017.12.21.

業績

- 国際会議

1. Shunsuke Yoshimoto, Yasuyuki Yamada, Yoshihiro Kuroda, and Osamu Oshiro, Compact and Largely Displaceable Tactile Shape Display using Arrayed Ultrasonic Linear Actuator, IEEE World Haptics Conference, Munich, 2017

- 国内発表

1. 山田恵之, 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 大城理, 形状ディスプレイのための超音波リニアモータによるピン変位制御の応答性評価, システム制御情報学会若手研究会, 吹田, 2017
2. 山田恵之, 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 大城理, 指先凹凸提示のための超音波リニアモータアレイ, システム制御情報学会研究発表講演会, 京都, 2017
3. 山田恵之, 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 大城理, 高精細凹凸提示のための電気的変位計測に基づく超音波モータ制御, 名古屋, 2017

- その他

1. 山田恵之, 大変形可能な指先凹凸提示装置, 生体工学領域交流会, 豊中, 2017
2. 山田恵之, 超音波モータを用いたピンアレイ型凹凸提示装置, 河原研一 大城研合同ゼミ, 豊中, 2017