

# 修士論文

## 拡張現実感における 視覚刺激を利用した上肢への触覚提示手法

Tactile Display Method to the Upper Limb Using Visual Stimulation  
for Augmented Reality

平成24年2月8日 提出

指導教員 小川 剛史 准教授

東京大学大学院  
工学系研究科 電気系工学専攻  
37-106483 新島 有信

## 要旨

拡張現実感の環境下において、現実世界に重畳表示した仮想物体とリアルなインタラクションを実現するには、視覚的な提示だけでなく、あたかも仮想物体に触れたかのような触覚を提示することが重要である。従来研究では、仮想物体との触覚によるインタラクションを実現するために、仮想物体と接触する部位に触覚デバイスを装着する方法が用いられている。しかし、触覚を提示可能な位置がデバイスの装着位置に依存してしまうため、触覚刺激の提示位置を柔軟に制御することが困難であった。筆者らの研究グループでは、視覚刺激と触覚刺激を組み合わせて提示することで、デバイスの装着位置に依存しない触覚提示手法の確立を目指している。本論文では、視覚刺激による触覚錯覚を用いて触覚刺激位置を制御するため、視覚刺激の提示位置が触覚刺激の知覚位置に与える影響を調査した。被験者実験より、視覚刺激によって振動刺激の知覚位置が転移可能であることと、視覚提示する仮想物体の動き方によって視覚刺激の影響力が変化するという知見が得られた。また、上肢への触覚提示の精度を高めるために、前腕と手のひらでの振動知覚特性の違いについて調査し、それぞれの部位での刺激提示方法について検討した。

## Abstract

In order to realize high realistic interactions between a user and virtual objects, it is very important to give a user tactile stimuli in augmented reality as if he touched them. In previous works a user is equipped with tactile device to present tactile stimuli on the place where virtual objects touch him. However, the area in which the system can provide him with tactile stimuli depends on the place where is covered by the tactile devices. Thus, it has been difficult to give him tactile stimuli in an arbitrary place. Our aim is to establish a representation method of tactile stimuli independent of locations of the devices. In this paper to control locations of tactile stimuli by tactile illusion caused by visual stimuli, we have investigated the correlation between visual stimuli and tactile perception. Based on the subjective experiments, we observe that subjects feel the perceived positions of vibrotactile sensation shifted to those of visual sensation, and the influence of visual stimuli is changed by the movements of visual objects. On the other hand, to achieve higher presentation to the upper limb we have investigated the difference of the forearm and the palm in vibrotactile perception, and we have examined the tactile display method in each place.

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	本研究の貢献	3
1.4	本論文の構成	3
<b>第2章</b>	<b>関連研究</b>	<b>4</b>
2.1	拡張現実感における触覚提示デバイス	4
2.2	ファントムセンセーション	9
2.3	視覚と触覚のクロスモーダル	10
2.4	本研究の位置づけ	11
<b>第3章</b>	<b>提案手法</b>	<b>13</b>
3.1	仮説	13
3.2	視覚刺激を利用した触覚提示手法の提案	13
3.3	システム構成	14
<b>第4章</b>	<b>評価実験</b>	<b>16</b>
4.1	実験1:振動刺激による触知覚位置の精度評価	16
4.2	実験2:視覚提示位置と触覚提示位置と触知覚位置の関係	22
4.3	実験3:提案手法による触知覚位置の精度評価	31
<b>第5章</b>	<b>考察</b>	<b>34</b>
5.1	実験環境についての考察	34
5.2	上肢における適切な振動モータ配置	35
5.3	アプリケーション例	37

第 6 章 結論	39
6.1 結論 . . . . .	39
6.2 今後の課題 . . . . .	40
謝辞	41
発表文献	42

## 目 次

1.1	視覚触覚融合アプリケーション	2
2.1	PHANTOM	6
2.2	SPIDAR-8	6
2.3	Gravity Grabber	7
2.4	Pen de Touch	7
2.5	Haptic Ring	9
2.6	Mass of Roaches!	9
2.7	SMA による触覚提示システム	9
2.8	ファントムセンセーション	10
2.9	ファントムセンセーションの刺激強度	10
2.10	視触覚クロスモーダル実験構成	11
3.1	触知覚位置の転移	13
3.2	提案手法	14
3.3	システム構成	15
3.4	システム処理の流れ	15
4.1	実験風景	17
4.2	振動モータの配置図	17
4.3	回答画面	17
4.4	正解提示画面	17
4.5	実験 1-1 の結果：前腕の触知覚精度	18
4.6	実験 1-1 の結果：手のひらの触知覚精度	18
4.7	実験 1-1 の結果：前腕の回答率	18
4.8	実験 1-1 の結果：手のひらの回答率	18
4.9	実験システム構成	20

4.10	実験 1-2 の結果	21
4.11	被験者 A の結果	23
4.12	被験者 B の結果	23
4.13	実験 1-3 の結果：触知覚精度	23
4.14	実験 1-3 の結果：軸ごとの比較	23
4.15	実験 2-1 の結果：刺激提示位置と触知覚位置の距離	24
4.16	実験 2-1 の結果：視覚提示位置と触知覚位置の距離	25
4.17	実験 2-1 の結果：触覚提示位置と触知覚位置の距離	25
4.18	移動方向の定義	26
4.19	実験 2-2 の結果：移動方向同じ	26
4.20	実験 2-2 の結果：移動方向異なる	26
4.21	実験 2-3 の結果	28
4.22	実験 2-4 の結果：触覚提示位置と視覚提示位置が一致した場合	30
4.23	実験 2-4 の結果：x 軸方向 20mm 差	30
4.24	実験 2-4 の結果：y 軸方向 20mm 差	30
4.25	視覚提示位置と触知覚位置の一致率 (距離 0mm)	31
4.26	視覚提示位置と触知覚位置の一致率 (距離 20mm)	31
4.27	実験 3 の結果	32
4.28	実験 3-2 の結果：手のひら上部	33
4.29	実験 3-2 の結果：手のひら下部	33
4.30	実験 3-2 の結果：手のひら右部	33
4.31	実験 3-2 の結果：手のひら左部	33
5.1	前腕におけるモータ配置例	37
5.2	手のひらにおけるモータ配置例	37

## 表 目 次

4.1	触覚提示位置と誤答位置：前腕 . . . . .	19
4.2	触覚提示位置と誤答位置：手のひら . . . . .	19
4.3	触覚提示位置と印加電圧 . . . . .	20
4.4	実験 2-4:触覚提示位置と視覚提示位置 . . . . .	29

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

近年、コンピュータが生成した仮想物体を現実世界に重畳し、現実世界に情報を付加する拡張現実感 (AR: Augmented Reality) 技術に関する研究が盛んに行われている [1][2]。AR 技術を用いたアプリケーションでは、ユーザに対して正確に情報を伝えるために、仮想物体と現実世界の幾何学的な整合性を保つことが重要とされ、これまでにカメラの位置・姿勢を推定するための手法や仮想物体の現実世界での位置合わせをするための手法が提案されてきた [3][4]。一方、ユーザの仮想物体に対するインタラクションのリアリティを向上させるために、ユーザに触覚フィードバックを与える研究も盛んに行われるようになってきており、例えば、仮想物体への能動的なインタラクションに対する触覚フィードバックを実現する研究 [5][6][7] や仮想物体の視覚的な動きに同期させて触覚を提示する研究 [8][9][10] がある。しかし、既存研究で提案されているシステムでは、ユーザに対して触覚を提示可能な位置がデバイスを装着している位置に限定されていることが多かった。そのため、ユーザの体の上を自由に動き回る仮想物体からの触覚を提示するには全身にデバイスを装着しなければならないという問題やデバイスに設置された多数のアクチュエータの印加電圧を細かく制御しなければならないという問題が生じた [11]。また、振動モータを装着していない部位に振動刺激を提示するための手法としてファントムセンセーションと呼ばれる触錯覚を利用した触覚提示手法が研究されている [12]。ファントムセンセーションとは、触覚において皮膚上の異なる 2 点を同時に刺激した際にそれらの間の 1 点に刺激が定位される現象であり、刺激が定位される位置は刺激の強さの比で決定され刺激の強い方に変位する。ファントムセンセーションを利用することで装着する振動モータの個数を減らすことが可能となるが、提示位置は振動モータ間の線分上に限られているため広範囲の触覚提示を実現するためには格子上に多数の振動モータを配置しなければならないといった問題が生じる [13][14]。さらに、人間の触覚の空間解像力は 20 歳代の前腕で 20mm 程度であり [15]、年齢や部位にもよるが、数 mm 単位で触覚提示位置を制御することは難しいと言える。したがって、AR 環境下での仮想物体の自由な動きを触覚提示するためには、範囲が



図 1.1 視覚触覚融合アプリケーション.

触覚デバイス装着位置に限定されるという問題と高精度の空間分解能を実現する触覚提示が難しいという課題がある.

## 1.2 研究目的

本研究では、振動モータと HMD を利用することで図 1.1 に示すように仮想物体がユーザの体の上を動き回るようなアプリケーションにおいて、その位置に応じた触覚刺激を少数の触覚デバイスだけで提示可能なシステムの実現を目指す。視覚刺激として ARToolKit [3] によって仮想物体を重畳表示し、触覚刺激として振動モータを用いる。触覚提示には従来研究と同様にファントムセンセーションを用いることにより振動モータ間の線分上の触覚提示も可能とし、触覚提示範囲を拡大する。また、視覚刺激を同時に提示することで視覚と触覚のクロスモーダルが発生し、視覚提示位置が触覚提示位置として知覚されることで意図した位置への触覚提示精度を高めることが出来る。さらに、視覚刺激の影響が強くなる範囲を保つように視覚刺激と触覚刺激の提示位置をずらすことで、触覚刺激だけでは提示が難しい範囲にまで触覚範囲が拡大出来る。触覚知覚させたい位置に視覚刺激を提示するという本研究の触覚提示手法を用いると、振動モータ間の線分上以外への触覚提示や

必要振動モータ数の削減を可能となる．これにより，仮想物体の自由な動きを少数の振動モータだけで提示可能になる．

### 1.3 本研究の貢献

本研究で提案した触覚提示手法は，触覚刺激だけでは提示が難しかった振動モータ間の線分以外への触覚提示を実現した．本研究の成果により，例えば，二次元平面内での仮想物体の動きを触覚提示する場合に，既存研究では振動モータが3個以上必要だったが，本研究の提案手法では2個以下で実現可能となった．さらに，視覚刺激によって触知覚位置を制御することで，数十 mm 単位の精度でしか提示出来なかった触知覚位置が数 mm 単位の精度で提示出来るようになった．本研究の提案手法は，上肢全体での触覚提示のような広範囲の触覚提示の際に，少数の振動モータを用いるだけで済むという利点がある．

### 1.4 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである．第2章では，仮想物体への触覚提示手法，ファントムセンセーション，クロスモーダルに関する研究について述べ，既存研究手法の課題を議論する．第3章では，ファントムセンセーションと視覚触覚クロスモーダルを併用した本研究の触覚提示手法を提案し，既存研究との差異を明確にすることで本研究の位置づけを明らかにする．第4章では，提案手法において考慮に入れるべき視覚と触覚の関係性についての評価実験の方法と結果について述べる．第5章では，実験の考察と実験結果をもとにした提案手法の応用例に関する考察を述べる．最後に，第6章で，まとめと今後の課題について述べる．

## 第2章 関連研究

本章では，AR 環境下における触覚提示手法に関する研究，振動モータを用いたファントムセンセーションの基礎と応用例に関する研究，五感のクロスモーダルに関する研究について述べる．また，既存研究の課題について考察する．

### 2.1 拡張現実感における触覚提示デバイス

ヒトの触覚は，物体の表面の手触りを感じる触覚，押された感じを知覚する圧覚，温かさと冷たさをそれぞれ感じる温覚，冷覚，痛みを感じる痛覚の 5 種類に分類可能である [16][17]．この中で物体との接触を知覚するのは触覚と圧覚であり，皮膚の変形によって知覚する．触覚や圧覚に反応する機械受容器は，マイスナー小体，メルケル盤，パチニ小体，ルフィニ終末の 4 種類に分類可能である．それぞれ刺激に対する応答速度や受容野の大きさが異なり，刺激の種類によって知覚する受容器が異なる．振動刺激を知覚する受容器はパチニ小体であり，刺激に対する順応が速く受容野が大きいという特徴がある．また，周波数によって知覚可能な刺激閾が異なり，200Hz 程度の周波数によく反応することがわかっている．ただし，生涯を通じて変化する受容器であり，65 歳を過ぎると著しく検出閾が低下するという知見も得られている．以下に AR 環境下における触覚を提示するデバイスについて，デバイスが固定されていて移動出来ない接地型と移動可能な非接地型に分けて紹介する．

#### 2.1.1 接地型力覚提示デバイス

PHANTOM [18] は最も代表的なデスクトップ型ハプティックインタフェースである．ユーザは指ぬきに入差し指を通すことによって使用する．PHANTOM は指先の動きをトラッキングし，動的に指先に力を働きかけることにより，固体物質にインタラクションしているかのような錯覚を与える，また，尖筆を指ぬきの代わりに使うこともでき，尖筆の先端で仮想物体の表面をなぞることで物体を触知覚できる．ユーザは PHANTOM を用いることで仮想物体の形状だけでなく，表面の摩擦や弾力や硬さも知覚することが可能となる．

PHANTOM はシンプルな機構をしており、モータとエンコーダと指の間で力を伝達する。ユーザの指先の三次元座標がエンコーダによってトラッキングされ、モータが三次元の力をコントロールしてユーザに伝える。モータからのトルクはアルミニウムの結合部に巻かれたケーブルによって伝えられる。結合部の先には3自由度を持った指ぬきジンバルがあり、ジンバルの回転軸が一点でまとめられているため、トルクがかからず純粋な力だけが加わる。これにより快適な方位で PHANTOM を使用することができる。さらに重要なことは、ユーザの指先が仮想環境では摩擦のない球体で表されるため、仮想環境での衝突やインタラクションの力が簡単に計算できる。特徴的なデザインとして3つのうち2つのモータが結合部で平衡を取るべく動くことで静的に釣り合っていることも挙げられる。ハプティックインタフェースにおいて重要な基準は3つ存在する。作業領域ではデバイスに妨げられることなく freespace であると知覚されるべきこと、物体の硬さを表現するために十分な力が加わること、ユーザが制御不可能ほど大きな力を加えないことの3つである。PHANTOM ではこれらの3つの基準をバランスよく取り入れている。摩擦力や慣性力は  $0.1 \sim 0.2\text{N}$  程度に抑え、ユーザはほとんど知覚しないで済む。ユーザが硬いと感じるよりも強い力を加えることも可能で、それでいて危険なほどの力は加わらないようになっている。

PHANTOM の応用例としては、遠隔地の仮想環境での操作、特に物理的な強さや器用さ、感覚を利用する場合に役立つと期待されている。また、医療分野では触覚の重要性が高いため実際に利用されている例もある(図 2.1)。例えば、触診のトレーニングや歯の治療のトレーニングに AR と PHANTOM を組み合わせるといった試みがなされている [19][20]。PHANTOM ではその構造上、主に圧覚を提示しており、トラッキングと力覚フィードバックにより物体の形状、硬さ、表面の摩擦を知覚することができると考えられる。一方で、指の表面の部位に応じて細かく力を加えることが困難なので触覚や痛覚は再現しづらいと考えられ、さらに、温度覚である温覚と冷覚には対応していない。また、サイズはデスクトップサイズに限定されているため、仮想物体の大きさの限度もデスクトップサイズに限定されてしまう。

SPIDAR [21] は糸を使って力覚フィードバックを行うストリングベース型インタフェースである。ユーザは糸でつながれた指キャップに指を入れて操作する。糸の長さの変化で指先の三次元位置を測定し、糸の張力によって指先に力覚フィードバックを与える。SPIDAR は 1989 年に最初の型が開発されたが、様々な用途に対応できるよう SPIDAR の改良型が次々に開発された。SPIDAR はデスクトップサイズの立方体で構成されている。立方体の角に DC モータと滑車とエンコーダと糸が設置されており、立方体の中央には糸でつなが



図 2.1 PHANTOM

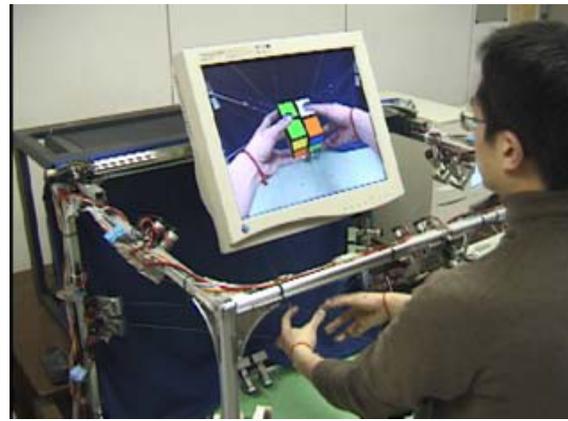


図 2.2 SPIDAR-8

れた指キャップが備え付けられている。エンコーダはモータの回転をトラッキングし、滑車の表面には指と滑車をつなぐために糸が巻き付けられている。また、糸をまっすぐ張ってユーザの指先に従うために各モータには微小の電流が流れている。モータとエンコーダはコンピュータにつながれていて、手の動きは糸の長さの変化によって検出する。指先が仮想物体に衝突したと検知した時、モータが各糸の張力をコントロールすることで適切な力覚フィードバックを与えることができる。また、立方体内ならばどこでも3次元の力覚フィードバックを与えることができる。初期のSPIDARでは片手の一本の指にしか対応していなかったが、研究が進むにつれ、両手の8本の指に対応したSPIDAR-8が開発された。両手複数の指を使えるようになったことで、仮想物体を掴む、握る、操作するといった動作が可能となっている。また、重さも知覚できるようになり、SPIDAR-8の実験例としては仮想のルービックキューブを操作する程度が可能となっている(図2.2)。また、デスクトップサイズだけでなく、ユーザの全身が立方体に入るほど大きなサイズのBig-SPIDARが開発され、ユーザは仮想環境に飛び込むような感覚を得ることができるようになった。SPIDARの特徴は3つある。1つ目は用途に応じて様々な大きさ、種類のSPIDARを選択可能であること。2つ目はストリングベース技術により、指先の位置の測定と力覚フィードバックを同時に行うことが可能であること。3つ目は糸を使ったインタフェースのため、ユーザの視界を妨げることなく利用可能なことである。SPIDARはPHANTOMと同様に主に圧覚を提示できるが、触覚、温度覚、痛覚については提示出来ていない。また、正確な力覚フィードバックのためには糸に直接接触することが許されないため、手の動きに制限が加えられるといった課題もある。

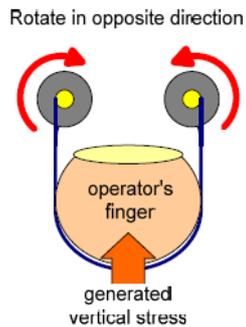


図 2.3 Gravity Grabber

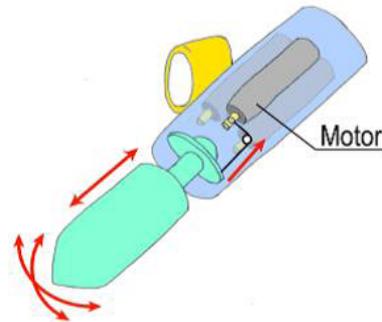
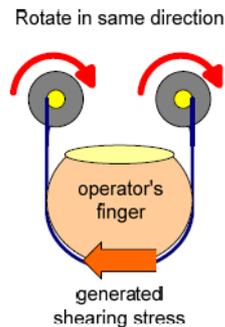


図 2.4 Pen de Touch

接地型デバイスは圧覚を中心とした高精度の触覚提示が可能となっているが、持ち運びが出来ないためユーザが自由に動き回るような AR 環境下での使用は想定されていない。また、触覚提示部位も指先に限定されている。次節で携帯可能な非接地型力覚提示デバイスについて述べる。

### 2.1.2 非接地型力覚提示デバイス

Gravity Grabber [22] は指先に装着するハプティックインタフェースであり、その特徴的な点として、仮想物体の質量を知覚することができる。物体を持ったときに指先に働く垂直力とせん断力に基づく皮膚感覚を再現することで、重量感覚を提示している。Gravity Grabber の機構は、二つのモータとベルトを用いており、二つのモータを逆位相に回転させると垂直力が発生し、同位相に回転させるとせん断力が発生する仕組みになっている (図 2.3)。垂直力の最大は一指あたり 16.1N となっている。安全のためベルトの過度の巻き取りや押し出しが発生したときは出力が停止するようになっている。また、モータによってベルトを巻きとる際に数十ミリ秒の時間遅れが生じる。SIGGRAPH2007 およびインタラクティブ東京 2007 において実演展示を行っており、実態の箱の中に仮想のボールが入っていくという動的な質量提示に成功した [23]。Gravity Grabber はポータブルなインタフェースでありながら、仮想物体の重さや箱の中の仮想物体を知覚する程度の圧覚を提示できる。しかし、適切に提示できる質量はおよそ 10g から 200g に限られている。また、ベルトの構造上、垂直力とせん断力の 2 次元の力しか加えることができない。さらに、精度としては誤差が 20% 程度観測された。これはデバイス自体の重さが 45g あることに起因すると考えられている。

Pen de Touch [7] は仮想物体に触った力を提示するポータブルハプティックインタフェースであり、ペン型のデバイスを介して様々な物体に触った感覚を再現することが可能である。ユーザは Pen de Touch を持って自由に空間中で手を動かすことによって仮想物体にペンで触れるような感覚を得られる。Pen de Touch の機構はペン先と根元に分かれている(図 2.4)。ペンの根元にはモータが組み込まれていて、モータによってペン先が動くようになっている。モータは3つ組み込まれており、3次元の力覚フィードバックを与えることができる。このデバイスを用いて仮想物体をつつくと物体の硬さを感じることができるが、 $0.6\text{N/mm}$  程度までしか再現できていない。また、3つのモータを用いて垂直方向にかかる最大の力は  $14.7\text{N}$  である [24]。

非設置型力覚提示デバイスは、接地型デバイスに比べて十分な精度で提示することは難しい。しかし、持ち運びが可能であるため、AR 環境下での使用に適していると考えられる。次節で非設置型で力覚ではなく触覚を提示するデバイスについて述べる。

### 2.1.3 非設置型触覚提示デバイス

Haptic Ring [6] は、指先に装着した小型デバイスで、ワイヤを引っ張り、指腹部に力覚フィードバックを与えるものである(図 2.5)。このデバイスを装着することで、力覚フィードバックを感じながら仮想のぬいぐるみに触れることが可能となり、ユーザの触れ方によってぬいぐるみのリアクションが変化する。ユーザが仮想物体に触れるだけでなく、仮想物体がユーザに触れられるという新しいインタラクションの形を実現しているが、触覚を提示可能な場所は指先に限定されている。

Mass of Roaches! [9] は、前腕に装着した振動モータによる触覚刺激と同一の位置に映像を提示することでユーザの触覚感覚を増幅させるデバイスである(図 2.6)。触覚提示にファントムセンセーションを利用することで、振動モータのない位置にも振動刺激を定位させた。視覚刺激を組み合わせることで、ファントムセンセーションで提示した振動刺激をより感じやすくなったという結果が得られた。また、視覚刺激として仮想のゴキブリを提示することで、振動刺激を与えなくともムズムズやカサカサといった触覚を感じさせることができるという知見も得られた。

高瀬ら [10] は、HMD と触覚グローブとスピーカを用いることで、手のひら上を動く仮想キャラクタの動きを視覚、触覚、聴覚で提示するシステムを構築した(図 2.7)。触覚グローブのアクチュエータには糸状に加工した形状記憶合金(SMA)を用いており、ファントムセンセーションや仮現運動を組み合わせることで触覚を提示する。マーカを利用した手

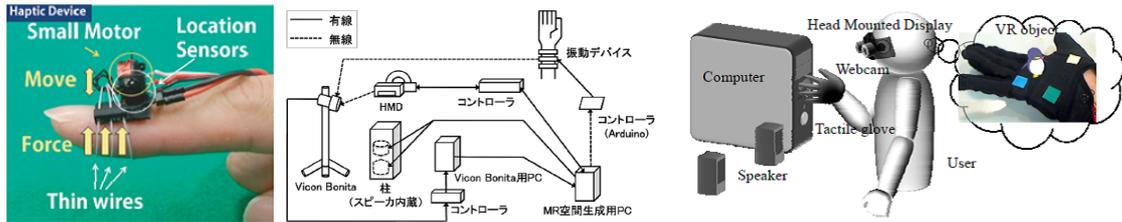


図 2.5 Haptic Ring    図 2.6 Mass of Roaches!    図 2.7 SMA による触覚提示システム

のひらの位置検出を行っており、手を傾けたり上下に動かしたりすることで仮想キャラクターが滑り落ちたり跳ね回ったりするというインタラクションも可能となっている。評価実験により、視聴覚に合わせて触覚を提示することで現実感が増強されるという知見が得られた。

非接地型デバイスはその使用目的によって提示する触覚は異なるが、仮想物体に触れたときの触覚を表す場合は振動刺激を用いることが多い [8][9][10]。筆者らの研究グループでも、軽量、安全、安価という理由で振動モータを用いている。振動モータを用いたシステム構成の場合には、振動モータが装着されていない触覚提示する方法としてファントムセンセーションを利用している研究も多く見られる。次節でファントムセンセーションについての関連研究を述べる。

## 2.2 ファントムセンセーション

ファントムセンセーション [12] とは、触知覚において、皮膚上の異なる 2 点を同時に刺激した際に、それらの間の 1 点に刺激が定位される現象であり (図 2.8)、この現象を利用することで、触覚を提示するすべての位置に振動モータを装着しなくても、少数のモータで広範囲に触覚を提示できる。刺激が定位される位置は刺激の強さの比で決定され、刺激の強い方に偏位する。また、2 個の振動モータ間に連続して均一な強さのファントムセンセーションを提示するためには、振動刺激の強度を対数的に変化させればよいことが示されている (図 2.9)。ただし、設置する部位や振動モータ間距離、振動モータの周波数などによって振動知覚は変化するため、ファントムセンセーションのための最適な振動制御は一意には決まっていない。例えば、ファントムセンセーションの知覚位置に関しては、振動刺激の強度を線形に変化させた方が精度が高いと報告されている [25][26]。また、ファントムセンセーションを用いた刺激提示は 1 個のみの振動モータ刺激に比べて知覚位置精度が低くなるという知見も報告されている [27]。

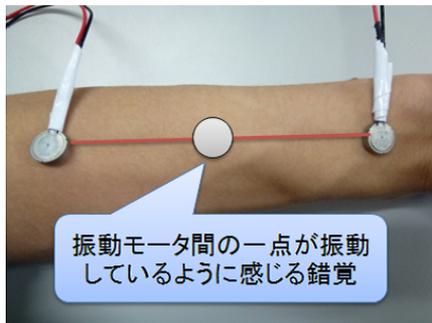


図 2.8 ファントムセンセーション

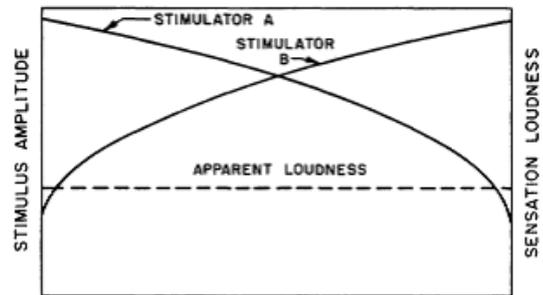


図 2.9 ファントムセンセーションの刺激強度

Israr ら [13] は、椅子の背もたれ部分に 12 個の振動モータを取り付け、ユーザが見ている映像に合わせて振動触覚を提示するためのアルゴリズムを研究した。二次元上での触覚の動きを滑らかにするためにファントムセンセーションと仮現運動を組み合わせ、かつ従来の制御とは異なる制御法を採用することでユーザへの触覚提示をより明快にした。しかし、提示できる動きが直線的な動きに限られるという課題を残している。

以上のようにファントムセンセーションを用いることで触覚提示に必要な振動モータ数を削減することは可能である。しかし、既存研究ではファントムセンセーションで提示可能な範囲は振動させる 2 個の振動モータの線分上に限られている。したがって二次元平面内での触覚提示を実現する場合には、振動モータなどのアクチュエータを提示範囲内を網羅するように多数設置しなければならないという問題がある [8][13][28][14]。この問題を解決するために筆者らは視覚と触覚のクロスモーダルに注目した。次節でクロスモーダルに関する研究について述べる。

### 2.3 視覚と触覚のクロスモーダル

クロスモーダル [29] とは複数の感覚を統合して一つの感覚を形成することである。例えば、視覚と触覚のクロスモーダル [30][31][32][33] や聴覚に関する刺激を同時に提示した場合のクロスモーダル感覚の研究が行われている [34][35]。

Craig [30] は、LED とオプタコンを用いることで指先に視覚運動刺激と触覚運動刺激を提示し (図 2.10)、視覚運動情報が触覚刺激の運動方向知覚にどのような影響があるかを研究した。実験結果より、指先に提示する上下方向の運動刺激を視覚刺激と触覚刺激が互いに逆方向になるように提示すると、触覚運動刺激の方向弁別率が低下するという知見が得

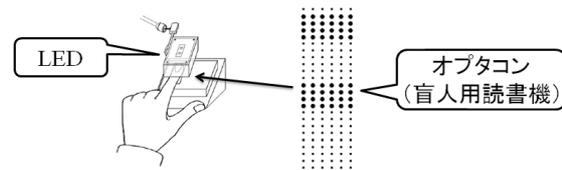


図 2.10 視触覚クロスモーダル実験構成

られた．同様に，視覚と聴覚に関しても運動方向が異なると聴覚運動刺激の方向弁別率が低下するという知見が得られた [34]．

視覚は他の感覚に比べて優位性を保持しているため，視覚刺激と触覚刺激を同時に提示することで，触覚刺激のみを提示した場合とは異なる感覚が知覚されと考えられる．クロスモーダルを AR における触覚に応用した例として物体の硬さ [36][37] や材質 [38] を視覚刺激によって変化させる研究がある．

佐々木ら [36] は，物体の硬さを識別する際に，視覚の影響が固有感覚および触覚と比べて，識別率にどの程度寄与しているのかを調査した．その結果，視覚情報を改変して提示することによって硬さの識別率を向上できることと視覚情報改変による硬さ強調効果は視覚的変位の改変量に比例することを報告した．

栗林ら [39] は，背面に移動可能な錘を付けた 18cm × 25cm の LCD の手持型デバイスを用いて，重心移動による左右の手への力覚提示における知覚特性の変化を調査した．重心移動に合わせて，3cm の円形を提示したが，力覚のみを提示した場合と比較して結果に大きな差はなかった．しかし，提示する物体の形状や輝度，背景とのコントラスト等を変化させることで知覚特性に影響を与える可能性はあるとしている．

以上のように視覚と触覚のクロスモーダルにより，視覚刺激と触覚刺激を同時に提示することで触覚に変化が現れるという知見が多くの研究で報告されている．筆者らもこの現象に注目して，視覚刺激の提示位置によって触覚位置に変化を与えることを考えている．視覚提示方向に触覚位置を転移させることが出来れば，ファントムセンセーションの提示範囲を従来の 2 個のモータの線分上だけでなく線分外への二次元平面拡張が可能になると言える．

## 2.4 本研究の位置づけ

本研究では，広範囲高精度な触覚提示システムの実現のために，振動モータを用いた触覚刺激を元にファントムセンセーションと視触覚クロスモーダルを併用する．既存研究の

手法では、ファントムセンセーションの提示位置は振動モータ間の線分上に限られていたが、本研究では視覚刺激を利用することで触覚提示範囲を振動モータ間の線分外へも拡大させる手法を提案する。次章では、本研究の提案手法について述べる。

## 第3章 提案手法

### 3.1 仮説

人間の前腕における二点弁別閾は 40mm 程度であり [40]，また空間解像力が 20mm 程度である [15] ことより，触覚刺激の提示のみでは触覚提示位置を数 mm 単位で正確に知覚することは難しいと言える [27]．したがって触覚刺激と視覚刺激を同時に提示した場合は，視覚刺激の影響を受けて触覚位置が変化する可能性が高いと考えられる．以上の仮定に基づいて筆者らは以下の仮説を設定した．(1) 視覚刺激と触覚刺激を同じ位置に提示することにより触覚刺激の提示位置を正確に知覚しやすくなる．(2) 視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示すると触覚位置は視覚提示位置方向に転移する (図 3.1)．ただし，視覚提示位置と触覚提示位置間の距離はある一定値以下とする．

### 3.2 視覚刺激を利用した触覚提示手法の提案

筆者らの仮説に基づいた前腕での触覚提示手法を以下に示す．(1) 視覚刺激と触覚刺激を同時に提示する．(2) 視覚刺激と触覚刺激の提示位置は 20mm 以下とする．この手法に基づいて刺激提示するとユーザは視覚提示位置が振動していると錯覚する可能性が高い．視

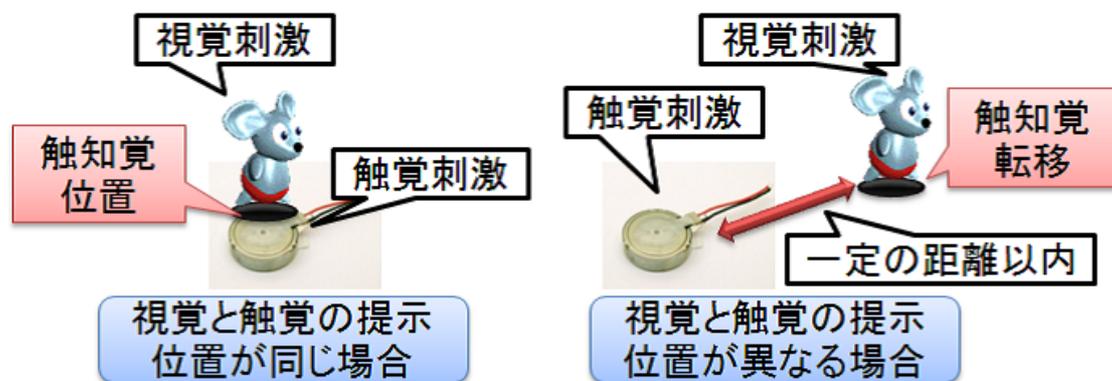


図 3.1 触覚位置の転移

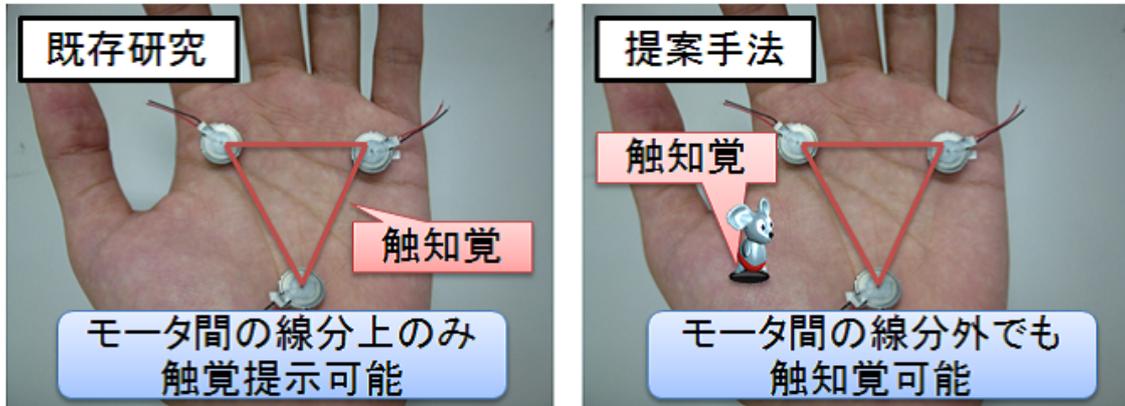


図 3.2 提案手法

覚提示位置と触覚提示位置の距離を 20mm 以下としたことは前腕の空間解像力が 20mm 程度であることに起因する．仮説の正当性を検証するために行った実験については次章で述べる．触覚刺激は振動モータによる振動刺激とし，視覚刺激はカメラ映像に仮想物体を合成して提示する．この提案手法を用いることでファントムセンセーションを用いただけでは提示出来ないと考えられていたモータ間の線分外の位置にも触覚提示が可能となる (図 3.2) ．

### 3.3 システム構成

振動モータには，直径約 10mm の扁平型小型振動モータを用いる．周波数はパチニ小体の発火特性を考慮して，最も振動を感じやすい 200Hz で振動させる [12][40]．使用する振動モータ数を削減するために，振動モータ間の触覚提示にはファントムセンセーションを用いる．モータ間の距離はファントムセンセーションが生起される距離とする．既存研究によれば，ファントムセンセーションはおよそ 10cm 程度離れたモータ間でも生起されるが [12]，筆者らが予備実験を行った結果，および他の既存研究 [9][25] を参考にモータ間は 4-5cm 程度の距離以内に設置する．カメラと振動モータを用いた場合の全体のシステム構成を図 3.3 に，HMD を用いた場合のシステム処理の流れを図 3.4 に示す．カメラによって ARmarker を映し，ARToolKit [3] を用いることによって，仮想物体を重畳表示させる．仮想物体の現実世界での位置は ARToolKit 内で処理されている．本研究では，カメラ画像の表示に Processing-1.5 [41] を使い，ARToolKit として NyAR4Psg/1.1.4 [42] を利用した．Processing と Arduino でシリアル通信を行い，仮想物体の位置をもとに振動モータの電圧

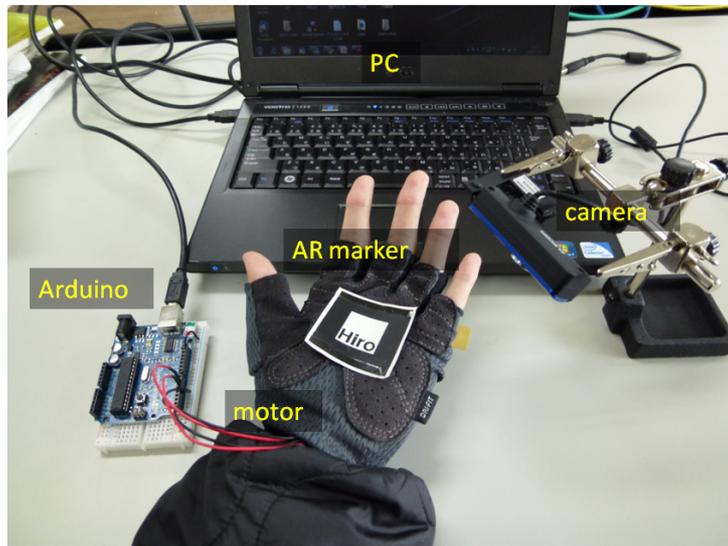


図 3.3 システム構成

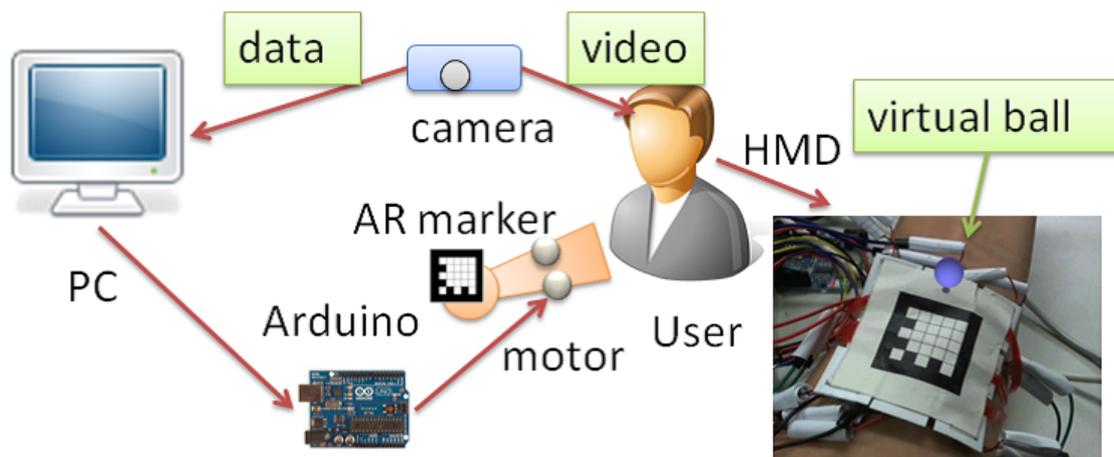


図 3.4 システム処理の流れ

を制御した。振動モータは、T.P.C 社製の円盤型小型振動モータ FM34F と Yatsugatake Club 社製の円盤型小型振動モータ VMT-003 を用いた。ともに直径 10mm 程度で、3V で約 200Hz の周波数で振動する。信号が送られてから振動するまでの遅延時間は約 100ms である。カメラは ELECOM 社製の UCAM-DLG200HBU と Logicool 社製の Webcam C910 を利用し、HMD は VUZIX 社製の Wrap920 を利用した。

## 第4章 評価実験

提案手法の評価として3種類の実験を行った。第一にヒトの上肢での触覚精度を実験によって調査した。この実験では振動モータによる触覚刺激を提示し、触覚刺激提示位置と振動知覚位置の距離を測定し、どの程度の誤差が生じるかを検証した。第二に、視覚刺激と触覚刺激を同時に提示した場合に、触覚知覚位置がどのように変化するかを検証した。視覚刺激提示位置と触覚刺激提示位置の距離が触覚知覚位置に与える影響について検証した。第三に、視覚提示位置と触覚提示位置を刺激間の距離を適切に保ちながら制御することで、実際に錯覚が生じるかについて調査した。提案手法によって使用する振動モータ数を減らしても、振動モータを多数配置した場合と同程度の範囲と精度を提示可能かを検証した。次節以降で、各実験の詳細について述べる。

### 4.1 実験 1:振動刺激による触覚知覚位置の精度評価

#### 4.1.1 実験 1-1:振動モータ 1 個による振動刺激の知覚位置精度

##### 実験 1-1:実験目的と内容

前腕と手のひらにおける振動知覚精度を検証する。図 4.1 に実験風景を示す。被験者の利き腕ではない方の前腕中央内側に 9 個の振動モータを 2cm 間隔で格子上に配置する (図 4.2)。振動モータは 5cm 四方のゴム板に固定されている。振動モータの電圧は Arduino を用いることによって PWM 制御する。振動モータ 9 個のうち 1 個をランダムで振動させる。各振動モータに与える電圧は 3.0V で、その際の振動数は約 200Hz となる。振動モータによる触覚刺激のみを提示して、震えている振動モータを正確に知覚した正答率を測定することにより触覚知覚の精度を検証する。被験者は HMD を通して自分の腕を見ながら震えていると感じた振動位置を利き手に持ったマウスで画面上をクリックすることで回答し、正答率を測定する。HMD には図 4.3 のように選択肢が 9 個提示され振動知覚位置を回答する。回答後は図 4.4 のように触覚提示位置がアイコンによって提示される。振動モータは被験者が回答するまで 1 秒間隔で振動と停止を繰り返し、回答後は次にランダムで選ばれた

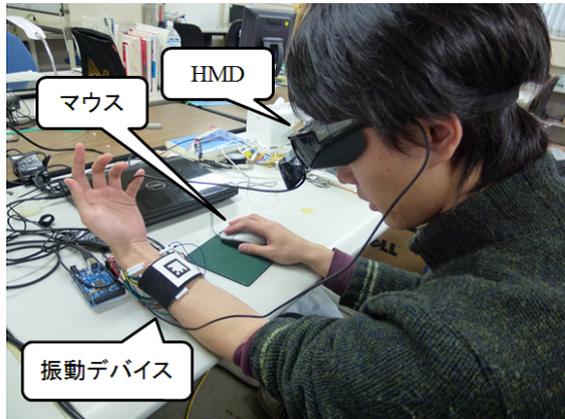


図 4.1 実験風景

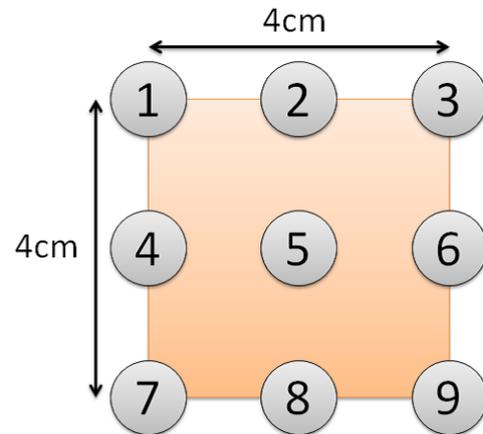


図 4.2 振動モータの配置図

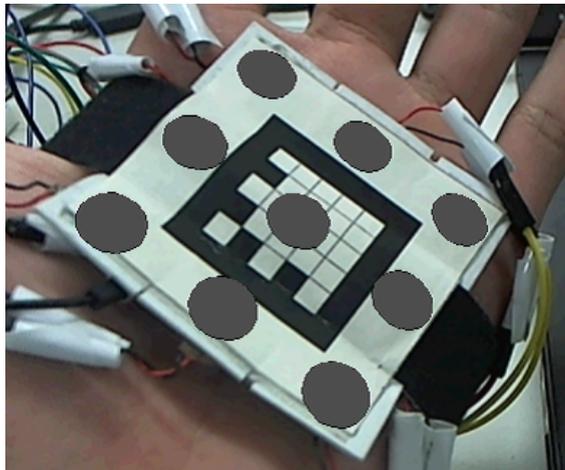


図 4.3 回答画面

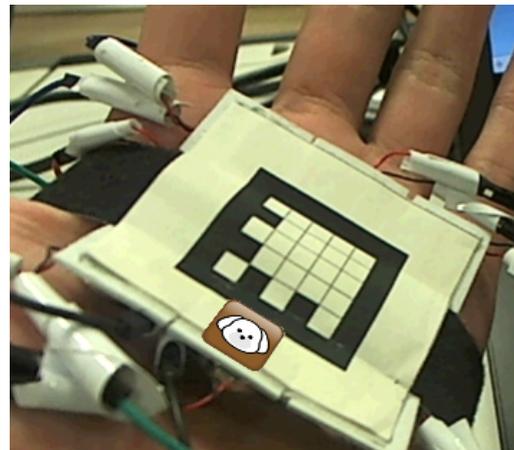


図 4.4 正解提示画面

モータが同様に1秒間隔で振動する．被験者は24歳から37歳の7名(男性6名女性1名)で6名は右利きで1名は左利きである．試行回数は100回とする．次に同様の実験を左手の手のひらで行う．条件は前腕とすべて同じとする．

#### 実験 1-1: 実験結果と考察

前腕と手のひらでの正答率測定の結果を図4.5, 4.6に示す．横軸の振動モータの番号は図4.2に対応しており, 縦軸は正答率を表している．前腕においては, 中央部の振動モータ位置(4,5,6)は正答率が60%と高く, 手首側の振動モータ位置(1,2,3)は正答率が20-30%と

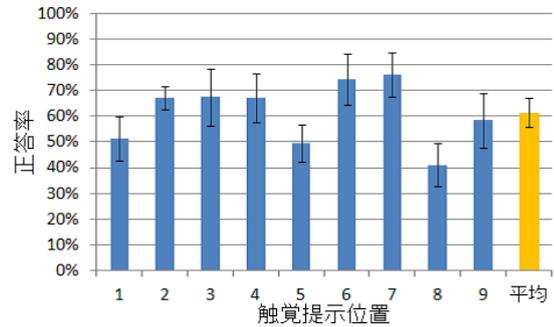
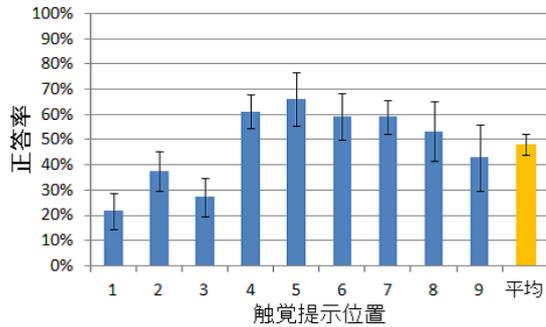


図 4.5 実験 1-1 の結果：前腕の触知覚精度

図 4.6 実験 1-1 の結果：手のひらの触知覚精度

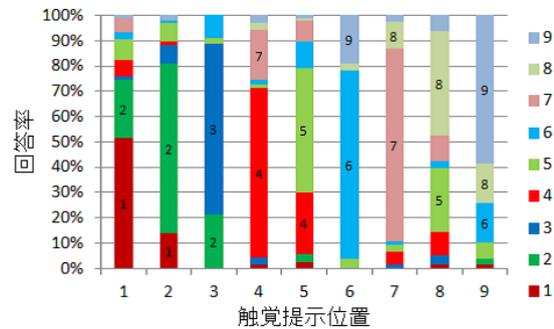
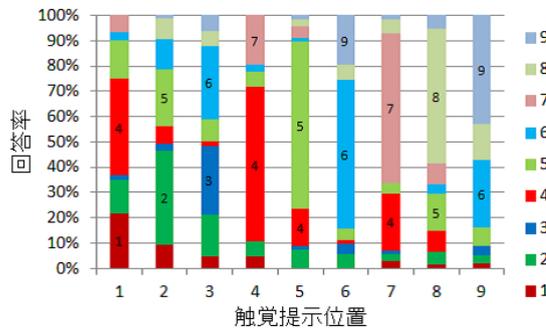


図 4.7 実験 1-1 の結果：前腕の回答率

図 4.8 実験 1-1 の結果：手のひらの回答率

低くなっている．全体の平均正答率は約 50%である．一方，手のひらにおいては，全体的に高い正答率を示しており，特に小指の付け根付近の 3 の位置や親指の付け根付近の 7 の位置では 70%を超える正答率となっている．全体の平均正答率は約 60%となっており，前腕よりも高い値である．これは前腕よりも手のひらの方が空間分解能が高いことに起因すると考えられる [15]．手のひらと前腕での正答率に有意差があるかを調べるために片側 t 検定を行ったところ， $t=-1.82, p<0.05$  となり，有意水準 5%で有意差があった．また，各触覚提示位置における回答位置の割合について示したものが図 4.7 および図 4.8 である．誤答位置の内，最も割合が高かった位置についてについて表 4.1, 4.2 にまとめて示している．各触覚提示位置における最も確率が高い誤答位置を示している．前腕では，y 軸方向 (1-4-7 の方向) に間違える傾向が見られる．一方，手のひらでは指の付け根とそれ以外で誤答関係がないことから，指の付け根とそれ以外では振動の感じ方が大きく異なると言える．

表 4.1 触覚提示位置と誤答位置：前腕

触覚提示位置	誤答位置	誤答率 [%]
1	4	38
2	5	23
3	6	29
4	7	19
5	4	15
6	9	20
7	4	23
8	5	15
9	6	27

表 4.2 触覚提示位置と誤答位置：手のひら

触覚提示位置	誤答位置	誤答率 [%]
1	2	23
2	1	14
3	2	21
4	7	20
5	4	24
6	9	19
7	8	11
8	5	26
9	6	16

#### 4.1.2 実験 1-2:視覚刺激の有無による触知覚精度の変化

##### 実験 1-2:実験目的と内容

モータ間線分上で触覚刺激のみを提示した場合と視覚刺激と触覚刺激を同位置に提示した場合にユーザがどの程度正確に触覚提示位置を知覚できるかを検証する。実験システム構成を図 4.9 に示す。被験者の利き腕ではない方の前腕部に 2 個の扁平型の小型振動モータ (FM34F) を 40mm 間隔で設置する。振動モータの直径は約 10mm であり、電圧 3.0V を印加すると周波数約 200Hz で振動し、信号が送られてから振動するまでの遅延時間は約 100ms である。振動モータはサポータによって前腕に固定されている。振動モータ設置部位をカメラで撮影し、被験者は PC モニタ上の自分の腕を見ながら振動したと知覚した位置を利き手に持ったマウスでクリックして回答し、その回答位置を触知覚位置とする。被験者は 23 歳から 37 歳の 7 名 (男性 5 名, 女性 2 名) で 6 名は右利きで 1 名は左利きである。

最初に触覚刺激のみを提示した場合の触知覚精度を測定する。触覚提示位置は 2 個のモータを結ぶ線分上に 5 箇所設定する。左側の振動モータからの距離を基準に 0mm から 40mm まで 10mm 間隔で触覚提示位置を設定し、それぞれの位置に応じた電圧を両端の振動モータに加える。各提示位置と電圧の関係は表 4.3 の通りである。触覚提示位置は 5 箇所の中からランダムで選択され、被験者が触知覚位置を回答するまで同じ強さで振動し続ける。振動モータによる触覚提示位置と被験者が震えていると感じた触知覚位置の距離を測定する。試行回数は 50 回とする。ただし、被験者には振動モータの正確な位置や触覚提示位置に関する情報は伝えない。

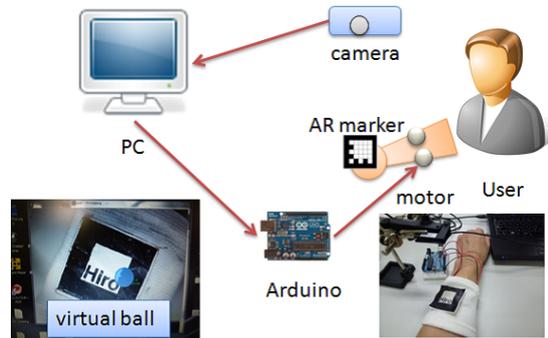


図 4.9 実験システム構成

表 4.3 触覚提示位置と印加電圧

触覚提示位置 [mm]	左モータ電圧 [V]	右モータ電圧 [V]
0	3.0	0
10	2.75	2.25
20	2.5	2.5
30	2.25	2.75
40	0	3.0

次に視覚刺激と触覚刺激を同位置に提示した場合の触覚精度を測定する．触覚提示位置は表 4.3 の通りであり，さらに同じ位置に半径 5mm の仮想ボールを提示する．仮想ボールの提示には ARToolKit [3] を用いる．その他の条件は前の実験と同じである．前の実験と同様に触覚提示位置と触覚位置の距離を測定する．試行回数は 50 回とする．ただし，被験者には視覚刺激と触覚刺激が同位置に提示することは伝えない．

#### 実験 1-2: 実験結果と考察

触覚刺激のみを提示した場合と視覚刺激と触覚刺激を同位置に提示した場合の実験結果を図 4.10 に示す．触覚提示位置 20mm, 40mm のときに，触覚刺激のみ提示した場合では触覚提示位置と触覚位置の間に 10mm 程度の誤差が生じていたが，視覚刺激を加えることで誤差が 5mm 以下に減少した．触覚提示位置と触覚位置間の距離に有意差があるかどうかを調べるために両側 t 検定を行ったところ，触覚提示位置 20mm, 40mm でそれぞれ  $t=4.00, p<0.01$ ,  $t=3.40, p<0.01$  となり有意水準 1% で有意差が認められた．その他の触覚提示位置では有意差が認められなかったが，すべての触覚提示位置において触覚提示位置

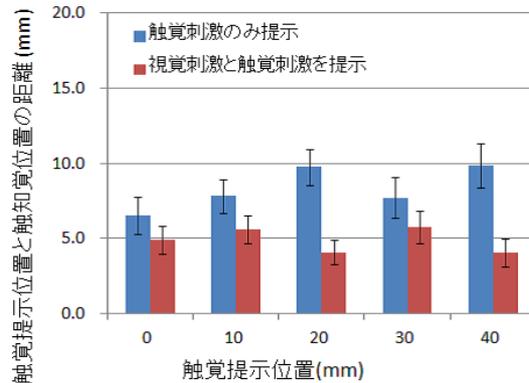


図 4.10 実験 1-2 の結果

と触知覚位置の距離は小さくなった。したがって、視覚刺激と触覚刺激を同位置に提示することで触知覚精度を向上させることができると考えられる。

#### 4.1.3 実験 1-3:二次元平面上の触知覚精度

##### 実験 1-3:実験目的と内容

図 4.1 に実験風景を示す。被験者の利き腕ではない方の前腕中央内側に 9 個の振動モータを 20mm 間隔で格子状に配置する (図 4.2)。振動モータの電圧は Arduino を用いることによって PWM 制御する。同時に振動するモータ数は 1 個、または 2 個とする。振動モータによる触覚刺激のみを提示して、触覚提示位置と触知覚位置の距離を測定することにより触知覚の精度を検証する。被験者は 26 歳から 37 歳の男性 4 名であり、3 名は右利きで 1 名は左利きである。触覚提示パターンは振動モータを 1 個のみ振動させた場合の 9 通りと振動モータを 2 個選択して振動させた場合の 36 通りの計 45 通りとし、振動するモータはランダムに決定する。触覚提示位置は、振動モータ 1 個が振動している場合はその振動モータの位置とし、2 個が振動している場合は 2 個の振動モータの中間の位置とする [12]。各振動モータに与える電圧は 3V で、その際の振動数は約 200Hz となる。被験者は HMD を通して自分の腕を見ながら震えていると感じた振動位置を利き手に持ったマウスで画面上をクリックすることで回答し、その回答位置を触知覚位置とする。1 回ごとに触知覚位置と触覚提示位置の距離を測定する。振動モータは被験者が回答するまで 1 秒間隔で振動と停止を繰り返す、回答後は次にランダムで選ばれたモータが同様に 1 秒間隔で振動する。試行回数は 500 回とする。

### 実験 1-3: 実験結果と考察

触覚提示位置と触知覚位置の差について被験者ごとにデータを分析した。例として、図 4.11, 図 4.12 に振動モータ 1 個を振動させた時の被験者 A, B の振動知覚位置を示している。図の赤い点が振動モータ位置を示しており、各番号に対応した青い点はその時の振動知覚位置を示している。グラフの一目盛りは 5mm 相当である。振動知覚位置は個人ごとに異なるが、全ての被験者において x 軸よりも y 軸方向への広がりが小さいという傾向が見られた。図 4.13 に被験者 5 名の実験 1 の結果を示す。振動モータ 1 個を振動させた場合、20mm 間隔の振動モータ 2 個を振動させた場合、40mm 間隔の振動モータ 2 個を振動させた場合、触覚提示パターン 45 通りすべてを合計した場合に分けてデータを抽出し、触覚提示位置と触知覚位置の距離の平均値を縦軸に示している。被験者ごとに各パターンにおける触覚提示位置と触知覚位置の距離の有意差を調べるため分散分析を行った。被験者 A, B, C, E の 4 名では有意差 5% で有意差がなく、被験者 D は有意差 1% で有意差がなかった。したがって、どの被験者においても振動モータの選択パターンによって触覚提示位置と触知覚位置の距離が大きく変わるということはなく、どの場合でも平均的に 15mm から 20mm 程度ずれて知覚されるということがわかった。このことから、触覚刺激のみで意図した位置を触知覚させようとしても 15mm 程度の誤差が生じると言える。また、触覚提示位置と触知覚位置の距離を軸ごとに比較した場合を図 4.14 に示す。x 軸方向の距離と y 軸方向の距離で有意差があるかどうかを t 検定で分析したところ、被験者 A, B, C, E の 4 名では有意差 1% で有意差があった。したがって、前腕における触知覚精度は、縦方向への誤差が大きくなるという傾向が見られた。これは、前腕の神経が縦方向に伸びて分布していることに起因すると考えられる。

## 4.2 実験 2: 視覚提示位置と触覚提示位置と触知覚位置の関係

### 4.2.1 実験 2-1: 視覚提示位置を触知覚させるための適切な視覚提示位置と触覚提示位置の距離

#### 実験 2-1: 実験目的と内容

視覚刺激位置方向へ触知覚位置を転移させることが可能な視覚提示位置と触覚提示位置の距離を検証する。被験者は 24 歳から 26 歳の男性 4 名であり、3 名が右利きで 1 名が左利きである。使用する振動モータや触覚提示位置や被験者の回答方法は実験 1-3 と同様であ

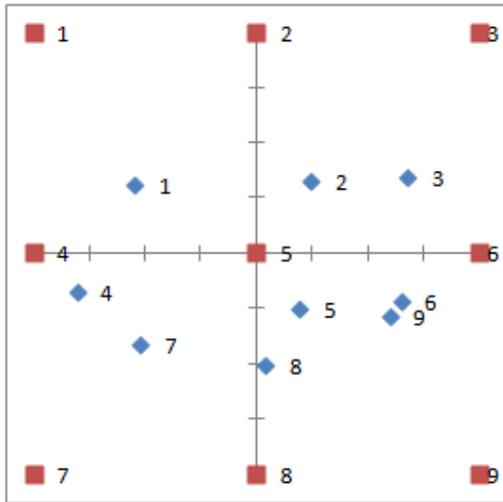


図 4.11 被験者 A の結果

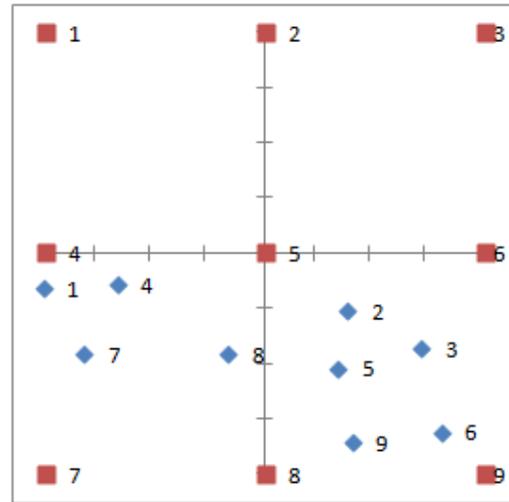


図 4.12 被験者 B の結果

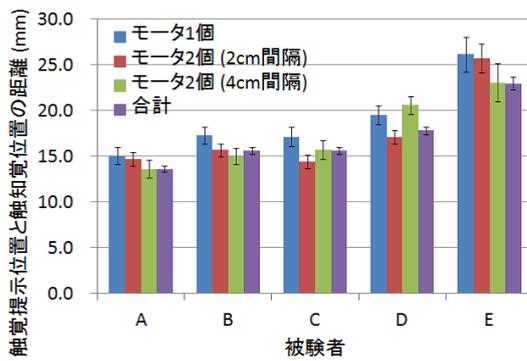


図 4.13 実験 1-3 の結果：触知覚精度

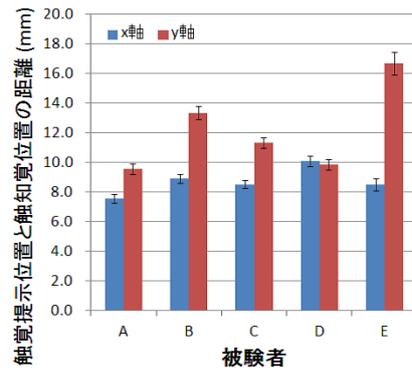


図 4.14 実験 1-3 の結果：軸ごとの比較

る (図 4.1) . さらに , 触覚提示に合わせて視覚刺激として半径 5mm の青い仮想ボールを提示する . 仮想ボールは高さ 1cm で 1 秒間隔で跳ねており , 視覚提示位置は図 4.2 の 1 から 9 の 9 箇所とした . 視覚提示位置と触覚提示位置はそれぞれ無関係にランダムで選ばれる . 被験者にはそれぞれの提示位置関係について伝えていない . 仮想ボールは被験者が回答するまで同じ位置で跳ね , 回答後は次の提示位置がランダムで選ばれる . 視覚提示位置と触覚提示位置の距離とその時の視覚提示位置と触覚位置の距離 , 触覚提示位置と触覚位置の距離を測定する . 試行回数は 500 回とする .

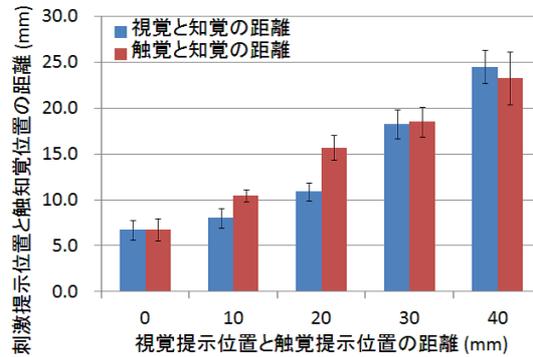


図 4.15 実験 2-1 の結果：刺激提示位置と触知覚位置の距離

#### 実験 2-1: 実験結果と考察

図 4.15 に視覚刺激と触覚刺激それぞれの提示位置と触知覚位置の距離を示す。視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 0mm, 10mm, 20mm, 30mm, 40mm の場合の測定データを抽出し、それぞれの場合の視覚提示位置と触知覚位置の平均距離、触覚提示位置と触知覚位置の平均距離を縦軸で示している。測定結果より、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 20mm 以下の場合には、触覚提示位置よりも視覚提示位置に近い場所を触知覚していることがわかった。視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 20mm の場合に視覚提示位置と触知覚位置の距離と触覚提示位置と触知覚位置の距離に有意な差があるかどうかを調べるために t 検定を行ったところ、 $t=3.34, p<0.01$  となり有意水準 1% で有意差があった。さらに、視覚提示位置と触知覚位置の距離を被験者ごとに分析した結果を図 4.16 に、触覚提示位置と触知覚位置の関係を図 4.17 に示す。測定結果より、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 20mm 以下の場合ならば、誤差 15mm 以下の精度で視覚提示位置を触知覚させることが可能であると考えられる。各被験者において、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 20mm の場合の精度が実験 1 の場合に比べて有意に高いことを調べるために、それぞれの提示位置と触知覚位置の距離を比較して t 検定を行ったところ、被験者 A は  $t=2.30, p<0.05$ 、被験者 B は  $t=2.76, p<0.05$ 、被験者 C は  $t=6.34, p<0.05$ 、被験者 D は  $t=10.04, p<0.05$  となり、有意水準 5% で有意差があると言えた。したがって、触覚刺激のみを提示した場合 (誤差 15mm) よりも高精度で視覚刺激位置を触知覚させたい場合は、視覚提示位置と触覚提示位置の距離は 20mm 以下が望ましいと言える。

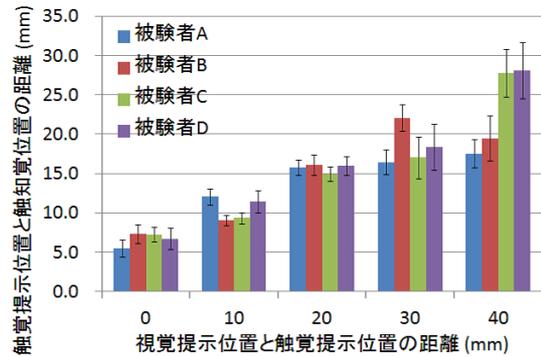
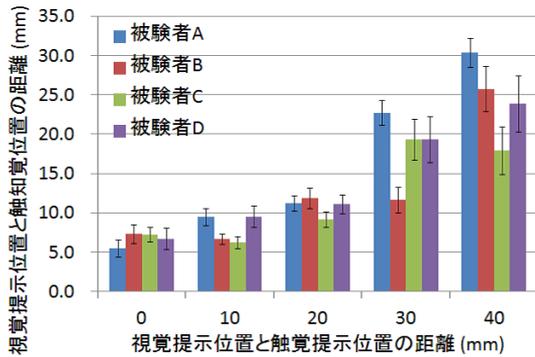


図 4.16 実験 2-1 の結果：視覚提示位置と触覚提示位置との距離

図 4.17 実験 2-1 の結果：触覚提示位置と触覚提示位置との距離

#### 4.2.2 実験 2-2:視覚刺激位置と触覚刺激位置の移動方向が触覚に与える影響

##### 実験 2-2:実験目的と内容

視覚刺激と触覚刺激の提示位置が異なる場合に、刺激の移動方向が触覚位置に与える影響を検証する。実験システム構成は実験 1-2 と同様に図 4.9 の通りであり、利き腕ではない前腕に 40mm 間隔で 2 個の振動モータを設置した。半径 5mm の仮想ボールによる視覚提示位置と振動モータによる触覚提示位置を異なる位置に提示し、振動したと知覚した位置を被験者に回答させる。触覚提示位置は実験 1-2 と同様に表 4.3 の通りである。視覚提示位置は 40mm 間隔で置かれた 2 個の振動モータ間の線分上とし、両端の振動モータ位置を含めて 5mm 間隔で 9 箇所設定する。視覚提示位置と触覚提示位置はランダムで決定され、被験者が回答するまで同じ強さで提示し続ける。この時、視覚提示位置と触覚提示位置の距離は最小で 0mm、最大で 40mm となる。N-1 回目から N 回目にかけて刺激提示位置が動く方向を移動方向と定義し(図 4.18)、視覚刺激の移動方向と触覚刺激の移動方向が同じ場合と異なる場合に分ける。それぞれの場合における視覚提示位置と触覚位置の距離と触覚提示位置と触覚位置の距離を測定する。被験者は 23 歳から 37 歳の 7 名(男性 5 名、女性 2 名)であり、6 名が右利きで 1 名が左利きである。試行回数は 100 回とする。ただし、被験者には視覚提示位置と触覚提示位置が必ずしも一致しないことを伝える。

##### 実験 2-2:実験結果と考察

実験結果のうち、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 0mm から 30mm の場合のデータを抽出した。実験結果を視覚刺激の移動方向と触覚刺激の移動方向が同じ場合(図 4.19)

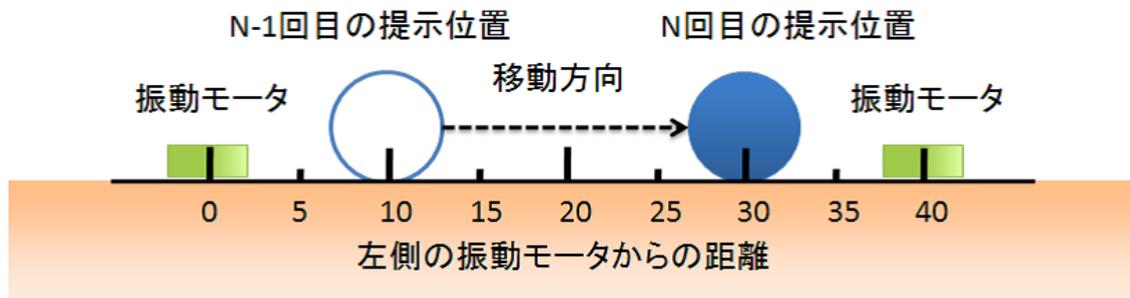


図 4.18 移動方向の定義

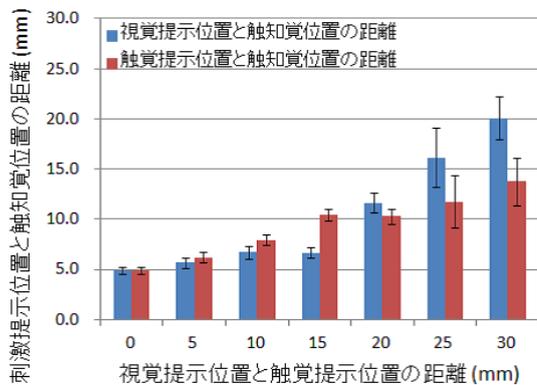


図 4.19 実験 2-2 の結果：移動方向同じ

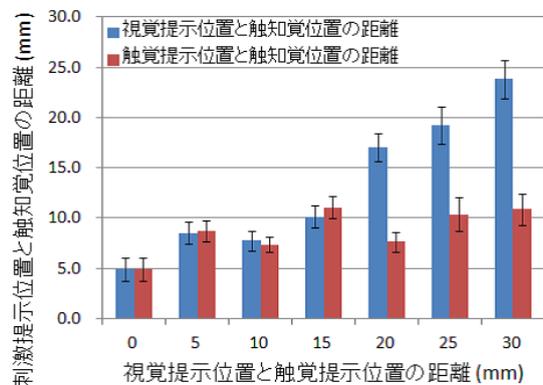


図 4.20 実験 2-2 の結果：移動方向異なる

と異なる場合 (図 4.20) に分けて示した。どちらの場合も視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 15mm 以下の場合には視覚提示位置付近を触覚する傾向が見られるが、20mm 以上になると視覚提示位置よりも触覚提示付近を回答する傾向があることがわかった。したがって、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 20mm 以下の場合に視覚刺激が触覚位置に影響を与えると考えられる。一方、視覚刺激と触覚刺激の移動方向が同じ場合は異なる場合に比べて視覚提示位置付近を回答する傾向が強いことがわかった。それぞれの場合において視覚提示位置と触覚位置の距離に有意差があるかどうかを調べるために両側 t 検定を行ったところ、刺激提示距離が 5mm のとき  $t=-2.37, p<0.05$  となり有意水準 5% で有意差があり、刺激提示距離が 15mm, 20mm のときそれぞれ  $t=-2.78, p<0.01$ ,  $t=-3.16, p<0.01$  となり有意水準 1% で有意差があった。その他の刺激提示距離では有意差は見られなかったが、すべての刺激提示距離において視覚刺激と触覚刺激の移動方向を統一した方が視覚提示位置と触覚位置の距離が小さくなった。したがって、視覚刺激と触覚刺激の移動方向を統一することによって視覚刺激の影響力が強まったと考えられる。

### 4.2.3 実験 2-3:仮想物体の動きが触知覚に与える影響

#### 実験 2-3:実験目的と内容

仮想物体の動きの違いによって触知覚位置に変化があるかを検証する。実験システムの構成は図 4.9 の通りであり、触覚提示位置は表 4.3 の通りである。実験 2-2 と同様に視覚提示位置は 2 個の振動モータ間の線分上とし、5mm 間隔で 9 箇所設定した。被験者は振動知覚位置を回答する。被験者が回答するまで視覚刺激と触覚刺激の提示位置は固定される。実験 2-2 では仮想ボールは視覚提示位置に静止していたが、実験 2-3 では仮想ボールは被験者が回答するまで視覚提示位置上で高さ 10mm を 1 秒間隔で跳ねる。被験者が回答すると、次の提示位置へ放物線を描いて移動する。放物線の高さの最大値は移動距離の半分とする。実験 2-2 のときの視覚提示位置と触知覚位置の距離と実験 2-3 のときの視覚提示位置と触知覚位置の距離を比較して、仮想物体の動きを変えたことで触知覚位置に変化が表れるかを検証する。被験者は 4 名 (23 歳から 37 歳の男性 4 名) で、3 名が右利きで 1 名が左利きである。試行回数は 100 回とする。ただし、被験者には視覚提示位置と触覚提示位置が必ずしも一致しないことを伝える。

#### 実験 2-3:実験結果と考察

実験結果のうち、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 0mm から 30mm の場合のデータを抽出した。被験者 4 名の実験 2-2 と実験 2-3 における視覚提示位置と触知覚位置の距離の結果を図 4.21 に示す。0mm から 30mm までのすべての視覚提示位置と触覚提示位置の距離において、仮想ボールを跳ねさせて提示した場合の方が静止して提示した場合に比べて視覚提示位置と触知覚位置の距離が小さくなった。それぞれの距離で有意差があるかどうかを調べるために両側 t 検定を行ったところ、視覚提示位置と触覚提示位置の距離 0mm ( $t=3.39, p<0.01$ )、5mm ( $t=6.59, p<0.01$ )、10mm ( $t=3.86, p<0.01$ )、15mm ( $t=2.84, p<0.01$ )、20mm ( $t=4.77, p<0.01$ )、25mm ( $t=4.25, p<0.01$ ) となり有意水準 1% で有意差があり、視覚提示位置と触覚提示位置の距離 30mm のとき  $t=2.23, p<0.05$  となり有意水準 5% で有意差があった。したがって、仮想ボールを跳ねさせた方が視覚刺激の影響力が増加して視覚提示位置を触知覚しやすくなると考えられる。視覚刺激の影響力が増加した要因として以下の 2 つが考えられる。1 つ目の要因は、軌跡表示による振動刺激位置の予測である。仮想ボールが放物線の軌跡を描いて移動すると、被験者は振動を知覚する前から次の振動位置を予測するというのが無意識に行われていると考えられる。このため、軌跡表示によって示された位置付近に触覚提示がなされると、視覚刺激と触覚刺激が多少異なった位置に提示されていても視覚提示位

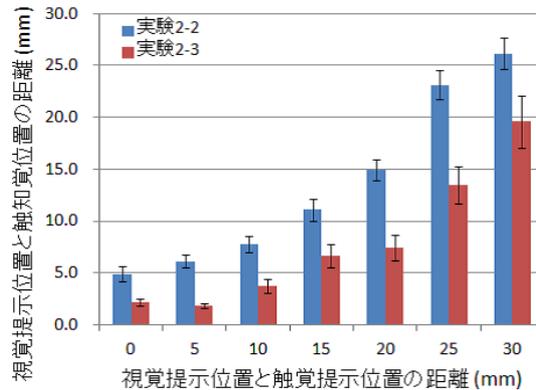


図 4.21 実験 2-3 の結果

置が震えていると錯覚するのではないかと考えられる。2つ目の要因は、ボールが跳ねるという視覚刺激と振動モータによる振動刺激の間で違和感が少ないことである。実験後の被験者の感想としてボールを跳ねさせた場合の方が刺激位置がわかりやすいという意見があったことから、ボールを静止させるよりも跳ねさせた方が違和感が少ないと考えられる。このように視覚刺激としての仮想物体の提示方法によって触覚に与える影響力は変化し、視覚刺激と触覚刺激の間の違和感が少ないほど視覚の影響力が増加すると言える。

#### 4.2.4 実験 2-4:手のひらにおける視覚提示位置と触覚提示位置の関係性

##### 実験 2-4:実験目的と内容

手のひらにおいても前腕と同様に、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 20mm 以内ならば視覚提示位置を触覚するかを検証する。9個のモータを図 4.2 のように左手の手のひらに設置する。使用する振動モータや触覚提示位置や被験者の回答方法は実験 1-1 と同様であり、触覚提示に合わせて視覚刺激として半径 5mm の青い仮想ボールを提示する。仮想ボールの提示位置は図 4.2 の 1 から 9 とし、視覚提示位置と触覚提示位置の距離は 0mm または 20mm とする。各触覚提示位置における視覚提示位置は実験 1-1 の結果から誤答率が高いものを抽出して設定する (表 4.4)。表 24set の各番号は図 4.2 に対応しており、1 列目は触覚提示位置を表している。各触覚提示位置における視覚提示位置として、視覚提示位置と触覚提示位置が一致している場合の視覚提示位置を 2 列目に、触覚提示位置から x 軸方向に 20mm ずれた場合の視覚提示位置を 3 列目に、触覚提示位置から y 軸方向に 20mm ずれた場合の視覚提示位置を 4 列目に表記している。例えば、触覚提示位置が 1 の場合、視

表 4.4 実験 2-4:触覚提示位置と視覚提示位置

触覚提示位置	視覚提示位置 (一致)	視覚提示位置 (x 軸 20mm 差)	視覚提示位置 (y 軸 20mm 差)
1	1	2	4
2	2	1	5
3	3	2	6
4	4	5	7
5	5	4	8
6	6	5	9
7	7	8	4
8	8	7	5
9	9	8	6

覚提示位置と触覚提示位置が一致している場合として仮想ボールを1の位置に提示し、x軸方向に20mmずれた場合として2の位置に提示し、y軸方向にずれた場合として4の位置に提示する。各触覚提示位置および視覚提示位置における被験者の触知覚位置を測定する。被験者は24歳から37歳の6名(男性5名、女性1名)であり5名が右利きで1名が左利きである。試行回数は200回とする。

#### 実験 2-4:実験結果と考察

実験 2-4 の結果を図 4.22, 図 4.23, 図 4.24 に示す。横軸の振動モータの番号は図 4.2 に対応している。縦軸が回答割合を表している。視覚提示位置と触覚提示位置が一致している場合は、回答位置は触覚提示位置(視覚提示位置)に一意に決まる傾向があった。一方、視覚提示位置と触覚提示位置をx軸もしくはy軸方向に20mm離して提示すると、回答位置は主に視覚提示位置または触覚提示位置に二分される傾向があった。

視覚提示位置と触知覚位置の距離について、視覚提示位置と触覚提示位置が一致した場合を図 4.25, 視覚提示位置と触覚提示位置がx軸方向に20mmずれている場合と視覚提示位置と触覚提示位置がy軸方向にずれている場合を図 4.26 に示す。図 4.26 の棒グラフ内の数字は視覚提示位置を表している。視覚提示位置と触覚提示位置が一致している場合は80-100%の高い確率で触知覚位置も一致している。一方、x軸方向またはy軸方向に20mmの距離をおいて仮想ボールを提示した場合、40-80%の確率で視覚提示位置を触知覚していることがわかった。触覚提示位置によって視覚提示位置と触知覚位置の一致率にばらつき

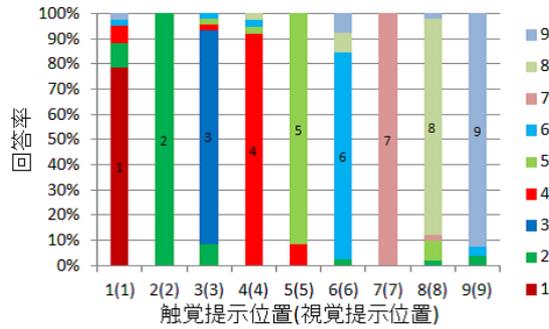


図 4.22 実験 2-4 の結果：触覚提示位置と視覚提示位置が一致した場合

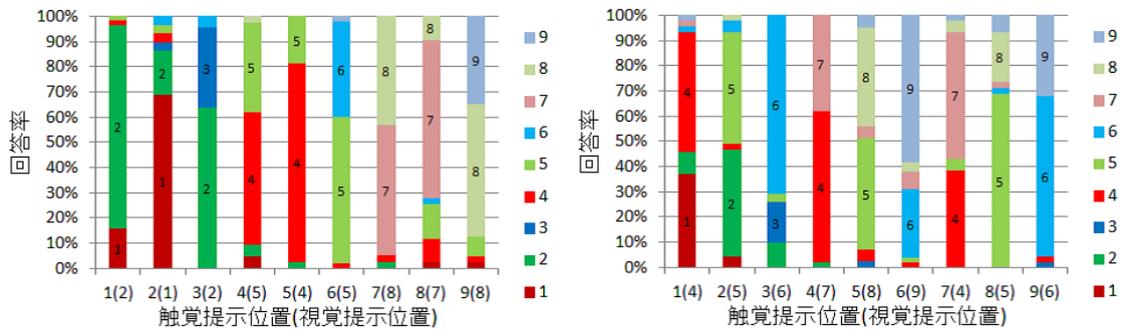


図 4.23 実験 2-4 の結果：x 軸方向 20mm 差 図 4.24 実験 2-4 の結果：y 軸方向 20mm 差

があり、また、x 軸と y 軸のどちらの方向にずれているかという視覚提示位置と触覚提示位置の位置関係によっても一致率が変化することがわかった。位置関係によって一致率に有意な差が生じるかを調査するために片側 t 検定を行ったところ、触覚提示位置 1 のとき  $t=1.93, p<0.05$ 、触覚提示位置 5 のとき  $t=2.43, p<0.05$  となり有意水準 5% で有意差があった。その他の位置では有意差は見られなかった。触覚提示位置 1, 5, 8 は視覚提示位置と触覚位置の一致率が高く、実験 1-1 で誤答率が高い位置ほど視覚刺激の影響を受けて触覚している傾向があった。したがって、視覚提示位置を触覚させる場合は、触覚が混同しやすい位置や方向に視覚刺激を提示することが効果的だと考えられる。

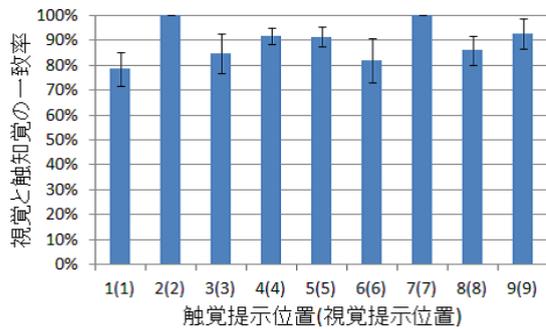


図 4.25 視覚提示位置と触知覚位置の一致率 (距離 0mm)

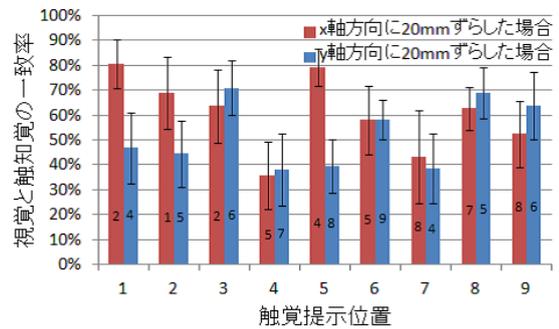


図 4.26 視覚提示位置と触知覚位置の一致率 (距離 20mm)

### 4.3 実験 3:提案手法による触知覚位置の精度評価

#### 4.3.1 実験 3-1:前腕における触覚提示

##### 実験 3-1:実験目的と内容

実験 2 の結果を踏まえて、使用する振動モータを制限しても十分な精度で触覚提示が可能かを検証する。まず、実験 1-3,2-1 と同様に 9 個の振動モータを使って触覚提示する。さらに、触覚提示位置に合わせて半径 5mm の仮想ボールを提示する。このときの視覚提示位置と触知覚位置の距離を測定する。回答方法は実験 1-3,2-1 と同様である。次に、同様の視覚提示に合わせて使用する振動モータを図 4.2 の 4,5,6 に限定して触覚提示を行う。それぞれの視覚提示位置における振動モータの選び方は、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が最小となるように選択する。このときの視覚提示位置と触知覚位置の距離を測定する。視覚提示位置と触覚提示位置の距離は縦方向のみに生じ、最大で 20mm である。被験者は 6 名(男性 3 名、女性 3 名)であり 5 名は右利きで 1 名は左利きである。試行回数は 200 回ずつとする。

##### 実験 3-1:実験結果と考察

図 4.27 に実験 3-1 の結果を示す。振動モータを 9 個使用した場合と振動モータを 3 個使用した場合での視覚提示位置と触知覚位置の距離を縦軸で示す。各被験者ともモータ 3 個の場合に、触覚提示位置よりも視覚提示位置付近を回答している傾向が見られた。また、モータ数が 9 個の場合と同程度の誤差で視覚提示位置を回答している傾向が見られた。それぞれの被験者についてモータ数の違いによる有意差があるかについて t 検定を行ったと

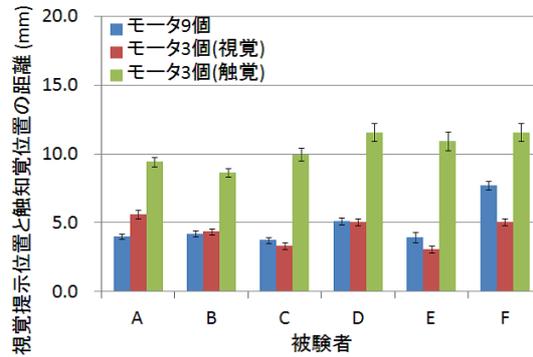


図 4.27 実験 3 の結果

ころ，被験者 A は  $t=-4.30, p<0.05$  となり有意差があったが，その他の被験者では有意差が見られなかったか 3 個の場合の方が誤差が小さくなっていた．したがって，振動モータが 3 個の場合でも意図した位置に十分な精度で触知覚させることが可能であると考えられる．

#### 4.3.2 実験 3-2:手のひらにおける触覚提示

##### 実験 3-2:実験目的と内容

手のひらにおいても前腕と同様に提案手法によって触覚提示が可能かを検証する．四隅に振動モータが配置された 5cm 四方のゴム板の四隅に振動モータを設置して，被験者の左手の手のひらに装着する．4 個の振動モータのうち 2 個だけを使用して触覚提示を行う．振動モータ間は 40mm とし，触覚提示パターンは表 4.3 に示すとおりである．半径 5mm の仮想ボールを実験 2-3 と同様の放物線の軌道付きで跳ねさせて提示する．提示範囲は振動モータで囲まれた 4cm 四方内とする．視覚提示位置と触覚提示位置の距離が最小となるように振動モータを制御する．被験者は HMD を通して自分の手のひらを見て，視覚提示位置と触知覚位置の間に違和感があった場合にマウスをクリックする (図 4.1)．被験者は 24 歳から 37 歳の男性 6 名とする．試行回数は 100 回とする．

##### 実験 3-2:実験結果と考察

図 4.28,4.29,4.30,4.31 にそれぞれ手のひら上部，下部，右部，左部の 2 個の振動モータを使用した場合の結果を示す．各グラフの赤い点が使用したモータの設置位置，青い点が被験者が違和感を感じてクリックした位置となっている．1 目盛りは 5mm 相当である．各場合において視覚提示位置と触覚提示位置が約 20mm 以上離れると違和感を感じる事が

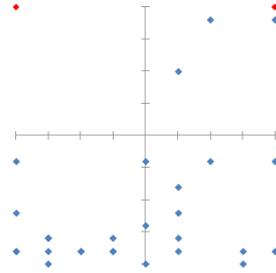


図 4.28 実験 3-2 の結果：手のひら上部

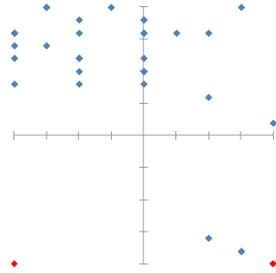


図 4.29 実験 3-2 の結果：手のひら下部

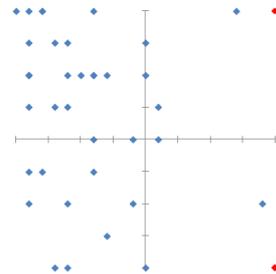


図 4.30 実験 3-2 の結果：手のひら右部

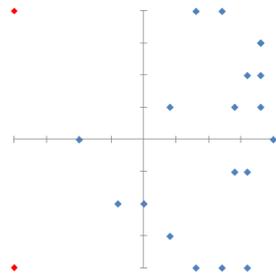


図 4.31 実験 3-2 の結果：手のひら左部

多いことがわかった。一方，視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 20mm 以内ならば 2 個のモータの線分外でも違和感を感じる事が少ないと考えられる。したがって，手のひらでも前腕と同様に視覚と触覚の刺激提示位置が 20mm 以内となるように提示することで，視覚提示位置を触知覚させることが可能であると言える。

## 第5章 考察

本章では，実験環境に関する考察，実験結果に関する考察および実験結果を踏まえた上での応用例を考察する．

### 5.1 実験環境についての考察

本節では，予備実験の結果から得られた項目について述べ，評価実験の方法の妥当性を議論する．

#### 5.1.1 振動モータの使用数について

本論文の実験では，同時に使用する振動モータ数を1個または2個に限定している．同時に3個以上の振動モータを使用して触覚提示する既存研究もあるが [43]，筆者らが予備実験を行ったところ3個以上の振動モータを使用してファントムセンセーションを提示しようとしても振動知覚位置が一点と感じられにくいという結果が得られた．また，手のひら上で4cm四方の頂点に配置した4個の振動モータを同時に振動させたところ，どこが震えているかわからないと回答した．これらの結果より，一点を触知覚させる場合は同時に使用する振動モータの個数は最大でも2個とした．2個の振動モータでは触覚提示位置は2個のモータの線分上に限られてしまうが，ファントムセンセーションを二次元に拡張することは視覚提示位置を触知覚させることで可能とする．

#### 5.1.2 仮想物体の提示個数について

仮想ボールを同時に2個提示した場合，触知覚にどのような影響を与えるかを予備実験によって確かめた．手のひら上で4cm四方の頂点に配置した4個の振動モータを使用し，さらに2個の半径5mmの仮想ボールを触覚提示位置に合わせて提示させたところ，同時に4個の振動モータが振動した場合，10人中9人がどこが震えているかわからないと回答した．このように2個以上の仮想物体を提示する場合に3個以上の振動モータが同時に震

えてしまうように提示してしまうと触知覚位置が一点に定まりにくいと言える．本論文で行った実験では3個以上の振動モータが同時に震えることがないようにするために仮想物体は1個の場合に限定した．

### 5.1.3 触知覚位置の回答方法について

本論文の実験における触知覚位置の回答位置方法として，触知覚位置をマウスでクリックする方法とレーザーポインタで指し示す方法を試した．レーザーポインタで指し示す方法は，輝度と色から画像認識によって位置を測定したが，マウスクリックに比べて誤差が数 mm 程度発生するため本実験には適さないと判断した．ただし，マウスクリックよりも直感的に指し示すことができるという意見があったため，誤差の問題を解決できればレーザーポインタで指し示す方法も取り入れたいと考えている．

### 5.1.4 触覚提示部位について

本論文の実験では，触覚提示位置として主に前腕を選択した．前腕を採用した理由としては，(1) 視覚刺激を利用するため自分の目で見える部位であること，(2) ファントムセンセーションを利用するため広範囲において触知覚の性質が大きく変化しない部位であること，(3) 振動モータを設置するため起伏が激しくない部位であること，という3つの理由が挙げられる．既存研究においてもファントムセンセーションを提示する部位として前腕を採用しているものは多い [9][25][27]．また，想定した視覚触覚融合アプリケーション (図 1.1) を実現するために手のひらについても検証した．

## 5.2 上肢における適切な振動モータ配置

前腕と手のひらそれぞれにおいて，部位によって触知覚精度が異なる．本節では，前腕および手のひらにおいて最も高精度な触覚提示が可能となる適切な振動モータ配置について議論する．

### 5.2.1 触知覚精度の個人差について

本論文のすべての実験において，個人差による触知覚精度の違いが見られた．例えば，第4章の実験 1-1 における前腕の触知覚精度の正答率では，最高で 69%，最低で 41% という結果になり約 30% 近い差が生じた．手のひらの触知覚精度の正答率は，最高で 85%，最

低で46%となり約40%近い差が生じた。また、実験2-4においても、例えば視覚提示位置が5で触覚提示位置が6のときに、視覚提示位置と触覚提示位置の一致率が100%の被験者と0%の被験者がいた。このように触覚精度や視覚刺激の影響の仕方は個人によって異なる。これは、腕の太さ、手のひらの大きさ、皮膚の厚さや視力などが個人ごとに異なるからであると考えられる。一方、触覚精度の高さと視覚刺激の影響力について、実験1-3と実験2-1の結果を比較検討したが、本実験では触覚精度の高さと視覚刺激の影響力については相関関係が見られなかった。ただし、視覚提示位置と触覚提示位置の間に違和感を生じさせないためには、触覚精度が高いユーザほど提案手法における視覚提示位置と触覚提示位置の距離は短くする必要があると考えられる。

### 5.2.2 触覚位置の傾向

触覚精度は個人差があるものの、触覚位置は一定の傾向が見られた。例えば、実験1-3より前腕の触覚位置はx軸方向に比べy軸方向には広がりが少なかった。また、実験1-1において、手のひら部分では触覚提示位置4,7は正答率が高く、触覚提示位置1,5は正答率が低いという傾向が過半数の被験者に見られた。このように被験者間で同様の傾向が見られる原因は、ヒトの神経配置が個人ごとに大きく変わらないからであると考えられる。

### 5.2.3 モータ配置例

第4章の実験1より、前腕においてはy軸方向よりもx軸方向の識別率が高かった。したがって、振動モータはx軸に密に設置し、y軸方向の触覚提示には視覚刺激を積極的に用いることが効果的であると考えられる。前腕のモータ配置例を図5.1に示す。x軸方向には、40mm間隔で2個の振動モータを配置する。2個の振動モータに等しい電圧を印加することで2個のモータの中間にファントムセンセーションが生起する。x軸方向においては、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が10mm以内となるように制御する。実験結果より、刺激間距離が10mm以内ならば高確率で視覚提示位置を触覚させることが可能である。一方、y軸方向は触覚の分解能が低いため、視覚の影響を受けやすい。よってy軸方向には最大20mmの距離まで視覚提示位置と触覚提示位置をずらすことを考える。したがって、y軸方向に振動モータを60mm間隔で配置する。中間地点のファントムセンセーションを組み合わせることで距離が20mm以内を保ちながら制御することが可能となる。

手のひらにおいては、実験結果より指の付け根付近の位置と中央から手首にかけての位置では触覚が異なることがわかった。したがって、手のひら上で触覚提示を実現する場

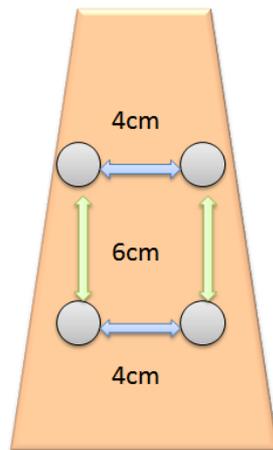


図 5.1 前腕におけるモータ配置例

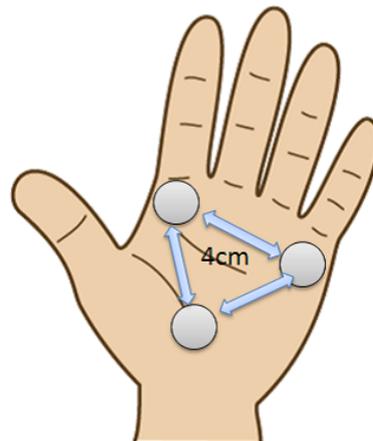


図 5.2 手のひらにおけるモータ配置例

合は、指の付け根とそれ以外の部分に最低 1 個ずつ必要だと考えられる。手のひらのモータ配置例を図 5.2 に示す。3 個の振動モータを 1 辺 4cm の正三角形の頂点上に配置する。実験 2-4 の結果より、視覚提示位置と触知覚位置を異なる位置に提示した場合に視覚提示位置と触知覚位置の一致率が高かった場所に振動モータを設置する。具体的には、触覚提示位置 1,3,8 の部分にあたる人差し指の付け根に 1 個、小指の付け根に 1 個、手のひら中央下付近に 1 個配置する。刺激提示を提示するときには視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 20mm 以内となるように制御することにより、視覚刺激で触知覚位置を制御可能となると考えられる。

### 5.3 アプリケーション例

本研究の提案手法を用いることが適切な条件としては、

1. 視覚を利用することが可能であること
2. 仮想物体との接触が主たる触覚であること

が挙げられる。視覚提示位置を触知覚させるという原理であるため、視認可能であることは必須の条件である。また、振動モータを利用する場合は、触覚を提示することは可能だが力覚を提示することが難しいため、仮想物体との接触を目的とするアプリケーションに向いている。振動刺激はボールが跳ねるような視覚刺激と組み合わせると違和感が少ないため、球技に関するアプリケーションには向いていると考えられる。例えば、AR テニス [44] や AR 卓球 [45] に提案手法を用いることでシンプルな構造のシステムで触覚を付加す

ることができる。また、AR ペットが前腕や手のひらを動き回るようなアプリケーションでも簡易な触覚提示方法として利用可能である。AR ペットのような生き物を表現する場合には、振動刺激による触覚だけではなく温度 [46][47] や手触り [38][48] を組み合わせた触覚提示を行うことでより没入感が増すアプリケーションになると考えられる。衣服や手袋に LilyPad Arduino [49] を縫いつけることで携帯可能なデバイスとしても使うことができる。

## 第6章 結論

### 6.1 結論

本研究では、仮想物体がユーザの体の上を自由に動きまわるときに仮想物体の位置に応じた触覚提示を実現することを目的としており、少数の振動モータと視覚刺激を利用して広範囲高精度な触覚提示システムの構築を目指した。本論文では前腕および手のひらにおいて、視覚刺激と触覚刺激を同じ位置に提示した場合、もしくは異なる位置に提示した場合に触覚位置に与える影響について述べた。前腕においては、触覚刺激のみを提示した場合は触覚提示位置と触覚位置に 15mm 程度の誤差が生じるという結果が得られた。手のひらは前腕に比べて触覚精度が高かったが、20mm 間隔で配置された振動モータの振動刺激の位置を正確に知覚することは難しいという結果が得られた。視覚刺激と触覚刺激を同時に同位置に提示した場合、触覚提示位置と触覚位置の距離が小さくなり、触覚刺激のみを提示する場合よりも精度の高い触覚提示が可能になるという知見が得られた。一方、視覚刺激と触覚刺激を異なる位置に提示する場合は、視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 20mm 以下の場合は視覚刺激の影響で視覚提示位置付近を触覚させることができるが、20mm 以上離れると視覚刺激の影響力が弱まり触覚提示位置付近を触覚するようになるという傾向が観測された。また、視覚刺激と触覚刺激の移動方向を統一することによって視覚刺激の影響力が強まるという傾向が見られた。さらに、仮想物体の動かし方によって視覚刺激の影響力は変化し、視覚刺激と触覚刺激の間の違和感が少ないほど視覚提示位置付近を触覚することがわかった。

以上の知見から視覚刺激は触覚に影響を与えていると言え、一定距離以内ならば視覚提示位置によって触覚位置を制御可能だと考えられる。実験結果より、前腕と手のひらにおいては視覚提示位置と触覚提示位置の距離が 20mm 以内になるように提示することで十分な精度が得られることがわかった。既存研究では触覚提示位置を振動モータ間の線分上に限定していたが、提案手法により線分外でも触覚提示が可能であることを示すことが出来た。これにより、一定の範囲内を触覚提示する場合に必要な振動モータ数を削減できると言える。例えば、4cm 四方程度の範囲ならば 2 個の振動モータを用いるだけでほとん

ど違和感を与えることなく触覚提示が可能であると考えられる。

## 6.2 今後の課題

今後の課題としては、提案手法の適用範囲の拡大と精度の向上が考えられる。適用範囲の拡大としては、上肢だけでなく他の部位においても同様な現象が起こりうるかを検証する必要がある。例えば、下半身の触覚は前腕や手のひらに比べて空間分解能が低いため [15]、提案手法を用いることで同数の振動モータでより広範囲を触覚提示可能であると考えられる。精度の向上としては、振動モータの制御をより精密に行うという方法が考えられる [50][51]。現在は電圧制御による周波数制御のみだが、振動モータ間でうなりが発生してしまうことがある。また、遅延が 100ms 程度生じてしまうため、数十 ms 単位での触覚提示が難しい。これらの問題を解決するための振動モータ制御について考えていきたい。さらに、個人差によって同じ部位でも触覚精度が異なるため、視覚提示位置と触覚提示位置の距離を厳密に定義することが難しいのが現状である。したがって、個人差を吸収するためのシステムとしてキャリブレーションを行う機能を実装するという課題が挙げられる。これらの課題を解決することでより広範囲高精度な触覚提示システムを実現できると考えられる。

## 謝辞

本研究および大学院修士課程2年間の生活においてご指導ご鞭撻していただいた東京大学の小川剛史准教授に深く感謝いたします。また、本研究を進めるにあたり多くの建設的な意見を与えてくださった東京大学の若原恭教授，中山雅哉准教授，関谷勇司准教授，妙中雄三助教，宮本大輔助教に心より感謝いたします。研究室での生活においては，山崎健生氏，山崎弘太郎氏をはじめ，多くの心優しい同期，先輩，後輩に恵まれ，大変充実した2年間を送ることができました。ここに感謝の意を表します。研究室外では，東京大学颯剣会の部員の方々とスポーツチャンバラを通じて適度な運動を行うことができ，また私生活でも大変お世話になり感謝しております。最後に，長い学生生活を支えてくださった両親，兄姉に深く深く心より感謝を致します。

## 発表文献

### 論文誌

1. 新島 有信 , 小川 剛史 . ”拡張現実感における視覚刺激位置が触知覚位置に与える影響の分析”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 (submitted).

### 国際会議

1. Arinobu Nijjima, Takefumi Ogawa. ”Influence Analysis of Visual Stimuli on Localization of Tactile Stimuli in Augmented Reality”, IEEE Virtual Reality Poster(Mar.2012).

### 国内会議 (査読あり)

1. 新島 有信 , 小川 剛史 . ”拡張現実感における視覚刺激と触覚刺激の提示位置の距離が触知覚位置に与える影響”, VR 学研報, Vol.16, No.CS-4, CSVC2011-54, pp.11-14 (Dec. 2011).

### 国内会議 (査読なし)

1. 新島 有信 , 小川 剛史 . ”拡張現実感における視覚刺激を利用した上肢への触覚提示手法に関する一考察”, 電子情報通信学会技術研究報告 (to appear).
2. 新島 有信 , 小川 剛史 . ”拡張現実感における仮想物体の動きが触知覚に与える影響に関する一考察”, VR 学研報, Vol.16, No.CS-1, CSVC2011-7, pp.37-42 (Apr. 2011).
3. 新島 有信 , 小川 剛史 . ”拡張現実感における触覚刺激に対する視覚刺激の影響に関する一考察”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.110, No.456, MVE2010-167, pp.195-200 (Mar. 2011).

## その他

1. 新島 有信, 小川 剛史. ”拡張現実感における視覚刺激を利用した触覚提示手法の提案と評価”, Programming Tools and Techniques, 口頭発表 (Apr. 2011).

## 受賞

1. 新島 有信, 小川 剛史. 優秀発表賞: ”拡張現実感における視覚刺激と触覚刺激の提示位置の距離が触覚位置に与える影響”, VR 学研報, Vol.16, No.CS-4, CSV2011-54, pp.11-14 (Dec. 2011).
2. 新島 有信, 小川 剛史. 優秀発表賞: ”拡張現実感における視覚刺激を利用した触覚提示手法の提案と評価”, 融合情報学コース輪講 ポスター発表 ( Jul. 2011 )

## 参考文献

- [1] Ronald T. Azuma. A survey of augmented reality. *Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 6, No. 4, pp. 355–385, 1997.
- [2] Feng Zhou, Henry Been-Lirn Duh, and Mark Billinghurst. Trends in augmented reality tracking, interaction and display: a review of ten years of ismar. *International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 193–202, 2008.
- [3] Hirokazu Kato and Mark Billinghurst. Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Augmented Reality*, 1999.
- [4] Hu Qing-xi, Liu Tao, and Yao Yuan. An easy system of spatial points collection based on artoolkit. In *World Congress on Computer Science and Information Engineering*, pp. 582–586, 2009.
- [5] Shang Ping Lee, Adrian David Cheok, Teh Keng Soon James, Goh Pae Lyn Debra, Chio Wen Jie, Wang Chuang, and Farzam Farbiz. A mobile pet wearable computer and mixed reality system for human-poultry interaction through the internet. *Personal and Ubiquitous Computing*, Vol. 10, No. 5, pp. 301–317, 2006.
- [6] Takefumi Aoki, Hironori Mitake, Danial Keoki, Shoichi Hasegawa, and Masako Sato. Wearable haptic device to present contact sensation based on cutaneous sensation using thin wire. In *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, pp. 115–122, 2009.
- [7] Sho Kamuro, Kouta Minamizawa, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. Pen de touch. In *ACM SIGGRAPH*, 2009.
- [8] Byung-Kuk Seo, Junyeoung Choi, Jae-Hyek Han, Hanhoon Park, and Jong-Il Park. One-handed interaction with augmented virtual objects on mobile devices. In *Pro-*

*ceedings of The 7th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*, 2008.

- [9] 森尚平, 杉本一平, 永坂貴浩, 村田龍吾, 山元明彦, 田村秀行. Mass of roaches! - 振動と視覚的演出の同期による mr アトラクションの演出 -. 第 15 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 398–401, 2010.
- [10] 高瀬裕史, 姜長安, 澤田秀之. 拡張現実空間における触感覚呈示による仮想キャラクタとのインタラクションシステム. 情報処理学会シンポジウム論文集, pp. 83–90, 2011.
- [11] 矢野博明, 廣瀬通孝, 小木哲朗, 田村善昭. 振動触覚グローブを用いた流れ場表現. 情報処理学会論文誌, pp. 414–421, 1999.
- [12] David S. Alles. Information transmission by phantom sensations. *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, Vol. 11, pp. 85–91, 1970.
- [13] Ali Israr and Ivan Poupyrev. Tactile brush: Drawing on skin with a tactile grid display. *CHI2011*, pp. 2019–2028, 2011.
- [14] Gi-Hun Yang, Moon sub Jin, Yeonsub Jin, and Sungchul Kang. T-mobile: Vibrotactile display pad with spatial and directional information for hand-held device. In *Intelligent Robots and Systems*, pp. 5245–5250, 2010.
- [15] Joseph C. Stevens and Kenneth K. Choo. Spatial acuity of the body surface over the life span. *Somatosensory and Motor Research*, Vol. 13, pp. 153–166, 1996.
- [16] 大山正, 今井省吾, 和氣典二, 菊地正 (編). 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック Part2. 誠信書房, 2007.
- [17] 岩村吉晃 (編). タッチ (神経心理学コレクション). 医学書院, 2001.
- [18] Thomas H. Massie and J. K. Salisbury. The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects. In *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 1994.
- [19] Phattanon Rhienmora, Kugamoorthy Gajananan, Peter Haddawy, Siriwan Suebnukarn, Matthew N. Dailey, Ekarin Supataratarn, and Poonam Shrestha. Haptic

- augmented reality dental trainer with automatic performance assessment. In *Proceedings of the 15th international conference on Intelligent user interfaces*, 2010.
- [20] Robert L. Williams II, Mayank Srivastava, John N. Howell, Robert R. Conatser, David C. Eland, Janet M. Burns, and Anthony G. Chila. The virtual haptic back for palpatory training. In *Proceedings of the 6th international conference on Multimodal interfaces*, 2004.
- [21] Makoto Sato. Development of string-based force display:spidar. In *The Eighth International Conference on Virtual Systems and Multi Media*, pp. 1034–1039, 2002.
- [22] Kouta Minamizawa, Souichiro Fukamachi, and Hiroyuki Kajimoto. Gravity grabber:wearable haptic display to present virtual mass sensation. In *ACM SIGGRAPH*, 2007.
- [23] 南澤孝太, 深町聡一郎, 梶本裕之, 川上直樹, 舘暲. バーチャルな物体の質量および内部ダイナミクスを提示する装着型触力覚ディスプレイ. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 1, pp. 15–23, 2008.
- [24] Sho Kamuro, Kouta Minamizawa, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. Ungrounded kinesthetic pen for haptic interaction with virtual environments. In *The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 436–441, 2009.
- [25] Lara Rahal, Jongeun Cha, Abdulmotaleb El Saddik, Julius Kammerl, and Eckehard Steinbachand. Investigating the influence of temporal intensity changes on apparent movement phenomenon. In *Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurements Systems*, pp. 310–313, 2009.
- [26] Jongman Seo and Seungmoon Choi. Initial study for creating linearly moving vibrotactile sensation on mobile device. In *IEEE Haptic Symposium*, pp. 67–70, 2010.
- [27] Ahmad Barghout, Jongeun Cha, Abdulmotaleb El Saddik, Julius Kammerl, and Eckehard Steinbach. Spatial resolution of vibrotactile perception on the human forearm when exploiting funneling illusion. In *Haptic Audio visual Environments and Games*, pp. 19–23, 2009.

- [28] Takafumi Asao, Hiroaki Hayashi, Masayoshi Hayashi, Kentaro Kotani, and Ken Horii. A study on fundamental information transmission characteristics of an air-jet driven tactile display. In *Proceedings of Human-Computer Interaction*, pp. 397–406, 2009.
- [29] Frank Biocca, Jin Kim, and Yung Choi. Visual touch in virtual environments: An exploratory study of presence, multimodal interfaces, and cross-modal sensory illusions. *Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 10, No. 3, pp. 247–265, 2001.
- [30] James C Craig. Visual motion interferes with tactile motion perception. *Perception*, Vol. 35, pp. 351–367, 2006.
- [31] Charles Spence, Francesco Pavani, and Jon Driver. Spatial constraints on visual-tactile cross-modal distractor congruency effects. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, Vol. 4, No. 2, pp. 148–169, 2004.
- [32] Francesco Pavani, Charles Spence, and Jon Driver. Visual capture of touch: Out-of-the-body experiences with rubber gloves. *PSYCHOLOGICAL SCIENCE*, Vol. 11, No. 5, pp. 353–359, 2000.
- [33] Anatole Lecuyer, Sabine Coquillart, and Abderrahmane Kheddar. Pseudo-haptic feedback : Can isometric input devices simulate force feedback? In *IEEE Virtual Reality*, pp. 83–90, 2000.
- [34] Salvador Soto-Faraco, Charles Spence, and Alan Kingstone. Congruency effects between auditory and tactile motion: Extending the phenomenon of cross-modal dynamic capture. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, Vol. 4, No. 2, pp. 208–217, 2004.
- [35] Lihan Chen and Xiaolin Zhou. Capture of intermodal visual/tactile apparent motion by moving and static sounds. *Seeing and Perceiving*, Vol. 24, No. 4, pp. 369–389, 2011.
- [36] 佐々木博, 藤田欣也. 力覚提示装置を用いた硬さ提示における視覚情報の寄与と改変効果に関する実験的検討. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 5, No. 1, pp. 795–802, 2000.

- [37] Yuichi Hirano, Asako Kimura, Fumihisa Shibata, and Hideyuki Tamura. Psychophysical influence of mixed-reality visual stimulation on sense of hardness. In *IEEE Virtual Reality*, pp. 51–54, 2011.
- [38] 家崎明子, 杉田明弘, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行. 複合現実型視覚刺激による触印象への影響. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 13, No. 2, pp. 129–139, 2008.
- [39] Hidenori Kuribayashi, Shoko Nakamura, and Yuichiro Kume. A hand-held display presenting visual and force information. In *Second Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 576–577, 2007.
- [40] 菊地正 (編). *感覚知覚心理学*. 朝倉書店, 2008.
- [41] Processing (<http://processing.org/>) (retrieved 2012.1.25).
- [42] NyARToolKit project (<http://nyatla.jp/nyartoolkit/wp/>) (retrieved 2012.1.25).
- [43] Shintaro Ueda, Masafumi Uchida, Akio Nozawa, and Hideto Ide. A tactile display using phantom sensation with apparent movement together. *Electronics and Communications in Japan*, Vol. 91, No. 12, pp. 29–38, 2008.
- [44] Anders Henrysson, Mark Billinghurst, and Mark Ollila. Ar tennis. In *ACM SIGGRAPH*, 2006.
- [45] Benjamin Knoerlein, Gabor Szekely, and Matthias Harders. Visuo-haptic collaborative augmented reality ping-pong. In *Proceedings of the international conference on Advances in computer entertainment technology*, pp. 91–94, 2007.
- [46] Gi-Hun Yang and Dong-Soo Kwon. Effect of temperature in perceiving tactile stimulus using a thermo-tactile display. In *International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 266–271, 2008.
- [47] 岩崎泰典, 江頭正和, 堀尾寛, 和田親宗. 触覚ディスプレイ開発のための冷覚知覚特性を考慮した仮現運動生成の刺激呈示法. 第15回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 664–667, 2010.

- [48] Masahiro Furukawa, Yuji Uema, Maki Sugimoto, and Masahiko Inami. Fur interface with bristling effect induced by vibration. In *Proceedings of the 1st Augmented Human International Conference*, 2010.
- [49] Leah Buechley, Mike Eisenberg, Jaime Catchen, and Ali Crockett. The lilypad arduino: using computational textiles to investigate engagement, aesthetics, and diversity in computer science education. In *Proceedings of the twenty-sixth annual SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 423–432, 2008.
- [50] Hiroshi Kato, Yuki Hashimoto, and Hiroyuki Kajimoto. Basic properties of phantom sensation for practical haptic applications. In *EuroHaptics*, 2010.
- [51] 丹羽真隆, 野間春生, 柳田康幸, 保坂憲一, Robert W. Lindeman. 安定した振動提示のためのフィードバック制御による振動子の振動状態制御. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 11, No. 1, pp. 59–68, 2006.