

令和5年度
修士学位論文

高知工科大学
工学研究科基盤工学専攻情報学コース
皮膚兔錯覚現象を応用した
触覚方位知覚の検討

Haptic Orientation Perception Utilizing the
Cutaneous Rabbit Illusion Phenomenon

1265107 武内 一晴

指導教員 情報学群 繁 柊 博 昭

2024年2月28日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻
情報学コース

要 旨

高知工科大学

工学研究科基盤工学専攻情報学コース

皮膚兎錯覚現象を応用した

触覚方位知覚の検討

武内 一晴

皮膚兎錯覚は呈示した位置とは異なる場所に触覚を感じる現象である。この錯覚の生起時に刺激の方位も変化して知覚されるか、また視覚刺激によってその知覚が変化するかを検討した。1, 2 回目の触覚刺激の位置と方位を同一にし、3 回目の触覚刺激のみ位置と方位を変化させた結果、2 回目の刺激の位置の錯覚と、限定的ではあるが方位の錯覚が生じた。また触覚刺激と同期して視覚刺激を呈示した場合は触覚による方位の判断に影響が見られた。

キーワード VR, 視覚, 触覚, 知覚, 多感覚統合, 皮膚兎錯覚

Abstract

Haptic Orientation Perception Utilizing the Cutaneous Rabbit Illusion Phenomenon

Issei TAKEUCHI

The cutaneous rabbit illusion is a phenomenon where haptic sensations are perceived at a location different from the actual point of stimulation. In this study, we examined whether the perceived orientation of the stimulus also changes during the occurrence of this illusion and whether visual stimuli can influence the illusion. The position and orientation of the first and second haptic stimuli were kept the same, and only the position and orientation of the third haptic stimulus was changed. In the results, the illusory effect on the position of the second stimulus was found, and to a limited extent, its orientation as well.

key words Virtual reality, Vision, Haptic, Perception, Multisensory integration, Cutaneous rabbit illusion

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	目的	4
1.3	触覚による方位判断について	5
1.4	視覚	6
1.5	触覚	7
1.6	多感覚統合	8
1.7	VR(Virtual Reality)	11
第 2 章	実験	12
2.1	実験装置	12
2.1.1	使用ソフトウェア	12
2.1.2	刺激呈示装置	12
2.1.3	触覚刺激呈示装置	15
2.2	実験環境	16
2.3	実験参加者	17
2.4	事前準備	18
2.4.1	HMD(視覚刺激)	18
2.4.2	ヘッドホン	18
2.4.3	触覚刺激呈示装置	18
2.5	各種刺激	19
2.6	実験手続き	21
2.6.1	回答の際の操作	23

目次

第 3 章	実験結果	24
3.1	皮膚兎錯覚の生起について	24
3.2	皮膚兎錯覚の生起時の方位錯覚について	25
3.3	知覚された方位差と皮膚兎錯覚との相関について	27
第 4 章	考察	28
4.1	展望	30
4.1.1	視触覚刺激の呈示時間の検討	30
4.1.2	視覚刺激の呈示方法の検討	31
4.1.3	不明瞭な知覚を正確にする手法の検討	32
4.1.4	変化あり条件における知覚された方位差が実際に呈示した第 2 触覚 刺激の方位よりも小さい値であったことについての検討	32
4.2	本研究の発展について	33
第 5 章	まとめ	34
	謝辞	35
	参考文献	36
付録 A	触覚刺激呈示装置の外見	38
付録 B	触覚刺激呈示装置のブレードの傾き	40
付録 C	ブレードの外見	41

目次

1.1	3D 触力覚技術	2
1.2	UnlimitedHand	2
1.3	bHaptics TactSuit X40	2
1.4	皮膚兎錯覚現象	3
1.5	視覚神経系の主要なブロック	6
1.6	末梢から中枢に至る触覚刺激の大まかな流	7
1.7	実験環境	9
1.8	バーの角度のズレ	9
1.9	旗のはためく様子及び木の葉が風で舞うようす	10
2.1	Meta Quest 2	13
2.2	ヘッドホン	13
2.3	触覚刺激呈示装置	13
2.4	回答用ワイヤレスマウス	13
2.5	実験装置の模式図	15
2.6	実験のようす-正面	16
2.7	実験のようす-俯瞰	16
2.8	敷物を敷いた状態	17
2.9	敷物を敷いていない状態	17
2.10	刺激の呈示 (第 1 刺激 0 deg, 第 2 刺激 30 deg, 第 3 刺激 60 deg)	20
2.11	方位判断時の呈示映像の例	22
2.12	方位判断時の呈示映像の例	23

目次

3.1	各条件における第 1 触覚刺激の位置を 0, 第 3 触覚刺激の位置を 100 とした第 2 触覚刺激の位置を数値で回答した結果 (誤差線は標準誤差)	24
3.2	30 deg 条件の知覚された方位差 (誤差線は標準誤差)	26
3.3	60 deg 条件の知覚された方位差 (誤差線は標準誤差)	26
3.4	90 deg 条件の知覚された方位差 (誤差線は標準誤差)	26
3.5	視覚なし条件かつ変化なし条件における相関	27
3.6	視覚なし条件かつ変化あり条件における相関	27
3.7	視覚あり条件かつ変化なし条件における相関	27
3.8	視覚あり条件かつ変化あり条件における相関	27
A.1	側面	38
A.2	背面	38
A.3	俯瞰	39
A.4	制御装置	39
B.1	触覚刺激呈示前	40
B.2	触覚刺激呈示時	40
C.1	ブレード側面	41
C.2	ブレード (下からの見え方)	41

第 1 章

はじめに

1.1 背景

Virtual Reality(以下 VR) 技術の発展により，視覚や聴覚に働きかけ VR 体験を成立させる一般的な方式だけでなく，触覚を呈示することも近年多く試みられている．香田ら [1] が開発した非線形波動と呼ばれる特殊な歪みをつけた振動を用いて脳をだます 3D 触力覚技術や，岩崎ら [2] が開発した，電気刺激を与え筋肉を動かすことにより，重みや銃を撃つたときの反動を感じさせるという「UnlimitedHand」などが表立った例である．

また触覚の呈示範囲を腕に限定せず，より広い範囲での触覚呈示を可能とするスーツ型の触覚呈示装置も検討されており，株式会社 bHaptics の「TactSuit X40」は，対応する VR ゲームをプレイ中にプレイヤーが受けた衝撃を再現することが可能である．スーツの内部にある 40 個の触覚フィードバックポイントから振動刺激が呈示され，複雑な銃撃戦では実際に体の撃たれた場所が衝撃を受け，相手に囲まれると，銃撃を受けた位置や衝撃の方向により，どの相手から撃たれたのかに気づくことができる [3]．

1.1 背景

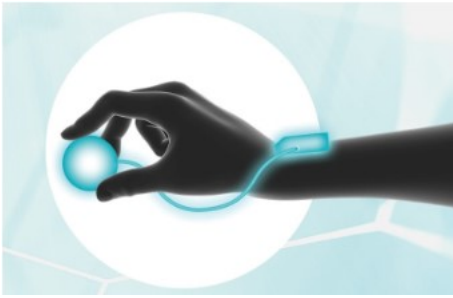


図 1.1 3D 触力覚技術



図 1.2 UnlimitedHand



図 1.3 bHaptics TactSuit X40

しかし触覚の呈示方法は視覚と聴覚に比べ発展が遅れている。この背景として、触覚を表現するには刺激を与えたい場所ごとに刺激呈示の装置が必要になる問題があり、またこれらの装置が高価であるため一般に普及しづらい問題がある。先ほど例に挙げた触覚呈示装置も触覚を呈示可能な範囲は限られており、ヘッドマウントディスプレイ (以下 HMD) の装着のみで VR 体験を成立させる従来の手法と比較すると必要なものが多く、VR 体験を楽しむために全身を現実の触覚に近づけるとなると、体の部位ごとに専用の装置を買いそろえる必要がある。よって HMD を使用した手法と比べ、触覚の呈示のみにおいても高価格かつ装置の着脱に面倒な手続きが必要になる。手軽で安価な装置を装着することで五感全てに働きかけ VR が体験できることが理想的であるが、触覚を含む視覚、聴覚以外の感覚はこのことを実現することは困難である。

しかし VR 技術が発展するためには触覚を含む視覚、聴覚以外の感覚の呈示は必須である。中でも現在 VR 技術がゲームやエンターテインメントへの利用が数多くされているこ

1.1 背景

とも踏まえると、視覚・聴覚以外の五感の中でも特に触覚へのアプローチが急務と考えた。このことから手軽で安価な装置で刺激の呈示位置に依存しない細かな触覚表現を可能にする方法を検討することが必要である。

刺激の呈示位置に依存しない触覚刺激の新たな呈示方法を検討するために、皮膚兔錯覚現象を利用する。皮膚兔錯覚とは、図 1.4 に示すように、触覚刺激を 2 回皮膚上のある位置に与え、直後に別の位置に 3 回目の触覚刺激を与えると、皮膚上を小さな兔が跳ねていくように 2 回目の触覚刺激が 2 点のあいだに移動して知覚される現象である [4]。

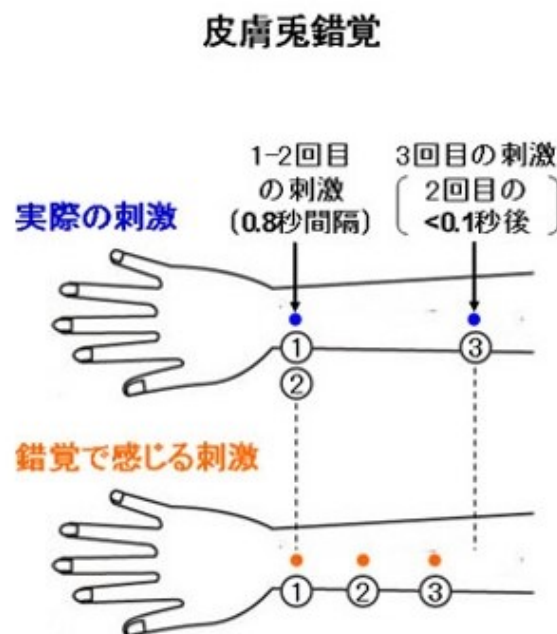


図 1.4 皮膚兔錯覚現象

しかしこの研究では皮膚兔錯覚現象が生じたときに、1, 2 回目の触覚刺激のある特性を 3 回目の刺激呈示時に変化させると、触覚刺激を呈示していない位置に感じた 2 回目の触覚刺激の特性も中間的な知覚に変化するののかについては検討されていない。また先行研究では視覚刺激との同期で皮膚兔錯覚が促進されることが報告されており [5] [6] [7], 視覚の効果によって触覚刺激を呈示していない位置に感じた 2 回目の触覚刺激の特性も変化するかについても検討されていない。

1.2 目的

1.2 目的

本研究では刺激の呈示位置に依存しない触覚刺激の新たな呈示方法を検討するために、皮膚兎錯覚現象を利用する。皮膚兎錯覚現象が生じたときに、1, 2 回目の触覚刺激のある特性を 3 回目の刺激呈示時に変化させると、触覚刺激を呈示していない位置に感じた 2 回目の触覚刺激の特性も中間的な知覚に変化するのかを検討した。変化させる触覚刺激は触覚で知覚できる基本的な特徴である方位刺激を用いた。視覚の効果によって触覚刺激を呈示していない位置に感じた 2 回目の触覚刺激の位置や特性も変化するのかを検討した。

1.3 触覚による方位判断について

本研究では、皮膚兔錯覚現象生起時の触覚刺激を呈示していない位置に感じた 2 回目の触覚刺激の特性に対する知覚について検討するために、触覚刺激として自作の触覚刺激呈示装置に装着された薄く伸びたブレード (厚さ 1 mm, 長さ 80 mm) を腕の皮膚に押し当てることによる方位刺激の呈示を行う。したがって触覚刺激の方位や与える視覚刺激を変化させることによって、触覚の特性に対する知覚について検討していく訳だが、Peters ら [8] の研究では、触覚による方位判断の際に、その手がかりの長さが変化することにより、方位判断課題の結果が変化することを報告している。この研究では、自動制御された棒の方向を指先で触れ知覚するという課題を行っており、本研究のようにブレードによる触覚刺激の呈示ではなく、実験手法は異なる。しかしこの研究で報告された方位判断の手がかりの長さによる知覚の変化が実験結果に影響する可能性もあるため、ブレードの大きさや押し当てる圧力によって触覚刺激の長さが変わらないようにした。当然参加者ごとに腕の長さは異なるため、手首と肘の中心と装置の刺激をする 2 点間の中心が重なるように触覚呈示装置を設置し、触覚の呈示位置が参加者によって手首に刺激を呈示するようなことが起きないように調整し実験を行った。

1.4 視覚

1.4 視覚

外界の光は、網膜を経て、図 1.5 に示すように、外側膝状体と上丘に伝わる。外側膝状体を経て大脳皮質第 1 次視覚野への経路はパターン情報処理等に関わる。網膜から上丘への経路の情報は、視床枕と呼称される神経核から大脳皮質に情報が送られる。上丘は眼球運動の指令中枢の一つであり、この経路は眼球運動と密接に関係すると言われている。大脳皮質に至った情報は、第 2 次視覚野 (V2) から MST で構成される視覚前野で二つの経路に分かれ、形態視に関係が深いとされる側頭連合野、空間視に関係が深いとされる頭頂連合野で処理される [9] [10].

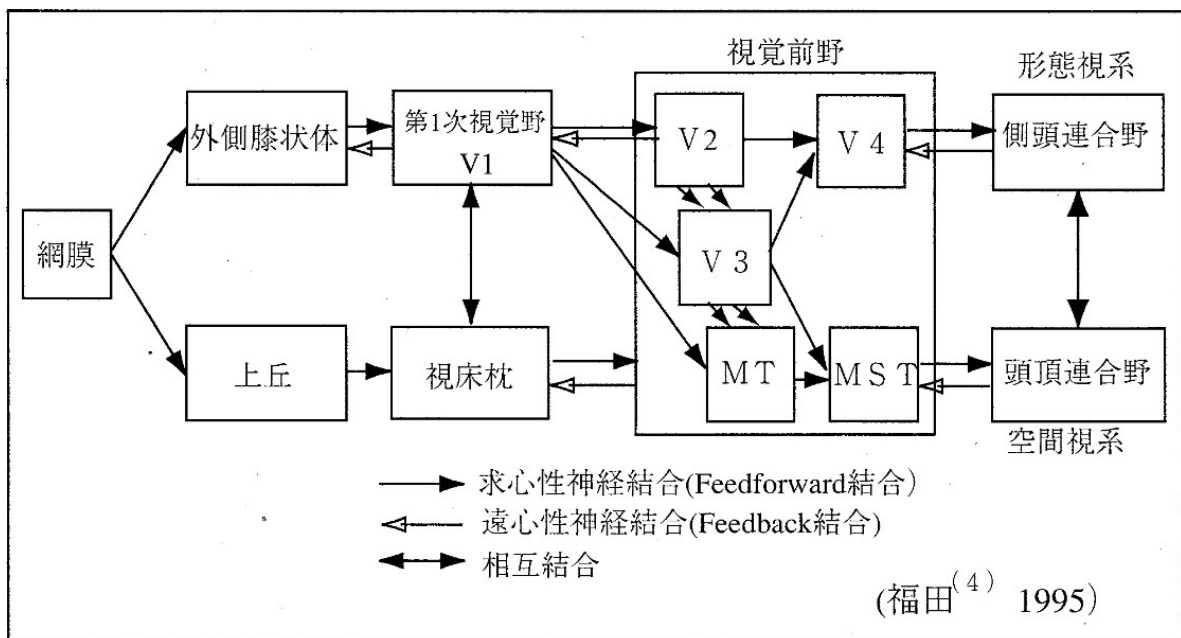


図 1.5 視覚神経系の主要なブロック

1.5 触覚

1.5 触覚

人の身体表面は皮膚で覆われている。皮膚が外部から刺激を受けて生起する感覚が、皮膚感覚である。その中で、体毛も含めた皮膚の機械的変形に起因するものが触覚である。皮膚で受容された情報は、主に感覚情報の基地である視床を経由して、大脳皮質内の中心後回に投射する [11]。そこで運動にかかわる固有感覚情報と統合され、2次体性感覚野、運動関連領野、連合野などのより高次の皮質領野に送られ、触覚体験をもたらし、行動の発現に関与する。触覚受容器の構造を図 1.6 に示す。

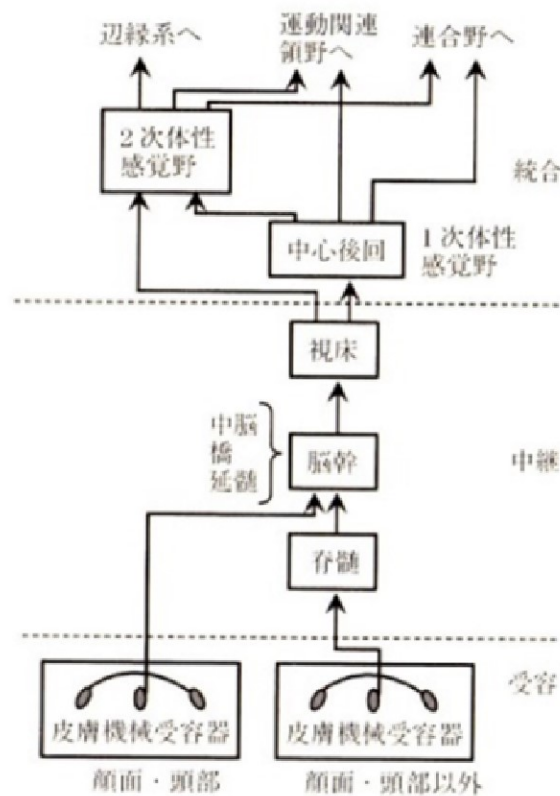


図 1.6 末梢から中枢に至る触覚刺激の大まかな流

1.6 多感覚統合

日常的において独立した感覚モダリティのみが与えられるという場面はあまりない。「食事をとる」という簡単な動作においても、五感全ての情報が同時に処理されている。視覚から得られるペンの形状や色、色や状態、嗅覚から得られる匂い、料理によっては音もなっているかもしれない。それが口に運ばれ、味覚によって味を、触覚によって触感を情報として取得している。このように人間は日常のあらゆる場面において各種感覚を同時に受け取り、加えて運動によって対象物と関りながら認識・適応を行っており、このような生体機能は“多感覚統合”と呼ばれる [12].

多感覚統合の1つ、視覚と触覚の統合過程では様々な研究が試みられており、Kaasら [13] は、参加者の前にある2つのバーのうち1つが課題のバーとなっており、もう片方をそのバーと同じ方向に合わせるといった課題を行った。その際、図1.7のように参加者の視界は黒色のカーテンで遮蔽され、手元のバーを直接見ることはできないようになっており、参加者の正面にある筒状のチューブの先にあるモニターにより手元の映像を見ることが出来るようになっている。この課題では図1.8のようにその映像のバーの角度が設定した角度条件に従い、実際のバーの角度とずれている。この研究では、視覚と触覚のズレが人間の知覚にどのような影響をもたらすのかを検討しており、これらの感覚刺激が一致しているか、不一致かによって先ほど説明したバーの角度を合わせる触覚課題の結果が変わることが報告されている。

1.6 多感覚統合

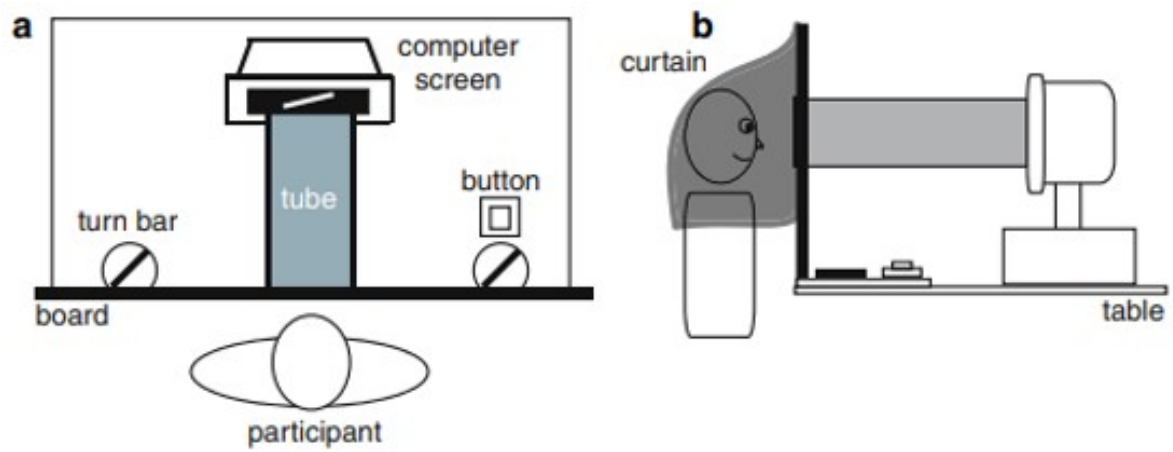


図 1.7 実験環境

Haptic stimulus



Visual deviation

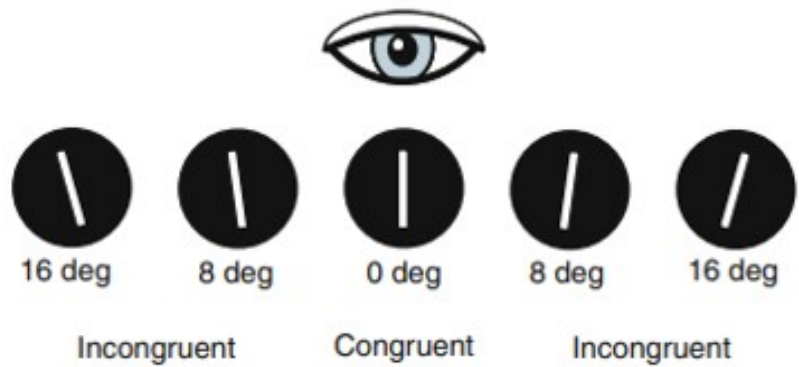


図 1.8 バーの角度のズレ

1.6 多感覚統合

また西牧ら [14] の研究では、図 1.9 のように HMD にヴァーチャルな旗が風ではためく映像、木の葉が風で舞う映像の 2 つを視覚刺激として表示し、同時に呈示した風の強さや方向を回答する課題を行った。この研究では参加者に当たる実風の強さは仮想的な風の強さに依存しながら変化して知覚され、その影響は仮想風と実風の風向が 90 度異なっても生じることを示している。

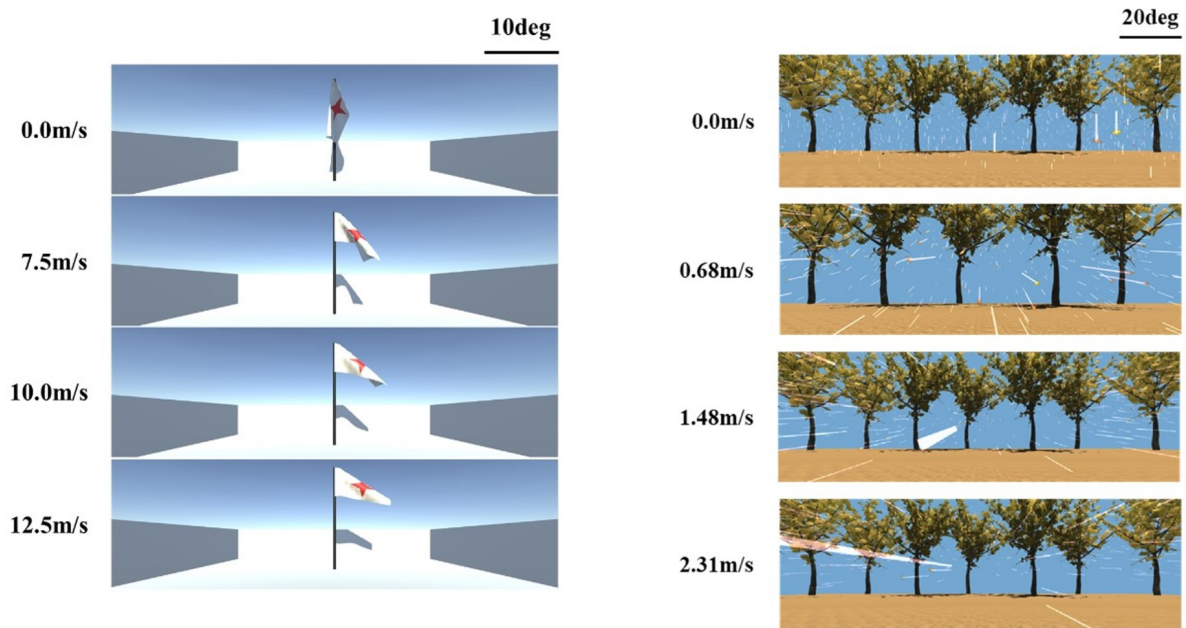


図 1.9 旗のはためく様子及び木の葉が風で舞うようす

これらの研究では視覚刺激の影響が同時に呈示した触覚刺激にまで及ぶという結果を報告しており、視覚の効果により触覚の感じ方が変化する可能性を示唆した。

1.7 VR(Virtual Reality)

VR(Virtual Reality) は、人工現実感と呼ばれ、現実ではできないような体験をすることができる技術である [15]. VR のシステム構成はディスプレイ, 入力システム, シミュレーションの 3 つに分類することができ [16], 多くの VR 技術は HMD を入力システムとして用い, コンピュータグラフィックス (CG) を使った視覚刺激やスピーカから出力される聴覚刺激を駆使することにより, 使用者に人工的に作られた仮想世界を体験させることが出来る. この仮想世界を作り出すために重要な要素として, 平面ではなく 3 次元的な空間を構成しているかという「3 次元の空間性」, 実時間とバーチャルな環境が相互的に影響しているかという「実時間の相互作用性」, 使用者がそのバーチャルな環境に入り込んだ状況が作れているかという「自己投射性」の 3 つが存在する [17].

第 2 章

実験

2.1 実験装置

2.1.1 使用ソフトウェア

視覚刺激の作成および運転環境の構築には，Unity(Ver.2021.3.4f1) を使用した．実験プログラムは C# 言語を用いて実装した．測定データは，逐次 CSV ファイルに格納するようになった．収集したデータは，Microsoft Excel 2019 を用いて整理，分析を行った．各種の検定には，R 言語 (Ver.4.1.0) を用い [18]，anovakun による分散分析及び多重比較を行った [19]．また刺激装置の稼働の制御は Arduino IDE を用いた．

2.1.2 刺激呈示装置

実験で用いる装置を以下に羅列する．これら装置の外見を図 2.1～2.4 に示す．

- HMD(Meta Quest 2)
- ヘッドホン (プレイステーションゲーミングヘッドセット)
- 触覚刺激呈示装置
- 回答用ワイヤレスマウス

2.1 実験装置



図 2.1 Meta Quest 2



図 2.2 ヘッドホン

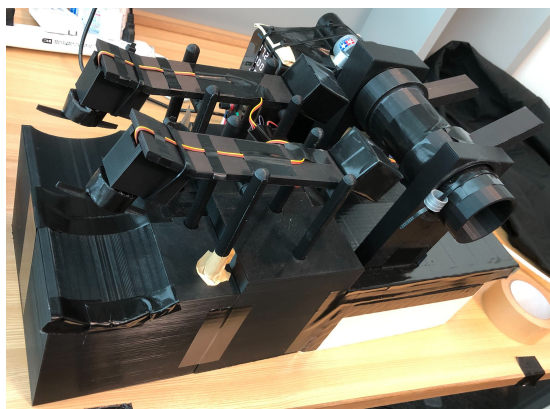


図 2.3 触覚刺激呈示装置



図 2.4 回答用ワイヤレスマウス

2.1 実験装置

HMD は視覚刺激の呈示に用いた。ただし参加者が HMD を装着後、鼻先の辺りに空間が生まれてしまい、一部外界の様子が見えていたため、テープを張ることで HMD を装着時に外界が見えてしまう問題に対応した。ヘッドホンは触覚刺激呈示装置の音が方位判断課題の手がかりとならないようにホワイトノイズを呈示した。触覚刺激呈示装置は触覚刺激の呈示に用いた。回答用ワイヤレスマウスは触覚による方位判断課題の回答をする際に用いた。

実験に使用したコンピュータのスペックは以下である。

- OS : Windows 10 Home
- CPU : Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @ 2.20GHz
- メモリ : 16.0 GB
- システムの種類 : 64 ビット オペレーティング システム、x64 ベース プロセッサ

2.1 実験装置

2.1.3 触覚刺激呈示装置

触覚刺激は自作の実験装置により呈示した。装置の模式図を図 2.5 に示す。装置は Blender で設計した 3D モデルを 3D プリンタで生成し、Arduino によりモータを制御した。モータに接続した板がシーソーのような部分の板を跳ね上げることで反対側の部分が参加者の腕を押し付けるように刺激し、そのすぐ後に重りによって再び反対側に傾くため、皮膚兔錯覚現象が生じるような短時間の触覚刺激の呈示が可能であった。刺激する部分の先端には自由に方位を変更できるようサーボモータを取り付け、その先端に参加者が方位刺激を判断しやすいように薄く伸びたブレード (厚さ 1 mm, 長さ 80 mm) を装着した。装置の外見を図 2.3 に示す。

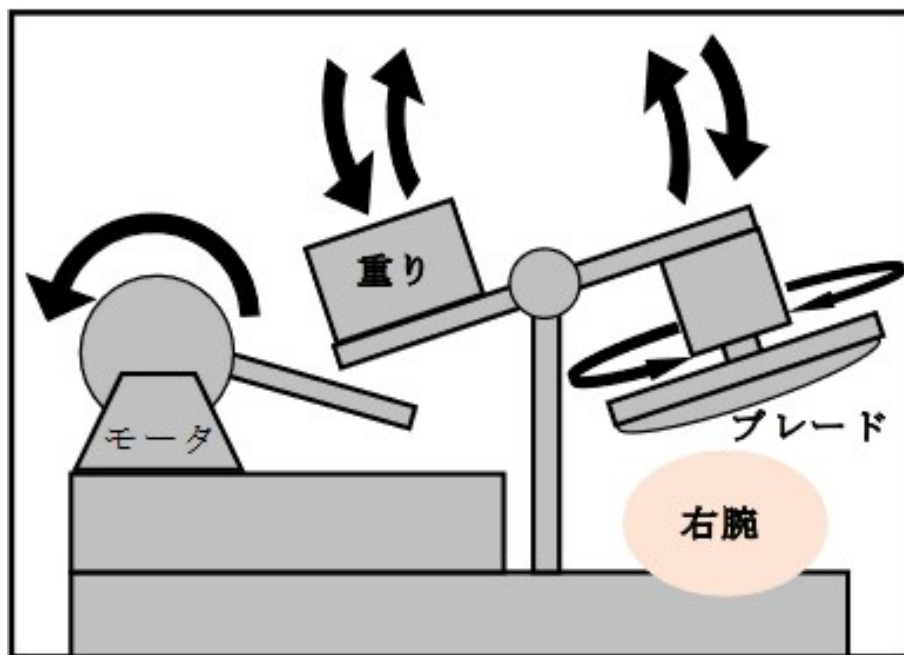


図 2.5 実験装置の模式図

2.2 実験環境

2.2 実験環境

参加者は周りにヘッドマウントディスプレイ (HMD) とヘッドホンを装着した状態で、触覚刺激呈示装置に手のひらが上に向くように右腕を置いた。HMD は視覚刺激を呈示し、ヘッドホンは装置の音が手がかりとならないようにホワイトノイズを呈示した。左手には触覚による方位判断課題の際に回答をするためにマウスを握った。実験のようすを図 2.6, 2.7 に示す。また実験中に参加者が HMD を装着していない時間は、触覚刺激の呈示位置が見えないようにするために、触覚刺激呈示装置に布をかぶせた。

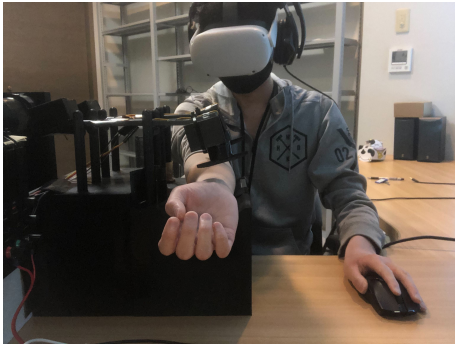


図 2.6 実験のようす-正面



図 2.7 実験のようす-俯瞰

2.3 実験参加者

2.3 実験参加者

参加者は 20 代の 12 名 (平均年齢 22.91, SD = 1.88, 男性 11 名, 女性 1 名) であった。また実験時の視力については, すべての参加者が視覚刺激を正常に認識できる視力を有していた。実験を行うにあたり参加者は実験者より実験の目的及び実験内容を聞き, 安全性に問題ないことを理解した上で実験に参加した。ただし参加者に触覚刺激呈示装置の外見について言及すると, 皮膚兔錯覚現象が生起しづらくなる可能性を考慮し, 1 回目の刺激位置と 2 回目の刺激位置が同じであることについては, 実験が終了後に説明した。また参加者の腕の太さによって触覚刺激の呈示位置や強度が大きく変化しないように, 腕が細い参加者には腕の高さを調整する敷物を触覚刺激呈示装置に敷いた。敷物を敷いた状態と敷いていない状態を図 2.8, 2.9 に示す。



図 2.8 敷物を敷いた状態



図 2.9 敷物を敷いていない状態

2.4 事前準備

2.4 事前準備

本試行を行う前に各実験装置の調整を行った。具体的な調整内容を装置ごとに以下に示す。

2.4.1 HMD(視覚刺激)

参加者は HMD を装着し右腕の服をまくり肌が露出した状態で、触覚刺激呈示装置の上に手のひらを上に向けた状態で腕を置いた。その際、現実の腕がある位置と同じ位置に視覚刺激として呈示するアバタの右腕を移動させた。

2.4.2 ヘッドホン

参加者は HMD を装着した上からヘッドホンを装着し、装置の音が手がかりとならないようにホワイトノイズを呈示した。その際、触覚刺激呈示装置の方位を変更する動作音が聞こえなくなるまで、参加者が方位判断課題に取り組む際にホワイトノイズが集中を妨げる要因とならない程度に少しずつホワイトノイズの音量をあげた。

2.4.3 触覚刺激呈示装置

参加者が HMD を装着した状態 (視覚刺激として白い床のみが見える映像を呈示) で水平・垂直の触覚刺激を呈示し、方位判断課題が正確に判断できるまで練習試行を行った。その際、参加者が正しい方位判断がしづらい場合は、呈示された触覚刺激の方位判断がしやすくなるように触覚刺激の腕に接する位置や強度の調整を行った。触覚刺激呈示装置のシーソーのような部分の支柱を上下させることで調節を行った。

2.5 各種刺激

触覚刺激として触覚刺激呈示装置により参加者の腕を3回刺激した。2回目の方位の条件として1回目と3回目の中間の方位に変化する条件(変化あり条件)と、1,2回目の方位が変化しない条件(変化なし条件)の2種類を設定した。触覚刺激のブレードが参加者の腕に当たっている時間は約100msであった。第1触覚刺激の呈示は図2.10に示すように肘よりも手に近い第1刺激の黒い棒の位置に呈示され、第1刺激から800ms後、同じ位置に第2刺激を呈示し、その100ms後、図2.10の第3刺激の黒い棒の位置(第1刺激よりも肘側に10cm離れた位置)に第3刺激を呈示した。

視覚刺激としてアバタの腕と触覚刺激のブレードに対応する黒い棒を呈示した。3本の黒い棒をアバタの腕の上に異なる3つの位置に呈示する視覚あり条件とアバタの腕のみを呈示する視覚なし条件の2種類を設定し、視覚あり条件では第2視覚刺激の方位が第1視覚刺激と第3視覚刺激の中間の方位を呈示した。また棒の呈示時間は触覚刺激の呈示時間と同じ100msであり、触覚刺激の呈示タイミングと同期して呈示した。

触覚刺激と視覚刺激の方位条件は1回目の刺激の方位(図3の黒い棒の方位を0degとして反時計回りに0deg, 30deg, 60deg, 90deg回転した方位)から時計回りまたは反時計回りに30deg, 60deg, 90deg回転した方位を第3刺激として呈示した。視覚刺激の棒の呈示の有無(視覚あり/視覚なし)2種類と第2触覚刺激の方位の変化の有無(変化あり/変化なし)2種類の計4条件で実験を行った。

2.5 各種刺激

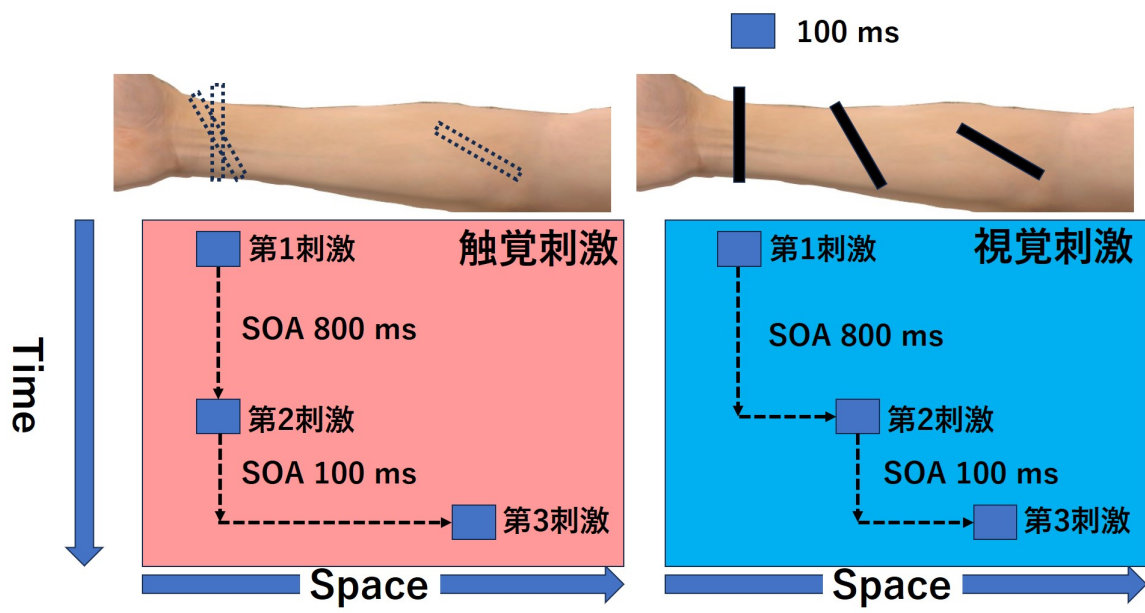


図 2.10 刺激の呈示 (第 1 刺激 0 deg, 第 2 刺激 30 deg, 第 3 刺激 60 deg)

2.6 実験手続き

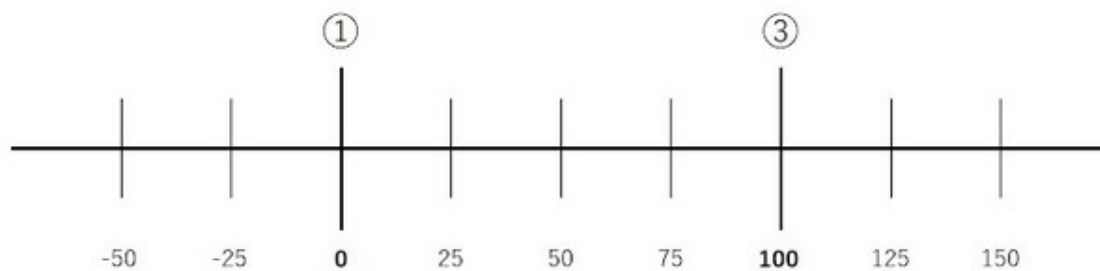
参加者は HMD を装着し、外部が見えない状態で触覚のみから水平、垂直の方位判断課題が正確に判断できるまで練習試行を行った。その際方位判断がしやすくなるように触覚刺激の腕に接する位置の調整を行った。方位判断は触覚のみで判断するように指示し、刺激の回答の手続きについても練習試行を行った。Wang ら [20] の研究では、触覚による方位分別課題を行い、その課題の成績がトレーニングによって向上することが報告されている。この研究では腕への触覚刺激の呈示ではなく、指への触覚刺激の呈示を行っているため、本研究とは触覚刺激の呈示位置が異なるため、本研究においてどの程度トレーニングによる影響が生じるかは分からないが、本試行の前にトレーニングを行うことによる効果が結果に影響を及ぼす可能性がある。そのため本研究では、本試行の前に正常な方位判断ができていないかと回答の方法を確認する練習課題を行うのみとし、その後トレーニングを挟まずに本試行に移行した。

本試行では、第 1, 2, 3 触覚刺激が呈示された方位をそれぞれ判断し、アバタの腕の上に表示される棒を回転させることで回答した。その際の具体的な操作を回答の際の操作の項目にて説明する。実験の流れは、各条件に対応した刺激の呈示、知覚された方位の回答の順で行い、これを 1 試行として、1 条件につき 24 試行を行った。1 条件終了ごとに第 2 触覚刺激が知覚された位置について、第 1 触覚刺激位置を 0 とし、第 3 触覚刺激位置を 100 とした場合の知覚位置を数値で回答した。知覚位置を数値で回答した際に用いた google form の画面を図 2.11 に示す。各条件の順序は参加者間でカウンターバランスを取った。また実験中に参加者が HMD を外す際は、触覚刺激の呈示位置が見えないようにするために、触覚刺激呈示装置に布をかぶせた。

2.6 実験手続き

今回の実験において1回目の触覚刺激の位置を0、3回目の触覚刺激の位置を100 *
として、
2回目に触覚刺激されたと思う位置を数値で入力してください
(目盛りの中から選択する必要はありません。例：11,-78,189)

①：1回目の刺激の位置 ③：3回目の刺激の位置



回答を入力

図 2.11 方位判断時の呈示映像の例

2.6 実験手続き

2.6.1 回答の際の操作

棒を操作する前の初期状態の視界の例を図 2.12 に示す。参加者はワイヤレスマウスを左手で操作することで回答を行った。ワイヤレスマウスのホイールを操作することで、視覚刺激内に呈示されたアバタの手の上に浮かぶ黒い棒を回転させ、自身が知覚した触覚刺激の方位にその棒を合わせ、右クリックによって回答をした。第 1 刺激に対しての触覚のみによる方位判断の回答を肘よりも手に近い黒い棒、第 2 刺激に対して真ん中の黒い棒、第 3 刺激に対して手よりも肘に近い黒い棒をいずれも回転させ回答した。その際左クリックをすることで、回転する方位の刻み (5 deg, 15 deg) を自由に切り替えることができた。これにより、知覚した方位をより詳細に回答する事が可能であった。棒は 360 deg 自由に動かすことができ、0 deg は 180 deg と同じ扱いとした。

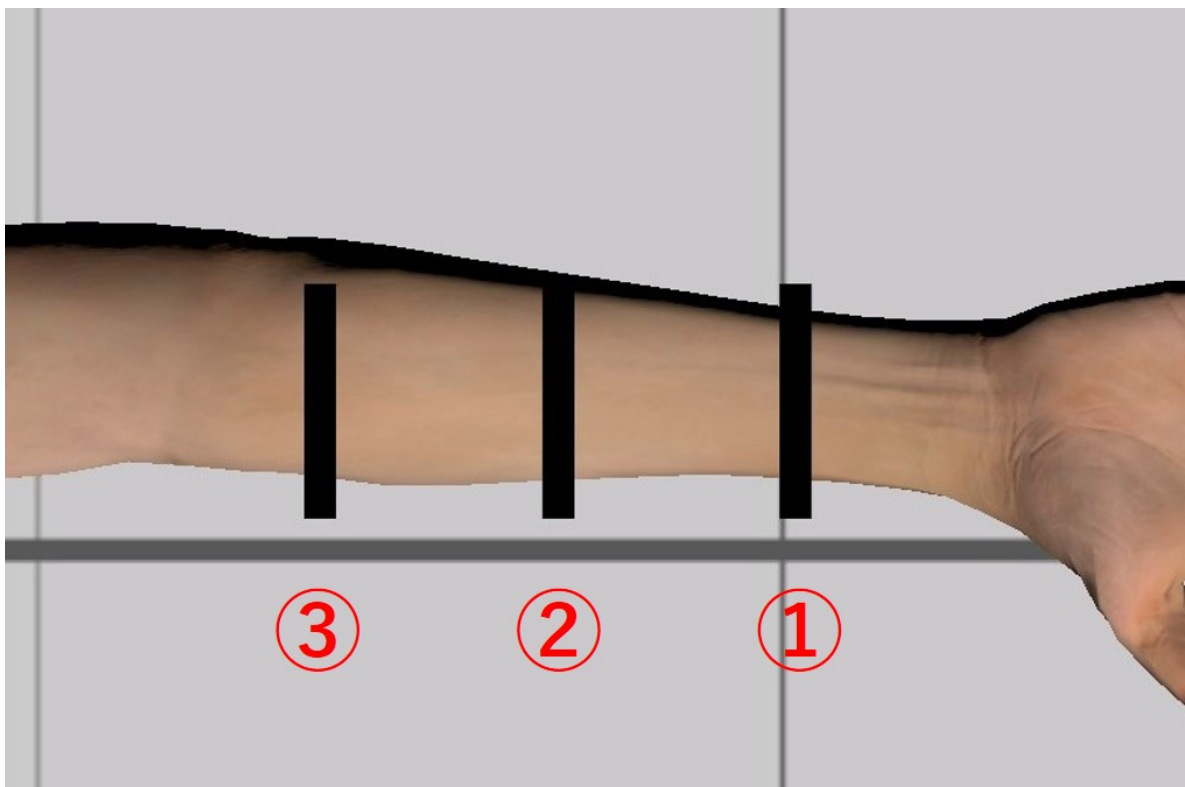


図 2.12 方位判断時の呈示映像の例

第3章

実験結果

3.1 皮膚兔錯覚の生起について

各条件における第2触覚刺激の位置を0-100の数値で回答した結果を図3.1に示す。皮膚兔錯覚現象が生じているかを検討するために条件ごとに0との差について1標本のt検定を行った結果、いずれも0よりも有意に大きかった (Bonferroni 補正, $p < 0.01$)。また各条件間で皮膚兔錯覚現象が生じている位置が異なるかを検討するため、視覚刺激の呈示の有無×第2触覚刺激の方位の変化の有無による対応あり2要因分散分析を行った結果、視覚刺激の呈示の有無の要因の主効果、第2触覚刺激の方位の変化の有無の要因の主効果、及び交互作用は有意ではなかった ($F(1, 11) = 2.0, p = .18, \eta_G^2 = 0.010$; $F(1, 11) = 4.0, p = .07, \eta_G^2 = 0.0064$; $F(1, 11) = 0.2, p = .64, \eta_G^2 = 0.0044$)。

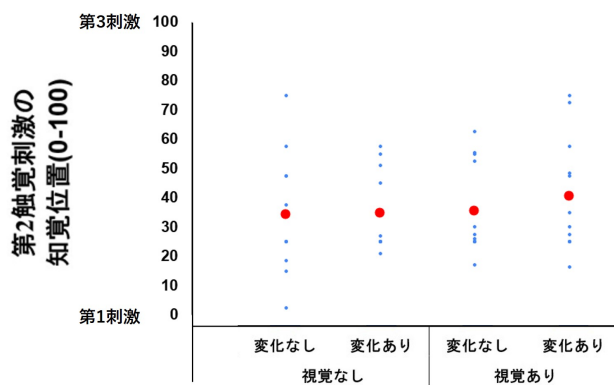


図 3.1 各条件における第1触覚刺激の位置を0、第3触覚刺激の位置を100とした第2触覚刺激の位置を数値で回答した結果 (誤差線は標準誤差)

3.2 皮膚兎錯覚の生起時の方位錯覚について

第 1 と第 2 触覚刺激の知覚方位の差分を知覚された方位差として算出した。第 1 と第 3 触覚刺激の方位差 (30, 60, 90 deg) 条件ごとに図 3.2~3.4 に示す。

図中の点線は、変化あり条件において実際に呈示された第 2 触覚刺激の方位を表したものである。よって 30 deg 条件では 15 deg, 60 deg 条件では 30 deg, 90 deg 条件では 45 deg を表示している。この点線と実際に知覚された方位差を比較すると、変化あり条件でも実際に呈示した方位差よりも小さい結果となった。方位の差が 0 以上に知覚されているかを検討するために、各条件における知覚された方位差について 0 との差について 1 標本の t 検定を行った結果、どの方位条件においても視覚あり条件かつ変化あり条件で 0 よりも有意に大きかった (Bonferroni 補正, $p < 0.01$)。

また 30 deg 条件の視覚あり条件かつ変化なし条件, 60 deg 条件の視覚なし条件かつ変化あり条件, 60 deg 条件の視覚あり条件かつ変化なし条件, これらの条件において 0 よりも有意に大きかった (Bonferroni 補正, $p < 0.01$)。次に方位差条件ごとに、方位変化の有無及び視覚刺激の有無によって方位差の知覚が変化するかを検討するため、第 1 と第 3 触覚刺激の方位差×視覚刺激の呈示の有無×第 2 触覚刺激の方位の変化の有無による、対応あり 3 要因分散分析を行った。その結果、視覚刺激の呈示の有無に有意差が見られた ($F(1, 11) = 13, p = .003, \eta_G^2 = 0.20$)。しかし第 1 と第 3 触覚刺激の方位差の主効果, 第 2 触覚刺激の方位の変化の有無の主効果は認められなかった ($F(2, 22) = 0.9, p = .41, \eta_G^2 = 0.01$; $F(1, 11) = 3.26, p < .009, \eta_G^2 = 0.02$)。また 3 要因いずれも交互作用は認められなかった ($F(2, 22) = 0.3, p = .74, \eta_G^2 = 0.004$; $F(2, 22) = 1.22, p < .31, \eta_G^2 = 0.01$; $F(1, 11) = 3.07, p = .0107, \eta_G^2 = 0.005$; $F(2, 22) = 0.95, p = .39, \eta_G^2 = 0.01$)。

3.2 皮膚変錯覚の生起時の方位錯覚について

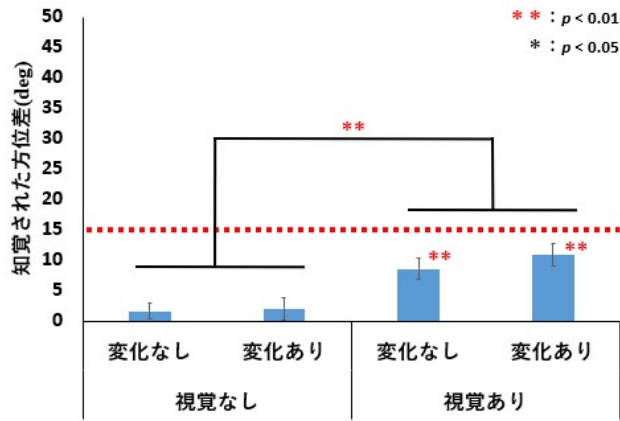


図 3.2 30 deg 条件の知覚された方位差 (誤差線は標準誤差)

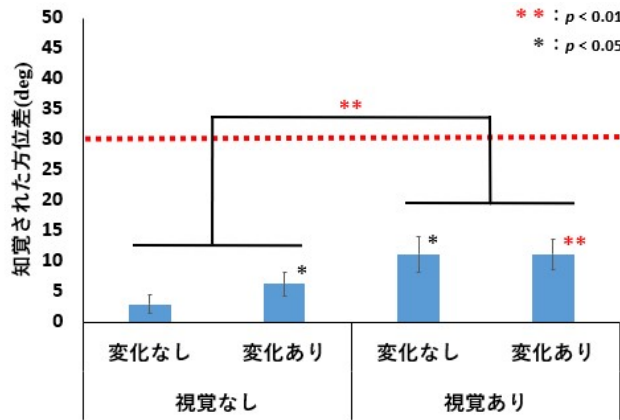


図 3.3 60 deg 条件の知覚された方位差 (誤差線は標準誤差)

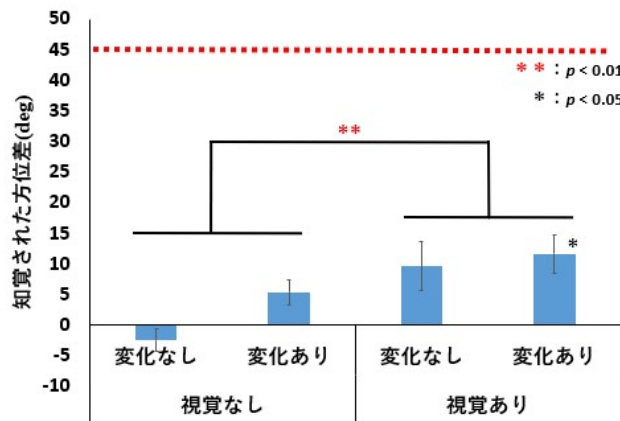


図 3.4 90 deg 条件の知覚された方位差 (誤差線は標準誤差)

3.3 知覚された方位差と皮膚兔錯覚との相関について

3.3 知覚された方位差と皮膚兔錯覚との相関について

第1と第2触覚刺激の知覚方位の差分を知覚された方位差とし、各条件における第2触覚刺激の位置を0-100の数値で回答した結果を皮膚兔錯覚の数値とする。これらの相関係数を算出した結果を図3.5~3.8に示す。図中の青い点線は各条件における傾きを表す。これらは各条件で皮膚兔錯覚が生じた強度に応じて知覚された方位差が変化するかを検討するために作成した。また各条件における知覚された方位差と皮膚兔錯覚の数値の相関係数を図の右上に示す。この結果を見ると、視覚なし条件かつ変化あり条件においてやや相関が見られたが、全体として強い相関は見られなかった。また視覚刺激を呈示することで強い相関が生じる結果も見られなかった。

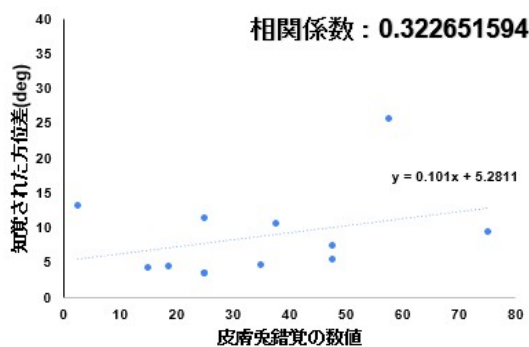


図 3.5 視覚なし条件かつ変化なし条件における相関

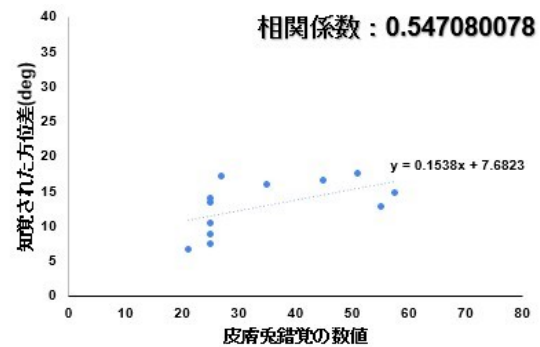


図 3.6 視覚なし条件かつ変化あり条件における相関

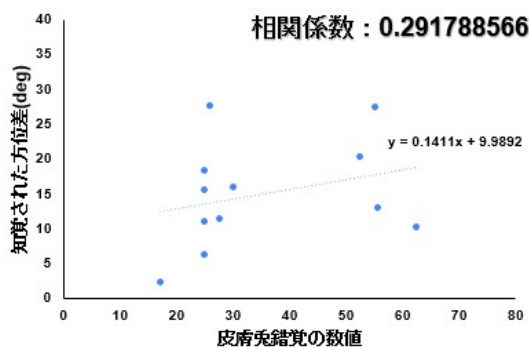


図 3.7 視覚あり条件かつ変化なし条件における相関

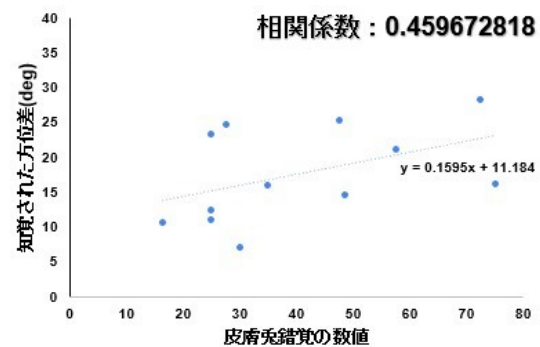


図 3.8 視覚あり条件かつ変化あり条件における相関

第 4 章

考察

第 2 触覚刺激の知覚位置について第 1 と第 3 の触覚刺激の位置を 0-100 の数値として回答した結果から、いずれの条件でもその値が 0 よりも有意に大きく、第 2 刺激の知覚位置が 2 点間の中に知覚される皮膚兎錯覚現象が生じていた。このことから、皮膚兎錯覚は刺激の方位に関わらず生起したといえる。一方で皮膚兎錯覚現象における先行研究では視覚刺激の効果が報告されているが、2 要因分散分析の結果、視覚刺激の呈示の有無に有意差が認められなかったため、本研究では視覚刺激の有無によって皮膚兎錯覚現象がより強く生じる結果は生じなかった。

方位については第 1 触覚刺激と第 3 触覚刺激の方位差 (30, 60, 90 deg) 条件ごとに、各条件における知覚された方位差を検定した結果、視覚なし条件かつ変化なし条件で 0 よりも有意に大きいという結果が見られず、視覚あり条件で一部 0 よりも有意に大きかった。また知覚された方位差に関する 3 要因分散分析の結果より、視覚の有無に有意差が認められたことで視覚による効果が見られた。このことから触覚のみの方位知覚では方位の錯覚が生じない可能性が考えられるが、触覚刺激と同期して視覚刺激を呈示させることで方位の錯覚が生じる可能性が見られた。

第 1 触覚刺激と第 3 触覚刺激の方位差条件と視覚刺激の呈示の有無の条件に交互作用が見られなかった。また第 1 触覚刺激と第 3 触覚刺激の方位差条件間には有意な差が認められなかった。このことから呈示した方位差が大きく異なっているにも関わらず、知覚された方位差に差が認められなかった。またどの方位差条件において変化あり条件の知覚された方位差が実際に呈示した方位差よりも大きく下まわる小さな値であったことを合わせて考えると、触覚による方位知覚は明確ではなく、不正確であったと考えられる。このことから、方位の

錯覚も明確に知覚されたのではないと考えられる。そのため、実際の触覚刺激の方位が正確に知覚される場合でも、皮膚兎錯覚生起時に方位の錯覚が生じるかを検討する必要がある。

知覚された方位差と、皮膚兎錯覚の数値との相関係数を算出した結果から、各条件において強い相関が見られなかったことから、本実験において皮膚兎錯覚の生じた強度に応じて知覚された方位差が大きくなる結果は見られなかった。仮説では皮膚兎錯覚生起時、つまり第 1 触覚刺激と第 3 触覚刺激の中間の位置に第 2 触覚刺激を感じる場合、位置だけではなく刺激する触覚の特性も中間的なものに変化するのではないかと考えた。そのため本研究では触覚の特性として方位を用い、位置の錯覚が生じる強さに比例して第 1 触覚刺激の方位と第 3 触覚刺激の方位の中間の方位に知覚が変化するかを検討したが、仮説を支持する結果は得られなかった。この結果から、皮膚兎錯覚の位置の錯覚が生じる強さに応じて、皮膚兎錯覚生起時の触覚の特性は変化しない可能性が考えられる。

続いて、視覚刺激を呈示することでより強い相関が生じる結果が見られなかった。この結果は、皮膚兎錯覚生起時の位置の錯覚に視覚刺激の影響が見られなかった事が影響していると考えられる。これらの結果は、本実験における視覚刺激はアバタの腕の上に黒い棒を表示するシンプルなものであり、視覚刺激の効果が弱いものであったことが原因として考えられるため、視覚刺激の情報量や呈示タイミングを最適化していくことで、再度検討する必要がある。

4.1 展望

4.1 展望

4.1.1 視触覚刺激の呈示時間の検討

本研究では視覚刺激および触覚刺激の呈示時間は第 1, 第 2, 第 3 刺激, いずれも 100 ms 間の呈示を行った。第 2 視覚刺激の呈示から第 3 視覚刺激の呈示までの時間 (SOA) は 100 ms であったため, 第 2 視覚刺激の呈示後, 呈示された黒い棒が消失すると同時に, 第 3 視覚刺激が呈示されていた。本研究においてこのように呈示したのは, 100 ms という短い呈示時間では触覚刺激はともかく視覚刺激が認識しづらい可能性が考えられたためである。またただの光刺激とは異なり, 方位を持った刺激であったため, 刺激を認識するには呈示時間を長めに呈示する必要があると考えた。加えて皮膚兎錯覚が生じさせるためには第 2 刺激の呈示から第 3 刺激の呈示までの時間が短い時間で呈示する必要があるため, これらを考慮し本研究ではこの間が 0ms で呈示を行った。

このことから第 2 刺激が消失すると同時に第 3 刺激の呈示が行われたため, 視覚的には第 2 視覚刺激の位置から第 3 視覚刺激の位置に黒い棒が移動するようになっていた可能性がある。その場合純粋に皮膚兎錯覚を促進するような視覚刺激ではないため, 黒い棒が運動して知覚された効果などが本研究の結果に現れた可能性が考えられる。そのため今後改めて視覚刺激を呈示する効果を検討する場合, 触覚刺激及び視覚刺激の呈示時間の修正を行う必要がある。今後の研究で方位を示す刺激や刺激の呈示時間をより最適化し明確な方位知覚のもとで本研究で見られた現象が生じるかを検討する必要がある。

4.1 展望

4.1.2 視覚刺激の呈示方法の検討

本研究ではアバタの右腕の上に黒い棒を3つ方位を設定し呈示することを視覚刺激あり条件として設定し呈示していた。これは視覚刺激をシンプルなものにすることで他の要因による影響を排除する必要があると考えたため、黒い棒のみで方位を知覚させる方法を選択した。しかし本研究では皮膚兎錯覚現象における先行研究で見られた視覚刺激の効果によって皮膚兎錯覚がより強く生じる結果が見られなかった。これは視覚刺激として呈示した黒い棒による刺激が知覚しづらいものだった可能性が問題として考えられる。

この問題の改善方法として、視覚刺激の要素を増やすことでより視覚刺激の効果を強めることが挙げられる。具体的な案としては、視覚刺激としてVR上にも現実の触覚刺激呈示装置のようなオブジェクトを配置し、触覚刺激と同期して動かすことで、刺激を受けるタイミングや受ける刺激の内容などを事前に理解した状態で実験することが可能になる。この実験を行うことで視覚刺激の効果が強まることが期待され、先行研究のように皮膚兎錯覚における位置の錯覚が促進される効果や、皮膚兎錯覚生起時の方位の錯覚がより強く生じることが可能性として考えられる。

4.1 展望

4.1.3 不明瞭な知覚を正確にする手法の検討

本研究の考察として、方位知覚そのものが正確に行われたものではない可能性を示唆したが、今後実際の触覚刺激の方位が正確に知覚される場合でも、皮膚兔錯覚生起時に方位の錯覚が生じるかを検討する必要がある。具体的な改善方法として、本研究では練習の効果によって皮膚兔錯覚生起時の方位錯覚が生じなくなる問題が考えられたため、本試行の前に 0 deg, 90 deg の方位判断のみで調整を行ったが、この調整の際に様々な方位を呈示し、それぞれが正しく知覚できるように練習試行を行うことでより正確な方位判断ができると考えられる。

4.1.4 変化あり条件における知覚された方位差が実際に呈示した第 2 触覚刺激の方位よりも小さい値であったことについての検討

本研究において視覚刺激・触覚刺激ともに第 2 刺激から第 3 刺激の呈示までの間が 100 ms と短い時間で呈示された。この短時間で呈示された影響で第 2 刺激の知覚が第 3 刺激の知覚によってマスキングされた可能性が考えられる。この問題は視触覚刺激の呈示時間の検討で記載した刺激の呈示時間の修正を行うことで検討する必要がある。

4.2 本研究の発展について

VR 技術は上述した先行研究以外にも様々な研究がなされているが、本研究のテーマにもあるように未だ触覚へのアプローチはあまり進んでいない状態である。これは触覚刺激が現在 HMD で用いられている視覚刺激や聴覚刺激と比較すると細かな操作が難しく、触覚刺激の複雑な表現が困難であることや、触覚刺激を呈示したい位置ごとに触覚呈示装置を装着する必要があることなどが原因であると考える。本研究では視覚刺激を呈示した条件という限定的な条件ではあるが、皮膚兔錯覚現象が生起した際、触覚刺激を呈示していない位置に感じた触覚による知覚が変化する可能性が見られた。今回は視触覚統合による知覚の変化だったが、これは視触覚統合に限った話ではなく、多くの示唆に富んだ発見であると考えており、このような知覚の変化が他の感覚モダリティによる統合過程においても生じる可能性がある。そのためこの研究を続け、発展させていくことで単純な触覚刺激であっても、他の感覚モダリティによる刺激により、細かな違いや呈示位置を変化させることができる可能性があると考える。

第5章

まとめ

本研究では皮膚兎錯覚現象の生起時に刺激の方位も変化して知覚されるか、また視覚刺激によってその知覚が変化するかを検討した。その結果、限定的ではあるが、実際には方位差のない刺激に対して方位差を知覚すると考えられる結果が得られた。VR上に実際に呈示していない触覚の情報を知覚させる試みとして、皮膚兎錯覚現象を応用して検討を行い、位置や方位が実際と異なる知覚が生じたことを示唆する結果が得られた。ただし、本実験では方位の知覚が不正確であったため、方位を示す刺激や刺激の呈示時間をより最適化し明確な方位知覚のもとで本研究で見られた現象が生じるかを検討する必要がある。

謝辞

本研究および論文作成にあたり，多くのご支援と熱心なご指導を賜りました繁榊博昭先生に深く感謝いたします。また，副査を務めて頂いた門田先生，妻鳥先生に感謝いたします。実験の際に快く参加者を引き受けて頂いた繁榊研究室の皆様，他研究室の皆様にも心より感謝いたします。加えて触覚刺激呈示装置の改良にご尽力頂いたロボット部の皆様にも感謝いたします。ありがとうございました。

参考文献

- [1] BAE 編集部, “「3D 触力覚技術」が可能にする次世代 VR の世界とは”, 株式会社ミライセンス 代表取締役 香田 夏雄, 2019.01.31,
URL <https://bae.dentsutec.co.jp/articles/miraisens/>.
- [2] HEROX, 富山英三郎著, “電気刺激で「触感」を疑似体験!最新のゲームコントローラーが熱い”, H2L 株式会社 代表 岩崎 健一郎, 2020.06.30,
URL <http://hero-x.jp/article/9313/>.
- [3] 日経クロストrend, “VR ゲームの攻撃を実際に体感! bHaptics の触覚ベスト「TactSuit」【TGS2023】”, 日経クロストrend ライター 島 徹, 2023.09.23 日,
URL <https://xtrend.nikkei.com/atcl/contents/18/00893/00080/>.
- [4] F. A. Geldard and C. E. Sherrick: “The cutaneous “rabbit”: a perceptual illusion”, *Science*, 178, pp.178-179, (1972)
- [5] C. C. Berger and M. Gonzalez-Franco: “Expanding the Sense of Touch Outside the Body”, *Proceedings of the 15th ACM Symposium on Applied Perception*, 11, pp.1-9, 2018.
- [6] J. P. Warren, M. Santello, S. I. Helms Tillery: “Electrotactile stimuli delivered across Fingertips inducing the Cutaneous Rabbit Effect”, *Experimental Brain Research*, 206, pp.419–426, 2010.
- [7] T. Asai and N. Kanayama: “”Cutaneous rabbit” hops toward a light : Unimodal and cross-modal causality on the skin”, *Frontiers in Psychology*, 3, pp.1–12, 2012.
- [8] R. M. Peters, P. Staibano, D. Goldreich: “Tactile orientation perception : an ideal observer analysis of human psychophysical performance in relation to macaque area 3b receptive fields”, *J Neurophysiol*, 114, pp.3076–3096, 2015.

参考文献

- [9] 矢野 澄男：“生理的・心理的側面からみた感覚-視覚の構造と仕組み-”，特集，映像情報メディア学会誌，1，pp.1-1，2003.
- [10] 内川 恵二，篠森 敬三：“視覚 I -視覚系の構造と初期機能-”，朝倉書店，2007.
- [11] 内川 恵二，岡嶋 克典：“感覚・知覚・実験法”，朝倉書店，2008.
- [12] 赤松 幹之，石川 正俊：“形状知覚における視-触覚の感覚統合過程の解析:感覚統合と能動性の関係”，バイオメカニズム，10，pp.23-32，1990.
- [13] A. L. Kaas, H I. V. Mier, J. Lataster, M. Fingal, A. T. Sack：“The effect of visuo-haptic congruency on haptic spatial matching”，Experimental Brain Research，183，pp.75-85，2007.
- [14] 西牧 侑哉，郷田 直一，蒲池 みゆき：“VR 環境下での風の強さ知覚における視触覚統合”，TVRSJ Vol.26, 1, pp.14-21, 2021.
- [15] I/O 編集部：“「VR」「AR」技術最前線”，工学社，2015.
- [16] 東京大学バーチャルリアリティ教育センター：“トコトンやさしい VR の本”，刊工業新聞社，2019.
- [17] 舘，佐藤 誠，廣瀬 通考：“バーチャルリアリティ学”，コロナ社，2010.
- [18] R Core Team (2021)：“R: A language and environment for statistical computing”，R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
URL <https://www.R-project.org/>.
- [19] Ryuta Iseki：“Anovakun version4.8.6.2021”，
URL <http://riseki.php.xdomain.jp/index.php?ANOVA%E5%90%9B>.
- [20] Wu Wang, Jiajia Yang, Yinghua Yu, Qiong Wu, Jiabin Yu, Satoshi Takahashi, Yoshimichi Ejima, Jinglong Wu：“Tactile angle discriminability improvement: roles of training time intervals and different types of training tasks”，J Neurophysiol, 122, pp.1918–1927, 2019.

付録 A

触覚刺激呈示装置の外見



図 A.1 側面

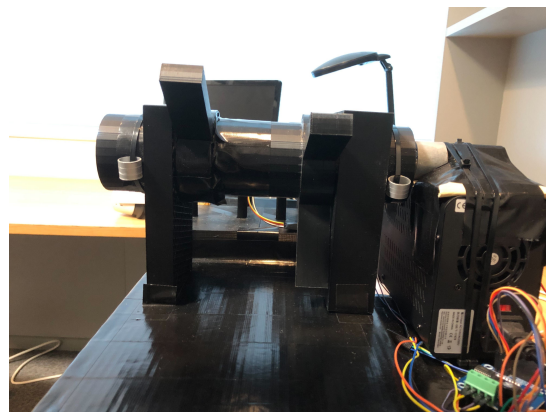


図 A.2 背面

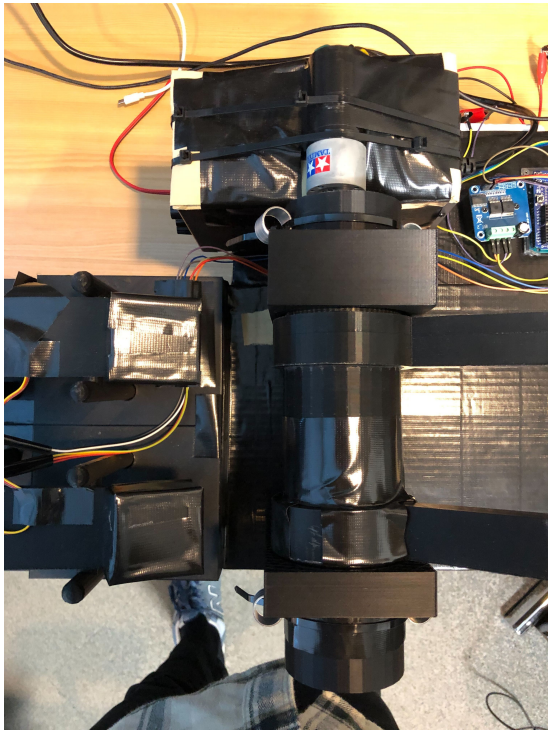


图 A.3 俯瞰

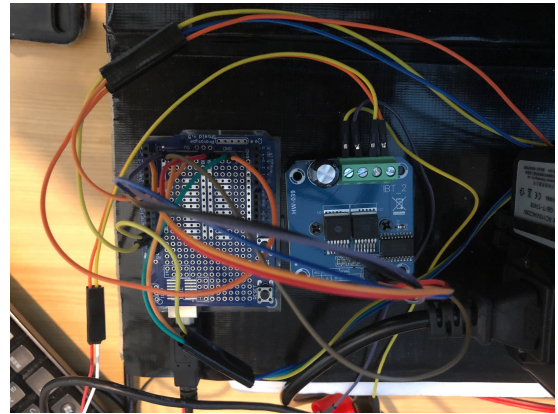


图 A.4 制御装置

付録 B

触覚刺激呈示装置のブレードの傾き

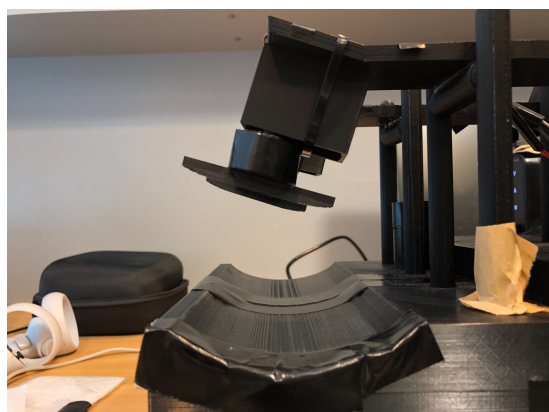


図 B.1 触覚刺激呈示前



図 B.2 触覚刺激呈示時

付録 C

ブレードの外見



図 C.1 ブレード側面



図 C.2 ブレード (下からの見え方)