

博士論文

複数の Gestalt 要因による  
触覚ディスプレイの提示能力向上

小村 啓

2020 年 1 月

名古屋大学大学院  
情報学研究科 複雑系科学専攻



# 目次

概要	8
<b>1. 序論</b>	<b>13</b>
1.1 本論文の背景	13
1.2 ヒトの触覚機構	15
1.3 能動的触運動と受動的触運動	17
1.3.1 探索行為	17
1.3.2 能動触と受動触	18
1.3.3 ダイナミック型とスタティック型	20
1.3.4 空間的触知覚と大脳領域	21
1.4 触錯覚現象	23
1.4.1 Pseudo-Haptics (擬似触覚)	23
1.4.2 Thermal referral illusion (温度参照触錯)	24
1.4.3 Comb illusion (櫛触錯)	24
1.4.4 Phantom sensation (PhS; ファントムセンセーション)	25
1.4.5 Fishbone tactile illusion (FTI; フィッシュボーン触錯)	26
1.4.6 Velvet Hand Illusion (VHI; ベルベット触錯)	26
1.5 Gestalt 理論	30
1.5.1 Gestalt 心理学	30
1.5.2 Prägnanz の法則	33
1.5.3 Gestalt に生起する錯覚現象	35
1.5.4 触覚の Gestalt 性と VHI の関係	39
1.6 研究目的	41
1.7 本論文の構成	42
<b>2. 能動触及び受動触が知覚精度に及ぼす影響</b>	<b>44</b>
2.1 緒言	44
2.2 能動触及び受動触と主観的角度	45
2.3 アクチュエータ技術	46
2.4 実験方法	50
2.4.1 装置設計	51

2.4.2	修正版恒常法	53
2.5	実験条件	54
2.5.1	実験参加者	54
2.5.2	実験 1-A	54
2.5.3	実験 1-B	54
2.6	実験結果と考察	55
2.6.1	実験結果(実験 1-A)	55
2.6.2	考察(実験 1-A)	56
2.6.3	実験結果(実験 1-B)	59
2.6.4	考察(実験 1-B)	60
2.7	結 言	62
<b>3.</b>	<b>触覚と Pseudo-Haptics による硬さ提示</b>	<b>64</b>
3.1	緒 言	64
3.2	Pseudo-Haptics で強化された触覚マウス	66
3.3	実験方法と条件	69
3.3.1	Pseudo-Haptics による硬さ提示(実験 2-A)	69
3.3.2	触覚刺激による硬さ提示実験(実験 2-B)	70
3.3.3	Pseudo-Haptics と触覚刺激の融合による硬さ提示(実験 2-C)	70
3.4	実験結果と考察	71
3.4.1	Pseudo-Haptics による硬さ提示(実験 2-A)	71
3.4.2	触覚刺激による硬さ提示実験(実験 2-B)	72
3.4.3	Pseudo-Haptics と触覚刺激の融合による硬さ提示(実験 2-C)	73
3.5	結 言	77
<b>4.</b>	<b>錯覚を惹起する触覚の Gestalt</b>	<b>79</b>
4.1	緒 言	79
4.2	実験装置	79
4.3	実験方法と条件	81
4.3.1	被験者	82
4.3.2	VHI の教示方法	82
4.3.3	実験 3-A	82
4.3.4	実験 3-B	84
4.3.5	実験 3-C	85

4.4	実験結果と考察	87
4.4.1	実験 3-A	87
4.4.2	実験 3-B	88
4.4.3	実験 3-C	91
4.5	結 言	92
5.	結 論	94
5.1	まとめ	94
5.2	今後の展望	97
	参考文献	99
	謝 辞	111

## 図目次

図 1-1 皮膚構造と触覚受容器.....	15
図 1-2 機械受容器の周波数応答性 [Bolanowski, 1988] .....	16
図 1-3 空間分解能と受容器密度の相関 [Johansson, 1983; 岩村, 1984].....	17
図 1-4 対象の特性とそれに対応する探索行為[下条, 2010; Nomura, 2009].....	18
図 1-5 能動触及び受動触の知覚処理メカニズム [Taylor, 1973; Iwamura, 2001] .....	19
図 1-6 1次体性感覚野における情報の流れ [下条, 2010].....	22
図 1-7 2次体性感覚野 [Eickhoff, 2006].....	22
図 1-8 Thermal referral illusion の提示方法 [Jones, 2006] .....	24
図 1-9 Comb illusion の提示方法[Hayward, 2008].....	25
図 1-10 Fishbone tactile illusion の刺激素材[Nakatani, 2006] .....	26
図 1-11 VHI の刺激素材[Ohka, 2010] .....	27
図 1-12 VHI 惹起の最適刺激.....	27
図 1-13 点図ディスプレイによる VHI の刺激条件 [Rajaei, 2016; 小村, 2019].....	28
図 1-14 VHI の関連領域 [Rajaei, 2018].....	29
図 1-15 エクスプロラトリウム博物館に展示されている VHI のデモ.....	29
図 1-16 Prägnanz の法則.....	34
図 1-17 カニッツァの三角形 [Kanizsa, 1955].....	35
図 1-18 ミュラー・リヤー錯視[Müller-Lyer, 1889].....	35
図 1-19 ツェルナー錯視[Zöllner, 1860].....	36
図 1-20 妻と義母(Hill, 1915) .....	36
図 1-21 ルビンの盃 [Edgar, 1915].....	37
図 1-22 音階錯覚.....	38
図 1-23 オクターブ錯覚:.....	38
図 2-1 右人差指を用いた能動触による角度弁別閾の調査[Voisin, 2002] .....	45
図 2-2 能動触及び受動触のタスク概要.....	50
図 2-3 能動触及び受動触の知覚処理メカニズム [Taylor, 1973; Iwamura, 2001] .....	51
図 2-4 (a):掌提示型触覚マウス (b):使い方, (c):提示部位 .....	52
図 2-5 掌特性と点図ディスプレイ特性の関係性.....	52
図 2-6 触覚マウスの制御システム(左図:制御回路, 右図:接触判定) .....	53
図 2-7 z 得点を用いた受動触における相対運動と知覚精度の比較.....	57
図 2-8 角度弁別閾を用いた受動触における知覚精度と相対速度の関係.....	58

図 2-9 z 得点を用いた能動触及び受動触の知覚精度の比較.....	59
図 2-10 角度弁別閾を用いた能動触及び受動触間の知覚精度の比較.....	60
図 2-11 能動触の平均速度 .....	61
図 3-1 触覚マウス, 仮想ハンド及び仮想ボタン.....	66
図 3-2 触覚マウスのシステム図.....	67
図 3-3 仮想ハンド, 仮想ボタン, および触知ピンの位置関係 .....	69
図 3-4 仮想ボタンのコンプライアンス係数と硬さ知覚の関係 (実験 2-A).....	72
図 3-5 触知ピンの高さで硬さ知覚の関係 (実験 2-B).....	73
図 3-6 全被験者の 9 条件それぞれの硬さ評価 (実験 2-C1).....	75
図 3-7 ピン高さ 3 条件の硬さ知覚とコンプライアンス係数の関係.....	76
図 3-8 コンプライアンス係数再設定後の硬さの諧調表現 (実験 2-C2).....	76
図 3-9 実験 2-C2 で設定した刺激条件と硬さ知覚の線形性.....	77
図 4-1 点図ディスプレイ概要 (装置の全体図, 使用方法, 及びサイズ).....	80
図 4-2 点図ディスプレイのシステム構成図.....	81
図 4-3 触知ピンで構成された平行線の往復運動刺激パターン .....	81
図 4-4 VHI の基準を作るための練習 .....	82
図 4-5 実験 3-A の刺激.....	83
図 4-6 実験 3-B の刺激.....	85
図 4-7 極限法を用いた実験 3-C の刺激条件. ....	87
図 4-8 平行線の往復運動の平均速度と VHI 惹起確率 .....	88
図 4-9 線を構成するピンの間隔と VHI 惹起確率.....	90
図 4-10 線を構成するピンの間隔と VHI 惹起確率の z 得点 .....	90
図 4-11 VHI を惹起させる線長の絶対閾 .....	91

## 表目次

表 2-1 点図ディスプレイに用いるアクチュエータ技術	49
表 2-2 実験 1-A の条件	55
表 2-3 実験 1-B の条件	55
表 3-1 実験 2-C1 で用いたコンプライアンス係数	71
表 3-2 実験 2-C2 で用いたコンプライアンス係数	71
表 4-1 実験 3-A の刺激条件	83
表 4-2 実験 3-B の刺激条件	85
表 4-3 実験 3-C の刺激条件	86

## 概要

2019年に日本がISSで使用するロボットの遠隔操作技術の実証実験が開始された。また高齢社会の中、遠隔医療の需要が高まっている。このような状況において、リアルな触り心地を提示可能な Haptic デバイスの開発が期待され始めている。Haptic デバイスを実現する方法は2通りあると考えられており、一つが触覚受容器に直接所望の感覚を再現する方法であり、もう一つが大腦皮質における統合処理の結果生起される錯覚現象を利用する方法である。前者は、皮膚に存在するマイスナー小体、パチニ小体、メルケル細胞、ルフィニ終末の4種類の感覚受容器の反応の複合によって触り心地が生起するとした触覚原色の仮説に基づく手法である。この仮説に従えば、実物を触ったときと同じ刺激をそれぞれの機械受容器に直接与えれば実物の触り心地が提示可能であると考えられる。しかし、手に感覚受容器が17,000個近く存在するためにそれらすべてに実物を触ったときの刺激を与えることは事実上不可能である。従って本論文では、後者の方法を採用することとした。すなわち、触覚研究のもう一方の研究要素である中枢神経における感覚処理研究の成果を錯覚による Haptic デバイスの演出法に活用するというアプローチを採用することである。

そこで本論文では、上述の後者のアプローチに従って、実物の手触り感を再現する Haptic デバイスを実現することを研究の最終目標に掲げる。その達成のために、触覚と探索運動の関係、視覚と触覚の統合による錯覚現象、錯触の調査により触覚情報の統合現象について明らかにして、触覚のVRにおける形状、硬さ、材質感認識の演出方法を確立することを研究目的とする。本論文では、この研究目的を達成するために下記3項目を実施した。

- (1) 触覚の求心性信号と骨格筋への遠心性信号が形状認識に及ぼす影響
- (2) Pseudo-Haptics に代表される多感覚統合による表現の拡張
- (3) 触覚の錯覚現象の機序についての調査とその Gestalt による解釈

以下に本論文の構成と成果について述べる。

第1章では、研究の背景と目的を述べる。すなわち、Haptic デバイスが現代社会に求められている状況やそれに対する研究状況を述べた後に、実物の手触り感を再現する Haptic デバイスを実現することを掲げて、触覚の VR における形状、硬さ、材質感認識の演出方法を確立することを研究目的とすることを述べる。また、本論文の構成を示す。

第 2 章では、触覚の求心性信号と骨格筋への遠心性信号が形状認識に及ぼす影響について述べる。まず触覚の基本的な感覚処理である能動触と受動触についての調査を行う。能動触と受動触は、遠心性コピーと呼ばれる運動に対するシミュレーションが存在するか否かという点において大きく異なる。従って、能動触と受動触それぞれの触覚の知覚精度を比較することで、脳内で行われる運動計画の役割を知ることが出来る。そこで、知覚精度として角度弁別閾を採用し、心理物理学実験手法である恒常法を用いて能動触と受動触の比較を行った。その結果得られた結論を以下に示す。

- 受動触による調査の結果、4 水準の提示速度条件(45, 90, 130, 170 mm/s)において、45 mm/s ~90 mm/s の条件で知覚精度が最大になった。これは感覚受容器の SAI(メルケル細胞)と FAI(マイスナー小体)を最も効率よく発火させることができる速度であるためである。
- 能動触の方が受動触よりもエッジ方向の知覚精度が良いとは必ずしもいえなかった。遠心性のコピーの情報があっても、受動触は能動触と同程度の精度であったことは、受動触では物体との接触速度と物体形状を同時に精度よく獲得しているということを示している。
- 能動触運動は、感覚受容器が物体の形状識別タスクを行う上で最も効率が良くなる接触速度である 90 mm/s に近づくように、探索速度を制御していることが明らかになった。

上述の結論にあるように、能動触が受動触に精度の点で優位になる結果を得ることができなかった。受動触では遠心性コピーに代わる何らかの情報を獲得して精度を維持している可能性がある。このため今後は、その遠心性コピーに代わる情報とは何か探索を継続する予定である。また点図ディスプレイの提示能力向上に向けては、2 つの取り組みを行う予定である。1 つは人間の神経系に基づく触覚認識現象を適用することで

ある。方法として確率共鳴を使用し、適切なレベルの振動触覚刺激を使用することで人間の感度が向上させることが可能となる。もう一つは、感覚受容器の性質に着目し、接線刺激を使用して SA II (ルフィニ終末) を励起することで表現感を向上させることを計画している。

第3章では、Pseudo-Haptics に代表される多感覚統合による表現の拡張について述べる。Pseudo-Haptics とは視覚刺激によって触覚に影響を与える現象である。この Pseudo-Haptics を利用すれば、視覚刺激の効果により少量のアクチュエータで開発した触覚ディスプレイにおいても多彩な触り心地を映像で与えることが可能であると考えた。そこで本論文では、Pseudo-Haptics の視覚刺激に加えて触覚刺激を変化させることで程度表現の幅を広げることが可能であるか否か調査した。その結果得られた結論を以下に示す。

- 液晶ディスプレイに映されたボタンを押すという課題において、Pseudo-Haptics 単独の刺激 (コンプライアンス係数 1, 2, 3, 4, 5, 6 cm/N の 6 条件) では、4~5 段階の硬さを提示可能であった。
- 一方、触知ピンの高さを利用した触覚刺激単独での硬さ提示 (触知ピンの高さ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 mm の 5 条件) では、2 段階の硬さを提示可能であった。
- Pseudo-Haptics と触覚の融合提示ならば、視覚・触覚単体での諧調表現より諧調数が向上して、6~7 段階の諧調表現が可能となった。

以上から、硬さ提示装置として十分な性能ではないアクチュエータによる触覚ディスプレイを用いても視覚刺激のアシストにより表現能力を広げることが可能であることを示した点で Haptic デバイス開発に資するものであるといえる。今後は、硬さ以外の感覚、例えばテクスチャ認識に対しても Pseudo-Haptics がどのように貢献できるか調査を進めたい。また、性差の検討や年齢差の検討も必要なるものと考えられる。特に、今後高齢社会を考えると、高齢者向け VR の需要も見込まれるために、20 代の被験者に対する実験に留まらず、加齢の影響も考慮した実験的検討も実施したいと考えている。

第4章では、触覚の錯覚現象の機序についての調査とその Gestalt による解釈について述べる。そこで、感覚処理過程で感覚受容器からの入力以上の感覚が生起する

現象である触錯覚現象の調査を行った。本論文では、Velvet Hand Illusion (VHI)に生じる滑らかな感覚の触錯覚現象に着目する。この錯覚現象は、Gestalt 理論の全体は部分の総和ではないという考え方によく一致していることから、Gestalt の Prägnanz の法則のフレームワークに従って調査を進めて、Gestalt 理論に基づく VHI の機序解明を目指す一連の実験を実施した。以下に本実験の結論を示す。

- 点図ディスプレイでは、線の運動は 1 ドットずつ順に移動させることによって表示させるために、掌に触覚の仮現運動を生起することになることを示した。
- 点図ディスプレイの触知ピンで構成した線の仮現運動の認識に関しては、18, 23, 32, 40, 54, 80, 150 mm/s の 7 水準の速度条件で比較したところ、80 mm/s の時に最大になり、速度が増加あるいは減少しても仮現運動の認識は低下した。また、仮現運動速度が 18 mm/s 程度になったときにほとんど仮現運動が生起しなくなった。
- 2 本の平行線を構成する点間距離が掌の 2 点弁別閾 (13 mm) より広いと VHI は生起しなくなることから、線で囲まれることが VHI の要件であることが分かった。すなわち、VHI 生起には触覚の Gestalt の閉合の要因と共通運命の要因が同時に満たされることが要件であることを明らかにした。
- VHI を生起する平行線の最短の線長 (閾値) についての調査で、必要な線長は最低  $27.8 \pm 3.5$  mm 必要であることが明らかになった。これは、掌で生起する触覚の Gestalt の最小サイズを示しており、触覚の Gestalt に関する重要な知見の一つである。

今後は、触覚の Gestalt についてより深い検討を進め、触覚の Gestalt を変化させてそれにより惹起される材質感を自在に変化することを可能とすることを目指す。このため、4 つの触覚の感覚受容器に神経自由終末も加えて合計 5 つの触覚関連の受容器を選択的に刺激する仕組みを追加して、Gestalt によって生まれる材質感のコントロールの可能性を調査することを計画している。なお、仮現運動速度、点間距離、平行線の線長の三

つのパラメータ間に存在する交互作用, およびパラメータの決定順序が結果に及ぼす影響についても今後の研究の中で明らかにしたい.

第 5 章では, 結論と今後の展望を述べる. すなわち, 本研究の成果は, 革新的な Haptic ディスプレイを設計する上で, 移動機構装備するか否かの判断, 視覚アシストを追加することによる精度向上の見積もり, および VHI を生起させる上での刺激図形のサイズの下限を定めた点で有効な知見を提供していることを述べた. また前述の各章で述べたように, 本研究で取り上げたのは研究段階の技術であることから, 本論文の三つの実施項目について今後も引き続き調査を進める必要があることも述べた.

# 1. 序 論

## 1.1 本論文の背景

2019年, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)と日本のロボットベンチャー企業であるGITAI社がInternational Space Station (ISS)で使用する遠隔操作ロボットの実証実験を開始した[日本経済新聞, 2019]. また, ロシアのROSCOSMOSが開発した等身大のヒト型ロボットFedorがISSにて使用が開始された. これらのロボットでは, 遠く離れた場所から人が臨場感をもって遠隔操作するテレグジスタンス (tele-existence ; 臨場感制御) が用いられている[Tachi, 2009]. このテレグジスタンスは, ロボット工学分野で今後の研究開発が期待されている分野の一つとされている. このテレグジスタンス技術の技術的課題として, ロボットが物を操作したときの触覚情報を人と共有させるための手段の実現がある.

一方, 近年注目度が急上昇しているVirtual Reality (VR)についても触覚への関心の高さが際立っている. 視覚・聴覚については解明された受容器特性や認知メカニズムに基づいて, Head Mounted Display (HMD)や立体音響装置等 (液晶ディスプレイやヘッドフォンの原理を利用), 数々の出力機器が既に開発され実用に供されている. これに対して, 触覚については視覚・聴覚ほど機器開発が進んでいない[松村, 2009].

このように近年の触覚研究では, 触覚の受容器特性解明のような基礎調査だけでなく, リアルな触り心地の再現するような発展的な技術の調査も求められ始めている. しかし, 感覚受容器サイズやアクチュエータの問題[Johansson, 1983; 岩村, 1984]など, 既存の技術でリアルな触り心地を再現することは難しく, どのようなアプローチを選択すれば実現できるのかを解明することが最重要課題となっている. 本論文も究極的にはリアルな触り心地を提示可能な技術の開発を目指している.

ここで, 触覚のディスプレイ装置の以後の呼び方について言及する. ロボティ

クスや VR の分野では、ギリシャ語の「触覚」を表す「ἅπτω; haptic」を用いて、触覚のディスプレイ装置に対して「Haptic デバイス」という用語を使っている。この Haptic デバイスという用語は、現在では完全に市民権を得た感がある。このため、本論文でもこの Haptic デバイスという用語を使い、Haptic デバイスの中でも特にマイクロアクチュエータの集合体により表面の凹凸を表示させるディスプレイ装置のことを触覚ディスプレイと呼ぶことにしている。

Haptic デバイスを高度化するために、考え方の一つとして触原色がある[Tachi, 2013]。触原色とは、皮膚に存在するマイスナー小体、パチニ小体、メルケル細胞、ルフィニ終末の 4 種類の感覚受容器[Schmit, 1991; Lederman, 1991]の反応の複合によって触り心地が生起することに着目した手法である(1.2 章参照) [Bolanowski, 1988]。この考え方に従えば、実物を触ったときと同じ刺激をそれぞれの機械受容器に直接与えれば実物の触り心地が提示可能であると考えられる。しかし、手に感覚受容器が 17,000 個近く存在するため[Johansson, 1983]にそれらすべてに実物を触ったときの刺激を与えることは事実上不可能である。また、機械受容器からの求心性信号だけでなく、手を動かして触り心地を得ていることから、運動ニューロンへの遠心性信号をも統合化して触り心地を得るという神経基盤のモデルについては未だに完全に明確化されたとは言えない。対象と感覚器官の接触に伴う相互作用を通じて対象の材質を知覚しているために、そのような相互作用の再現を必要としていることも工学的手段の実現を困難にしている要因となっている。以上の事情から、実物を触った時に感じる材質感の再現を可能とする Haptic デバイスを開発することには多大な困難が伴う。

そこで本論文では、上述の Haptic デバイスの困難性を打開するために、錯覚を有効に活用して使用者に本物を触ったかのように感じさせるための方法論を確立することを目的としている。複数の感覚器官からの入力 of 統合によって多彩な感覚を生起可能であることはよく知られている。本研究で扱う錯覚現象は、視覚と触覚の統合化(1.3.2 章参照)や掌表面に提示された図形の統合化などを選定しているために、錯覚を演出手法として使用するだけでなく、神経基盤のモデルの確立に供されることも目指している。そこで脳に本物と感じさせる触覚の錯覚の研

究成果が重要な役割を果たすと考えられるため、本章の以下では、触覚の錯覚についてこれまでの理論や実験事実についてまとめる。さらに、触覚の錯覚が生じるためには様々な刺激入力が入脳内で統合化されている仕組みについて考察する必要があり、そのための有力な理論として Gestalt Grouping のあらましを解説する。

## 1.2 ヒトの触覚機構

まず、ヒトの触覚機構について解説する。図 1-1 に示すように、ヒトの皮膚は、表皮、真皮および皮下組織の3層から構成される。そして主に真皮にマイスナー小体、パチニ小体、メルケル細胞、ルフィニ終末と呼ばれる機械受容器が存在する。これらの機械受容器は、皮膚が刺激された際の皮膚変形に従って信号を大脳皮質に送っている。

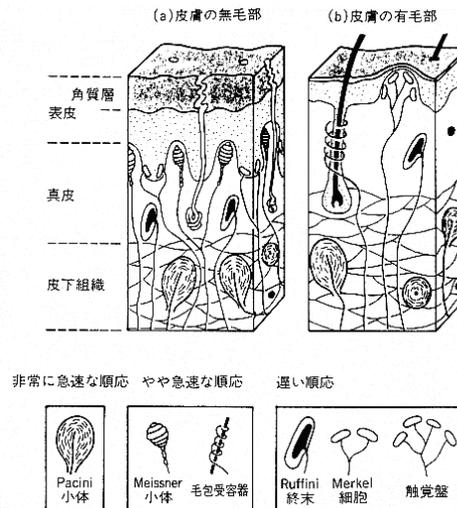


図 1-1 皮膚構造と触覚受容器

これらの4種類の機械受容器は周波数特性が異なり、皮膚変形や変形速度に応じてそれぞれの受容器の活動が異なる。この反応特性の違いから、マイスナー小体は速順応 I 型単位 (FA I: Fast adapting type I unit)、パチニ小体は速順応 II 型単位 (FA II: Fast adapting type II unit)、メルケル細胞は遅順応 I 型単位 (SA I: Slowly adapting type I unit)、ルフィニ終末は遅順応 II 型単位 (SA II: Slowly adapting type II unit) と呼ばれる [Bolanowski, 1988]。また、Bolanowski 等の調査により4種類の機械受容単位の振動感

覚についても明らかにされている(図 1-2). 実線, 破線, 点線および一点鎖線は, それぞれ SA I, SA II, FA I および FA II を示している. また, 黒丸は心理物理学的に測定された振動検出閾のデータ点である. 閾値が小さいということは, それだけ振動刺激に対する感度が高いことを示している. 従って, SA I より FA I の方が, また SA II より FA II の方が振動刺激に対する感度が高いということである. この結果から判断すると, 物体表面の細かな凹凸は FA I と FA II により獲得されていると考えられる. また, ヒトの手の触覚受容器の密度は手の部位によって異なる(図 1-3). FA I や SA I に関しては指先が掌の 5 倍~10 倍, FA II に関しては 2 倍の密度で分布しているのに対して, SA II に関しては掌の方が指先より 2 倍近く密度が高いということが分かっている. また, 指の空間分解能は掌の約 6 倍であることも明らかにされている.

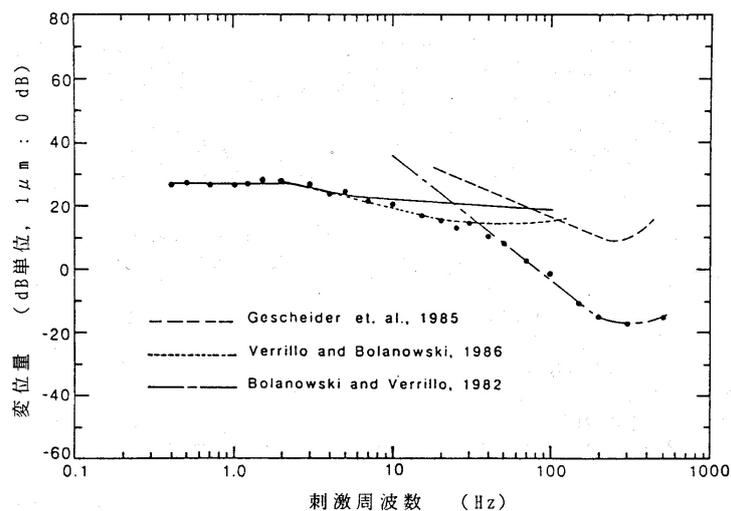


図 1-2 機械受容器の周波数応答性 [Bolanowski, 1988]

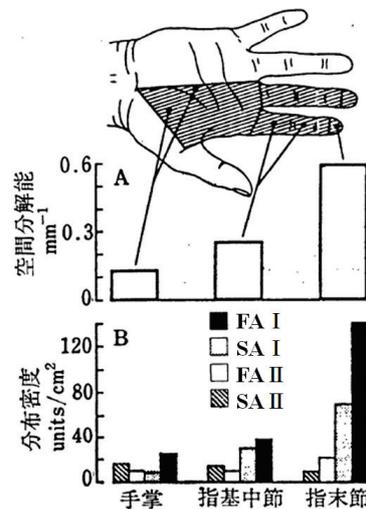


図 1-3 空間分解能と受容器密度の相関 [Johansson, 1983; 岩村, 1984]

### 1.3 能動的触運動と受動的触運動

Haptic デバイスを開発する上で、人が日常でどのように触運動を行っているのかを知ることは極めて重要である。そこで本章では、人の触覚を用いた探索行為についての過去の研究成果について紹介するとともに、Haptic デバイスを開発する上で解明しなければいけない事柄についてまとめる。

#### 1.3.1 探索行為

人は触覚を用いた探索動作を通じて対象物体の情報を取得している。Lederman 等は、対象物体に関する情報を人がどのような探索動作を通じて取得しているのかを調査し、6 種類の探索行為が存在することを明らかにした[Lederman, 1998]。またこの探索動作により、テクスチャ、硬さ、温度、重さ、全体の形、細部の形、体積の 7 種類の特性に関する情報を入手していることも明らかにした(図 1-4)。



図 1-4 対象の特性とそれに対応する探索行為[下条, 2010; Nomura, 2009]

### 1.3.2 能動触と受動触

人には能動触と受動触の2通りの探索方法が存在する。前者は能動的に自由に体を動かして知覚する方法であり、一方後者は、動いている対象を静止した状態で知覚する方法である。能動触は、筋肉、関節、皮膚に存在する感覚受容器を総動員することにより対象の情報を取得する点で受動触と異なる。また、大脳の神経基盤も大きく異なっている。図 1-5 で示したように、能動触の場合は随意運動の際に運動野から筋肉へ遠心性信号が送られ、それと同時に遠心性コピーが体性感覚野（1.3.4 章参照）に事前に投射される。これにより実際の運動よりも先行して体性感覚野が活動し、感覚受容器からの求心性信号が戻ってきた際には運動の分析が行われる [Deecke, 1969; Soso, 1980]。視覚の場合はこの遠心性コピーによって、常に発生している眼球の微小振動（サッケード）による視野のブレが視覚野で補正される。

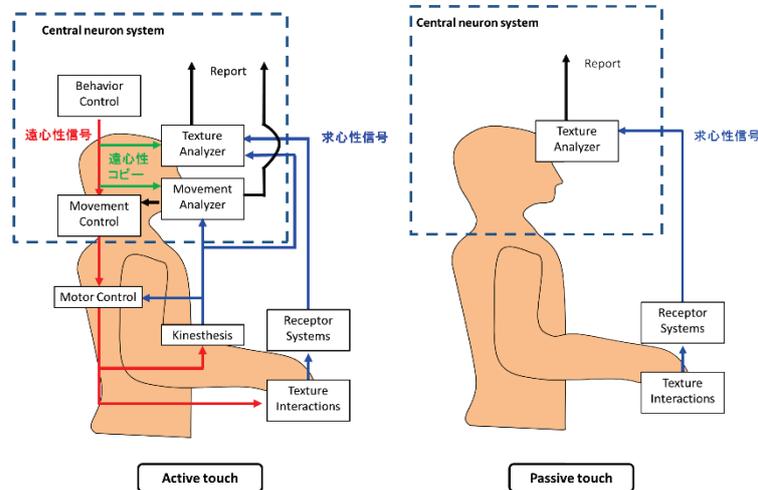


図 1-5 能動触及び受動触の知覚処理メカニズム [Taylor, 1973; Iwamura, 2001]

触覚においても遠心性コピーが知覚精度を向上させるのか否かという問題が、かねてから触覚研究者の研究対象となってきた。1.3.1 章で記述したように、ヒトは対象物体の情報に関して 7 種類の特性を探索動作によって取得している。とりわけ手を戦略的に動かして皮膚と対象の相対運動で知覚するテクスチャ、硬さ、形状認識に関しては、遠心性コピーと求心性信号の統合が深く関係していると予想される。この場合、受動触型の Haptic デバイスでは能動触型に比べて知覚精度が悪化してしまう可能性があることから、触覚の遠心性コピーの働きを解明することは Haptic デバイスを開発する上で極めて重要である。

テクスチャ知覚に関しては、能動触の方が材質の判定精度という点で優れていることが明らかにされている[西松, 2001]。粗さ知覚に関しては、様々な調査が実施されているが今のところ統一的な見解が得られていない。例えば、Katz 等は能動触の方が粗さ知覚に関して優位であるという立場であるのに対し[Katz, 1925], Lederman は能動触と受動触の粗さ知覚に差は存在しないと主張している[Lederman, 1981]。また、Helminen は運動時の触覚抑制作用によって受動触の方が優位であると主張し[Helminen, 1994]ており、彼らの見解は真っ向から対立している。圧覚に関しては、原田等の調査により能動触の方が受動触よりも知覚閾値(圧覚知覚可能な最小刺激)が低く、すなわち能動触の方が優れていることを明らか

にされた[原田, 2009]. 形状知覚に関しては, Henriques 等の調査により受動触における身体の水平面上での角度弁別閾 (人間の知覚可能な最小の角度差) が  $4.92^\circ$  [Henriques and Soechting, 2003], Voisin 等の調査により身体の水平面に対して垂直方向の角度弁別閾が  $5.2^\circ$  であることが明らかにされてきたが [Voisin and Benoit, 2002], 空間的異方性により身体の水平面, 矢状面, 前額面間の計測結果を比較することが出来ないため, この結果を持って受動触の方がわずかに良いと断言することはできない.

このように, 筋肉・皮膚・関節感覚といった複数の感覚モダリティの影響, 能動触における遠心性コピーの影響, 身体の空間異方性を踏まえた実験構成の難しさから, 現在まで能動触と受動触のどちらの知覚精度が良いのかについて体系的にまとめられていない. 本論文 2 章では, 能動及び受動の形状知覚において空間的異方性の影響を排除する形で実施した実験について説明する.

### 1.3.3 ダイナミック型とスタティック型

続いて, Haptic デバイスの型であるダイナミック型とスタティック型について説明する. Haptic デバイスは, 基本的には皮膚上に装着固定する形で使用することを想定されている. 装着したデバイスが動くのでこのタイプの Haptic デバイスをダイナミック型という. 一方, 皮膚と装置を固定せずに, 装置表面に提示された刺激を皮膚と装置の間の相対運動で知覚する形式をスタティック型という [Shimizu, 1986]. すなわち, デバイスの方を据え置いてアクティブタッチでデバイスが表示した凹凸を感じ取る方式である. 両者の最大の違いは, 探索動作によって反応する感覚受容器である. ダイナミック型はスタティック型に比べて FA I 及び FA II という振動知覚の役割を持つ受容器を十分に発火させることが出来ないため, 粗さ知覚の閾値が 2 倍程度ダイナミック型の方が良いという結果が得られている [Morley, 1983]. しかし, Haptic デバイスを実際に適用する場合には大型化するためスタティック型は運用が困難になることが予測できる. そこで本論文では, 点図ディスプレイを装着するウェアラブル型 Haptic デバイスの実現に向けてダイナミック型を採用することとする. すなわち, ダイナミック型 Haptic デバイスにおいて能動触と受動

触のどちらが優れているのかを調査することで、FA I 及び FA II の働きが弱い状態で、能動触の遠心性コピーが形状知覚精度に及ぼす影響を解明する。

#### 1.3.4 空間的触知覚と大脳領域

体性感覚とは、皮膚感覚、固有感覚(筋肉、関節)等の感覚のことを言い、感覚受容器→脊髄→視床を経て大脳皮質の主に 1 次体性感覚野及び 2 次体性感覚野に到達する。1 次体性感覚野は図 1-6 に示したように中心溝の後部の頭頂葉に存在しており、細かく分類すると 3a, 3b, 1, 2 野の 4 種類に分類される[Jones and Friedman, 1982]。3a 野は筋肉や腱などの受容器からの情報、すなわち体の姿勢に関する情報が入力されるのに対し、3b 野は皮膚に加えられた刺激が入力される。3a 野, 3b 野に入力された情報は、1 野, 2 野と大脳の後部に投射されるにつれて統合化されていく。その後、1 次体性感覚野から後頭頂葉の 5 野を経て、3 次元的空間処理が行われる 7 野に投射される。7 野は視覚野からの入力も受けるマルチモーダルな空間認識に係る領域である。

2 次体性感覚野は頭頂弁蓋部という場所に存在する(図 1-7)[Eickhoff, 2006]。2 次体性感覚野は、1 次体性感覚野と同様に視床からの入力を受けるだけでなく、一次体性感覚野、運動前野、前頭眼野、前頭前野、島皮質、7b 野との情報のやり取りを行っており、その役割は多岐にわたっているとされている[Disbrow, 2003]。例えば、触覚刺激だけでなく、記憶、注意、運動にも関連していることが知られている。

上述のように、触覚に入力された情報は 1 次体性感覚野、及び 2 次体性感覚野での情報処理が行われることによって、テクスチャ、硬さ、温度、重さ、全体の形、細部の形、体積等の様々な外部情報を認識することが可能となる。また、1.4 章で紹介する錯覚現象に関してもこのような統合化プロセスが非常に関与している。

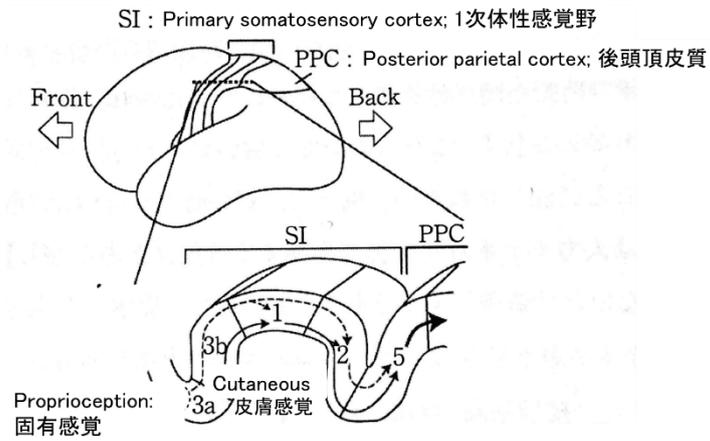


図 1-6 1次体性感覚野における情報の流れ [下条, 2010]

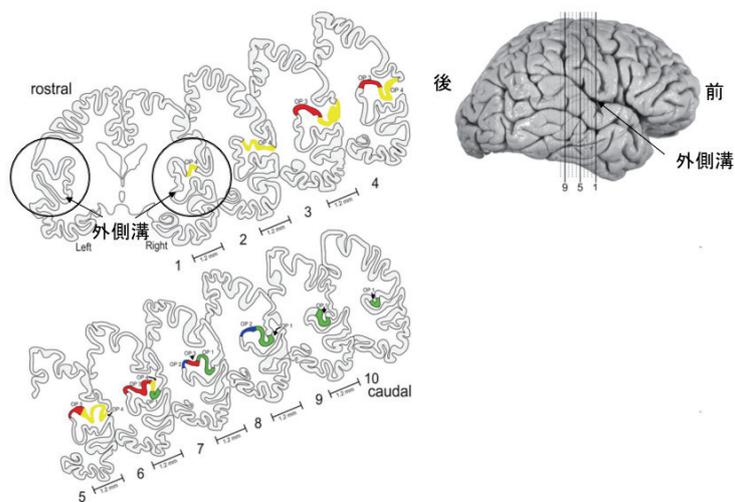


図 1-7 2次体性感覚野 [Eickhoff, 2006]

## 1.4 触錯覚現象

大脳皮質の情報処理過程で生起する触覚に関する触錯覚現象について紹介する。

### 1.4.1 Pseudo-Haptics (擬似触覚)

触覚情報に視覚フィードバックを追加することにより、触り心地に変化させることが可能である。この現象は Pseudo-Haptics と呼ばれる錯覚現象である。例えば、マウスを動かした際にマウスカーソルがその動きに対して遅れて動くと、マウスの動きとは逆向きに力を感じる現象が Pseudo-Haptics である。Pseudo-Haptics が期待される理由として、装置の簡略化や省電力化があげられる。多彩な視覚フィードバックを与えることで、触覚提示部分を簡略化することが期待される。すなわち、人間の感覚情報処理、統合化プロセスを活用することで、単純な触覚刺激でもより幅広い表現が実現できるということである。例えば、HMD 装着状態で物を持ち上げる際に実際よりも物体が早く持ち上がるような映像を提示することによる重量感の変化の提示や[Taima, 2014], 物体の形状操作による重心位置知覚の操作など[面迫, 2013], 重量知覚に影響を与える研究成果が存在する。また、物を触る際の押込み量の視覚フィードバック操作による硬柔操作[Lecuyer, 2009; Moody, 2009; Argelaguet, 2013], マウスカーソルの移動速度の加減速操作による凸凹感操作[Menvoort, 2008], 実際に触るものと異なる形状を視覚フィードバックで与えることによる物体の形状、および大きさ操作[Ban, 2012; Ban, 2013]など、様々な感覚に対して Pseudo-Haptics の手法が注目されている。

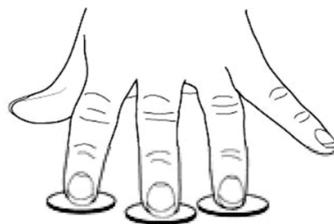
以上の先行研究を踏まえて、著者らの研究グループでは触覚ディスプレイの硬さ提示能力を高めるために、Pseudo-Haptics の活用を試みる研究を進めてきた[Tsuboi and Ohka, 2014]。その結果、触覚ディスプレイの触知ピンの出方が大きいほど硬く感じるグループと逆に柔らかく感じるグループに分けられる結果となり提示方法の改良が求められていた。

そこで本論文の第 3 章では、上述の先行研究で検討された Pseudo-Haptics と触覚刺激の複合提示による硬さ表現能力を向上することを目的とする。このために

まず, Pseudo-Haptics 単独の硬さ表現能力と触覚刺激単独の硬さ表現能力を調査する.

#### 1.4.2 Thermal referral illusion (温度参照触錯)

Thermal referral illusion [Thunberg, 1986; Jones, 2006]は痛覚や灼熱感を生起する錯覚現象である. この錯覚現象は, 温刺激と冷刺激を皮膚表面にある一定の感覚で交互に並べた際に生起する. 実際に皮膚に損傷を与えない温度刺激であったとしても生起するのがこの錯覚の重要な点である.



Physical Stimulation	warm	neutral	warm
	cool	neutral	cool
Perceptual Experience	warm	warm	warm
	cool	cool	cool

図 1-8 Thermal referral illusion の提示方法 [Jones, 2006]

#### 1.4.3 Comb illusion (櫛触錯)

Comb illusion はペンと櫛によって生起する錯覚現象である. この錯覚では, 閉眼状態で櫛をペンで櫛の歯に対して垂直方向に擦ると, ペンを持つ指の上を何かが移動する感覚が生起する錯覚現象である [Hayward, 2008].

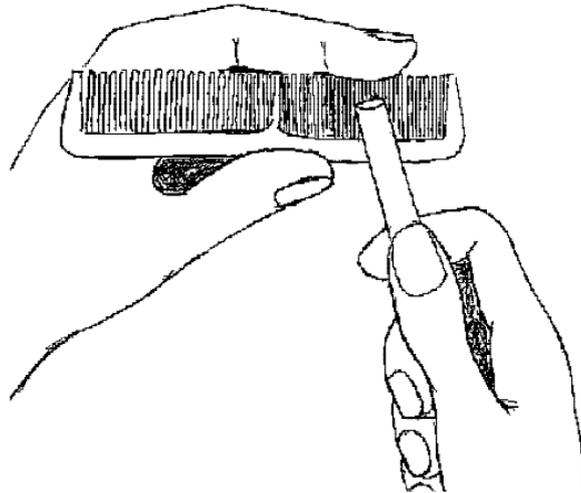


図 1-9 Comb illusion の提示方法 [Hayward, 2008]

#### 1.4.4 Phantom sensation (PhS; ファントムセンセーション)

Phantom sensation とは、1959 年に von Békésy によって発見された錯覚現象である[von Békésy, 1959]. Phantom sensation では、皮膚上のある距離を隔てた 2 点を同時に刺激すると、2 点に刺激が加わっているとは知覚されずに、2 点の中間点に 1 点の刺激が加わったという知覚になる錯覚現象である。また Phantom sensation の知覚位置は 2 点の刺激強度の強い方に傾くことや、刺激のタイミングを変えることで仮現運動のような効果を起こすことが可能である。また視覚刺激や温度刺激でも Phantom sensation を生起することが可能であることが明らかにされている[大原, 2009; 橋口, 2016]. さらに、皮膚上にある点をトントンと軽くタッピングした後間髪入れずに 10 cm 程離れた別の点を軽くタッピングすると、本来刺激を与えていない 2 点間に刺激がウサギのように移動する皮膚ウサギという現象も確認されている[Miyazaki, 2010]. これらの錯覚現象を利用して指先への接触力と滑りを提示することが可能な技術[大丘, 2010]が開発されてきており、VR への応用が期待されている。

#### 1.4.5 Fishbone tactile illusion (FTI; フィッシュボーン触錯)

Fishbone tactile illusion とは, 図 1-10 のような楕形の形状のテクスチャの幹の上  
に人差し指を載せて擦ると, 幹の部分が枝部分と比較して凹んでいるように知覚  
する錯覚現象である[Nakatani, 2006]. これは, 指との摩擦力が幹部と枝で異なるこ  
とによって生起していると考えられる.

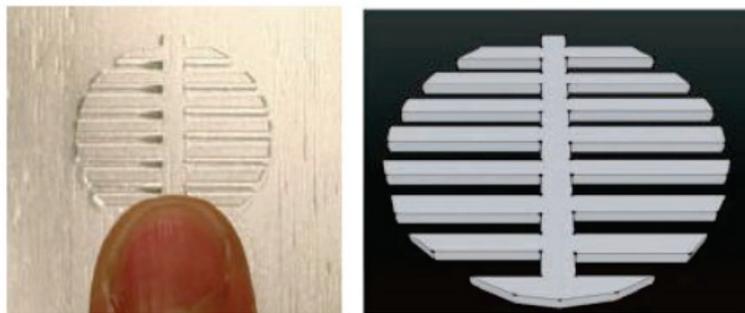


図 1-10 Fishbone tactile illusion の刺激素材 [Nakatani, 2006]

#### 1.4.6 Velvet Hand Illusion (VHI; ベルベット触錯)

Velvet Hand Illusion とは, 図 1-11 で示すようにテニスラケットのガットのよう  
な細いワイヤで作られた格子状のものを両手で挟んで前後にこすると, 滑らかな感  
覚が掌に生起するという錯覚現象である[Mochiyama, 2005]. この錯覚現象に関し  
ては心理物理学と生理学の両側面から機序解明に向けた調査が進んできている.  
この錯覚は, 本論文と深く関係するために, 以下にこれまでの研究で明らかにさ  
れてきたことをまとめる.

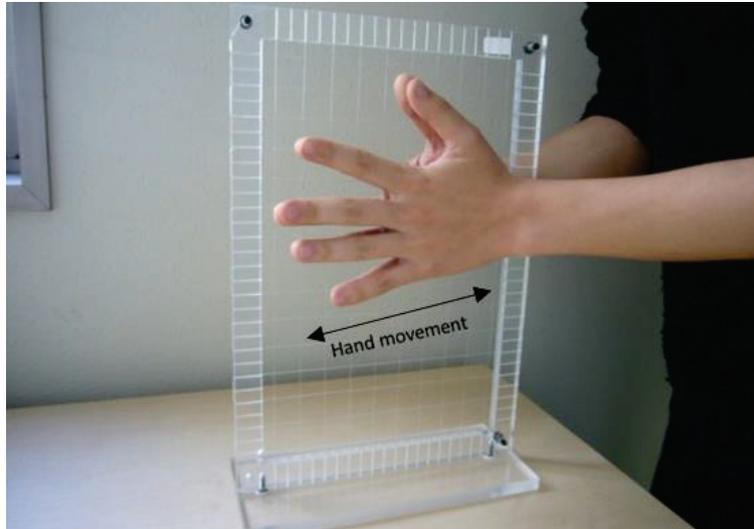


図 1-11 VHI の刺激素材 [Ohka, 2010]

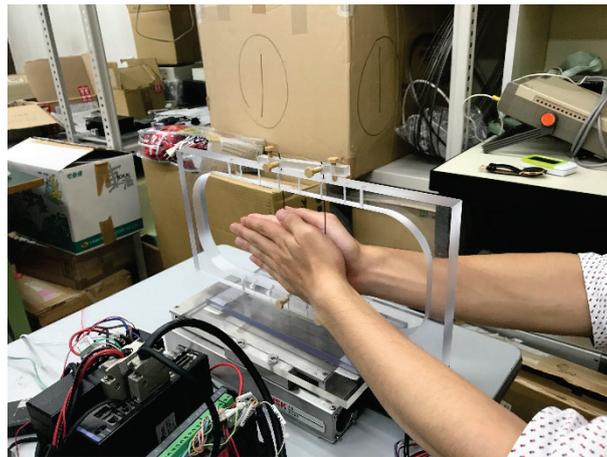


図 1-12 VHI 惹起の最適刺激

VHI は図 1-12 のような 2 本の平行に張られたワイヤを掌の上で往復運動させても、滑らかな面の感覚 (VHI 感) が惹起される。このとき感じる VHI 感は金網によって生じる VHI 感より強いために、2 本のワイヤにより VHI が調査されてきた。その結果、VHI の強さは 2 本のワイヤの線間距離とストロークで制御可能であること[Ohka, 2010; Rajaei, 2012], 触覚の仮現運動により点図ディスプレイのピンで構成された平行線 (図 1-13) でも VHI が惹起されること[Rajaei, 2016], 足の裏でも惹起されること[鶴岡, 2017], および VHI 感とは 2 本の鋼線の滑らかな面に

よる掌触覚のマスクングであること[Hidaka, 2018]などが明らかにされている。また生理学的な側面から VHI に関する大脳神経基盤の調査も進んでおり、fMRI の調査では左の一次体性感覚野 (S1) のある領域において、図 1-14 に示すように VHI の錯覚強度に比例して賦活量が増加する部位が特定されている[Rajaei, 2018]。またこの錯覚現象は非常に強く出ることから知られ、米国カリフォルニア州サンフランシスコ市の Exploratorium (エクスプロラトリウム博物館) にも展示されている (図 1-15)。

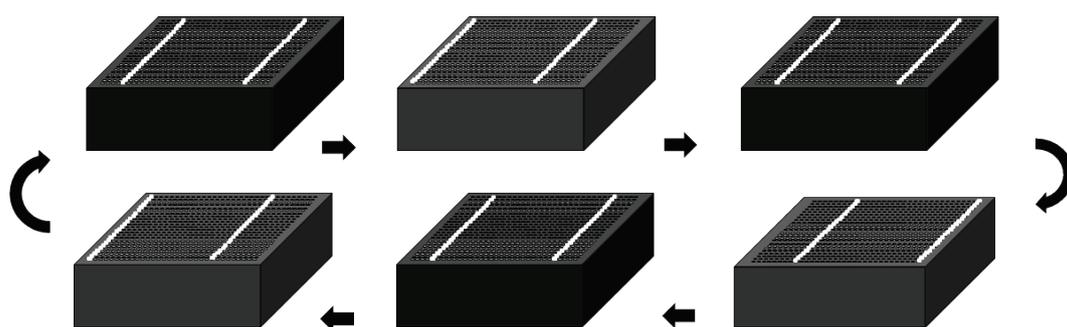
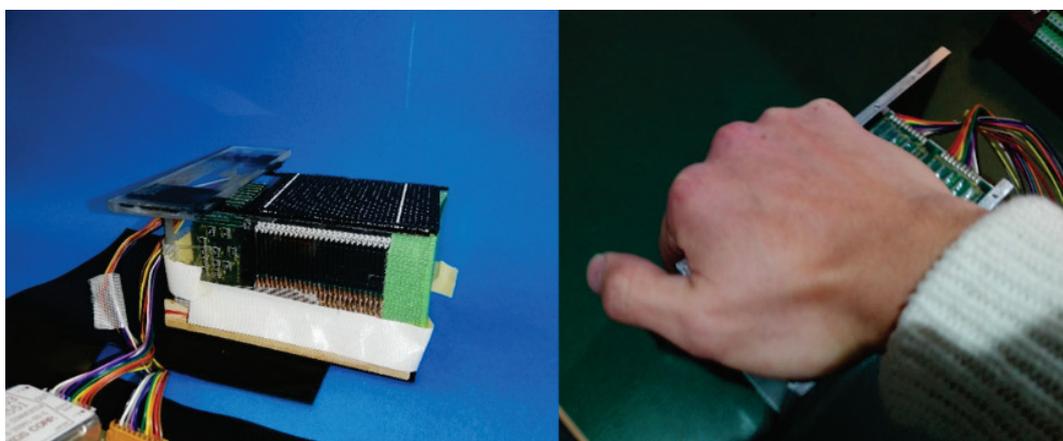


図 1-13 点図ディスプレイによる VHI の刺激条件 [Rajaei, 2016; 小村, 2019]

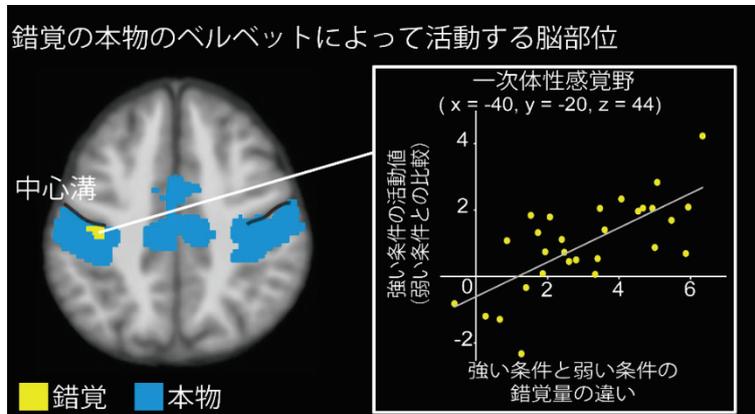


図 1-14 VHI の関連領域 [Rajaei, 2018]



図 1-15 エクスプロラトリウム博物館に展示されている VHI のデモ

## 1.5 Gestalt 理論

続いて、本研究において扱う Gestalt について、Gestalt 心理学の歴史、及びこれまでの研究変遷についてまとめる。

### 1.5.1 Gestalt 心理学

Gestalt の概念について、最初に提唱したのは Christian von Ehrenfels (1859-1932) であると言われている。Ehrenfels は、音楽において音の高さを全体的に上下させてもメロディーが保存されることや、形状の大きさが変化してもその形状に対する認識が保存されることに注目し、このまとまりに対して形態質と名付けた。また、Ehrenfels の主張では、ヒトの動きに関しても、しっかりしているように見える場合、おどおど落ちつかいように見える場合等において形態質が関与していると主張した。このように、知覚的性質は個々の刺激の関係に依存し、刺激一つ一つに依存しないというのが彼の主張であった。

その後、Gestalt はドイツ人心理学者の Max Wertheimer (1880-1943)、Kurt Koffka (1886-1941)、Wolfgang Kohler (1887-1967)によって大々的な実験が実施され Gestalt 心理学という学問体系が構築された。Gestalt に関する最初に実施された実験は、Wertheimer (1880-1943)による仮現運動に関する実験である。仮現運動とは、2 箇所に設置された光源がタイミングよく交互に点滅すると、あたかも一つの光源が移動しているかのように知覚する錯覚現象である。この現象は Gestalt 心理学の概念が生まれるまでは、人間の思考における誤り、すなわち素早く交互に点滅する知覚事実から、観測者が誤って同じものとして認めて錯覚が生起していると考えられてきた。しかし、Wertheimer は、最適なタイミングで 2 箇所の光源が交互に点滅する条件下では仮現運動と実際の運動が全く同じに認識され、どちらが真の運動でどちらが見かけの運動かを区別することが出来ないということを見出した。さらに真の運動と見かけの運動、両条件において負の残像が生起することを解明し、仮現運動は実際運動と全く同様に知覚の上で現実的であると結論づけた。負

の残像とは視覚に関する現象で、ある連続的に動いている対象が突然静止すると、連続的に動いていた方向とは逆方向に対象が動きだしたように知覚する現象である。Wertheimerはこの現象が、仮現運動及び真の運動のどちらでも生じたことから、両者は全く同じ知覚メカニズムであることを主張した。

なお、この実験に被験者として参加した Koffka と Kohler はこの後、ガンマ運動、色の対比、幾何学的視差等の Gestalt に関する実験に従事することとなった。Wertheimer はこれらの研究成果を 1912 年に『Experimentelle Studien über das Sehen von Bewegung（運動視に関する実験的研究）』 1921 年及び 1923 年に『Untersuchungen zur Lehre von der Gestalt I, II（ゲシュタルト説に関する 3 つの論述 I, II）』にてまとめている。また Koffka は 1935 年に、『Principles of Gestalt Psychology（ゲシュタルト心理学の原理）』を出版し Gestalt に関する法則性を体系的にまとめている。

この群化に関する法則性に関して当時は 3 原理にまとめられた。現在はさらに拡張されプレグナンツ(Prägnanz)の法則としてよく知られている。下記に 3 原理を示す。

第 1 原理：群化はある対象間距離が他の対象間距離よりも遠い場合に生じる。

第 2 原理：同じ性質のものが群をなす。

第 3 原理：群化は、簡単・相称的・滑らかな場合に生じやすい。すなわち最も単純な美学として認識される方向に群化が起きる。

上述した群化が単純な方向に生起するという特徴は、自然科学で知られる現象とよく一致すると言われている。例えば、量子論の創始者である Max Karl Ernst Ludwig Planck は、複雑な過程を単純な要素過程の結合とみなし、全体が部分の総和であると考えられる場合、非可逆過程では論理的整合性が取れなくなると主張した。これはすなわち、自然科学の現象においても、微小部分を次々と調べて、その結

果を持って全体を表そうとすると、微小部位に存在しない全体的な特徴が失われるということである。

このように心理学だけでなく、自然科学においても群化による特徴を無視できないという主張がされたことにより、Kohler は心理物理同型説を提案した。心理物理同型説とは、知覚過程が規則的で単純な形態をとるならば、大脳皮質内で処理される過程でも同様の傾向を示すはずであるという説である。例えば、網膜の2箇所異なる強さの光刺激を加えた場合、この刺激に伴って興奮する大脳皮質のそれぞれの網膜に対応する部位の興奮状態の程度は、刺激の強さに依存するという事である。Kohler は脳波を用いて図形残効が脳活動に及ぼす影響を調査し、この仮説の妥当性を確認している[Kohler, 1952; 1955; 1957]。この視覚の体制化の研究の変遷に関しては、Kohler の著書で田中等が翻訳をしたゲシュタルト心理学入門にまとめられている[ケーラー, 1971]。

聴覚の Gestalt に関する研究は、視覚と比較して歴史は浅い。視覚は3次元空間において複数の光源を使用することによる形状刺激の作成及び統制が技術的に容易であったのに対して、聴覚は音源周波数の制御に関してデジタル技術が発達するまで困難であったことが研究の遅れを引き起こした。従って、1930年代から1990年代にかけての聴覚研究は感覚量を測定する心理物理学実験に重きが置かれた。そして、聴覚の Gestalt 研究が大々的に実施され始めたのは、1990年代前後の Stephen Handel (1945 -), Albert Bregman (1936 -), Diana Deutsch(1938 -), 中島祥好(1954 -)からである。聴覚の場合も基本的には視覚の Gestalt 研究で明らかにされた Prägnanz の法則に従うが、音は視覚刺激とは異なり1次元の信号であるため、対称性の要因等は存在しない。一方で、調和性の持った音（周波数が定数倍の音源の重なりで作成された複合音）を聞いた場合には一つの音に聞こえる調和性の原理など聴覚ならではの要因も存在する[Deutsch, 2013]。この聴覚の体制化の研究変遷に関しては、中島祥好らの聴覚の文法で体系的にまとめられている[中島, 2014]。

### 1.5.2 Prägnanz の法則

上述の群化の法則である Prägnanz（簡潔）の法則について紹介する。

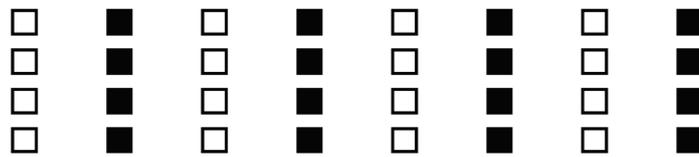
視覚の Gestalt は、3次元空間の事象を認識するために必要不可欠な知覚メカニズムである。文字を読んで内容を理解することや、人の表情を認識してコミュニケーションをとる等の行動は視覚の Gestalt 無しでは成し遂げることは不可能である。視覚の Gestalt の性質に関する法則に関しては、近接の要因、類同の要因、閉合の要因、共通運命の要因などがあり、これらは Prägnanz（簡潔）の法則として体系的にまとめられている[Kohler, 1969].

Prägnanz の法則の一部について図 1-16 を用いて説明する。図 1-16 では、本研究に関連する要因が示されている。まず、(a) は近接の要因である。近い物同士を形態として認識され、形態化の強さはその距離に依存する。(b) は類同の要因であり、同形、同色、同性質のものが形態と認識される。(c) は閉合の要因であり、囲まれているものが形態として認識される。(d) は共通運命の要因であり、同方向に動いているものが形態として認識される。(e) は良い連続の要因であり、連続性のある形状が1つの形態として認識される。それ以外には、過去経験によって群化にバイアスがかかる経験の要因等、それ以外にも様々な群化の要因が存在する。

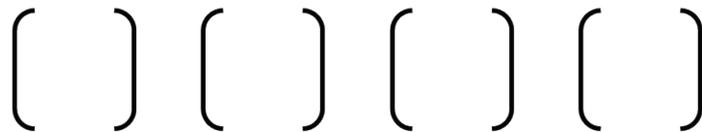
(a) 近接の要因



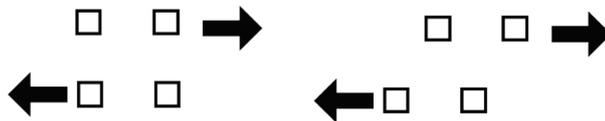
(b) 類同の要因



(c) 閉合の要因



(d) 共通運命の要因



(e) 良い連続の要因

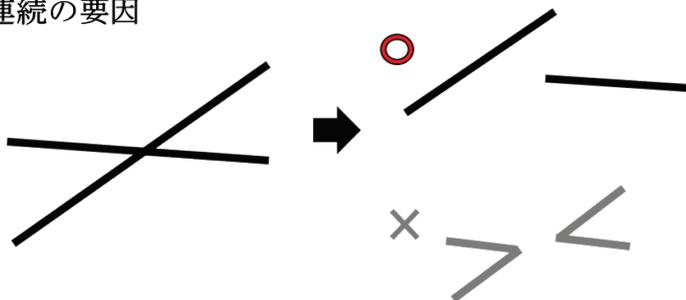


図 1-16 Prägnanz の法則

### 1.5.3 Gestalt に生起する錯覚現象

Gestalt の性質により様々な錯覚現象も知覚される。例えば、輪郭線に沿った輝度や色の変化が存在しないにも関わらず、明度の違いが輪郭線として知覚されるカニッツァの三角形 [Kanizsa, 1955] (図 1-17) や、直線の長さが同じであるにも関わらず両端の羽の向きで主観的な線長が変化するミュラー・リヤー錯視 [Müller-Lyer, 1889] (図 1-18), 複数の直線が平行に並んでいるにもかかわらず、周りの線の影響で主観的な平行性が失われるツェルナー錯視 [Zöllner, 1860] (図 1-19) などがある。これらの錯覚現象の重要な点は、実際の物理刺激では説明のつかない知覚が、群化によって生起する点である。すなわち、人間にモノを知覚させる際には、感覚受容器に入力する局所的な感覚だけを考慮するだけでは不十分であり、統合化プロセスもよく理解して置く必要があることは明らかである。

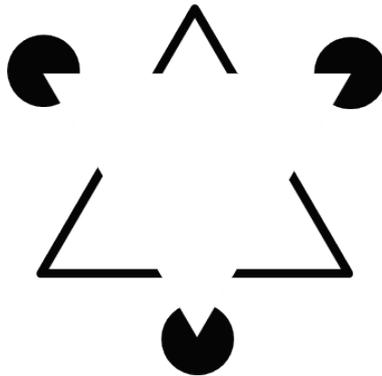


図 1-17 カニッツァの三角形 [Kanizsa, 1955]

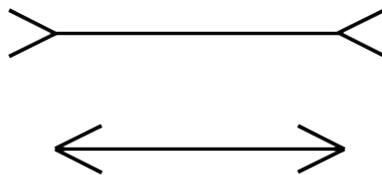


図 1-18 ミュラー・リヤー錯視[Müller-Lyer, 1889]

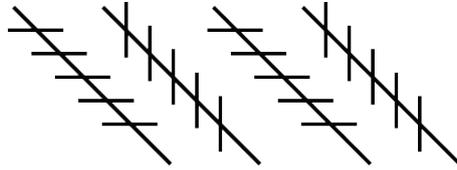


図 1-19 ツェルナー錯視[Zöllner, 1860]

上述の錯覚以外にも、非常に有名な錯視であり Gestalt に非常に関与している例として、妻と義母の絵（図 1-20）とルビンの盃（図 1-21）を紹介する。妻と義母の絵では妻と老婆が交互に認識され、ルビンの盃では盃と人の横顔が交互に認識される。これらは地と図といわれる群化のプロセスの結果生じる錯覚である。この現象は、図形残効の阻止効果によるものといわれており、見えている図に対応する大脳皮質過程が持続するのを阻止するように局部的過程を惹起し、その結果図が弱められ図が交代すると推測されている。



図 1-20 妻と義母 (Hill, 1915)



図 1-21 ルビンの盃 [Edgar, 1915]

聴覚に存在する Gestalt の例についても紹介する[Handel, 1989]. 例えば, 人は外部の音情報をメロディーや言葉として認識することが出来る. これは, 聴覚の Gestalt によって音の経時変化や周波数が一部グループ化されて認識されるためである. 例えば, 同時に始まり同時に終わる音は共通運命の要因により Gestalt として認識される. また, 周波数が近い音や長さが近い音は近接の要因・類同の要因により Gestalt として認識される. このように, 基本的な法則性は視覚の Gestalt の Prägnanz の法則に従う. 聴覚の Gestalt の場合は, 空間 (音源の位置) よりも周波数の方が優先されることから, 音階錯覚 (図 1-22) [Deutsch, 1975; 2013], オクターブ錯覚 (図 1-23) [Deutsch, 1974; Deutsch and Roll, 1976]等のような錯覚現象が惹起されることが明らかにされている.

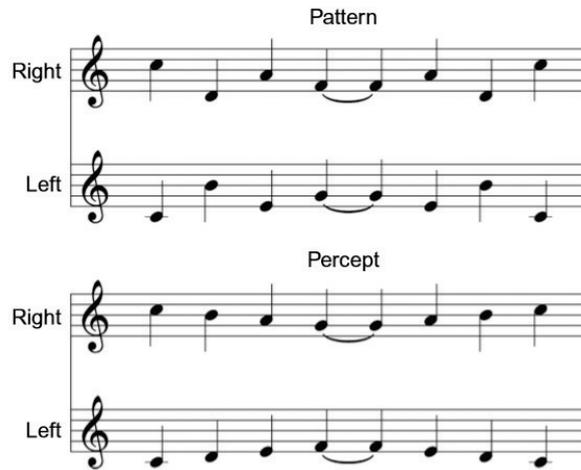


図 1-22 音階錯覚

ステレオヘッドフォンで左右の耳に図 1-22 上図の音源パターンが提示された場合，図 1-22 下図のようなメロディーが知覚される．すなわち，類同，近接，良い連続の要因により周波数が近い音が結びつきやすい傾向にある[Deutsch, 2013]

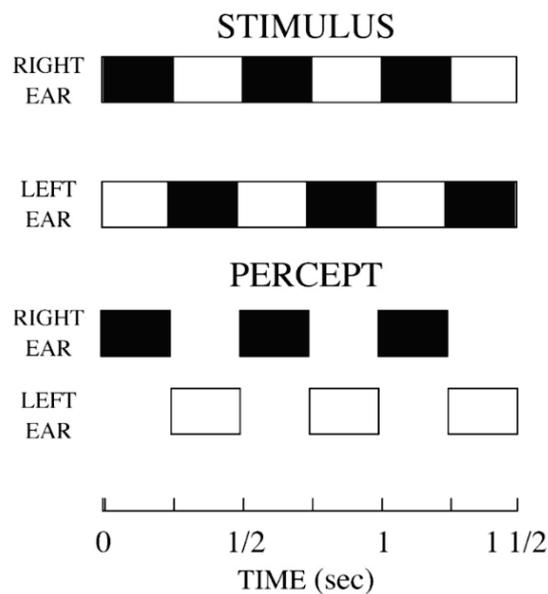


図 1-23 オクターブ錯覚:

黒塗りの刺激が 800Hz，白抜きの刺激が 400Hz の音源である．左右の耳に 2 種類の音源を交互に提示すると，右耳には 800Hz（高音），左耳には 400Hz（低音）の音が交互に聴こえる錯覚である[Deutsch, 1974]

#### 1.5.4 触覚の Gestalt 性と VHI の関係

続いて、触覚の Gestalt 性について考える。触覚にも Gestalt が存在するが、触覚は部分々々の形状や材質感を認識する際に使用されるという特性上（例えば手で形をなぞるような動作）、Gestalt を日常で認識することはあまりない。しかし、紙面に円形の一部を扇形に切り欠いた凸部図形を適切に配置したものを触ると、カニツァの三角形[Kanizsa, 1955] (図 1-17) のような主観的輪郭を紙面より下に引っ込んで感じる事が報告されている[和氣, 1996]。本論文では、Fishbone 錯触[仲谷, 2008]で認められた凹部の感触もこの主観的輪郭と関連している可能性があると考えている。さらに、第 4 章で論じる VHI 感のような滑らかな触り心地の錯覚現象がある。このように触覚の場合は、視覚の Gestalt とは異なり図形だけでなく、凹感や滑らかさなど触り心地に関連した感覚を生じることもある点が興味深い。

触覚がもつ触り心地の感覚は、圧力・振動・変位・痛み・温かさ等の複数の情報を 5 種類の受容器（マイスナー小体、パチニ小体、メルケル細胞、ルフィニ終末、自由神経終末）によって知覚し、それらの情報を中枢神経で統合することにより知覚される。これらの 5 つの受容器の情報が統合される際に、Gestalt として図形情報だけでなく図形情報の運動から触り心地感覚が知覚されると考えられる。

また、この触り心地は触覚独自の法則によって惹起されると考えられる。例えば、VHI の場合は、2 本の平行線が掌を往復運動することで惹起される錯覚現象であるが、Prägnanz の法則の観点から分析すると、2 本の平行線に囲まれた領域に対して閉合の要因、往復運動に対して共通運命の要因が同時に作用していると考えられる。もし、閉合の要因と共通運命の要因を同時に作用させることが、VHI を惹起させるための必須条件であるならば、これは触覚の特徴の一つといえる。このように、VHI と触覚の Gestalt の関係を通じて触覚の理解が深まることが期待される。

以上の仮説を元に VHI 感惹起メカニズムを下記にまとめる。

- ▶ 合掌や点図ディスプレイに片掌を押し付ける等で生じる一定圧力が掌に加わり、一定圧力を感知する受容器がこの情報を獲得する。

- ▶ ワイヤ等が形成した平行線が掌を往復運動することにより生じる振動刺激を振動感知に関する受容器が獲得する。
- ▶ 平行線の運動によって、掌の上に長方形領域として **Gestalt** が形成され、それが掌の上で移動する。

1 番目と 2 番目の条件は、VHI に関連する機械受容単位の状態についての条件である。3 番目の条件は 1 本目の線のみでは生起せず 2 本目の線の情報が統合化されないと VHI が惹起されないことを意味している。したがって、2 本で囲まれた領域は **Gestalt** と考えることができる。

以上の 3 条件がすべて満たされると、押し付け圧が印加された状態で形成された **Gestalt** が移動する。その際に、せん断力を感じる受容器はほとんど発火しないために、**Gestalt** として認識された領域は運動しているにもかかわらず摩擦が零の滑らかな面として知覚される。このように、圧力、振動、せん断力を知覚する複数の受容器の発火の状態の組み合わせ、および大脳内での情報の統合の結果が滑らかな面の知覚に関係している。触覚の場合は、視覚・聴覚とは異なり、5 種類の役割の異なる受容器の情報の統合が触り心地感覚を生む。したがって、掌に **Gestalt** が生成される際に、5 種類の受容器のうちから複数のものを選択的に刺激することで掌表面に様々な触り心地の **Gestalt** を提示できる可能性がある。

VHI を VR の用途に利用するためには、VHI 感の生成やその強さを自由に制御する必要がある。そのためには、VHI に関連する機械受容単位の状態の調査だけでなく、VHI を生み出す要因の一つとなっている触覚の **Gestalt** の生成・消失条件の調査も重要である。その上で、様々な触り心地の制御方法について研究を進める必要がある。本論文では、上述の触覚の **Gestalt** の基本特性を調査するために、様々な図形を提示できる点図ディスプレイを用いて触覚の **Gestalt** の生成・消失条件を明らかにする。

## 1.6 研究目的

冒頭で述べたように、これまでの Haptic デバイスの研究開発者は、機械受容器に伝達すべき刺激を可能な限り実物の手触り感に近づけようとして注力してきた感が強い。しかし、このアプローチをとると機械受容器レベルのマイクロスケールに対応したアクチュエータ技術が必要となる。これに対して、マイクロアクチュエータは、いまだに研究段階であることから、実物の手触り感を再現できる Haptic デバイスは未だに完成することができていない。

以上の現状を鑑みると、触覚研究のもう一方の研究要素である中枢神経における感覚処理研究の成果を Haptic デバイスの演出法に活用するというアプローチも有力であることに気付く。本研究では、このアプローチに従った研究を進める。すなわち、本研究の最終目標として、実物の手触り感を再現する Haptic デバイスを実現することを掲げて、触覚における形状、硬さ、材質感認識の演出方法を確立することを研究目的とする。そのための小目標として、

- ・触覚の求心性信号と骨格筋への遠心性信号が形状認識に及ぼす調査
- ・Pseudo-Haptics に代表される多感覚統合による表現の拡張
- ・触覚の錯覚現象の機序についての調査とその Gestalt による解釈

などを主に実施する。

このため本論文では、まず触覚の基本的な感覚処理である能動触と受動触についての調査を行う。能動触と受動触は、遠心性コピーと呼ばれる運動に対するシミュレーションが存在するか否かという点において大きく異なる。従って、能動触と受動触それぞれの触覚の知覚精度を比較することで、脳内で行われる運動計画の役割を知ることが出来る。

次に、Pseudo-Haptics と呼ばれる視覚と触覚の多感覚統合の調査を行う。Pseudo-Haptics とは視覚刺激によって触覚に影響を与える現象である。従って、Pseudo-Haptics を利用することで少量のアクチュエータで開発した触覚ディスプレイに

においても多彩な触り心地を映像で与えることが可能である。本研究は、Pseudo-Haptics の視覚刺激に加えて触覚刺激を変化させることで程度表現の幅を広げることが可能であるか否か調査した。

最後に、感覚処理過程で感覚受容器からの入力以上の感覚が生起する現象である触錯覚現象の調査を行う。本論文では、VHI に生じる滑らかな感覚の触錯覚現象に着目する。この錯覚現象は、Gestalt 理論の全体は部分の総和ではないという考え方によく一致していることから、Gestalt の Prägnanz の法則のフレームワークに従って調査を進めて、Gestalt 理論に基づく VHI の機序解明を目指す。

上述した 3 種類の調査は全て、部分の総和が全体性をあらわさないという Gestalt の考え方に従う統合化に関係した感覚である。従って、複数の Gestalt 要因が関わっている現象であると言えるが、遠心性コピーと求心性信号の統合や、視覚と触覚の統合のような異なる感覚モダリティでの統合を Gestalt 理論のフレームワークで分析するのは難しいため、本研究では 3 つ目の触覚の Gestalt のみ Gestalt 理論のフレームワークを用いて分析を行い、それ以外に関しては通常の心理物理学実験手法を用いて調査を行う。

## 1.7 本論文の構成

初めの第一章で本研究のあらましを述べた。その中で関連する概念である触覚の錯覚と Gestalt について解説した。

次の第 2 章では、求心性と遠心性信号の相互作用により向上する知覚感度と精度について、能動触の腕の運動感覚を例にとって調査する。この研究では、「能動触の際に生成される遠心性コピーが知覚精度を向上させる」という仮説を立てている。このときの感覚処理メカニズムを明らかにすることは、どのようなタイプの触覚ディスプレイを設計するかを決定する上で極めて重要である。本仮説を検証するために、新しく開発した掌提示形触覚ディスプレイを用いて能動触と受動触のどちらの知覚精度が優れているのかを調査する。

続く第 3 章では、視覚と触覚のようにモダリティが全く異なる感覚の融合に

よって向上する知覚精度について調査する。1.6 節で紹介したように、先行研究では Pseudo-Haptics と触覚刺激の複合提示による硬さ表現能力を向上についてまだ十分に明らかにされていない。このためにまず、Pseudo-Haptics 単独の硬さ表現能力と触覚刺激単独の硬さ表現能力を調査する。それらの結果を踏まえて、Pseudo-Haptics と触覚刺激の複合提示による硬さ表現能力について心理物理実験を行い、モダリティの異なる感覚間にも精度を向上させるメカニズムがあることを示す。

第 4 章では、1.6 節で述べたこれまでの VHI に関する研究成果に基づき、VHI が Gestalt Grouping[Koffka, 1935]によって生み出されていると考え、Gestalt により VHI を説明することを試みる。本論文では、VHI の仮説として、『掌全体に圧力がかかる状態で、平行線が掌を往復運動することによる機械受容器に与えられる刺激、およびその刺激で生起される Gestalt によって VHI が生じる』を提案する。ここで得られた Gestalt が一定圧力下でせん断力を受けずに運動することによって VHI が惹起されるとした。このとき生起される Gestalt の要因として、特に閉合の要因を取り上げてそれが VHI の惹起に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。そのために、様々な図形を提示できる点図ディスプレイを用いて、閉合の要因の強度を変化させて VHI 感の惹起に及ぼす影響を調査する。すなわちまず、前述の仮現運動が成立するために必要な 2 本線の速度条件を明らかにする。次に、ドットで 2 本の線を表現し、上記の実験で求めた最適な仮現運動速度の条件で、ドットの密度と平行線の長さを変化させたときの VHI 感を調査する。

最後の第 5 章では、本研究の結論及び今後の展望を述べる。

## 2. 能動触及び受動触が知覚精度に及ぼす影響

### 2.1 緒言

触覚を利用した VR 技術が注目されており，触覚フィードバック可能なアクチュエータを搭載した Haptic デバイスの開発がなされてきた．例えば，デルタハプティックデバイス[Grange, 2001]，振動触覚ディスプレイ[Ikei, 1999]，など様々なアクチュエータを用いて開発されてきた．これらの Haptic デバイスは，エンターテインメント，リハビリテーション，ロボットの遠隔操作など，様々なアプリケーションに使用されることが期待されている．また，Haptic デバイスは，力覚と触覚を同時に提示することができ，さらなる実装の大きな可能性を秘めている [Massie and Salisbury, 1994; Broeren, 2004; Halvorsen, 2006].

このような触覚ディスプレイの研究においては，能動触と受動触のどちらの方が知覚精度という点において優れているかという問題が存在する．この問題は VR 機器を開発する上で極めて重要である．能動触では遠心性コピーという運動知覚の事前準備のような処理が存在するが，受動触ではそれが存在しない．すなわち，感覚処理プロセスの差が知覚精度に及ぼす影響を明らかにする必要があるという事である．そこで，本論文では能動触あるいは受動触で図形を触り，それぞれの角度弁別閾を調査することで，能動触における遠心性コピーがどのような役割を果たすのかを明らかにする．

本章では，まず現在まで実施されてきた能動触及び受動触の研究成果，及びアクチュエータ技術についてまとめる．その後，盲人用点図ディスプレイ（SC10, KGS 社）を搭載した掌提示型触覚マウスについて説明を行う．次に受動触における図形提示速度と知覚精度の関係の調査結果を説明する．そして最後に，能動触と受動触それぞれの知覚精度の調査結果を説明する．

## 2.2 能動触及び受動触と主観的角度

まず、現在までに実施された能動触及び受動触と角度弁別閾に関する研究結果について紹介する。まず過去に行われた受動触に関する研究について説明する。Henriques は受動触における人間の角度弁別閾に関する調査を行った[Henriques and Soechting, 2003]。この実験では、被験者は右手でマニピュレータを握り、マニピュレータの動きを受動的に知覚する。そのような実験系において、被験者自身の右手が身体の正中線に対して水平に動かされているか否かを評価した。その結果、角度弁別閾は  $4.92^\circ$  であることが明らかにされた。

一方、能動触における角度弁別閾も別の研究者によって実施された[Voisin and Benoit, 2002]。この実験は、右人差し指を使用して心理物理学実験手法の恒常法で行われ、その結果角度弁別閾が  $5.2^\circ$  であることが得られた (図 2-1)。ただし、この実験系は右指で鉛直方向に設置された材料のエッジを知覚するものであるため、水平方向の角度弁別閾を求めた上述の研究成果と比較することはできない。

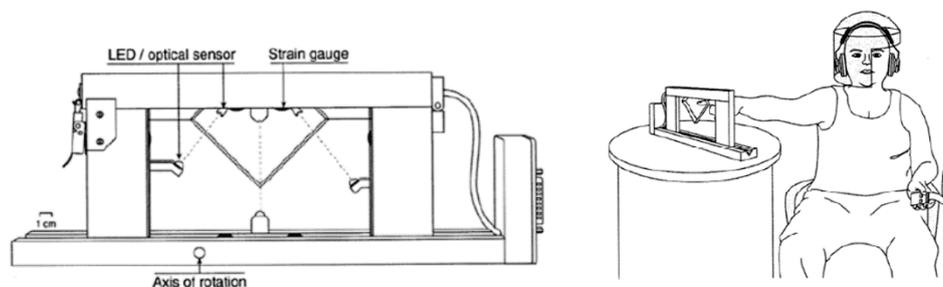


図 2-1 右人差し指を用いた能動触による角度弁別閾の調査[Voisin, 2002]

上述の研究結果によると、受動触の角度弁別閾は  $4.92^\circ$  であり、能動触の場合は  $5.2^\circ$  である。しかし、ヒトの触知覚には空間的異方性が存在し、身体の矢状面の方角で行われた実験と、横断面で行われた実験の結果を比較することが不可能である。従って、上述の 2 つの実験結果から能動触と受動触のどちらの方が知覚精度で優れているのかを結論付けることが難しい。そこで本研究では、空間的異方性を考慮し、身体に対して実験を実施する場所を限定したうえで、能動触と受動触

の知覚精度を比較し，両者の異なる感覚処理プロセスが知覚精度に及ぼす影響を調査する．

### 2.3 アクチュエータ技術

既存の点図ディスプレイを駆動するアクチュエータ技術の調査を実施し，本実験に適したデバイスの選定を行う．表 2-1 に示すように，1990 年代から様々なアクチュエータを用いた点図ディスプレイに関する研究が行われてきた．点図を用いて触覚ディスプレイでは，離散的に並んだ触知ピンで表現された図形が触動作を通じて連続的な刺激であるように知覚できなければならない，すなわち，ピン間隔が触覚の受容器密度に比べて十分に小さい必要があるという事である．それ以外にも，触知ピンの応答時間，サイズ，消費エネルギー，及びコスト等に関しても重要な要素となっている．その結果，多くの研究者はこれらの要因を最適化するために，様々なアプローチでアクチュエータを使用し点図ディスプレイを開発してきた．表 2-1 に示すように，様々なアクチュエータ技術を用いて開発された点図ディスプレイは多数存在するが，ピン間距離と応答時間の要件を同時に満たすものは存在しない．しかし， piezoelectric アクチュエータは上記の仕様の全てを満足しているわけではないが，制御性とコンパクトさを考慮して本論文において採用した．

以下に，点図ディスプレイのために開発されたアクチュエータを紹介する．

#### **Bimorph piezoelectric ceramic actuator ( piezoelectric アクチュエータ )**

piezoelectric アクチュエータは，最も点図ディスプレイに使用されている．ピン間隔に関しては年々改善がなされ，1.5 mm 以下程度のピン間隔が実現されている． piezoelectric アクチュエータは非常に応答性が高いため，触覚ディスプレイに適したアクチュエータであると言えるが，コストが非常に高い． [Watanabe, 1999; 2000; Kyung and Kwon, 2000; Ohka, 2007; Ros, 2014].

#### **Shape Memory Alloy (形状記憶合金)**

このアクチュエータは形状記憶合金を使用したものである。1.27 mm という非常に狭いピン間隔を実現できている。しかし、温度変化による金属の変位を利用することから、応答速度が非常に遅く、点図ディスプレイには不向きである。[Tayler, 1998; Zhao, 2012; Matsunaga, 2013].

#### Stepping motor (ステッピングモータ)

ステッピングモータを使用したアクチュエータは、触知ピンの高さ制御に非常に優れた性能を発揮する。また触知ピンの高さを一定に保つ制御には電力を使用しないため、消費電力は非常に低いという特徴がある[Shinohara, 1989]。しかし、点図ディスプレイサイズの非常に小さなアクチュエータを実現することを考慮するとステッピングモータはトルクが弱く触知ピンの押付力は非常に小さくなる。そのため、触覚ディスプレイには適していないと言える。

#### RC Servomotor (RC サーボモータ)

RC サーボモータを使用した触覚ディスプレイでは、直径 1 mm のピアノ線で作成された触知ピンを動かすのに使用される。各ピンの端部にはレバー形状の部品が取付けられ、サーボモータの回転エネルギーを並進方向に変換する機構によって駆動する。サーボモータにより触知ピンの高さを自在にコントロールすることは可能であるが、ピンの応答速度は非常に遅くなるという欠点がある。また、サイズに関してもステッピングモータと同様の問題が存在する。

#### Phase-change material actuator (相変化物質アクチュエータ)

2005 年に開発されたこのアクチュエータは、パラフィンワックスの揮発性を利用したアクチュエータである[Lee, 2005]。このアクチュエータは、気化を利用する原理のために非常に大きな力を取り出すことができるため、主に医療機器に使用されている。しかし、アクチュエータの応答速度がパラフィンワックスの気化速度に依存するために非常に遅く、触覚ディスプレイには不向きであると言える。

### **Pneumatic pressure and low temperature melting metal (空気圧及び低温溶融金属)**

この原理は 2004 年に初めてアクチュエータに利用された[Nakashige, 2004]. 触知ピンは低融点金属に固定されており, 一度金属がヒーターによって溶かされると, 空気圧によって触知ピンが上下に動かされる仕組みである. このアクチュエータは押付力を空気圧で制御できる点に特徴があるが, 空気圧や金属の融解を利用するという性質上応答速度が遅いという問題もある.

### **Flapper actuator (フラッパーアクチュエータ)**

フラッパーアクチュエータは, 鉄心, エナメルコイル, 電機子によって構成されている[Yeh and Liang, 2007]. この電磁気学の理論を用いたアクチュエータを点図ディスプレイに適用すると, ブラッシングの快適な感覚が得られ, それは非常に低コストで実現可能である.

### **Electroactive polymer (EAP; 電気活性ポリマー)**

EAP は表示軽量, 小型, 柔軟, 省電力という特徴からウェアラブル触覚デバイスのアクチュエータに非常に向いている[Kato, 2007]. ピン間隔と応答速度はピエゾアクチュエータと同程度と性能が良いが, 発揮可能な力が非常に弱い.

### **Pneumatic actuators (空気圧アクチュエータ)**

空気圧アクチュエータである. 各触知ピンの高さを電磁弁によって制御できる場所に特徴がある. すなわち, 単純な凹凸以外の刺激, 例えば斜面や曲面も提示面に表現可能である[Kim, 2012]. またピン間隔も狭くすることが可能である.

### **Polyoxymethylene (POM; ポリオキシメチレン)**

POM は光学および機械工学を使用したアクチュエータである. POM が光を受光すると伸縮する特徴を利用しており, この特徴を利用することで触知ピンを上下に動作する [Torrassa, 2014]. しかし, 応答速度に関しては POM の光に対する変形特性を利用することから非常に遅く, 発揮できる力も他のアクチュエータと比

較して小さい。

表 2-1 点図ディスプレイに用いるアクチュエータ技術

Actuator	Year	Authors	Matrix	Resolution	Stroke	Presentation area	Force	Frequency
1. Piezoelectric actuator	1999	Watanabe	4 × 8	2.4 mm	0.7 mm	21 mm × 25.6 mm	0.177 N	100 Hz
	2007	Ohka et al.	8 × 8	1.0 mm	0.7 mm	7 mm × 7 mm	0.177 N	100 Hz
	2008	Kyung et al.	5 × 6	1.8 mm	0.7 mm	9.7 mm × 7.9 mm	0.06 N	350 Hz
	2014	Ros et al.	8 × 8	1.5 mm	0.7 mm	10.5 mm × 10.5 mm	0.0833 N	20 Hz
2. Shape Memory Alloy (SMA)	1998	Taylor et al.	4 × 16	3.6 mm	1.7 mm	20 mm × 40 mm	-	2 - 3 Hz
	2012	Zhao et al.	3 × 8	2 mm	3 mm	4.5 mm × 17.6 mm	-	-
	2013	Matsunaga et al.	10 × 10	1.27 mm	2 mm	-	0.1 ~ 0.15 N	3 Hz
3. Micro stepping motor	1998	Shinohara et al.	64 × 64	3 mm	10 mm	200 mm × 170 mm	2.94 N	0.067 Hz
4. Servomotors	2002	Wagner et al.	6 × 6	2 mm	2 mm	10 mm × 10 mm	-	7.5 Hz (max. 25 Hz)
5. Pneumatic pressure and low-temp. melting metal	2004	Nakashige et al.	10 × 10	2 mm	-	20 mm × 20 mm	Depends on pneumatic pressure	0.06 Hz
6. Phase-change material actuator	2005	Lee et al.	-	2.5 mm	1 mm	-	0.3 W	0.01 - 0.04 Hz
7. Electroactive polymer (EAP)	2007	Kato et al.	-	-	-	-	0.0147 N	1-2 Hz
	2008	Koo et al.	4 × 5	3 mm	0.5 mm	11 mm × 14 mm	10 W/cm <sup>2</sup>	50 Hz
8. Flapper-type actuator	2007	Yeh & Liang	-	2.5 mm	0.7 mm	-	0.156 N	-
9. Pneumatic actuator	2012	Wu et al.	2 × 3	2.5 mm	0.6 mm	2.5 mm × 5 mm	0.05 N	0.2-150 Hz
10. Polyoxymethylene (POM)	2014	Torrassa et al.	10 × 10	3 mm	3 mm	25 mm × 25 mm	0.04 N	0.28 Hz (max.)

## 2.4 実験方法

本論文では，掌で物体に触れたときの知覚精度を実験的に明らかにする．探索方法は受動触と能動触の2種類である．被験者は点図ディスプレイが搭載された触覚マウスを使用して，液晶ディスプレイ上に映し出された仮想エッジを触るといふ課題を行う．この課題は恒常法で行われるため，2つの仮想エッジを連続で触りどちらの角度が大きいのかを回答することが課題である．この課題は閉眼状態で行われ，受動触では仮想物体側が動き，能動触では被験者が能動的にマウスを動かす（図 2-2）．

続いて，能動触及び受動触の知覚システムがどのように異なるのかを説明する [Taylor, 1973]．図 2-3 は Taylor が能動触メカニズムについて説明した図を，遠心性コピーの機能を追加するために，岩村[岩村, 2005]が加筆し，さらに我々が受動触についても説明する為に変更を加えた図となっている．

能動触の感覚処理プロセスでは，図 2-3 に示すように，脳の振る舞いと運動を行うために運動器に送られる遠心性信号を計画する．それと同時に機械受容システムによって捕捉された感覚は求心性の信号として大脳に戻される．これに対して，受動触では運動信号に送信される遠心性信号は生成されないために遠心性コピーがテクスチャアナライザーに送られることはない．能動触では遠心性コピーと求心性信号の両方がテクスチャアナライザーで解析されるために，取得された触覚テクスチャの同定精度が向上すると仮定される．

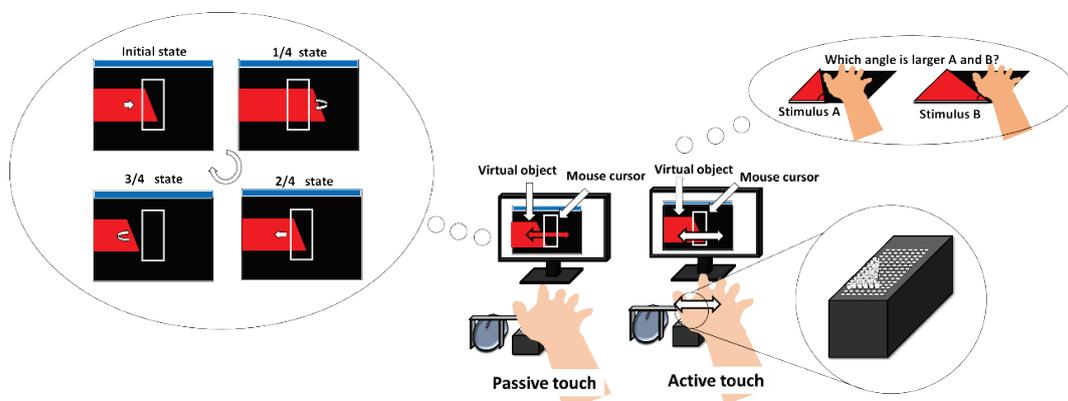


図 2-2 能動触及び受動触のタスク概要

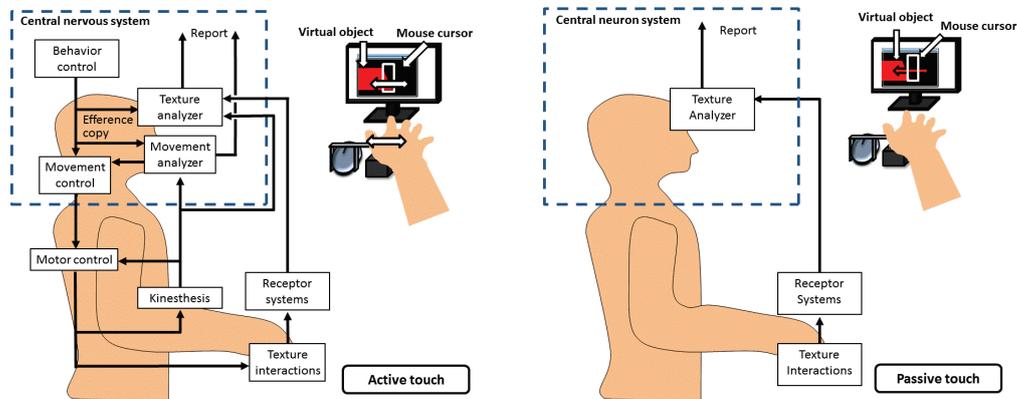


図 2-3 能動触及び受動触の知覚処理メカニズム [Taylor, 1973; Iwamura, 2001]

#### 2.4.1 装置設計

掌に提示面を持つ触覚マウスについて解説を行う[Rajaei, 2016]. マウス型ディスプレイを採用した理由は、被験者が自然な動きで実験を行う事ができるようにするためである. ピンは  $12 \times 32 (= 384)$  に配置され、それぞれのピン間隔は  $2.4 \text{ mm}$  である SC10 (KGS, Japan) を採用した. 触知ピンは、バイモルフ圧電セラミックアクチュエータであり、 $200 \text{ V}$  が印加されると  $0.7 \text{ mm}$  のストロークで動作する. SC10 は本来、視覚障害者が指先で点図を使用してテキスト情報を読むように設計されているため、指先に図形を提示するには優れていない. しかし、掌の二点弁別閾は  $13 \text{ mm}$  であり、ピンピッチ  $2.4 \text{ mm}$  の分解能でも十分に図形を掌に提示することが可能であることから掌を提示対象として採用した. [Johansson and Vallbo, 1983], [Fox, 2002]. 掌提示型触覚マウスシステムは、PC (OS : Windows 7), DIO (PCI-2772C, Interface), SC10 (KGS, Japan), および光学式マウスで構成されており、マウスカーソルを動かして、液晶ディスプレイに投影された仮想物体に触れると、対応する触知ピンが立ち上がり、被験者の掌を刺激するという仕組みである (図 2-4, 図 2-5).

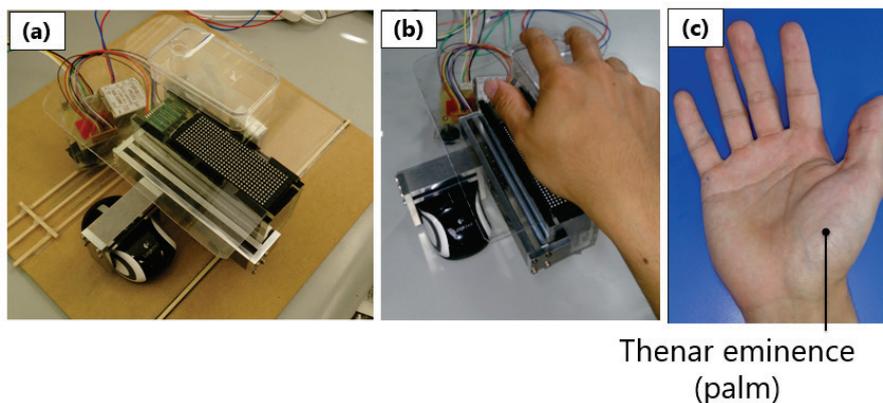


図 2-4 (a):掌提示型触覚マウス (b):使い方, (c):提示部位

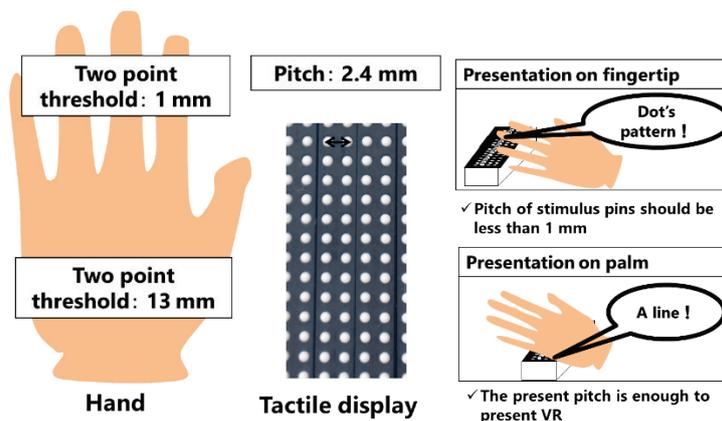


図 2-5 掌特性と点図ディスプレイ特性の関係性

ソフトウェアは、C++および OpenGL で作成された。マウスカーソルと仮想物体間の接触を評価するために、OpenGL の RGB 値を使用した接触判定システムを作製した (図 2-6)。マウスカーソルは、ドットマトリックス表示に対応する  $12 \times 32$  で構成されており、マトリックスの各セルには緑色 (RGB 値 : 0, 255, 0) が割り当てられている。一方、仮想物体には赤色 (RGB 値 : 255, 0, 0) が割り当てられており、マウスカーソルのマトリックスが仮想物体に触れてオーバーラップすると、オーバーラップしたマトリックス部分が緑色から黄色 (RGB 値 : 255, 255, 0) に変化し、点図ディスプレイの対応する触知ピンが押し出される。この接触判定システムは、マウスカーソルと仮想物体間の距離の計算を必要としないため、接触判定の計算コストが削減され、参加者に時間遅延なくピン刺激が提示

される。従って、このアプローチには、実験的なタスクを簡単に作成できるという利点がある。

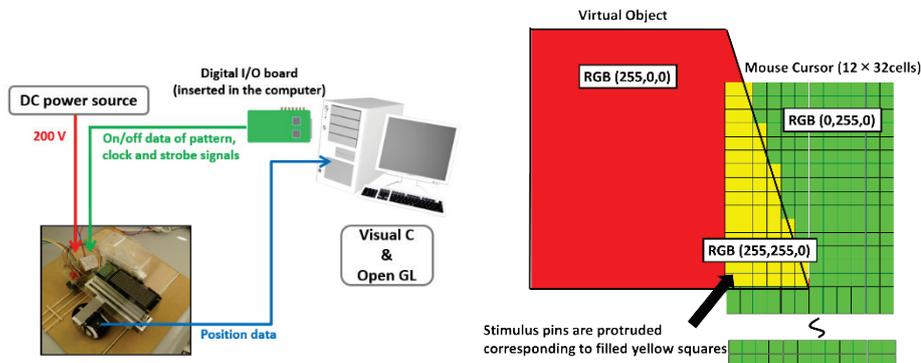


図 2-6 触覚マウスの制御システム (左図：制御回路, 右図：接触判定)

#### 2.4.2 修正版恒常法

心理物理学実験手法として恒常法を採用し角度弁別閾を調査した。恒常法では、被験者は2つの刺激を比較し刺激が大きい方を判断する課題を実施する。本実験の場合では、標準刺激と比較刺激として点図で表現された2つの図形を触る課題を実施し、図形の斜辺のエッジ角度の大きい図形を判断する課題を実施した。両者のエッジ角度が近い場合は判断を誤る確率が増加し、両者の角度差が大きい場合は正確に判断できる確率が増加する。すなわち、確率を用いることで識別できる角度差の限界である角度弁別閾を求めることが可能となる。解析では、比較刺激が大きいと回答された確率を用いる。比較刺激が標準刺激よりも大きいと判断される確率を  $z$  得点に変換し、角度弁別閾を  $z$  得点の心理測定関数を使用して計算することが可能となる。角度弁別閾が悪い条件下では心理測定関数の傾きが減少し、角度弁別閾が向上すれば心理測定関数の傾きが増加するためである。

本論文では、被験者が集中して取り組める環境を作るため、通常の恒常法のルールを一部変更して実験の試行回数を減らし実験時間を30分以内に短縮した。通常は標準刺激群と比較刺激群を同じ数準備し、総当たりで比較課題を行う。しかし、実際に解析で使用するデータは標準刺激の一部と比較刺激を比較した際のデータである。そこで、実際に解析に使用する条件のみに絞り実験を行った。すな

わち、 $m$  と  $l$  はそれぞれ標準刺激と比較刺激の数とした場合、実験の総試行回数は  $n = m(l + 1)$  として計算される  $n$  回の試行で構成される。被験者は、標準刺激と比較刺激のすべての組み合わせを比較する必要があるが、標準刺激と比較刺激が同じ場合、刺激順序の影響を排除するため、参加者はこの組み合わせを 2 回比較する必要がある。従って、「+1」は、同じ刺激の二重カウントを意味する。標準刺激は、 $m = l$  が通常採用される定数刺激法で使用されるものと同等であるが、この研究では  $m < l$  が採用するという事である。統計分析の後、心理物理学的手順に基づいたいくつかの条件の差の閾値 (Differentz Liemen; DL) を取得した[Gescheider, 1997].

## 2.5 実験条件

### 2.5.1 実験参加者

22 歳から 25 歳の名古屋大学の学生 17 人 (女性 2 人, 男性 15 人) が本論文の心理物理実験に参加した。すべての実験は、名古屋大学の倫理委員会によって承認されたものである。実験では視覚情報を排除するために、全ての学生にアイマスクを着用させた。

### 2.5.2 実験 1-A

掌の機械受容器の特性と知覚精度の関係を明らかにするために、様々な速度で動く図形を触り傾斜部分のエッジ角度を比較する実験を受動触で実施した。図形が動く速度は 45, 90, 130, および 170 mm/s の 4 種類である (表 2-2)。実験条件は 1 課題あたり 96 条件 (速度 4 条件) × (標準刺激 3 条件) × (比較刺激 8 条件) である。96 条件の刺激はランダムで被験者に提示される。各被験者にこの課題を 3 回ずつ実施した。

### 2.5.3 実験 1-B

能動触における遠心性コピーが形状知覚精度に及ぼす影響を調査することを目的に、能動触と受動触それぞれの形状知覚精度の調査及び比較を行った。表 2-3

に示す条件が今回実施した恒常法の実験条件である。本実験では、感覚処理以外の要素、すなわち触覚に入力される情報を統一する為に、能動触で被験者が動かした触覚マウスの動きを受動触にプレイバックさせる方式で実験を実施した。従って、実験は能動触を先に実施し、その後受動触を実施するという順番で行われた。実験 1-B では、1つの課題は 30 回の試行で構成された：(標準刺激 3 条件) × (比較刺激 9 条件+1 条件)。それぞれの被験者は、能動触、受動触ともに 3 回ずつこの課題を実施した。

表 2-2 実験 1-A の条件

Parameter	Value
Velocity	45, 90, 130, and 170 mm/s
Standard stimuli	65°, 70°, 75°
Comparison stimuli	55°, 60°, 65°, 70°, 75°, 80°, 85°

表 2-3 実験 1-B の条件

Parameter	Value
Velocity	According to subject's manner
Standard stimuli	65°, 70°, 75°
Comparison stimuli	50°, 55°, 60°, 65°, 70°, 75°, 80°, 85°, 90°

## 2.6 実験結果と考察

### 2.6.1 実験結果 (実験 1-A)

実験 1-A では、発火させる機械受容器が知覚精度に及ぼす影響を調査する為に 45, 90, 130, および 170 mm/s の 4 速度条件下での角度弁別閾を調査した。標準刺激 65°, 70°, 75°それぞれに対する 4 速度条件それぞれの  $z$  得点と心理測定関数を図 2-7 に示す。また心理測定関数から求めた角度弁別閾を図 2-8 に示す。角速度間で知覚精度を比較することを目的に、SPSS 16.0 を使用して  $z$  得点で得られた心理測定関数の傾き間に共分散分析 (ANCOVA) を実施した。角度弁別閾を比較すると、どの標準刺激に対する結果に対しても低速度条件群 (45, 90, 130 mm/s) と高速度条件群 (170 mm/s) の間に有意差が確認され、速度が増加するにつれて知

覚精度が悪化することが明らかになった。

### 2.6.2 考察（実験 1-A）

受動触では，低速度条件群（45～90 mm/s）での知覚精度が高速度条件群（130～170 mm/s）での知覚精度よりも優れていることが明らかになった．この結果に対して，提示した速度条件と機械受容器の反応について考察する．機械受容器が受ける振動周波数  $f$  は  $f=v/\lambda$  で計算することが可能である．ここで， $v$  と  $\lambda$  はそれぞれ速度と波長である．速度  $v$  は点図ディスプレイ上の線の動きを意味しており，ピン間距離を波長  $\lambda$  として計算する．

$$f \text{ (Frequency)} = \frac{v \text{ (velocity)}}{d \text{ (pin pitch)}} \quad (2.1)$$

触知ピンの直径  $d$  は 2.4 mm，低速度条件は 45 および 90 mm/s であることから，触覚受容器が得る振動周波数はそれぞれ 19 および 38 Hz である．一方，高速度条件である 130 および 170 mm/s は，それぞれ 54 および 71 Hz である．皮膚の機械受容器のうちで皮膚変形速度に反応するマイスナー小体（FA I）は約 50 Hz 未満の低周波数に反応する[Rajaei, 2012]．また皮膚に加わる定常的な力情報はメルケル細胞（SAI）に反応する．従って SAI および FAI の発火頻度を最大化する振動刺激によって，低速度条件でのエッジの知覚精度が向上する．

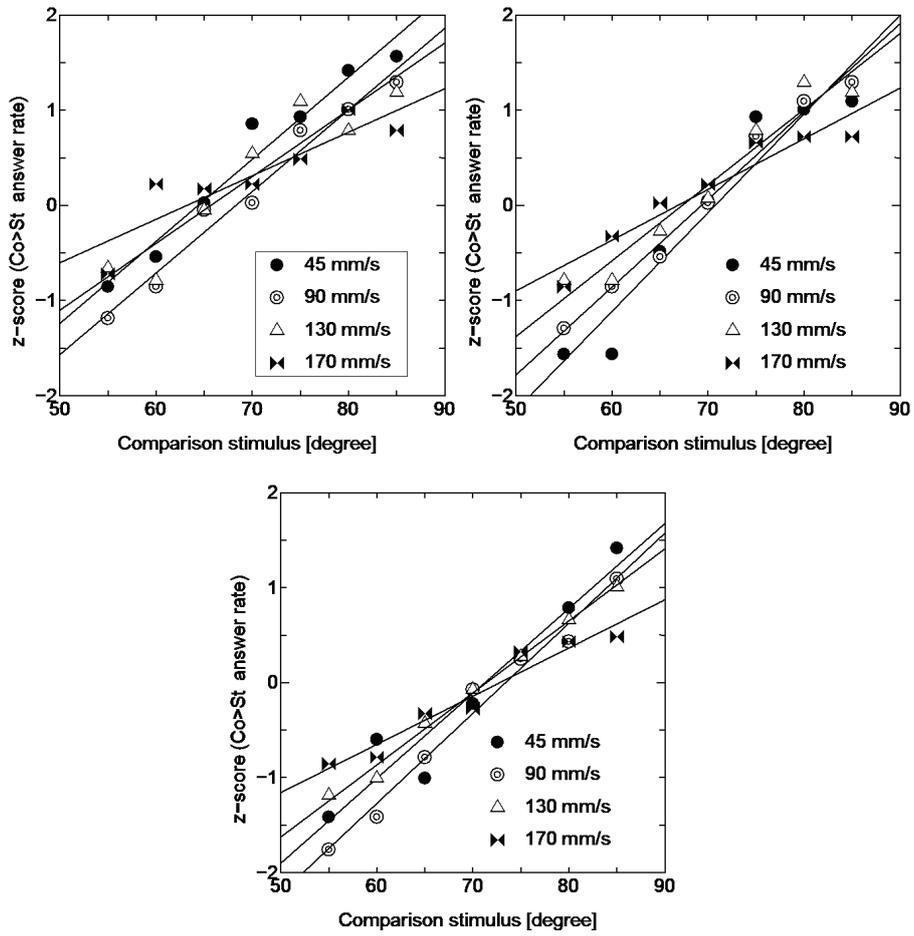


図 2-7 z 得点を用いた受動触における相対運動と知覚精度の比較  
 左上:標準刺激 65° , 右上:標準刺激 70° , 下:標準刺激 75°

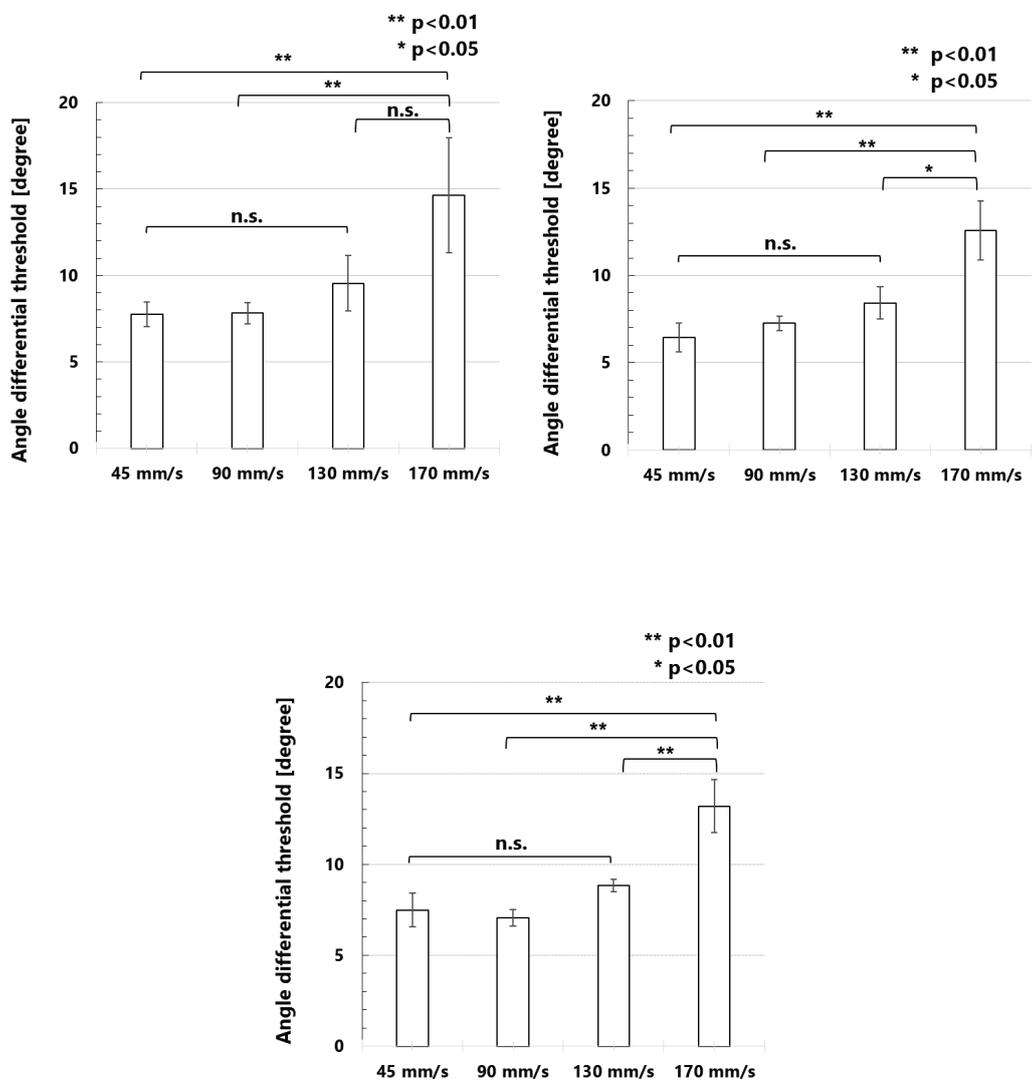


図 2-8 角度弁別閾を用いた受動触における知覚精度と相対速度の関係  
 左上:標準刺激 65° , 右上:標準刺激 70° , 下:標準刺激 75°

### 2.6.3 実験結果 (実験 1-B)

実験 1-B では、感覚処理が知覚精度に及ぼす影響を調査する為に、能動触と受動触それぞれの知覚精度を調査した。z 得点の心理測定関数を図 2-9 に示し、エッジ角度弁別閾を図 2-10 に示す。能動触と受動触それぞれの心理測定関数の傾きに対して共分散分析 (ANCOVA) を実行した。ANCOVA を使用することにより能動触と受動触それぞれの心理測定関数の傾きに有意な差があるのか否かを明らかにすることが出来る。統計解析の結果、それぞれの標準刺激  $60^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $75^\circ$  において、能動触と受動触それぞれの有意確率が  $p=0.49$ 、 $0.11$ 、 $0.16$  となった。

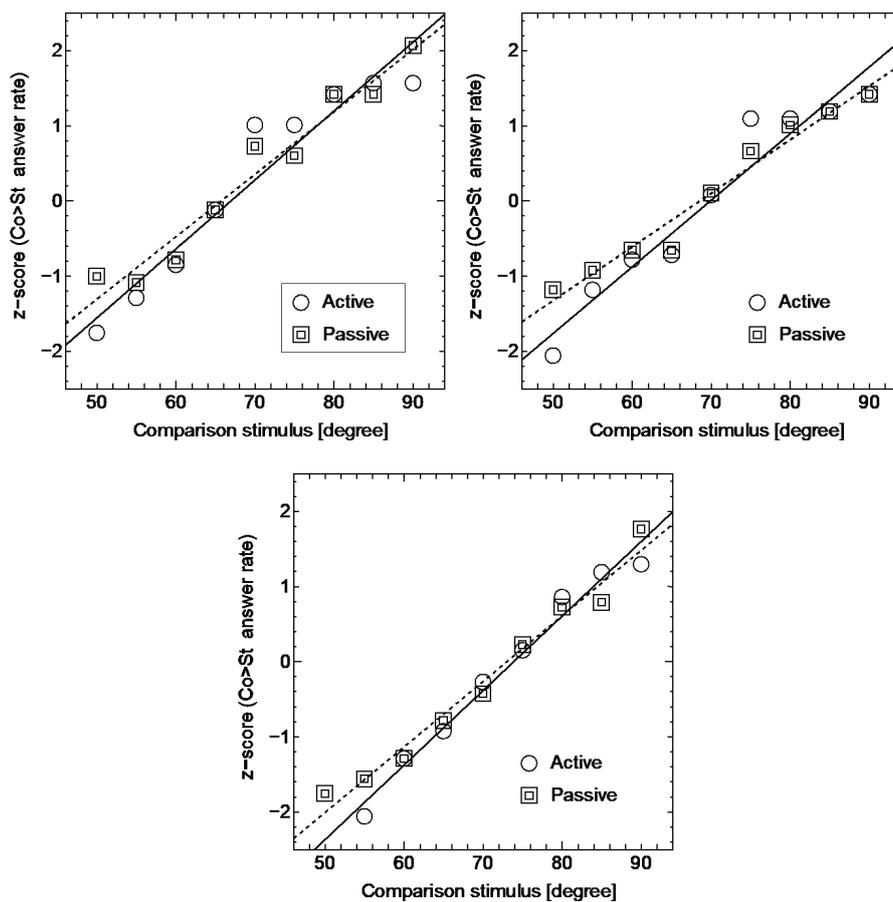


図 2-9 z 得点を用いた能動触及び受動触の知覚精度の比較  
 左上:標準刺激  $65^\circ$  , 右上:標準刺激  $70^\circ$  , 下:標準刺激  $75^\circ$

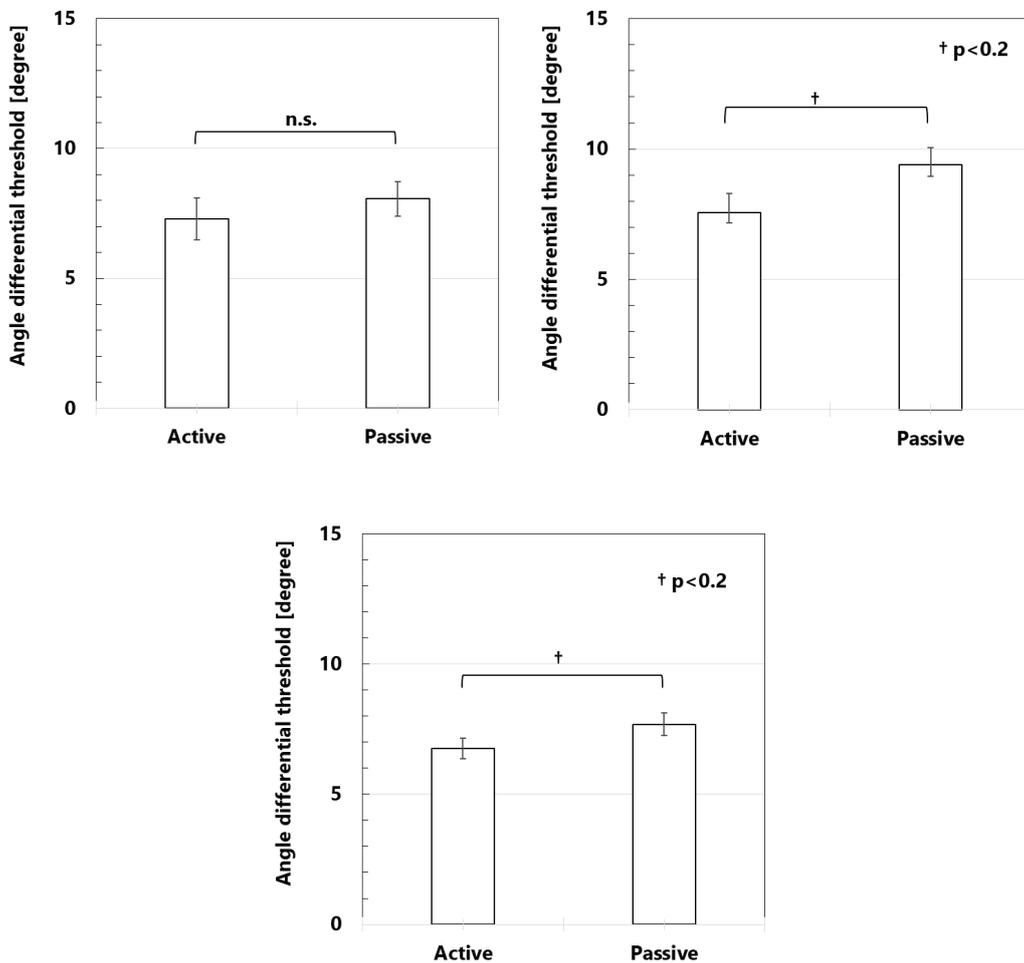


図 2-10 角度弁別閾を用いた能動触及び受動触間の知覚精度の比較  
 左上:標準刺激 65° , 右上:標準刺激 70° , 下:標準刺激 75°

#### 2.6.4 考察 (実験 1-B)

実験 1-B の結果は、1.3.2 章で説明した神経科学の観点からの感覚処理プロセスが異なるにもかかわらず、受動触と能動触それぞれの知覚精度の間に差があるとは言えないことを示している。能動触の場合、求心性信号と遠心性の運動指令により、触覚によって形状が知覚されたときに手を動かす。一方、受動触では、すべてのオブジェクト情報が触覚によって同時に知覚される。しかし、知覚精度

という観点では，受動触と能動触の間に有意な差は確認されなかった．この結果は，人間が触覚情報のみからオブジェクトの形状を正確に認識する能力を持っていることを示唆している．触覚情報の時間変化に基づいて，図 2-3 に示すテクスチャアナライザーで，遠心性コピーの代わりに情報が生成されと考えられる．物体の動きによって引き起こされる触覚情報の劣化は，脳内の情報処理によって補償される可能性があり，それにより，遠心性コピーの助けを借りずに安定した触覚画像が維持されるという事である．さらに，VR エンジニアの観点から考えると，上記の受動触の能力は，テクスチャプレゼンテーションにモータ駆動部品を必要としない，より小さな VR デバイスの開発が可能であることを示している点で意味がある．

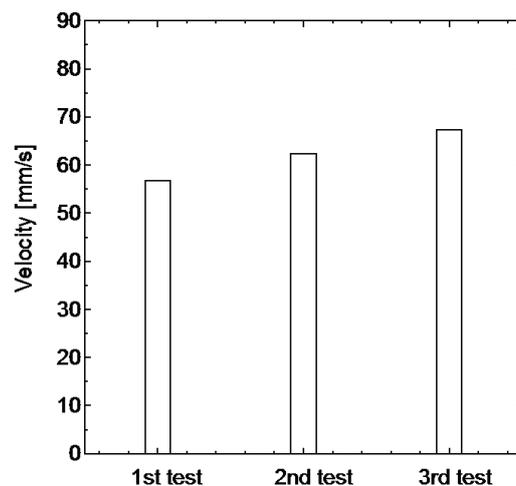


図 2-11 能動触の平均速度

次に，能動触で観察される触覚速度の適応について検討する．実験 1 では，低速条件（45 mm/s および 90 mm/s）が物体を正確に認識する上で適していることを明らかにした．すなわち，能動触において知覚精度を最大化するために，人間は物体に触れる速度を 45～90 mm/s の間で制御しているのではないかと考え，能動触時の探査速度をまとめた．図 2-11 は，能動触実験で得られた被験者の物体を探査する平均速度と課題順序の関係である．課題が 1 番目から 2 番目，3 番目と進

むにつれて、探査速度が 56, 62, および 67 mm/s に増加することが示されている。この結果は、人間が物体に触れる速度を 45~90 mm/s の範囲で調整していることを示唆しており、すなわち感覚受容器の働きが最も課題に適したものになるように調整しているという事である。さらに課題を続けた場合、オブジェクトに触れる最適な速度を明確にできると考えられる。

最後に、指先と掌の知覚精度の差について調査する。掌と指先の最大の違いは、感覚受容器の密度である。指先の感覚受容器は、掌のおよそ 5 倍の密度で分布している。しかし、角度弁別閾は、掌 (7.1°) であり、指先 (7-9°) [Zhou, 2011] とほぼ同じ値である。この事実は、エッジ方向の知覚精度が受容器密度と接触面積の両方に依存することを示唆している。

## 2.7 結 言

小型で安価な VR デバイス技術開発のために、能動触と受動触それぞれの知覚精度を調査した。点図ディスプレイを用いた触覚マウスを開発し、恒常法を用いた心理物理実験を実施して角度弁別閾を測定した。実験では点図ディスプレイ上に三角の図形を提示し、標準刺激と比較刺激でどちらの図形のエッジ角度が大きいのかを回答させた。まず初めに、知覚精度と機械受容器の関係を明らかにすることを目的に、45, 90, 130, 170 mm/s の 4 種類の速度と角度弁別閾の関係を受動触で調査した。その結果、速度が遅い条件において知覚精度が向上した。すなわち、FA I が最も活性化されたときに知覚精度が最大になることを明らかにした。実験 2 では、能動触と受動触の感覚処理メカニズムの違いが知覚精度にどのような影響を及ぼすのかを調査した。調査の結果、能動触と受動触の間に違いがないことを確認された。これは、人間は触覚情報から触ったものの速度と形状を掌で同時に正確に認識する能力を持っているという事である。この結果から、点図ディスプレイ等で表現できるような簡単な仮想物体を触るという条件においては、駆動部分を必要としない触覚デバイスを開発可能となる。

能動触における運動戦略が知覚精度に影響を与えるわけではないという事実は、多くの触覚ディスプレイを設計する上で有用な知見となると考えられる。例

えば、視覚障害者向けの触覚マップデバイスの設計に役立つと考えられる。この地図では、道路や建物を示す凸面パターンを通して視覚障害者にナビゲーション情報を提供する。この研究成果は、人が受動的感覚を通じて触覚デバイスに同時に表示されるオブジェクトの正確な速度と形状を取得できることを示しているため、点図ディスプレイ全体を動かすことなしに表示された地図データを認識可能である。

今後は、触覚提示を強化するための2つの戦略で調査を実施する予定である。1つは触覚提示に別の感覚（例えば視覚）を加えて提示性能を向上させる取り組みである。もう1つは人間の神経系に基づく触覚認識現象を適用することである。前者の戦略では、著者の研究グループの研究[Zhou, 2011]で接線刺激の効果を実証しているため、接線刺激を使用して SA II を励起することにより提示性能を向上可能である見込みを持っている。後者の戦略については、2つの計画がある。1つ目は、以前の論文[Rajaei, 2013]で検討した Velvet Hand Illusion (VHI) を活用することである。2つ目の戦略は、確率共鳴[Becerren, 2013]を使用することであり、これにより適切なレベルの振動触覚刺激を使用して人間の感度が向上するので、提示性能も向上可能となる見込みである。

## 3. 触覚と Pseudo-Haptics による硬さ提示

### 3.1 緒言

仮想空間内で表現された物体を触ったり、持ち上げたりして本物のように感じるためには、操作者への力覚・触覚のフィードバックが有効である。力覚・触覚を提示するデバイスのことを Haptic デバイスと呼び、バーチャル・リアリティ (VR) の分野で注目されている[松村, 2009; 黄, 2010]。Haptic デバイスが扱う力覚と触覚の内、力覚の提示の方はシリアル型やパラレル型のロボットマニピュレータを用いる方法が一般的であり、市販の装置も数多く市場に出ている。これらの装置とは異なる原理によって、仮想物体との接触によって生じる反力を表現するために、非対称振動など機械的振動を刺激として用いることも数多く提案されている[Amemiya, 2005]。もう一方の能力である触覚提示については、表面の凹凸や摩擦状態を表現することが求められている。この触覚提示のための装置のことを特に触覚ディスプレイと呼び、既に存在する電動モータの使用で十分達成される力覚提示とは異なり、今後開発が期待される高度なマイクロアクチュエータが求められている。本論文では、触覚ディスプレイの提示能力の向上を目指している。

この触覚ディスプレイについては、指の表面に作用するせん断力を変化させる戦略も採用されている[Nakamura and Yamamoto, 2013; Tamon, 2012]。これらの研究に比べて、ヒトの皮膚に分布して存在する機械受容器に対応して、皮膚に刺激を与えるピンを多数面状に配置する設計法の方が発表例は多い。このような大規模集合アクチュエータによる触覚ディスプレイについては、著者の研究グループでも以前に 1 mm ピッチで 8×8 配列したものを発表している[大岡, 2005; 2006]。最近の例では、1.5 mm ピッチで 60×60 配列したものなどが提案され集積規模が拡大されてきている[Bellik and Clavel, 2017]。このような大規模集合アクチュエータによる触覚ディスプレイを開発するためには、アクチュエータのマイクロ化に関する高度な技術開発が求められている。大規模集合アクチュエータの材料として形状

記憶合金や圧電セラミックスが有力であるが、集積化するためにはアクチュエータ素子のマイクロ化が必要であり、マイクロ化すると十分なストロークと発生力が得られず、現状では仮想物体を押し付けた時に発生する反力の大きさが十分でないという問題がある。このように、現状のマイクロアクチュエータを触覚ディスプレイに用いるためには、発生ストロークと発生力の不足を補う方法が必要とされている。

そこで本章では、その補う方法として以下のような **Pseudo-Haptics** を活用することを提案する。**Pseudo-Haptics** とは、ポインティングデバイス等を通じて身体的位置情報をコンピュータに入力する一方で、その情報に合わせてディスプレイ上の動画出力を変化させる場合に、入力量に対する映像出力を動的に変化させた際に疑似的な力が知覚される現象である[Lécuyer, 2000]。このような **Pseudo-Haptics** により力覚を体験できれば、**Haptic** デバイスに求められる電磁モータなどのアクチュエータを省略することが可能となる。このため、**Pseudo-Haptics** は、装置を簡略化する上で注目を集めている。

力覚提示によって硬さ提示が可能となり、硬さ提示は材質感の表現に関連しているために、仮想物体のリアリティを高める上で重要である。これまでも、**Pseudo-Haptics** による硬さ提示が可能であることを示すため、Lécuyer らは実体のバネを標準刺激として、仮想バネ定数を変化させた恒常法により、心理物理学上の測度である JND(Just Noticeable Difference; 丁度可知差)と主観的等価点を求めた[Lécuyer, 2000]。その後 Sanz らは、Lécuyer とともに外力を受ける物体表面のテクスチャ画像の変化から、**Pseudo-Haptics** による硬さ提示が可能であることを示す研究へと発展させている[Sanz, 2013]。一方、著者の研究グループでは、触覚ディスプレイの硬さ提示能力を高めるために、**Pseudo-Haptics** の活用を試みる研究を進めてきた[Tsuboi and Ohka, 2014]。その結果、触覚ディスプレイの触知ピンの出方が大きいほど硬く感じるグループと逆に柔らかく感じるグループに分けられる結果となり提示方法の改良が求められていた。

そこで本章では、先行研究で検討された **Pseudo-Haptics** と触覚刺激の複合提示による硬さ表現能力を向上することを目的とする。このためにまず、**Pseudo-**

Haptics 単独の硬さ表現能力（実験 2-A）と触覚刺激単独の硬さ表現能力（実験 2-B）を調査する．それらの結果を踏まえて，Pseudo-Haptics と触覚刺激の複合提示による硬さ表現能力について心理物理実験（実験 2-C）を行う．

### 3.2 Pseudo-Haptics で強化された触覚マウス



図 3-1 触覚マウス，仮想ハンド及び仮想ボタン

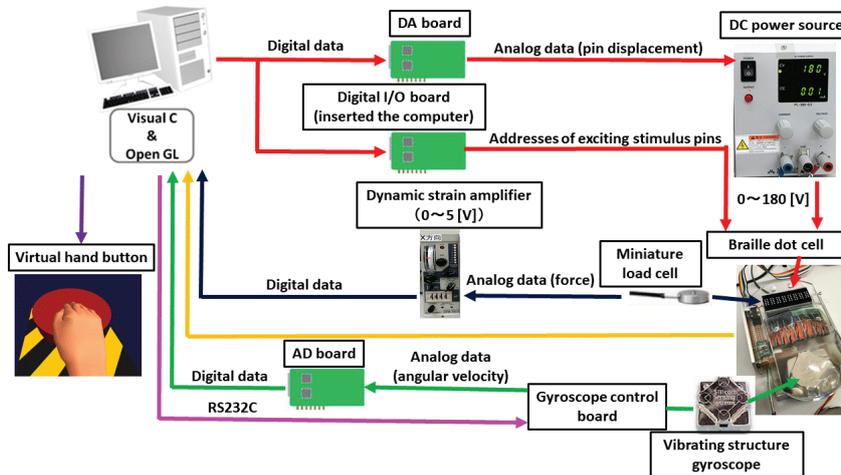


図 3-2 触覚マウスのシステム図.

前報[Tsuboi and Ohka, 2014]では力覚提示も可能なように、平面マニピュレータの末端に触覚ディスプレイを搭載した装置を使用した。本論文では、装置の簡略化を進めることと、触覚の提示面を増大するために、図 3-1 に示す触覚マウスと仮想ハンド・ボタンで構成された実験装置を新しく製作した。以下では、この装置の触覚マウス部分と画像提示部分について順に説明する。

まず本触覚マウスは、分布圧覚提示装置、小型圧縮型ロードセル、振動ジャイロセンサを搭載している。前報の分布圧覚提示装置では、 $4 \times 12$  の触知ピンを備えていたのに対して、人差指、中指、薬指の三指の指先を楽に乗せるために、触知ピンが  $4 \times 16$  配列された点図セル (SC-9, KGS 社) を採用して提示面の面積を増大した。180 V の電圧を印加すると触知ピンは約 1 mm 提示面より突き出る。この時発生する押し圧は、約 0.1N であるため、触知ピン 1 個のばね定数は約 0.1 N/mm である。この点図セルでは、通常では触知ピンが突き出るか出ないかの ON/OFF 状態の制御しかできないために、180V 印加電圧を変動することにより 0~1 [mm] の間でピンの出方を自由に設定できるようにした。

被験者が提示面を指で押しつけた時の押し圧を計測するために、分布圧覚提示装置の底部に小型圧縮型ロードセル (LMA-A-5N, 共和電業社) が設置されている。

また、前報[Tsuboi and Ohka, 2014]の触覚提示装置はマニピュレータの先端に設置されていたために、提示面垂直軸周りの回転角を計測できたが、本装置の場合マウス搭載であるためにこの回転角を計測できない。このため、振動ジャイロ (CRS03-02S, シリコンセンシング社) を搭載してマウスの回転を計測できるようにした。これによって、前報の装置と同様な位置と回転角の入力を可能としている。この機能は本論文では使用する機会はなかったが、マウスを鉛直線周りに回転させる動きに伴って生じる触覚提示を可能とするために組み入れた機能であり、本論文に続く後続の研究に備えたものである。

触覚マウスの制御の仕組みを図 3-2 に示す。触覚ディスプレイに表示されるパターンを決定するピンの on-off データは、DIO ボードを介して点図セルに内蔵されたコントローラに送信され、 $4 \times 16$  個のデータが送信された後に strobe 信号を送信するとパターンが更新される。前述のピンの出方は、ピエゾアクチュエータに電力を供給している電源の電圧出力をアナログ信号によって調整される。ロードセルと振動ジャイロセンサの出力は、それぞれひずみアンプと外付けボードを通じて AD コンバータに送信されコンピュータに取り込まれる。

次に、Pseudo-Haptics を誘発させるための仮想ハンド・ボタンについて述べる。図 3-3 に、被験者の手を模した 3D の仮想ハンドと押しボタンが表示されている。この図では、両者の位置関係を明確にするために、図 3-1 とは別角度の表示が示されている。また、触覚マウスの提示面と仮想ハンドの位置関係を示すために、仮想マウスの提示面が押しボタンの上に表示されている。被験者は、触覚マウスの触覚提示面に指を三本乗せて提示面を下方へ押す。そのとき作用する圧縮力が小型ロードセルにより計測される。その値の大きさに応じて、液晶ディスプレイの中の仮想ハンドと押しボタンが押し込まれるように圧縮力とハンド・ボタンの動きを連動させるようにプログラミングされている。押しボタンの上下動のストロークは 6.0cm に設定されている。1N あたりの押しボタンの降下量を変動させると、Pseudo-Haptics によって仮想コンプライアンス  $c$  [cm/N], すなわちボタンの柔らかさを変化させることができる。なお、被験者が押しボタンを最大ストロークまで押し込んだ場合にはビーブ音で知らせるようにしてある。

### 3.3 実験方法と条件

本論文では, Pseudo-Haptics と触覚刺激による硬さの提示能力を調査する実験 2-A と 2-B と複合提示の場合の実験 2-C を行った. 実験 2-A と 2-B は, 装置の基本的な性能を調べるための実験であり, 分割尺度法に基づいて実施される. 7 段階の間隔尺度を用いて, 提示された刺激と主観的な回答尺度の関係を調査した. 一方, 実験 2-C は, 本論文の主題となる実験であり, 実験 2-A と 2-B に比べてより精度の高いシェッフエの一対比較法浦の変法に従って実験を行った. 実験 2-A, 2-B および 2-C において, 被験者は 20 代右利き男性 10 人であった. 被験者には, あらかじめ実験内容の説明を行い, 同意を得たうえで実験の被験者として協力してもらった.

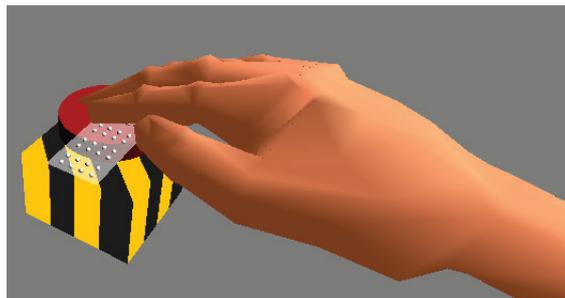


図 3-3 仮想ハンド, 仮想ボタン, および触知ピンの位置関係

#### 3.3.1 Pseudo-Haptics による硬さ提示(実験 2-A)

実験 2-A は, Pseudo-Haptics 単独の効果を調べるためのものである. このため, 図 3-3 の画像出力と触覚マウスの押し圧検出機能を使用し, ピンの上下動は 0 とした. 被験者には基準となる刺激を最初に提示され, 引き続いて 6 種類の刺激の順に刺激がランダムに提示された. 刺激は, 6 種類のコンプライアンス係数  $c$  (1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 [cm/N]) であり, 基準の刺激は 1.0cm/N である. 1.0cm/N のコンプライアンスが 7 となるように, その後提示される 6 種類の刺激が基準の刺激に対して被験者は硬さを 1 (柔らかい) ~4 (普通) ~7 (硬い) で答えた. このとき, 被験者には 6.5 のような少数を使用することが許された. 被験者は刺激

提示中 5 秒以内に硬さの評価を行い、6 種類全部の回答を行うまでを 1 セットとし、被験者各自 10 回行った。また、5 セットごとに休憩を挟んで実験を実施した。

### 3.3.2 触覚刺激による硬さ提示実験(実験 2-B)

実験 2-B は、触覚刺激のみの効果を調べるものである。このため、触覚マウスのピンの上下動のみを使用した。前報[Tsuboi and Ohka, 2014]の実験では、ピンが大きく突き出た場合を硬く評価するグループと柔らかく評価するグループがあった。前者の解釈では、大きく突き出た場合それを押し込めるには大きい力が発生するので硬く解釈し、後者の解釈では大きく変位するほど撓みやすく柔らかいと解釈されたと推察している。ピンが発生する力に着目すれば、前者の理解が自然であると思われるが、一方ピンの突き出し量を 0 とした場合を考えると、提示面カバーの硬さを感じるようになるため、0 に近いほど硬くなるという後者の解釈も成り立つ。本論文では、突き出し量 0 の条件は含めずに 0.2 mm を最小の突き出し量として実験を行った。

実験 2-A とは異なり、実験 2-B では二通りの解釈があり得るために、被験者には先入観を与えずに、初めに 5 種類すべての刺激を提示され、自らの基準を設定した後に、5 種類の刺激をランダムに提示することとした。刺激は触知ピンの変位を変化させた 5 種類 (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 [mm]) を用いる。実験 2-A と同様に、被験者は、5 種類の刺激が基準の刺激に対してどの程度硬いか 7 段階の間隔尺度で答えた。この実験 2-B でも被験者一人に対し 10 セット行った。

### 3.3.3 Pseudo-Haptics と触覚刺激の融合による硬さ提示(実験 2-C)

実験 2-C は、Pseudo-Haptics と触覚刺激を同時に利用した場合に、それぞれ単独で利用した場合より硬さの提示能力が向上することを示すために実施するものである。この実験は二回実施され、一回目の実験結果に基づいて二回目が計画された。以後、一回目と二回目をそれぞれ 2-C1 と 2-C2 と名付ける。

表 3-1 実験 2-C1 で用いたコンプライアンス係数

ID of stimuli	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\alpha 3$	$\alpha 4$	$\alpha 5$	$\alpha 6$	$\alpha 7$	$\alpha 8$	$\alpha 9$
$c$ [cm/N]	1	1	1	3	3	3	5	5	5
Displacement [mm]	0.2	0.6	1	0.2	0.6	1	0.2	0.6	1

表 3-2 実験 2-C2 で用いたコンプライアンス係数

ID of stimuli	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	$\beta 4$	$\beta 5$	$\beta 6$	$\beta 7$
$c$ [cm/N]	1	1.3	1.8	2.4	2.6	4.8	5
Displacement [mm]	0.2	1	0.2	1	0.2	1	0.2

まず 2-C1 では、表 3-1 に示す 9 種類の刺激を用意し、その中から 2 つの刺激をランダムに取り出し、2 つを順に提示して被験者に評価させる。二つ目の刺激が提示されている間に、一つ目と比較して二つ目の刺激を評価する。+2：非常に硬い、+1：少し硬い、0：同じ、-1：少し柔らかい、-2：非常に柔らかい、というように評点を回答する。回答は、前述の実験 A と B と同様に刺激提示中の 5 秒間の間に完了してもらう。実験 2-C1 では 24 試行ごとに休憩をとることとした。実験 2-C2 は、実験 2-C1 の結果に基づき計画されたものである。理由は後述することとする。刺激の種類は表 3-2 に示す 7 種類とした。そのほかの手順は実験 2-C1 と同様である。休憩は 21 試行終了時にとることとした。

### 3.4 実験結果と考察

#### 3.4.1 Pseudo-Haptics による硬さ提示(実験 2-A)

実験の結果、6 段階のコンプライアンスごとに平均値を求めた結果を図 3-4 に示す。図からわかるように回答尺度はコンプライアンスの増加とともに減少している。すなわち、コンプライアンス  $c$  が大きくなるほど柔らかく感じている。ただし、あまりに柔らかくなると差が判別できなくなり、 $c=4.0$  cm/N あたりで飽和しているように見える。

そこで、 $p = 5\%$ の棄却水準で Tukey 法により多重検定を実施した (IBM SPSS 22.0)。その際に、個人間のバラツキを非系統誤差として扱い、それを除くために

個人に対して各水準で 10 回行った結果を平均してそれを代表値として使用した ( $n=10$ ). その結果, 1.0 と 2.0, 2.0 と 3.0, 3.0 と 5.0 cm/N の間には有意差が有ることが判明した. すなわち, 仮想コンプライアンス  $c$  を基準に硬さを制御する場合には, 1.0, 2.0, 3.0, および 5.0 cm/N の 4 段階で硬さ表現ができることがわかった.

### 3.4.2 触覚刺激による硬さ提示実験(実験 2-B)

実験の結果, 被験者は 3 つのグループ (A, B, C) に分類された. グループ A (7 人) では, 触覚刺激の増加に伴って硬く感じ, グループ B (2 人) は触覚刺激の増加に伴って柔らかいと感じ, グループ C (1 人) ではある閾値を境に触覚刺激の増加, または低下に伴って柔らかくなると感じた.

前報[Tsuboi and Ohka, 2014]では, グループ A と B の割合が 3:2 であったのに対して, 今回は 7:2 のようにグループ A の解釈に統一されてきたように思われる. これは, 突き出し量 0 というような極端なケースを含めなかった効果が現れたと考えられる. 10 人の平均値の結果を図 3-5 に示す.  $p=5\%$ の棄却水準で Tukey 法により多重検定を実施した( $n=10$ ). その結果, 1 mm と 0.2 mm, 1 mm と 0.4 mm の間のみ優位差が有り, それ以外の組み合わせすべてに有意差が認められなかったため, 本装置の提示能力は 2 段階の硬さ表現であるといえる.

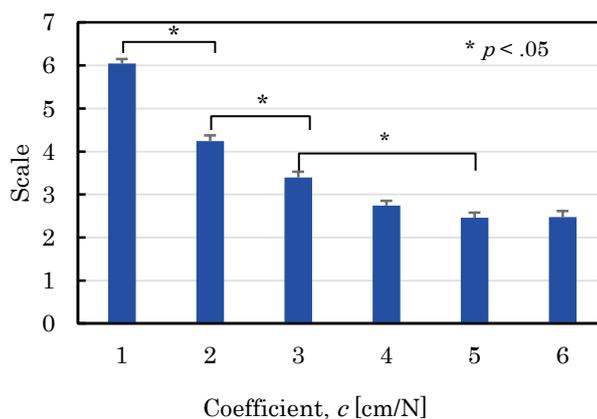


図 3-4 仮想ボタンのコンプライアンス係数と硬さ知覚の関係 (実験 2-A)

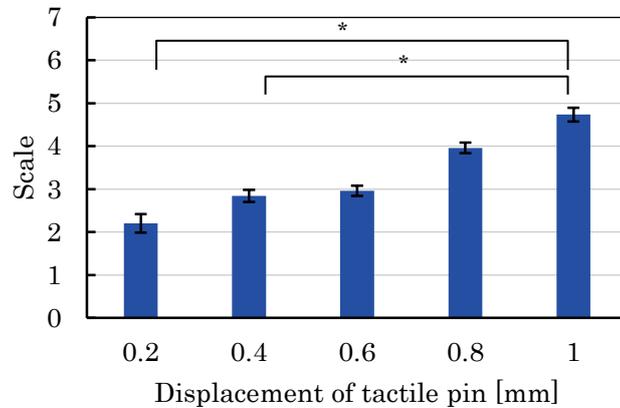


図 3-5 触知ピンの高さで硬さ知覚の関係 (実験 2-B)

このように、本触覚マウスの場合、触覚刺激のみで硬さを表現する場合に諧調表現を大きく取れないことがわかる。これはピエゾアクチュエータによりピンを押し上げる場合に最大ストローク 1 mm と小さく、発生力も 1 ピンあたり 0.1 N とわずかであることが関係していると考えられる。また、ピエゾアクチュエータは電磁モータと異なり電流制御により発生力を制御できないことから、ストロークを変化させてもピエゾアクチュエータ自体のコンプライアンスを変化させることができないことも関係していると思われる。どちらの欠点が硬さの解釈のばらつきに影響しているかは不明であるが、いずれにしても本実験結果は、本触覚提示装置と同様なピエゾアクチュエータを配列した提示装置を利用して硬さの提示を行う場合には制約があることを示している。

### 3.4.3 Pseudo-Haptics と触覚刺激の融合による硬さ提示(実験 2-C)

前述の実験 A と B の結果から、Pseudo-Haptics による錯覚が硬さ提示に与える効果の方が触覚の効果よりも大きいことがわかった。そこで、実験 2-C1 では、Pseudo-Haptics と触覚刺激の融合により硬さの提示能力を増大させる試みを行った。実験結果を図 3-6 に示す。これは 9 種類の試料  $\alpha 1 \sim \alpha 9$  までの効果を示している。正の値に大きくなるほど硬いと評価し、負の値に大きくなるほど柔らかいと評価したことになる。また、本実験では、2 組の試料の主効果の差が求めたヤー

ドスティック  $Y = 0.218$  より大きければ、その試料間に有意水準 5%の有意差が認められる。各試料間の優位差を検討した結果、9種類の試料の硬さは、 $\alpha 7 < (\alpha 9, \alpha 4) < \alpha 6 < (\alpha 3, \alpha 2, \alpha 1)$ の4段階に表現できることがわかった。これは実験 A と同程度であり、このままでは融合の効果を示すことができない。

そこで、図 3-6 を見ると、 $\alpha 1 \sim \alpha 3$  と  $\alpha 4 \sim \alpha 9$  の間に大きな差があることがわかる。このため仮想コンプライアンスと触知ピンの変位を適切な値に設定することで表現能力を向上させることができると考えられる。図 3-6 の結果から主効果と仮想コンプライアンスの関係を求めて図 3-7 に示す。図 3-7 からわかるように、0.6 mm の結果と 0.2 mm の結果は  $c$  が 1 から 3cm/N の範囲でほぼ一致している。そこで、まず条件 0.6 mm を省略することとした。次に主効果の最大値と最小値の差である 1.728 を 7 等分した値 0.288 を求めた。この値はヤードスティック  $Y = 0.218$  より大きいため、7 分割しても各水準の間に有意差がある提示が可能となるはずである。したがって、主効果の値が 0.288 ずつ増加するように、図 3-7 から係数  $c$  [cm/N] を決定した。以上の検討の結果求めたものが前述の表 2 であった。

実験 2-C2 として表 3-2 の刺激の組み合わせにより再実験を実施した結果を図 3-8 に示す。この時求められたヤードスティックの値は、0.235 であった。この値をもとに、図 3-8 を調べると  $\beta 4$  と  $\beta 5$  の間の距離がヤードスティックより狭いもののほかの水準の間はすべてヤードスティックより離れていた。したがって、6 段階の硬さ ( $\beta 7 < \beta 6 < \beta 5 \cong \beta 4 < \beta 3 < \beta 2 < \beta 1$ ) を表現可能であることがわかった。とくに  $\beta 6$  と  $\beta 7$  の刺激はそれぞれ  $c$  の値が 4.8 と 5cm/N であるために、触覚刺激の助けがなければ判別できない試料である。また、図 3-8 をみると  $\beta 5$  と  $\beta 4$  の間もある程度広がっていて、ヤードスティックの値に近いことから、さらに詳細に刺激の組み合わせを調整すれば複合提示では 7 階調の表現が可能になるものと思われる。

また、水準ごとに主効果の値をプロットすると、図 3-9 が得られる。図 3-9 に対して線形近似を行うと  $R^2 = 0.98$  となり高い線形性を示したことから、各水準は等間隔で硬さを表現可能である。以上の議論から、本論文では次の手法を提案する。すなわち、

- 1) 適当な水準を設定して，シェッフエの一对比較法浦の変法を実施して基礎データを得る．
- 2) 得られたヤードスティックで主効果の最大値最小値の範囲を等分して刺激の組み合わせを決定する．  
の 2 ステップにより刺激の水準を決定する．

なお，実験 2-C2 では  $c = 1 \sim 1.8\text{cm/N}$  の範囲で 3 諧調表現ができて，しかも図 3-7 を見るとこの範囲では触覚提示の影響がほとんどないことがわかる．したがって，実験 2-C2 の手順で実験 A の再実験を実施した場合には，5 諧調表現が可能であるという結論が得られるものと予想される．

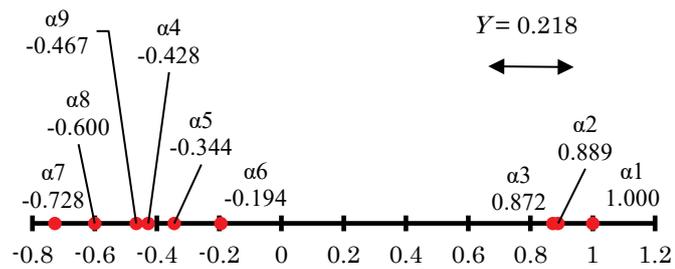


図 3-6 全被験者の 9 条件それぞれの硬さ評価 (実験 2-C1)

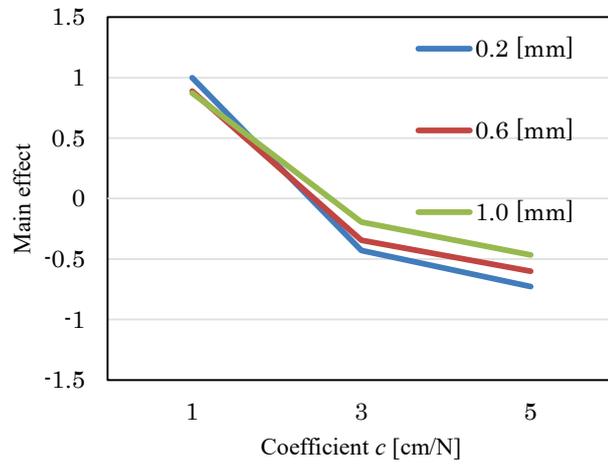


図 3-7 ピン高さ 3 条件の硬さ知覚とコンプライアンス係数の関係

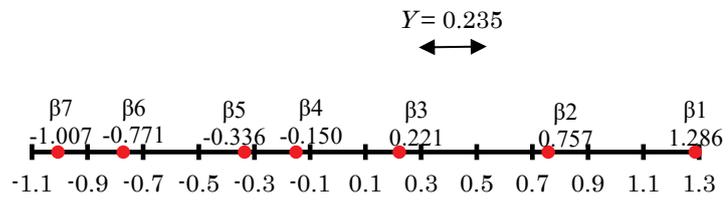


図 3-8 コンプライアンス係数再設定後の硬さの諧調表現 (実験 2-C2)

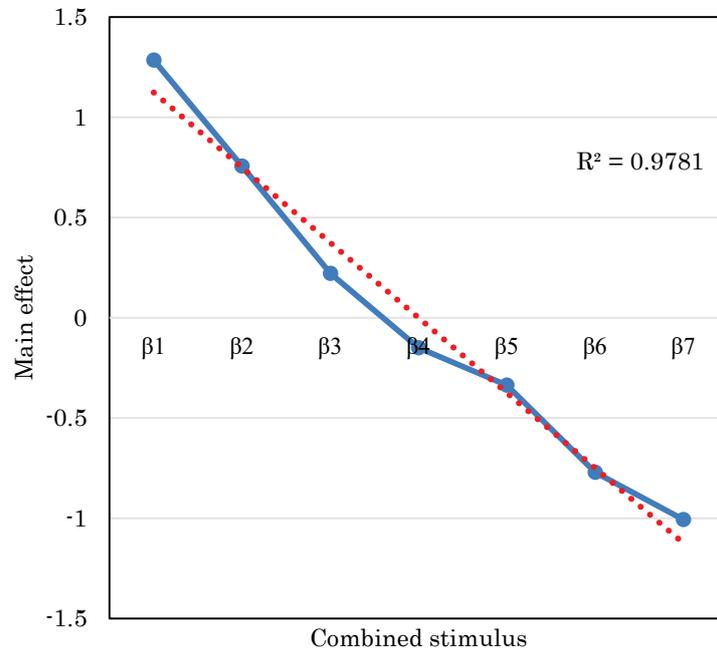


図 3-9 実験 2-C2 で設定した刺激条件と硬さ知覚の線形性

### 3.5 結 言

単独の刺激では4～5段階しか提示できなかったディスプレイが、融合提示を実施することにより6～7段階の諧調表現が可能となることを示した。この結果は、硬さ提示装置として十分な性能ではないアクチュエータによる触覚ディスプレイを用いても視覚刺激のアシストにより表現能力を広げることが可能であることを示している。マイクロアクチュエータは現在研究が進められているが、まだ触覚ディスプレイに適用するにはアクチュエータの能力が十分でない。一方でVRの分野では近年 Haptic デバイスへの要求が高まっており、理想的な触覚ディスプレイの出現まで待てない状況にある。現状のマイクロアクチュエータでも、本手法を組み合わせることで触覚ディスプレイに使用すれば、実用可能な Haptic デバイスの提供が可能となる。さらに、将来高性能なマイクロアクチュエータが完成した際には、提示能力をさらに強化するための手段として本手法は有望である。なお、本論文では男性のみを被験者として採用して実験を行ったが、今後本論文に関して性差の検討も必要なるものと考えられる。さらに、今後高齢者向け VR を実現さ

せるためには、20代の被験者に対する実験に留まらず、加齢の影響も考慮した実験的検討も重要になるものと思われる。

## 4. 錯覚を惹起する触覚の Gestalt

### 4.1 緒言

ヒトは外界の情報を五感で獲得し中枢神経において統合することによって認識する。すなわち、ヒトの感覚研究を進めるためには感覚受容器によるセンシングと中枢神経で行われる感覚処理の2つの視点を考慮する必要がある。本章では、後者である感覚処理中に生起する Gestalt について解明し、VR 研究に応用することを考える。Gestalt とは「全体は部分の総和ではない」という意味であり、すなわち Gestalt Grouping によって高度な感覚を知覚しているということである。

視覚、聴覚に関しては、1章で説明したように Gestalt Grouping の役割が体系的にまとめられてきており、また Gestalt に生起する錯覚についての調査も進んでいる。これらの調査では、視覚の Gestalt は顔や文字のような形状認識、聴覚の Gestalt では言葉やメロディーなどの音認識の役割を担っていることが明らかにされている。一方、触覚の Gestalt についての調査は触覚ディスプレイを開発する上で非常に重要であるにも関わらず行われきていない。そこで本論文では、触覚の Gestalt の存在を Velvet Hand Illusion (VHI) を利用して明らかにすることを試みる。

調査方法として視覚の Gestalt の法則である Prägnanz の法則を用いる。VHI 生起の要件である2本の平行線に囲まれた領域が往復運動する、を Prägnanz の法則の観点から閉合の要因と共通運命の要因に分解し、VHI と Prägnanz の法則の因果関係を調査する形で触覚の Gestalt Grouping が存在するか否かを調査する。

### 4.2 実験装置

本論文のため開発した掌提示型触覚ディスプレイを図 4-1 に示す。本掌提示型触覚ディスプレイの開発に際して、次の3点の条件を満たすようにした。

- 掌全体に刺激を提示可能にするために、提示面の範囲を 85 mm×70 mm とした。

- 掌の2点弁別閾13 mmよりも細かい刺激を提示可能にするように、ピンピッチ2.4 mm、ピン径1.3 mmのデバイスを採用した。
- VHI 惹起のための基本的な刺激として、点で構成した線がまるで掌上を動いているような刺激を作り出す必要があった。そこで、高速でピンを上下運動させることが可能なバイモフ型 piezoアクチュエータで駆動する点図ディスプレイを採用した。

これらの方針を実現するために、提示方式として点図ディスプレイ (SC10, KGS, Japan) を使用し、DIO ボード (PC-2772, Interface Co. Japan) と PC (OS : Windows 10, 64bit) と Visual C ++で制御した (図 4-2) . 点図ディスプレイで2本の平行線を表示し、ピンの立ち上げ, 立ち下げのタイミングをコントロールすることで、二本線がディスプレイ上を往復する仮現運動を生成した。この二本線の仮現運動により、VHI を惹起させることが可能となった (図 4-3)。

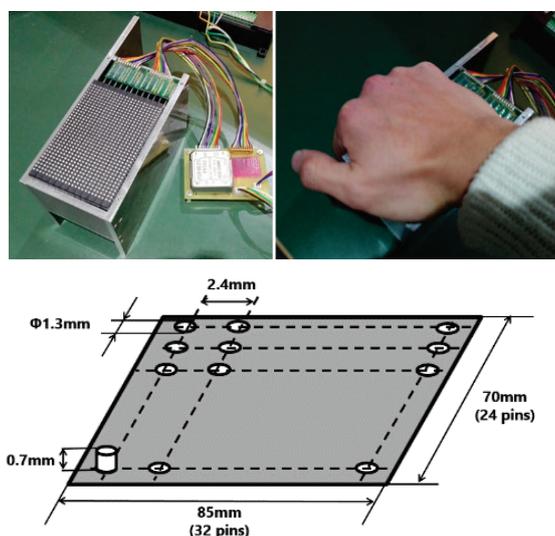


図 4-1 点図ディスプレイ概要 (装置の全体図, 使用方法, 及びサイズ)

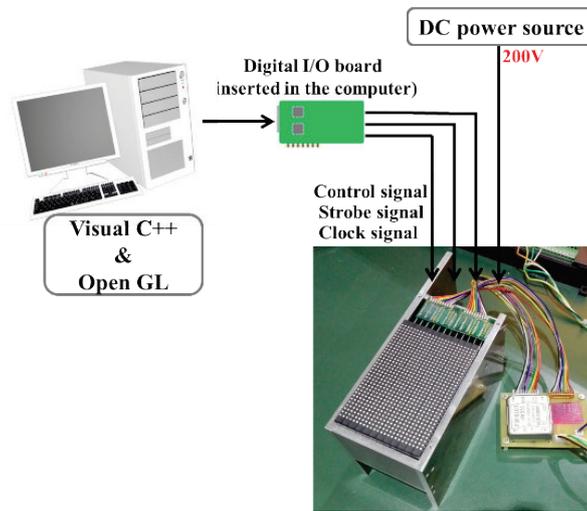


図 4-2 点図ディスプレイのシステム構成図

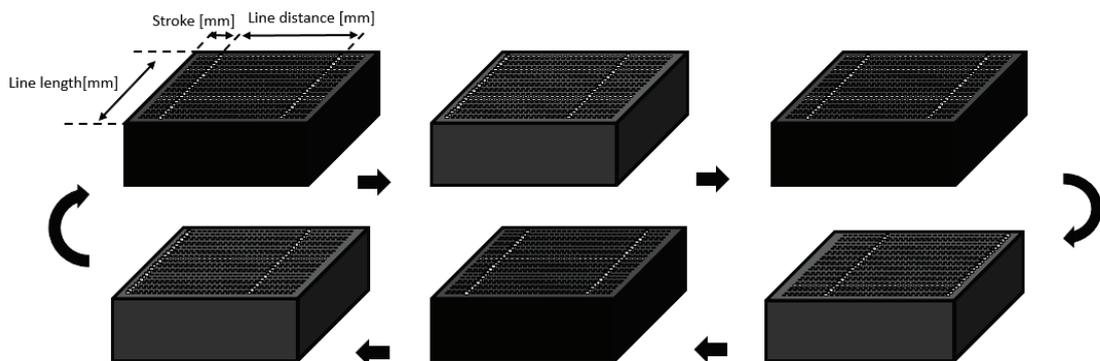


図 4-3 触知ピンで構成された平行線の往復運動刺激パターン

### 4.3 実験方法と条件

VHI が触覚の Gestalt であるか否かを調査することが本実験の目的である。上述の Gestalt と VHI の関係を解明する為に、3 種類の実験を実施する。まず実験 3-A では、強い VHI を惹起可能な速度条件についての調査を行い、ここで得られた実験結果を後の実験 3-B と実験 3-C に使用する。続いて、実験 3-B では線を構成する点の密度を変化させるという方法で閉合の要因を変化させた際の VHI の生起確率の変化の調査を行

う。最後に実験 3-C では、閾値を求める心理物理学実験手法である極限法を使用して VHI 惹起のための閾値の調査を行う。以下に実験条件の詳細を示す。

#### 4.3.1 被験者

本論文の心理物理学実験に参加した日本人学生は 11 名であり、年齢は 22 歳～25 歳である。以下の実験 1～3 は、名古屋大学 大学院情報学研究科の倫理委員会によって承認され実施されたものである。

#### 4.3.2 VHI の教示方法

実験を行う前に、被験者に VHI の感覚を教示するための練習を行った。練習では、点図ディスプレイで図 4-4 の 3 種類の刺激を順番に繰り返し提示した。1 本線では生じない滑らかさが、2 本線では線間に生じる。この刺激を繰り返し提示することで、被験者は VHI 感の基準を心の中で生成することが可能となる。この練習を実験前に 5 分間実施した。

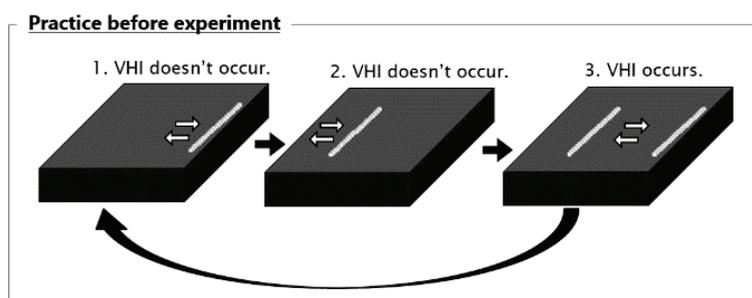


図 4-4 VHI の基準を作るための練習

#### 4.3.3 実験 3-A

まず実験 3-A では、VHI 感を最大化するための触覚の仮現運動の速度を調査する。そこで、

表 4-1 に示す様に、7 種類の平行線移動速度を準備した（

表 4-1, 図 4-5)。実験では、7 種類の刺激をランダムで提示し VHI が惹起されたか否かを Yes か No で回答させた。この試行を 1 セットとして、各被験者に 4 セット実施した。

表 4-1 実験 3-A の刺激条件

Parameter	Value
Line length, $L$	55.2 mm
Distance between two lines, $D$	60 mm
Dot-distance forming line	2.4 mm
Stroke, $r$	14.4 mm
Average speed of moving line	150, 80, 54, 40, 32, 23, 18 mm/s

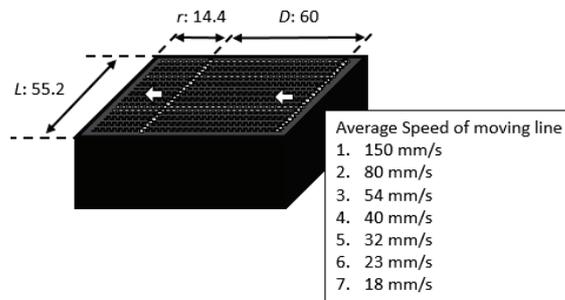


図 4-5 実験 3-A の刺激

なお、刺激変数の変化に対する VHI 感の変化を明瞭にするために、実験 3-A で求めた VHI 感を最大化する仮現運動の速度は続く実験 3-B と 3-C でも採用される。

#### 4.3.4 実験 3-B

前述のように、触覚の Gestalt の共通運命の要因が VHI 惹起に必須であることから、ここでは閉合の要因と VHI 惹起の関係を調査する。その調査のために、ドットの集まりが疎であればその疎の程度に従って閉合の要因は低下するという性質を利用する。

閉合の要因と VHI 惹起の関係を確かめるために実験 3-B では、点図ディスプレイを使用して、往復運動する平行線を形成するドットの間隔を種々変更し、ドット間隔が開いても VHI が惹起されるか否かを調査する。線を構成する点間距離は、表 4-2 に示した 6 種類『55.2 mm, 26.4 mm, 14.4 mm, 9.6 mm, 4.8mm, 2.4 mm』である。図 4-6 は、これらのドットの集団の様子を模式的に表したものである。被験者は、実験 1 と同様にドットで表示した二本線の間で VHI が惹起されたか否かを Yes か No で回答する。この試行を 1 セットとして、各被験者に 4 セット実施した。

表 4-2 実験 3-B の刺激条件

Parameter	Value
Line length, L	55.2 mm
Distance between two lines, D	60 mm
Dot-distance forming line	55.2, 26.4, 14.4, 9.6, 4.8, 2.4 mm
Stroke, r	14.4 mm
Average speed of moving line	80 mm/s

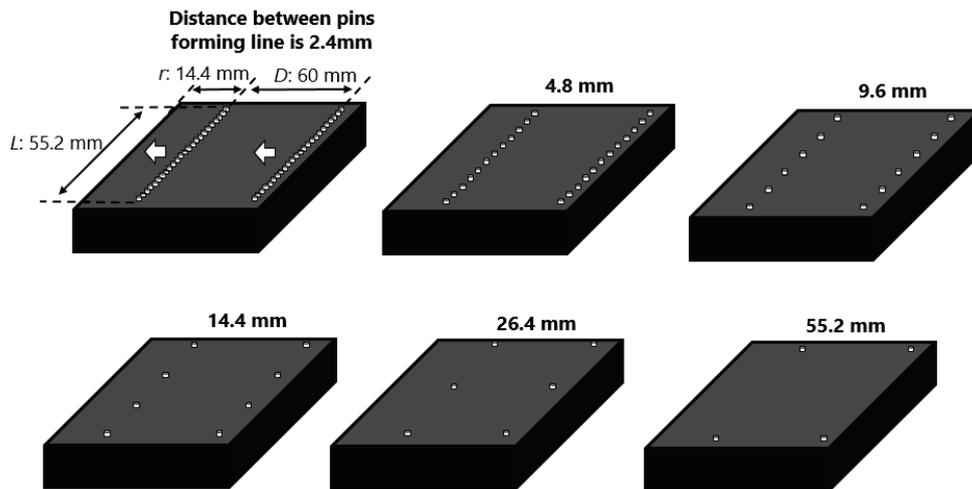


図 4-6 実験 3-B の刺激

#### 4.3.5 実験 3-C

実験 3-C では、閉合の要因を生起させるために必要な最小刺激を求めることを目的に、VHI 惹起に必要な平行線の最小線長を調査した。ある線長以上で VHI が惹起されるが、ある線長以下では VHI が惹起されないとしたら、その線長は触覚の Gestalt を生み出すために必要な最小の線長、すなわち絶対閾ということになる。

実験方法として心理物理学実験手法の一つである極限法を使用した[Gecheider, 1997]。実験条件として最小線長 1.3 mm、最長線長 46.9 mm として、2.4 mm 間隔の刺激 20 種類を準備した (表 4-3 参照)。続いて、実験 3 で実施した極限法について説明する (図 4-7)。極限法は上昇系列と下降系列で構成される。実験 3 では上昇系列から実施した。まず初めに、最小刺激である線長 1.3 mm の平行線を被験者に提示し、VHI が惹起されたか否かを被験者は回答する。VHI が惹起されない

場合は、2番目に短い線長 3.7 mm の平行線が提示される。この試行は VHI が惹起されたと被験者が回答するまで続く。VHI が惹起されたと回答された場合、その線長が上昇系列の絶対閾として記録され、下降系列に移る。下降系列では、上昇系列の最後に提示された線長よりも少し長い線がランダムに被験者に提示され、被験者はその刺激に対して VHI の有無を回答する。VHI が惹起されると回答した場合は、次に短い刺激が被験者に提示され、この手続きは VHI が惹起されなくなるまで続く。その後 VHI が惹起されないと回答された際に、その線長より 1 つ長い線長が下降系列の絶対閾として記録される。下降系列が終了すると、再び上昇系列が実施される。その際の最初の刺激は、下降系列の最後の線よりも短い線がランダムで提示され、そこからは上記で説明した上昇系列の手順で行われる。各被験者は、上昇系列と下降系列を 1 セットとして、5 セットの評価を実施した。

表 4-3 実験 3-C の刺激条件

Parameter	Value
Line length, $L$	1.3, 3.7, 6.1, 8.5, 10.9, 13.3, 15.7, 18.1, 20.5, 22.9, 25.3, 27.7, 30.1, 32.5, 34.9, 37.3, 39.7, 42.1, 44.5, 46.9 mm
Distance between two lines, $D$	60 mm
Dot-distance forming line	2.4 mm
Stroke, $r$	14.4 mm
Average speed of moving line	80 mm/s

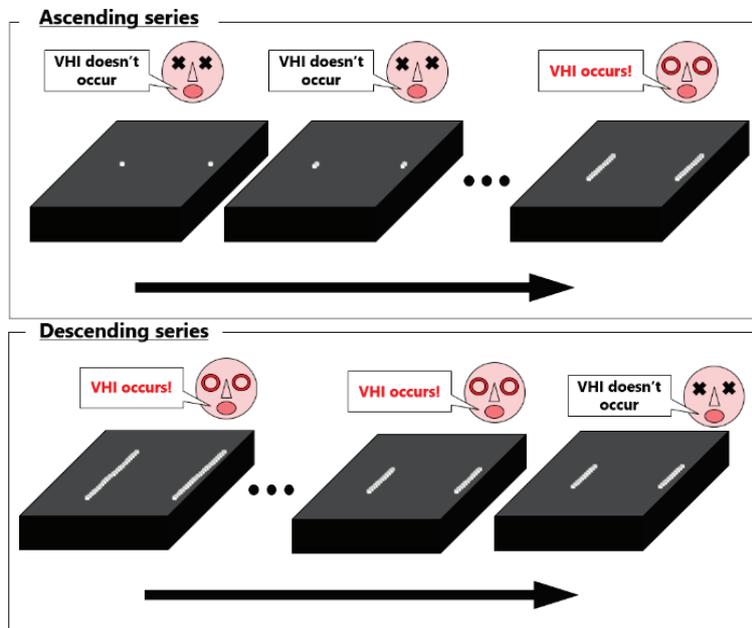


図 4-7 極限法を用いた実験 3-C の刺激条件。  
(上図が上昇系列，下図が下降系列を示す.)

## 4.4 実験結果と考察

### 4.4.1 実験 3-A

触覚の仮現運動を最大化する刺激速度の調査を行った。刺激条件として表 4-1 の 7 種類を準備し、最適なピンの提示速度を求めた。その実験結果を図 4-8 に示す。

この実験結果は、被験者 11 人の VHI が惹起されると回答した割合の平均を示している。平行線の移動速度が 80 mm/s の際に VHI 惹起確率が最大化し、一方で速度が減少するにつれて VHI 惹起確率が減少した。そこで、 $p=5\%$ の棄却水準で Bonferroni 法により多重検定を実施した (IBM SPSS 22.0)。その際に、個人間のバラツキを非系統誤差として扱い、それを除くために個人に対して各水準で 4 回行った結果を平均してそれを代表値として使用した ( $n=11$ )。その結果、80 mm/s と 18 mm/s の水準間において、VHI 惹起確率に有意な差が示された。この実験事実、触覚の仮現運動は 80 mm/s において最大化し、80 mm/s から変化するにつれ

で減少し、18 mm/s となった時に、仮現運動がほとんど認識されなくなる、ということを示している。この結果は、2012 年に Rajaei 等が実施した二本のワイヤの刺激速度の結果と一致している。以上の実験結果を踏まえて、実験 3-B, 3-C においても、最も VHI が強く惹起される仮現運動速度である 80 mm/s を採用した。

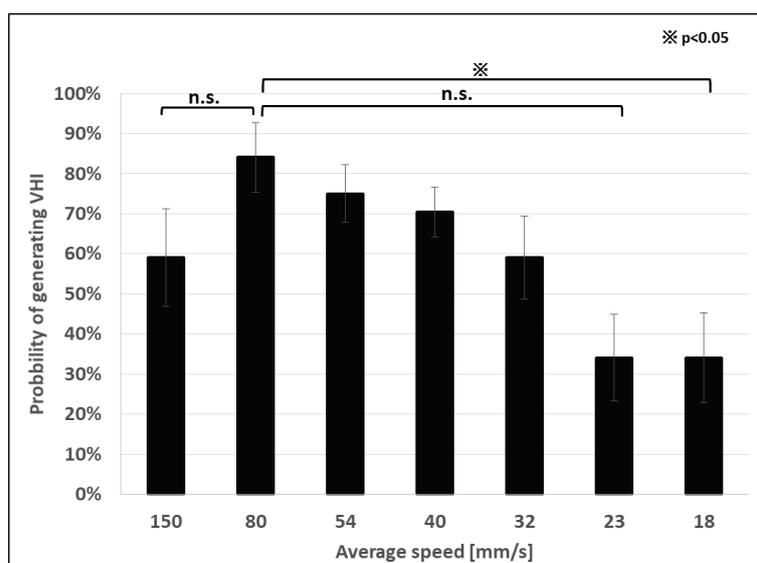


図 4-8 平行線の往復運動の平均速度と VHI 惹起確率

#### 4.4.2 実験 3-B

本論文では、閉合の要因で認識された Gestalt が共通運命の要因で動いていると認識されることで、VHI が惹起されると仮定している。実験 3-B では、この触覚の Gestalt に関係する閉合の要因がどの程度満足することが必要か調査することを目的としている。このため、平行線を構成するドットの間隔を変化させ、閉合の要因の条件を緩くするとそれが VHI 感にどの程度影響するのか調査した。

線を形成するドットの間隔の水準に対する VHI 惹起確率を図 4-9 に示す。ドット間隔が狭ければ狭いほど VHI 惹起確率が大きくなるのが分かる。そこで実験 3-A と同様に、 $p=5\%$ の棄却水準で Bonferroni 法により多重検定を実施した (IBM SPSS 22.0)。その結果、4.8 mm, 9.6 mm, 14.4 mm の水準間に有意差が存在することが判明した。すなわち、上記の水準のどこかに VHI の閾値があることを示して

いる。

そこでさらに詳しい解析を実施するために、水準 2.4 mm, 4.8 mm, 9.6 mm, 14.4 mm において、VHI 惹起確率から z 得点を求めた (図 4-10 参照)。z 得点を用いて閾値を求める際には、z 得点=0 (VHI 惹起確率 50%) となる条件を求めればよい。実験 3-B の場合は、線を構成するドットの集団に求められる点間距離は、9.34 mm であった。これは掌の 2 点弁別閾 13 mm[Fox, 2002]よりも狭い間隔である。2 点弁別閾とは、掌を 2 点同時に刺激した時に、2 点が刺激されていると識別できる最小の距離のことをいい、2 点弁別閾よりも狭い間隔で 2 点を刺激したとしても人は 2 点を刺激されているとは認識できない。つまり、VHI の惹起には線を形成する点の点間距離が 2 点弁別閾より狭い間隔が必要であるという今回の実験事実は、VHI 惹起には平行線が必要であるということを示しており、すなわち、掌に Gestalt を形成するためには線が必要であるということを示している。この実験事実を視覚の Prägnanz の法則に当てはめてまとめる。VHI に関連する触覚の Gestalt では、線で囲まれるという閉合の要因と、平行線が同時に往復運動するという共通運命の要因が同時に満足されて初めて VHI 感が生み出されるということである。

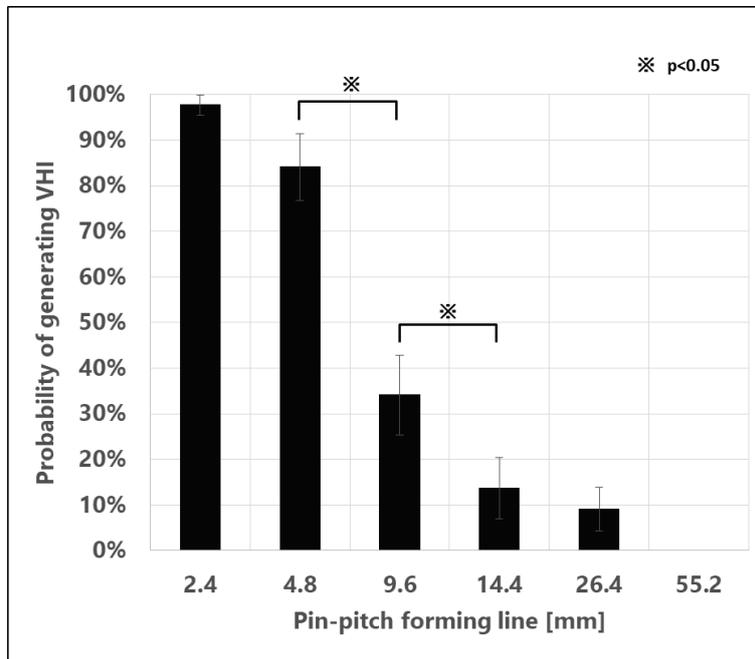


図 4-9 線を構成するピンの間隔と VHI 惹起確率

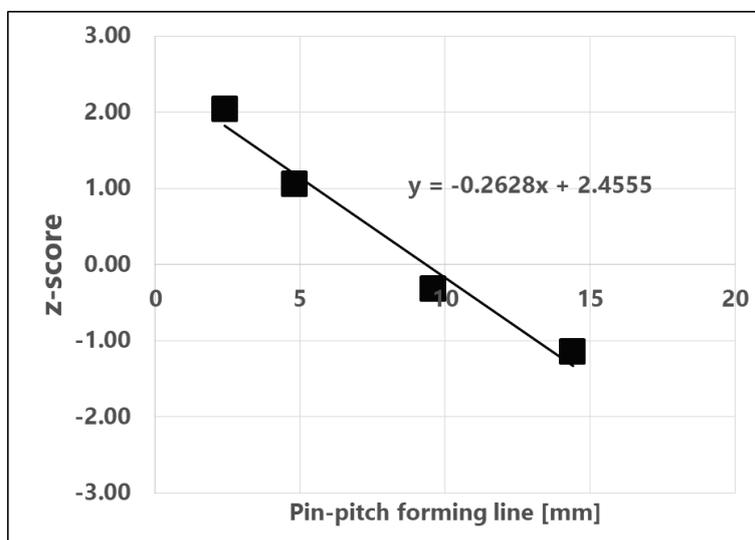


図 4-10 線を構成するピンの間隔と VHI 惹起確率の z 得点

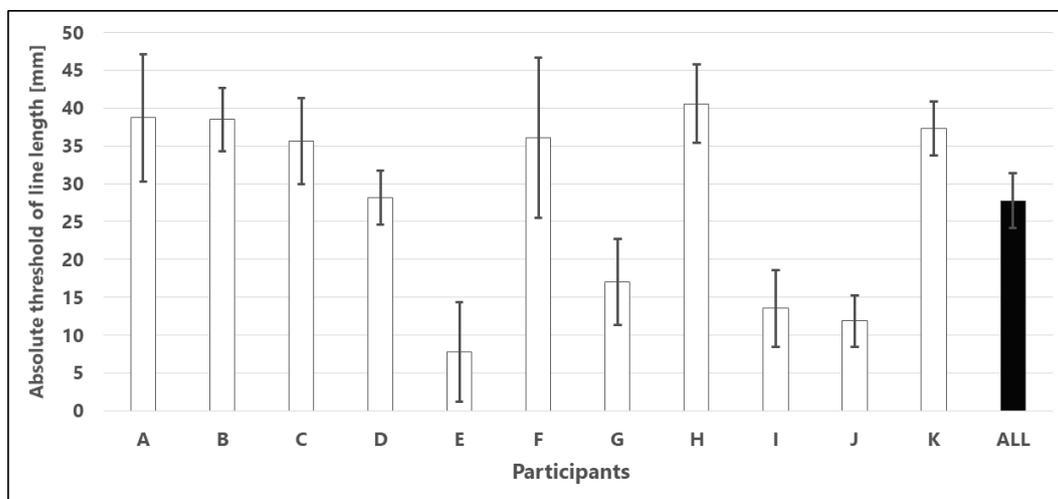


図 4-11 VHI を惹起させる線長の絶対閾

#### 4.4.3 実験 3-C

実験 3-B において、触覚の Gestalt に触り心地を生み出すためには、平行線で囲まれた領域が往復運動することが必要であることを明らかにした。実験 3-C では触覚の Gestalt を惹起する為に必要な閉合の要因を生じさせるための最小刺激を調査した。実験結果を図 4-11 に示す。これは、各被験者が VHI 惹起に必要な平行線の線長を示しており、被験者ごとの絶対閾をまとめた結果である。被験者ごとにそれぞれの VHI の滑らかさの基準を持っており、最小が 7.8 mm、最長で 40.5 mm であることが分かる。また、被験者 E, G, I, J のように二点弁別閾にかなり近い長さでも VHI 感が惹起されるグループと提示面の幅に近い長さにならないと VHI 感が惹起されないグループに分けられるようであった。以上の結果から絶対閾の平均値を求めると 27.8 mm であった。また、標準誤差は 3.5 mm であった。したがって、VHI を惹起させる線長は、 $27.8 \pm 3.5$  mm であることが判明した。今後、Haptic デバイスのサイズを決定する上でのデータとして有用である。

## 4.5 結 言

触覚の VR における質感の制御において、滑らかさをコントロールする技術開発のため、錯触現象の 1 つである Velvet Hand Illusion (VHI) を活用した。VHI の仮説として、『掌全体に圧力がかかる状態で、平行線が掌を往復運動することによる機械受容器に与えられる刺激、およびその刺激で生起される Gestalt によって VHI が生じる』を提案した。VHI は平行線が掌の中で共に動くとき惹起され、静止すると消失するため、共同運命の要因による Gestalt により VHI が生じることは自明である。また、平行線で囲まれた領域の中で VHI が生じるために、閉合の要因も関係していると考えられる。そこで本論文では、VHI の原理解明や VR への利用技術確立を目指して、閉合の要因が VHI の発生・消失の基本条件の一つであることを明らかにするために、以下の三つの実験を実施した。

実験 3-A において、触覚の仮現運動の速度について調査した。その結果、平均 80 mm/s で平行線を往復運動させた場合に仮現運動の発生率が最大となり、触覚の Gestalt に最も強い滑らかさが惹起された。

実験 3-B では、平行線を構成する点の密度を制御することで閉合の要因に強弱をつけ、VHI がその強弱に対してどのような影響を受けるのかを調査した。その結果、VHI の強さは閉合の要因に依存することが明らかになった。この実験結果から、触覚の Gestalt の惹起には閉合の要因と共同運命の要因が、同時に成立することが不可欠であることが確認された。

実験 3-C では、触覚の Gestalt の閉合の要因を惹起させるための最小刺激について調査した。閉合の要因は 2 本の平行線で囲まれることで生じるので、閉合の要因の強さは線の長さで調査が可能である。その結果、2 本の平行線の線長が  $27.8 \pm 3.5$  mm の時に、触覚の Gestalt の閉合の要因が満たされて VHI が惹起されるということを明らかにした。

これらの研究成果は、触覚の Gestalt を惹起させるための基本的な刺激条件の一つである。今後の研究では、触覚の Gestalt により惹起される材質感を自在に変

化することを可能とすることを旨す. このため, 触覚の 5 つの受容器を選択的に刺激する仕組みを追加して, Gestalt によって生まれる材質感のコントロールの可能性を調査することを計画している. なお, 仮現運動速度, 点間距離, 平行線の線長の三つのパラメータ間に存在する交互作用, およびパラメータの決定順序が結果に及ぼす影響についても今後の研究の中で明らかにしたい.

## 5. 結 論

本論文では、ヒトの感覚処理機構に着目した新しい Haptic デバイス技術の開発を目指している。Haptic デバイスのハードウェア開発はアクチュエータの性能に依存しており、革新的 Haptic デバイスの開発に欠かせない。本論文では、それとは別のもう一方のアプローチとして触覚の感覚情報処理の特性を活用して、ソフトウェアの面からハードウェアの不備を補う方法論をとる。触覚の感覚情報処理については、関連する大脳の神経基盤の解明まで含む広い範囲の研究が求められるが、本研究では Haptic デバイスに関連した検討項目について研究を進めた。すなわち、「能動触及び受動触が知覚精度に及ぼす影響」、「触覚と Pseudo-Haptics による硬さ提示」、及び「錯覚を惹起する触覚の Gestalt」の3種類の感覚処理機構についての調査を行った。

### 5.1 まとめ

#### 能動触及び受動触が知覚精度に及ぼす影響

Haptic デバイスを開発する際には、能動的に使用するものと受動的に使用するものの2通りが考えられる。能動触の際の遠心性コピーによる脳内でのシミュレーションが知覚精度を向上させるのか否かは触覚ディスプレイを設計する上で非常に重要であるにもかかわらず未解明である。そこで、知覚精度として角度弁別閾を採用し、心理物理学実験手法である恒常法を用いて能動触と受動触の比較を行った。以下に本実験の結論を示す。

- 受動触において4水準の速度条件『45, 90, 130, 170 mm/s』の角度弁別閾を調査した結果、エッジと掌の相対速度が 45 mm/s ~90 mm/s の条件で角度弁別閾が最大になった。これは感覚受容器の SA I と FA I を最も効率よく発火させることができる速度であるためである。

- 能動触と受動触それぞれの角度弁別閾を調査した結果，能動触の方が受動触よりもエッジ方向の知覚精度が良いとは必ずしもいえなかった．遠心性のコピーの情報がなくとも，受動触は能動触と同程度の精度であったことは，受動触では物体との接触速度と物体形状を同時に精度よく獲得しているということを示している．
- 能動触運動は，感覚受容器が物体の形状識別タスクを行う上で最も効率が良い接触速度である 90 mm/s に近づくように，探查速度を制御していることが明らかになった．

### 触覚と Pseudo-Haptics による硬さ提示

Pseudo-haptics は，Haptic デバイスからモータなどのアクチュエータを省略できる可能性がありコンパクト化に有利になる．また，視覚は触覚とは異なるモダリティを有しているために，異なるモダリティ間の統合現象を観察・解明する上で重要である．この研究項目で得られた結論を以下に示す．

- Pseudo-Haptics 単独での硬さ表現において，液晶ディスプレイに映されたボタンを触覚マウスで押すという課題を実施し，6 種類のコンプライアンス係数 1, 2, 3, 4, 5, 6 [cm/N] で硬さ提示を試みたところ，4 段階の硬さを提示可能であった．
- 一方，触知ピンの高さを利用した触覚刺激単独での硬さ提示では，触知ピンの高さ 5 水準 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 [mm] で 2 段階の硬さを提示可能であった．
- Pseudo-Haptics と触覚の融合提示の場合，硬さ提示が有効な触覚刺激と柔らかさ提示が有効な触覚刺激という特性を活かした刺激条件を組み合わせることで，視覚・触覚単体での諧調表現より諧調数が向上して，6～7 段階の諧調表現が可能となった．

以上から，硬さ提示装置として十分な性能ではないアクチュエータによる触覚ディスプレイを用いても視覚刺激のアシストにより表現能力を広げることが可能である

ことを示した点で Haptic デバイス開発に資するものであるといえる。

## 錯覚を惹起する触覚の Gestalt

触錯覚現象の一つである Velvet Hand Illusion (VHI) が触覚の Gestalt により生起することを調査した。以下に本実験の結論を示す。

- 点図ディスプレイでは、線の運動は1ドットずつ順に移動させることによって表示させるために、掌に触覚の仮現運動を生起することになる。
- 点図ディスプレイの触知ピンで構成した線の仮現運動の認識に関しては、18, 23, 32, 40, 54, 80, 150 mm/s の 7 水準の速度条件で比較したところ、80 mm/s の時に最大になり、速度が増加あるいは減少しても仮現運動の認識は低下する。そして仮現運動速度が 18 mm/s 程度になったときにほとんど仮現運動が生起しなくなった。
- 2本の平行線を構成する点間距離が掌の2点弁別閾(9~13 mm)より広いと VHI は生起しなくなることから、線で囲まれることが VHI の要件であることが分かった。すなわち、VHI 生起には触覚の Gestalt の閉合の要因と共通運命の要因が同時に満たされることが要件であることを明らかにした。
- VHI を生起する平行線の最短の線長(閾値)についての調査で、必要な線長は最低  $27.8 \pm 3.5$  mm 必要であることが明らかになった。これは、掌で生起する触覚の Gestalt の最小サイズを示しており、触覚の Gestalt に関する重要な知見の一つである。

以上の結論は、革新的な Haptic デ스플레이を設計する上で、移動機構装備するか否かの判断、視覚アシストを追加することによる精度向上の見積もり、および VHI を生起させる上での刺激図形のサイズの下限を定めた点で有効な知見を提供している。しかしながら、十分な知見が揃ったとは言えず、さらなる研究が必要であるため、次節では今後の展望を述べる。

## 5.2 今後の展望

ヒトの触覚感覚処理に着目して行った3つの検討課題それぞれについて、以下では今後の展望を記述する。今後は、革新的な Haptic デバイスの開発に資する研究はもとより、触覚がもつ統合化処理の解明を通じて大脳の神経基盤のモデル化も視野に入れた研究を進めたいと考えている。

### 能動触及び受動触が知覚精度に及ぼす影響

本研究では、能動触が受動触に精度の点で優位になる結果を得ることができなかった。受動触では遠心性コピーに代わる何らかの情報を獲得して精度を維持している可能性がある。このため今後は、その遠心性コピーに代わる情報とは何か探索を継続する予定である。

また点図ディスプレイの提示能力向上に向けては、2つの取り組みを行う予定である。1つは人間の神経系に基づく触覚認識現象を適用することである。方法として確率共鳴を使用し、適切なレベルの振動触覚刺激を使用することで人間の感度が向上させることが可能となる。もう一つは、感覚受容器の性質に着目し、接線刺激を使用して SA II を励起することで表現感覚を向上させることを計画している。

### 触覚と Pseudo-Haptics による硬さ提示

本研究では、硬さ提示に対して諧調数を増加させることが Pseudo-haptics の導入で可能となることが明らかにされた。今後は、硬さ以外の感覚、例えばテクスチャ認識に対しても Pseudo-haptics がどのように貢献できるか調査を進めたい。

また、性差の検討や年齢差の検討も必要なるものと考えられる。特に、今後高齢化社会を考えると、高齢者向け VR の需要も見込まれるために、20代の被験者に対する実験に留まらず、加齢の影響も考慮した実験的検討も重要になるものと思われる。

## 錯覚を惹起する触覚の Gestalt

触覚の Gestalt についてより深い検討を進め、触覚の Gestalt を変化させてそれにより惹起される材質感を自在に変化することを可能とすることを目指す。このため、4 つの機械受容単位に神経自由終末も加えて合計 5 つの触覚関連の受容器を選択的に刺激する仕組みを追加して、Gestalt によって生まれる材質感のコントロールの可能性を調査することを計画している。なお、仮現運動速度、点間距離、平行線の線長の三つのパラメータ間に存在する交互作用、およびパラメータの決定順序が結果に及ぼす影響についても今後の研究の中で明らかにしたい。

## 参考文献

- [Amemiya, 2005] Amemiya, T., Ando, H. and Maeda, T., Virtual force display: direction guidance using asymmetric acceleration via periodic translational motion, 2005 Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 619-622 (2005)
- [Argelaguet, 2013] Argelaguet, F., Jauregui, D., Marchal, M., and, Lecuyer, A., Elastic images: Perceiving local elasticity of images through a novel pseudohaptic deformation effect, ACM Transactions on Applied Perception, Vol. 10, No. 3, p. 17 (2013)
- [Ban, 2012] Ban, Y., Kajinami, T., Narumi, T., Tanikawa, T., Hirose, M., Modifying an identified position of edged shapes using pseudo-haptic effects, 2012 IEEE Haptics Symposium, pp. 211-216, (2012)
- [Ban, 2013] Ban, Y., Narumi, T., Tanikawa, T., Hirose, M., Modifying Perceived Size of a Handled Object through Hand Image Deformation; Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 22, No. 3, pp. 255-270 (2013)
- [Bekesy, 1959] Von Bekesy, G., Neural Funneling Along the Skin and Between the Inner and Outer Hair Cells of the Cochlea, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 31, pp. 1236-1249. (1959)
- [Becerren, 2013] Becerren, K., Ohka, M., Miyaoka, T., Yussof, H., Makhtar, A. K. and Basir, S. N., Investigation of human tactile stochastic resonance depending on frequency effect, International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, Vol. 6, No. 5, pp. 2334-2349 (2013)
- [Bolanowski, 1988] Boanowslo, J. S., Gescheider, A. G., Verrillo, T. R., Checkosky, M. C., Four channels mediate the mechanical aspects of touch, J. Acoust. Soc. Am, 85(5), pp. 1680-1694 (1988)
- [Broeren, 2004] Broeren, J., Rydmark, M. and Sunnerhagen, K. S., Virtual reality and haptics as a training device for movement rehabilitation after stroke: a

- single-case study, *Archives Physical Medicine and Rehabilitation*, Vol. 85, pp. 1247-1250 (2004)
- [Bellik, 2017] Bellik, Y. and Clavel, C., Geometrical shapes rendering on a dot-matrix display, *IHCI 2017, LNCS 10688*, pp. 8-18, (2017)
- [Deecke, 1969] Deecke, L., Scheid, P. and Kornhuber H. H., Distribution of readiness potential, pre-motion positivity, and motor potential of the human cerebral cortex preceding voluntary finger movements, *Experimental Brain Research*, Vol. 7, Issue 2, pp. 158-168 (1969)
- [Deutsch, 1974] Deutsch, D., An auditory illusion, *Nature*, 251, pp. 307-309 (1974)
- [Deutsch, 1975] Deutsch, D., Two channel listening to musical scales, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 57, pp. 1156-1160
- [Deutsch, 1976] Deutsch, D. and Roll, P. L., Separate "What" and "Where" decision mechanism in processing a dichotic tonal sequence, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 2 pp. 23-29 (1976)
- [Deutsch, 2013] Deutsch, D., "Grouping mechanism in music", *The Psychology of Music*, Amsterdam: Academic Press, 3rd edition, pp. 188-248 (2013)
- [Disbrow, 2003] Disbrow, E., Litinas, E., Recanzone, G. H. and Krubitzer, L., Cortical connections of the second somatosensory area and the parietal ventral area in macaque monkey, *J. Comp. Neural.*, Vol. 462, No. 4, pp. 382-399 (2003)
- [Eickhoff, 2006] Eickhoff, S. B., Scheicher, A., Zilles, K. and Amunts, K., The Human Parietal Operculum. I. Cytoarchitectonic Mapping of Subdivisions, *Cerebral Cortex*, Vol. 16, Issue 2, pp. 254-267 (2006)
- [Fox, 2002] Fox, S. I., *Human Physiology (7th Edition)*, McGraw-Hill, pp. 245 (2002)
- [Gescheider, 1997] Gescheider, G. A., *Psychophysics: The Fundamentals*, Third ed., Lawrence Erlbaum Associates, (1997)
- [Grange, 2001] Grange, G., Conti, F., Helmer, P., Rouiller, P. and Baur, C., Overview of the delta haptic device, *Eurohaptics 2001*, Birmingham, England (2001)

- [Halvorsen, 2006] Halvorsen, F. H., Elle, O., J., Dalinin, V. V., Mork, B. E., Sorhus, V., Rotnes, J. S. and Fosse, E., Virtual reality simulator training equals mechanical robotic training in improving robot-assisted basic suturing skills, *Surg Endosc*, Vol. 20, pp. 1565–1569 (2006)
- [Handel, 1989] Handel, S., *Listening: An Introduction to the Perception of Auditory Events*, MIT PRESS (1989)
- [Helminen, 1994] Helminen, R., Mnsikka, H., and Pertovaara, A., Lowered or increased cutaneous sensitivity during movement depends on stimulus intensity, *Perceptual and Motor Skills*, Vol. 78, No. 3, pp. 721-722 (1994)
- [Hidaka, 2018] Hidaka, S., Suzuishi, Y. and Kitagawa, N., Investigating the Effects of Tactile Masking and Surface Texture on the Velvet Hand Illusion, *Perception*, Vol. 47, Issue 10-11, pp. 1070-1080 (2018)
- [Hill, 1915] Hill E. W., “My wife and my mother-in-law. they are both in this picture - find them,” in *Puck*. Washington, D.C. 20540: Library of Congress Prints and Photographs Division, Vol. 78, No. 2018, p. 11. (1915)
- [Ikei, 1999] Ikei, Y., Yamada, M. and Fukuda, S., Tactile texture presentation by vibratory pin arrays based on surface height maps, *Proc. of Int. Mechanical Engineering Conf. and Exposition*, pp. 51-58 (1999)
- [Ikei, 2002] Ikei, Y. and Shiratori, M., Texture explore: a tactile and force display for virtual texture, *Proc. 10th Symposium on Haptics Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator System*, pp. 327-334 (2002)
- [Iwamura, 2001] Iwamura, Y., *The touch*, Igaku-shoin, pp. 149-152 (2001) (in Japanese).
- [Johansson, 1983] Johansson, R. S. and Vallbo, Å. B., Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand, *Trends in Neurosciences*, No. 6, Vol. 31, pp. 27-32 (1983)
- [Jones, 1982] Jones, E.G, and Friedman, D.P., Projection pattern of functional components of thalamic ventrobasal complex on monkey somatosensory cortex, *Journal of neurophysiology*, Vol.48, No.2, pp.521-544 (1982)
- [Jones, 2006] Jones, L. A., and Lederman, S. J., *Human Hand Function*. Oxford

- Univ. Press (2006).
- [Kamuro, 2009] Kamuro, S., Minamizawa, K., Kawakami, N. and Tachi, S., Ungrounded kinesthetic pen for haptic interaction with virtual environment, Proc. of the 18th IEEE Inter. Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp. 436-441 (2009)
- [Kanizsa, 1955] Kanizsa, G. : Margini quasi-percettivi in campi con stimolazione omogenea, Rivista di Psicologia, 49 (1), pp.7-30 (1955)
- [Katz, 1925] Katz, D., 触覚の世界, 東山篤規, 岩切絹代訳, 新曜社 (2003)
- [Kato, 2007] Kato, Y., Sekitani, T., Takamiya, M., Doi, M., Asaka, K., Sakurai, T. and Someya, T., Sheet-type Braille displays by integrating organic field-effect transistors and polymeric actuators, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 54, No. 2, pp. 202-209 (2007)
- [Koffka, 1935] Koffka, K., Principles of Gestalt Psychology, Routledge & KEGAN PAUL LTD (1935)
- [Köhler, 1952] Köhler, W., Held, R. and, O'Connell, D. N., An Investigation of Cortical Currents, Proceedings of the America Philosophical Society, 96, pp. 290-330 (1952)
- [Köhler, 1955] Köhler, W., Deef, W. D. and Wegener, J., Currents of the auditory cortex in the cat, Journal of Cellular and Comparative Physiology, Vol. 45, Issue S1, pp. 1-24 (1955)
- [Köhler, 1957] Köhler W., O'Connell, D. N. Currents of the visual cortex in the cat, Journal of Cellular and Comparative Physiology, 49, pp. 1-43 (1957)
- [Köhler, 1969] Köhler W., The Task of Gestalt Psychology, Princeton Legacy Libray (1969)
- [Komura, 2019] Komura, H. and Ohka, M., Edge angle perception precision of active and passive touches for haptic VR using dot-matrix display, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 13, No. 3, pp. 1-11 (2019)
- [Koo, 2008] Koo, I-M., Jung, K., Koo, J-C., Nam, J-D., Lee, Y-K. and Choi, H-R., Development of soft-actuator-based wearable tactile display, IEEE Transactions on Robotics, Vol. 24, No. 3, pp.549-558 (2008)

- [Kyung, 2008] Kyung, K-U, and Kwon, D-S., Tactile displays with parallel mechanism world's largest science, *Technology & Medicine*, pp. 445-457 (2008)
- [Lécuyer, 2000] Lécuyer, A., Coqillart, S., Kheddar, A., Richard, P. and Coiffet, P., Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback? *Proc. of Virtual Reality Conference*, pp. 83-90 (2000)
- [Lécuyer, 2009] Lécuyer, A., Simulating Haptic Feedback Using Vision: a Survey of Research and Applications of “Pseudo-Haptic Feedback”: *PRESENCE: Virtual and Augmented Reality* Vol. 18, No. 1 pp. 39-53 (2009)
- [Lederman, 1981] Lederman, S. J., The perception of surface roughness by active and passive touch, *Bulletin of the Psychonomic Society*, Vol. 18, Issue 5, pp. 253-255 (1981)
- [Lederman, 1991] Lederman, J. S., Skin and Touch, *Encyclopedia of Human Biology*, Vol. 7, pp. 51-63 (1991)
- [Lee, 2005] Lee, J-S. and Lucyszyn, S., Micromachined, A., Refreshable braille cell, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 14, No. 4, pp. 673-682 (2005)
- [Massie, 1994] Massie, T. H. and Salisbury, J. K., The PHANToM Haptic Hnterface: A Device for Probing Virtual Objects, *Proc. of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, (1994).
- [Matsunaga, 2013] Matsunaga, T., Totsu, K., Esashi, M. and Haga, Y., Tactile display using shape memory alloy micro-coil actuator and magnetic latch mechanism, *Displays* 34, pp. 89-94, (2013)
- [Miyazaki, 2010] Miyazaki, M., Hirashima, M. and Nozaki, D., The “Cutaneous Rabbit” Hopping out of the Body, *Jornal of Neuroscience*, 30(5), 99, pp. 1856-1860, (2010)
- [Moody, 2009] Moody, L., Waterworth, A., Arthur, J. G., McCarthy, D. A., Harley, J. P., Smallwood, R. H., Beyond the visuals: tactile augmentation and sensory enhancement in an arthroscopy simulator, *Virtual Reality*, Vol. 13, No. 1, pp.

- 59-68 (2009)
- [Menvoort, 2008] Mensvoort, V. K., Hermes, J. D., Montfort, V. M., Usability of optically simulated haptic feedback, *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 66, No. 6, pp. 438-451 (2008)
- [Mochiyama, 2005] Mochiyama, H., Sano, S., Takesue, N., Kikuuwe, R., Fujita, K., Fukuda, S., Marui, K., and Fujimoto, H., Haptic Illusions Induced by Moving Line Stimuli, *World Haptics Conference*, pp. 645-648 (2005)
- [Morley, 1983] Morley, J. W., Goodwin, A. W. and Darian-Smith, I., Tactile discrimination of gratings, *Experimental Brain Research*, Vol. 49, No. 2, pp. 291-299 (1983)
- [Müller-Lyer, 1889] Müller-Lyer, F. C., *Optische Urteilstauschungen*, *Archiv fur Anatomie und Physiologie, Physiologische Abteilung*, Vol. 2, pp. 263-270 (1889)
- [Nakamura, 2013] Nakamura, T. and Yamamoto, A., Multi-finger electrostatic passive haptic feedback on a visual display, *IEEE World Haptics Conference*, pp. 37-42 (2013)
- [Nakashige, 2004] Nakashige, M., Hirota, K. and Hirose, M., Linear actuator for high-resolution tactile display, *13th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 587-590 (2004)
- [Nomura, 2009] Nomura, T., Arashi, T., Maeno T., How do we recognize water and oil through our tactile sense? , *Colloids Surf B Biointerfaces*, Vol. 73, No. 1, pp. 80-83 (2009)
- [Ohka, 2007] Ohka, M., Koga, H., Mouri, Y., Sugiura, T., Miyaoka, T. and Mitsuya, Y., Figure and texture presentation capabilities of a tactile mouse equipped with a display pad of stimulus pins, *Robotica*, Vol. 25-4, pp. 451-460 (2007)
- [Ohka, 2010] Ohka, M., Kawabe, Y., Chami, A., Rajaei, N., Yussof, B. H. and Miyaoka T., Investigation on Velvet Hand Illusion Using Psychophysics and FEM Analysis, *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, Vol. 3, No. 3, pp. 488-503 (2010).
- [Rajaei, 2012] Rajaei, N., Kawabe, Y., Ohka, M. and Miyaoka, *Psychophysical*

- experiments on Velvet Hand Illusion toward presenting virtual feeling of material, *International Journal of Social Robotics*, Vol. 4, Issue 1 Supplement, pp.77-84 (2012)
- [Rajaei, 2013] Rajaei, N., Ohka, M., Miyaoka, T., Yussof, H., Makhtar, A. K. and Basir, S. N., Investigation of VHI affected by the density of mechanoreceptive units for virtual Sensation, *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, Vol. 6, No. 4, pp. 1517-1532 (2013)
- [Rajaei, 2016] Rajaei, N., Ohka, M., Nomura, H., Komura, H., Matsushita, S. and Miyaoka, T., Tactile mouse generating Velvet Hand Illusion on human palm, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 13-5, pp. 1-10 (2016)
- [Rajaei, 2018] Rajaei, N., Takahashi, HK., Miyaoka, T., Kochiyama, K., Ohka, M., Sadato, N., and Kitada, R., Brain networks underlying conscious tactile perception of textures as revealed using the Velvet Hand Illusion. *Hum Brain Map.*, pp 1–15 (2018)
- [Ros, 2014] Ros, P. M., Dante, V., Mesin, L., Petetti, E., Giudice, P. D. and Pasero, E., A new dynamic tactile display for reconfigurable Braille: Implementation and Tests, *Frontiers in Neuroengineering*, pp. 1-13 (2014)
- [Rubin, 1915] Rubin, E., *Synsoplevede figurer. Studier i psykologisk Analyse. Første Del.* Copenhagen and Christiania: Gyldendalske Boghandel, Nordisk Forlag (1915)
- [Sanz, 2013] Sanz, F. A., Jáuregui, D. A. G. and Lécuyer, A., Elastic images: perceiving local elasticity of images through a novel pseudo-haptic deformation effect, *ACM Transactions on Applied Perception*, Vol. 10, No. 3, pp.17:1–17:14 (2013)
- [Schmit, 1991] Schmit, R. F. (岩村他訳), *感觉生理学第2版*, 金芳堂 (1991)
- [Shinohara, 1998] Shinohara, M., Shimizu, Y. and Mochizuki, A., Three-dimensional tactile display for the blind, *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 249-256, (1998)
- [Shimizu, 1986] Shimizu, Y., Tactile display terminal for visually handicapped, *Displays*, Vol. 7, Issue 3, pp. 116-120 (1986)

- [Soso, 1980] Soso, M. J. and Fetz, E. E., Responses of Identified Cells in Postcentral Cortex of Awake Monkeys During Comparable Active and Passive Joint Movements, *Journal of Neurophysiology*, Vol. 43, No. 4, pp. 1090-1110 (1980)
- [Tachi, 2009] Tachi, S., *Telexistence Book*, World Scientific Publishing, USA (2009)
- [Tachi, 2013] Tachi, S., Minamizawa, K., Furukawa M. and Fernando, C. L., Haptics media construction and utilization of human-harmonized “tangible” information environment, *Proceedings of the 23rd International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, pp. 145-150 (2013)
- [Tamon, 2012] Tamon, R., Takasaki, M. and Mizuno, T., Generation of drawing sensation by surface acoustic wave tactile display on graphics tablet, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 5, No. 4, pp. 242–248 (2012)
- [Thunberg, 1896] Thunberg, T., Förnimmelserne vid till samma ställe lokaliserad, samtidigt pågående köld-och värmeretning, *Uppsala Läkareförenings Förh.*, Vol. 1, pp. 489-495 (1896)
- [Taima, 2014] Taima, Y., Ban, Y., Narumi, T., Tanikawa, T. and Hirose, M., Controlling figure while lifting objects using Pseudo-Haptics in a mixed reality space; *Haptics symposium 2014*. pp. 175-180 (2014)
- [Tsuboi, 2014] Tsuboi, S. and Ohka, M., A basic study of hardness cognition combining Pseudo-Haptics and distributed pressure display, *ICIC Express Letters*, Vol. 8, No. 1, pp. 103-108 (2014)
- [Taylor, 1973] Taylor, M. M., Lederman, S. J. and Gibson, R. H., Tactual perception of texture, *Handbook of Perception*, pp. 251-272 (1973)
- [Taylor, 1998] Taylor, P. M., Moser, A. and Creed, A., A sixty-four element tactile display using shape memory alloy wires, *Displays* 18, pp. 163-168 (1998)
- [Torrassa, 2014] Torrasa, N., Zinoviev, K. E., Camargo, C. J., Campo, E. M., Campanella, H., Esteve, J., Marshall, J. E., Terentjev, E. M., Omastová, M., Krupa, I., Teplicky, P., Mamojka, B., Bruns, P., Roeder, B., Vallribera, M., Malet, R., Zuffanelli, S., Soler, V., Roig, J., Walker, N., Wenn, D., Vossen, F.

- and Cromptoets, F. M. H., Tactile device based on opto-mechanical actuation of liquid crystal elastomers, *Sensors and Actuators, A* 208, pp. 104-112 (2014)
- [Tsuboi, 2013] Tsuboi, S., Ohka, M., Yussof, H., Khushairy, A. and Basir, S. N., Object handling precision using mouse-like haptic display generating tactile and force sensation, *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems* Vol. 6, No. 3, June (2013).
- [Ura, 1959] Ura, S., An analysis of a paired comparison experiment, *Quality Control, Journal of JUSE*, Vol. 16, pp. 78-80 (1959)
- [Wagner, 2002] Wagner, C. R., Lederman, S. J. and Howe, R. D., Design and performance of a tactile shape display using RC servomotors, *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, HAPTICS*, pp. 1-6 (2002)
- [Watanabe, 1999] Watanabe, T., Form recognition with the tactile mouse, *ITE Technical Report*, Vol. 23, No.66, pp. 1-6 (1999) (in Japanese)
- [Wu, 2012] Wu, X., Kim, S-H., Zhu, H., Ji, C-H. and Allen, M. G., A Refreshable Braille cell based on pneumatic microbubble actuators, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 21, No. 4, pp. 908-916 (2012)
- [Yeh, 2012] Yeh, F-H. and Liang, S-H., Mechanism design of the flapper actuator in Chinese Braille display, *Sensors and Actuators, A* 135, pp. 680-689, (2007)
- [Zhao, 2012] Zhao, F., Jiang, C. and Sawada, H., A novel Braille display using the vibration of SMA wires and the evaluation of Braille presentations, *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol. 7, No. 4, pp. 416-432 (2012)
- [Zhou, 2011] Zhou, Y., Yin, X. and Ohka, M., Virtual figure presentation using pressure-slippage-generation tactile mouse, *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, Vol. 4, No. 3, pp. 454-466 (2011)
- [Zöllner, 1860] Zöllner F., Ueber eine neue Art von Pseudoskopie und ihre Beziehungen zu den von Plateau und Opperl beschriebenen Bewegungsphänomenen, *Annalen der Physik und Chemie*, 186, Issue 7, pp. 500-523 (1860)
- [岩村, 1984] 岩村吉晃, ヒトの触覚受容器の構造と特性, *日本ロボット学会誌*, 第2巻, 第5号, pp. 438-444, 1984

- [原田,2009] 原田隆之, 平井達也, 千鳥司浩, 渡邊紀子, 星野雅代, 井上大輔, 上野愛彦, 田中知美, 木村友一, 村雲聡江, 下野俊哉, 接触における能動性の有無が知覚閾値に及ぼす影響, 第18回愛知県理学療法学会大会, 第21巻, 第2号, pp. 117-121 (2009)
- [大岡,2005] 大岡昌博, 古賀浩嗣, 宮岡徹, 三矢保永, 高密度ピンアレイ形触覚マウスによる格子状仮想テクスチャ提示(第1報:高密度ピンアレイ形触覚マウスの試作と性能評価実験法の確立), 日本機械学会論文集C編, Vol. 71, No. 711, pp. 3174-3180 (2005)
- [大岡,2006] 大岡昌博, 古賀浩嗣, 宮岡徹, 三矢保永, 高密度ピンアレイ形触覚マウスによる格子状仮想テクスチャ提示(第2報:触知ピン間隔, テクスチャ密度および畝高さの検討), 日本機械学会論文集C編, Vol. 72, No. 715, pp. 865-871 (2006)
- [大丘,2010] 大丘達也, 藤田欣也, 振動ファントムセンセーションの位置制御による指先への接線力と滑りの代替提示, TVRSJ Vol.15 No.2 pp. 263-272, 2010
- [大原,2009] 大原淳, 加藤寛士, 橋本悠希, 梶本裕之, 温度によって生じるファントムセンセーション, 第14回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2009
- [面迫,2013]面迫宏樹, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: Shape-COG illusion: 複合現実感体験時の視覚刺激による重心知覚の錯覚現象(第2報); 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 18, No. 2, pp. 117-120 (2013)
- [カニツァ,1985]カニツァ G., カニツァ視覚の文法—ゲシュタルト知覚論, サイエンス社 (1985)
- [ケーラー,1971] ケーラー W., 田中良久, 上村保子, ゲシュタルト心理学入門, 東京大学出版会 (1971)
- [黄,2010] 黄健, 次世代マルチメディアサービスへの期待:ハプティックデバイスによる力提示とその応用, 近畿大学次世代基盤技術研究所報告,

- Vol.1, pp. 45-50 (2010)
- [後藤, 2005] 後藤倬男, 錯視の科学のハンドブック, 東京大学出版 (2005)
- [小村, 2019] 小村啓・大岡昌博: 滑らかさを惹起する触覚の Gestalt に関する基礎調査, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.24-1, pp. 43-51 (2019)
- [下条, 2010] 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 (2010)
- [鶴岡, 2017] 鶴岡誠司, 上岡玲子, ベルベットハンドイリュージョンの足裏への提示実験, 第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会 (2017)
- [中島, 2014] 中島祥好, 聴覚の文法, コロナ社 (2014)
- [仲谷, 2008] 仲谷正史, R. D Howe, 舘暲, Fishbone Tactile Illusion を利用した触対象の凹知覚の研究, TVRSJ, Vol. 13, No. 1 (2008)
- [西松, 2001] 西松豊典, 長野史智, 前田 邦峰, 上條 正義, 鳥羽 栄治, 石澤 広明, 能動的触運動による材質判別評価について, 感性工学研究論文集, Vol. 1, No.1, pp. 39-44 (2001)
- [日本経済新聞, 2019] 日本経済新聞, 2019/3/25  
<<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO42874810V20C19A3000000/>>
- [橋口, 2016] 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子, 複合現実型視覚刺激が温冷覚の知覚位置・知覚幅に与える影響, TVRSJ Vol.21 No.3 pp. 503–511 (2016)
- [松村, 2009] 松村将太郎, 熊澤逸夫, 触覚に情報を提示するハプティックデバイスを活用するビジネスの展開—デジタルデバイドの克服とゲームの触覚リアリティ向上, 映像情報メディア学会誌, Vol.63, No.10 pp. 1407-1412 (2009),
- [松村, 2011] 松村将太郎, 熊澤逸夫, 触覚に情報を提示するハプティックデバイスを活用するビジネスの展開—デジタルデバイドの克服とゲームの触覚リアリティ向上, 映像情報メディア学会誌, Vol.63, No.10, , pp. 1407-1412 (2009).

- [横山, 2018] 横山綾亮, 小村啓, 坪井諭之, 大岡昌博 : Pseudo-haptics と触覚刺激の複合呈示による硬さ表現能力の向上, 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 868, pp. 1-8, (2018)
- [和氣, 1996] 和氣洋美・和氣典二, 再び, 触覚にも主観的輪郭の効果はあるのか, 神奈川大学心理・教育論集, 15 卷, pp. 27-61 (1996)

## 謝 辞

---

本研究の推進および論文の執筆にあたり、終始丁寧かつ適切な御指導を下された、名古屋大学大学院情報学研究科 複雑系科学専攻 複雑系計算論講座 大岡昌博教授に深く感謝の意を表します。大岡先生には、会社を辞めて大学院に戻ってきた際には技術補佐員として受け入れてくださり、また博士課程 1 年の際にはカナダに、博士課程 2 年の際にはシンガポールに研修に行かせていただきありがとうございました。非常に有益な経験をさせていただきました。

また、ご多忙のなか副査を快諾して下さると共に、本論文をまとめる上で貴重な御助言を下された、同講座 畔上秀幸教授、渡邊崇教授、及び鈴木泰博准教授に深く感謝します。

本研究は、名古屋大学 大学院情報学研究科博士課程前期 三井雄介君、横山綾亮君(平成 30 年度修了)、工学研究科博士課程前期 池田慧君、情報学研究科博士課程前期 阿部航平君、渡邊孝裕君、志村友輝君等(平成 31 年度修了)の協力により完成させることが出来ました。深く感謝いたします。

また、本研究は公益財団法人豊秋奨学会の研究助成、公益財団法人立松財団の海外調査研究助成、日本学術振興会の研究助成により実施されました。深く感謝申し上げます。

令和 2 年 1 月  
小村 啓