

令和7年度
修士学位論文

多感覚の刺激呈示による伸長錯覚を
発生させる手法の検討

Examination of Methods for Inducing the Elongation
Illusion Using Multisensory Stimuli

佐藤希来

指導教員 繁榎博昭

2026年2月27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

多感覚の刺激呈示による伸長錯覚を発生させる手法の検討

佐藤希来

本研究では、バーチャルリアリティ（VR）環境で身体の伸長錯覚を発生させる手法について検討した。実験 1 では指を伸長させたアバタを、実験 2 では手全体を前方にずらしたアバタを用い、身体の視覚刺激の呈示方法の違いおよび物体接触時の視触覚の整合性が伸長錯覚に与える影響を検討した。実験の結果、どちらのアバタも伸長錯覚は生じず、身体の視覚刺激の呈示方法の違いや視触覚の整合/不整合の効果も見られなかった。実験 3 では指の引っ張りによる力覚刺激の影響を検討した。実験の結果、身体位置の回答時にアバタの視覚フィードバックがない条件において引っ張りの効果が見られ、引っ張りの方向に指の長さが長く知覚された。これらの結果より、伸長錯覚による指の位置知覚の変化においては、体性感覚に与える刺激の特性が強く影響することが示された。

キーワード バーチャルリアリティ（VR）、身体拡張、伸長錯覚、多感覚統合、体性感覚

Abstract

Examination of Methods for Inducing the Elongation Illusion Using Multisensory Stimuli

Kira Sato

This study examined methods for inducing body elongation illusion in Virtual Reality (VR) environments. Experiment 1 used an avatar with an elongated finger, while Experiment 2 used an avatar with the entire hand shifted forward while maintaining its shape, to investigate the effects of differences in visual presentation methods and visuotactile congruency during object contact on the elongation illusion. Results showed that the elongation illusion did not occur with either avatar, and no effects were observed for differences in visual presentation methods or visuotactile congruency. Experiment 3 examined the effect of haptic force feedback from finger pulling. Results revealed that a pulling effect was observed when visual feedback of the avatar was absent during body position judgments, with finger length perceived as longer in the pulling direction. These findings indicate that the characteristics of stimulation applied to somatosensory perception strongly influence changes in finger position perception induced by the elongation illusion.

key words Virtual Reality, Body Augmentation, Elongation Illusion, Multisensory integration, Somatosensory Perception

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	目的	2
1.3	身体拡張	3
1.4	伸長錯覚	5
1.5	多感覚統合	7
1.6	体性感覚	8
第 2 章	実験 (全体)	9
2.1	実験装置	9
2.1.1	使用ソフトウェア	9
2.1.2	刺激呈示装置	9
第 3 章	実験 1	12
3.1	目的	12
3.2	実験参加者	12
3.3	実験装置	13
3.3.1	触覚刺激呈示装置	13
3.4	実験環境	15
3.5	呈示刺激	15
3.5.1	視覚刺激	15
3.5.2	触覚刺激	16
3.6	実験条件	16
3.7	実験手続き	19

目次

3.8	質問紙	20
3.9	結果	21
3.10	質問紙の分析結果	22
3.11	考察	23
第 4 章	実験 2	25
4.1	目的	25
4.2	実験参加者	25
4.3	実験手続き	25
4.3.1	視覚刺激	26
4.3.2	質問紙	26
4.4	結果	27
4.5	質問紙の分析結果	28
4.6	考察	31
第 5 章	実験 3	33
5.1	目的	33
5.2	実験参加者	33
5.3	実験装置	34
5.4	実験環境	35
5.5	呈示刺激	36
5.5.1	視覚刺激	36
5.6	実験条件	37
5.7	実験手続き	38
5.8	質問紙	40
5.9	結果	41
5.10	質問紙の分析結果	42

目次

5.11	考察	45
第 6 章	まとめ	47
	謝辞	48
	参考文献	49

目次

1.1	VR 空間で足先の動きと連動する余剰肢ロボットアーム (Arai et.al., 2022 より引用)	3
1.2	えくす手 (小川ら, 2016 より引用)	4
1.3	ユーフラテス 伸びる腕 ([11] より引用)	5
1.4	参加者が指の近くの空間を引っ張ることで, 指が伸長したように見える様子 (石原ら, 2024 より引用)	6
2.1	VIVE Pro	10
2.2	VIVE Controller	10
2.3	VIVE Tracker	10
3.1	触覚刺激呈示装置	13
3.2	ターゲット	13
3.3	ターゲットの位置を 変更するためのスライドレールと ターゲットの位置	14
3.4	ガイドレールとストッパー	14
3.5	実験 1 環境	15
3.6	VR 上で表示される右手のアバタ	16
3.7	VR 上で表示されるターゲット	16
3.8	整合条件の模式図	17
3.9	不整合条件の模式図	18
3.10	参加者の指の長さが 6 cm の場合に使用したアバタ (左: 不整合条件, 右: 整合条件)	18
3.11	位置回答時に使用する板	19
3.12	ターゲットの色が変わっている様子	20

図目次

3.13	実験 1: 知覚された平均値	21
3.14	実験 1:Q1 の結果	23
3.15	実験 1:Q2 の結果	23
3.16	実験 1:Q3 の結果	23
3.17	実験 1:Q4 の結果	23
4.1	実験 2 で使用したアバタ	26
4.2	実験 2: 知覚された平均値	28
4.3	実験 2:Q1 の結果	29
4.4	実験 2:Q2 の結果	29
4.5	実験 2:Q3 の結果	29
4.6	実験 2:Q4 の結果	29
4.7	実験 2:Q5 の結果	31
4.8	実験 2:Q6 の結果	31
4.9	実験 2:Q7 の結果	31
4.10	実験 2:Q8 の結果	31
5.1	引っ張りによる力覚刺激呈示前の装置模式図	34
5.2	引っ張りによる力覚刺激呈示後の装置模式図	35
5.3	右手人差し指に巻いたテーピング	35
5.4	実験 3 環境	35
5.5	視覚刺激	36
5.6	伸長前のアバタ	37
5.7	伸長後のアバタ	37
5.8	アバタ呈示あり条件	38
5.9	アバタ呈示なし条件	38
5.10	VR 上で表示されていた赤い箱と青い円柱	39

図目次

5.11 リーチング課題	39
5.12 人差し指根本の位置回答時に使用する板	40
5.13 実験 3: 知覚された平均値	42
5.14 実験 3:Q1 の結果	44
5.15 実験 3:Q2 の結果	44
5.16 実験 3:Q3 の結果	44
5.17 実験 3:Q4 の結果	44
5.18 実験 3:Q5 の結果	44
5.19 実験 3:Q6 の結果	44

表目次

3.1 実験 1 質問紙項目	20
4.1 実験 2 質問紙項目	27
5.1 実験 3 質問紙項目	40

第 1 章

はじめに

1.1 背景

バーチャルリアリティ（VR）技術の発展により、アバタを自己身体として体験することが可能になっている。また、VR 空間ではアバタの見た目を自由に変更でき、現実では不可能な多様な体験を提供できる。このようなアバタの変更により、人の心理状態も変化する。例えば、自己の身体と異なるアバタや体験でも、自分の身体のように感じる身体所有感や、自分で動かしていると感じる運動主体感が発生することが報告されている [1]。

こういった現実では不可能な体験として、人間の身体部位を拡張する身体拡張が挙げられる。その中でも、既存の身体部位が伸びたように感じる錯覚のことを伸長錯覚という。

伸長錯覚に関する先行研究では、主に腕の伸長が検討されている。例えば、筋肉の伸縮感覚と視覚情報の組み合わせにより、腕が伸長する感覚が得られることが報告されている [2][3]。また、視覚刺激と合わせて力覚刺激を呈示することで腕が伸長する感覚が得られることも報告されている [4]。

さらに、近年は指を対象とした研究も行われている。例えば、能動的なつまみ動作による指の伸縮感覚の誘発 [5] や、体験者の能動的な指の伸縮操作による指の伸縮感覚の強度への影響が検討されている [6]。

しかしながら、これらの先行研究においても、伸長錯覚を発生させるために必要な刺激の特性や手続きについてはまだ明らかになっていない点が多い。また、普段から人や物に触れるなど、触覚刺激を受ける指や手といった部位の伸長錯覚において、どのような刺激が有効であるのかも明らかになっていない。

1.2 目的

そこで本研究では、伸長錯覚を効果的に発生させる刺激の特性、アバタの呈示方法、身体部位についての検討を統合し、伸長錯覚を発生させる手法を多角的に検討した。

実験 1 では、視触覚刺激の整合性が指の伸長錯覚にどのような影響を与えるかを検討した。今回は、先行研究で検討されておらず、伸長したアバタでもものに触れることで、視覚刺激の信頼性が向上するのではないかと考え、ターゲットへの接触による触覚刺激を用いた。

実験 2 では視覚刺激の呈示方法の違い（アバタの指の伸長／手アバタの位置ずれ）が伸長錯覚にどのような影響を与えるかを検討した。実験 1 では、右手人差し指が伸びたアバタを視覚刺激として呈示したが、実験 2 ではアバタの形状を変えず、アバタ全体を前にずらす手法を用いて、実験 1 の結果と比較した。

実験 3 では、腕の伸長錯覚の誘発に有効であった引っ張りによる力覚刺激が [4]、指の伸長錯覚に与える影響を検討した。また、身体位置を判断する際にアバタの視覚フィードバックが伸長錯覚に与える影響を検討するため、身体位置回答時にアバタを呈示する条件、アバタを呈示しない条件を設定した。

1.3 身体拡張

身体拡張とは、人間の身体に新たな部位を追加したり、身体部位を増強、伸ばすなどして拡張する技術のことである。小説や漫画、ゲーム、アニメなどの創作物では、人間のような見た目でありながらも、腕が2本よりも多いキャラクターや、腕や脚、指などを自由自在に伸縮させられるキャラクターなどがある。現在、アバタを自由に変更可能なVR上で身体拡張に関する研究が数多く行われており、現実世界でも身体拡張を実現するシステムの開発、提案が行われている。

例えば、余剰肢を増やすためのシステム提案として、佐々木らが開発した「MetaLimbs」がある。リュックなどのように背負うことで、2本のロボットアームが背中から生えているような見た目になる。足の何箇所かにセンサーを取り付けることで、足を自由に移動、回転させたり、物を掴むことが可能になる [7]。

身体に追加した部位を身体化させる研究も行われている。荒井らの研究では、図 1.1 の VR 空間で足先の動きと連動する余剰肢ロボットアームを開発し、余剰肢を用いてボールを触るという課題を行った。その結果、余剰肢ロボットアームに身体所有感、行為主体感、腕が増えたと感じる余剰肢感覚が生じることが示された [8]。

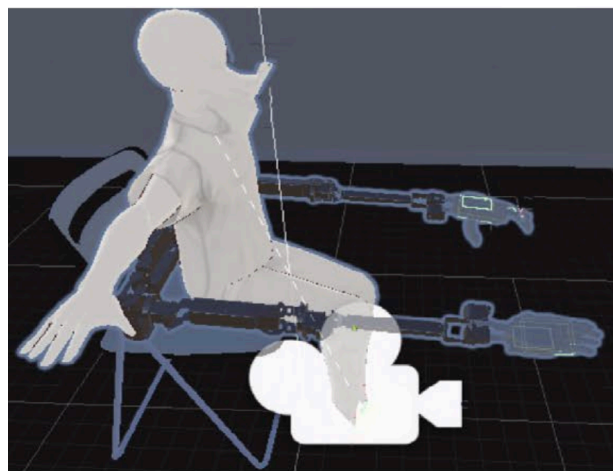


図 1.1: VR 空間で足先の動きと連動する余剰肢ロボットアーム
(Arai et.al., 2022 より引用)

また、既存の身体部位を拡張する方法でもさまざまな研究が行われている。例えば、小川

1.3 身体拡張

らは指を伸長させ、角度を変形させたアバタを見ながらピアノを弾くことで、通常であれば届かない範囲のキーに指が届くようにする、図 1.2 の「えくす手」という作品を提案した。指が伸びたアバタを視覚刺激として見せるのみでなく、ピアノの音や、テーブル、電子キーボードを用いた触覚刺激など、いくつかの刺激の組み合わせにより、体験者に身体所有感や行為主体感が発生する可能性を示した [9]。

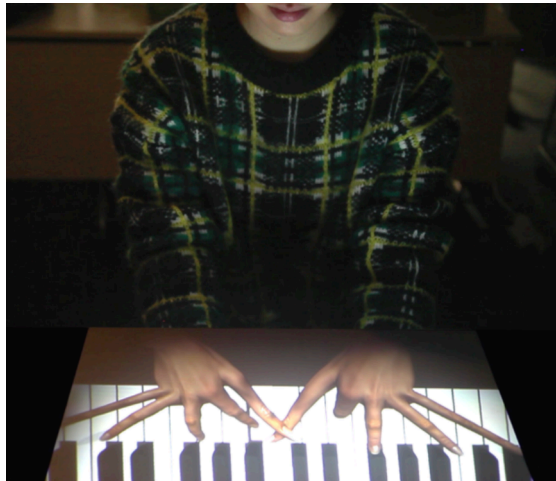


図 1.2: えくす手 (小川ら, 2016 より引用)

1.4 伸長錯覚

1.4 伸長錯覚

伸長錯覚とは、身体部位が伸長したように感じられる錯覚のことである。現実世界では、元の身体部位を隠して伸長したアバターを見せるなどの手法で伸長錯覚を発生させる作品が提案されている。

現実世界で腕の伸長錯覚を発生させる作品として、図 1.3 のユーフラテスの「伸びる腕」という作品がある。穴に手を入れて机の上に置かれた目標物に手を伸ばすと、机に腕が伸びていく様子が投影される。腕が目標物に到達すると、手には実際に触れたような感覚が得られることで、伸長錯覚が発生する可能性を示した [10][11]。

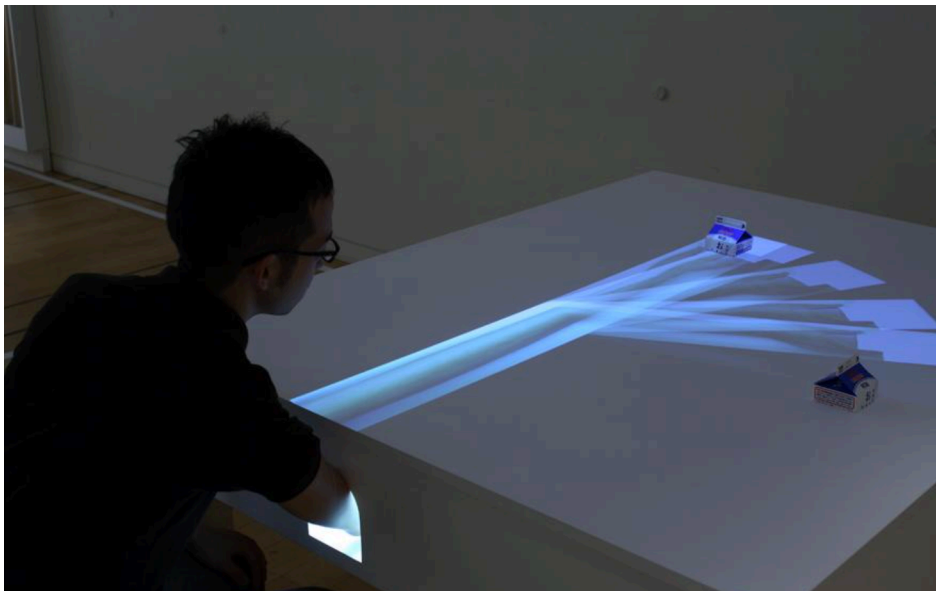


図 1.3: ユーフラテス 伸びる腕 ([11] より引用)

また、指の伸長錯覚を発生させる作品としては、図 1.2 の「えくす手」などもある [9]。

VR 上でも伸長錯覚に関する研究が行われている。与える刺激について検討した先行研究では、筋肉の伸縮感覚と視覚刺激の組み合わせで腕の伸長錯覚が得られること [2][3] や、視覚刺激と合わせて力覚刺激を呈示することで腕の伸長錯覚が発生すること [4] が報告されている。

また、視覚刺激の見た目について検討した先行研究では、VR 上で呈示する視覚刺激をアバターではなく、実験参加者の腕の画像を引き伸ばしたものに変更することで、身体所有感が

1.4 伸長錯覚

強くなるため、伸長錯覚が強固になると報告されている [4].

伸長の実装方法について検討した研究もある。中川らの研究では、手の動きに対し等倍に腕が伸長する等倍条件、手の速度に応じてアバタの伸長度合いが変わる加速条件、視線と指の方向が合っていれば手を動かすとアバタの腕が瞬時に伸びる瞬時条件を比較した。その結果、身体所有感や課題成績がそれぞれ異なり、目的に合わせて伸長方法を選択する必要があることが示された [12].

さらに、伸長させる長さについて検討した先行研究では、参加者の利き手の腕をそれぞれ2倍、3倍、4倍に伸長させ、何倍の長さまでであれば身体所有感が発生するか検討した。その結果、3倍の長さまでであれば、伸長した腕に身体所有感が生じ、4倍の長さでは身体所有感が弱まることが報告されている [13].

指を対象とした研究では、図 1.4 のように、参加者自身が指の近くの空間を引っ張る動作を行うことで、視覚刺激のみで受動的に呈示される伸長錯覚よりも強固になることが報告されている [5]。また、参加者の能動的な意思に着目し、つまみ動作やジェスチャー、ボタン入力により指を伸長させた研究では、強度の差が見られず、視覚刺激と共に触覚刺激を呈示することで最も錯覚が強固になることが報告されている [6].

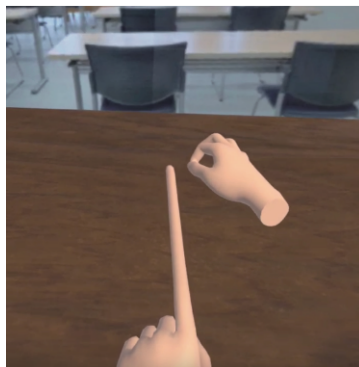


図 1.4: 参加者が指の近くの空間を引っ張ることで、指が伸長したように見える様子
(石原ら, 2024 より引用)

1.5 多感覚統合

視覚，聴覚，触覚，味覚，嗅覚など，五感やそれ以外の感覚のことを感覚モダリティという [14]。多感覚統合とは，異なる感覚モダリティに入力された刺激を一つの事象として知覚・認識する処理のことである [15]。人間は日常的に五感から多くの刺激を受けるが，そのほとんどが異なる感覚からの刺激が組み合わさったものである。例えば，複数人の人がいる中でも，ある人の口の動き（視覚刺激）と声（聴覚刺激）が組み合わさることで，誰が話しているかを特定できる。また，スマートフォンでボタンを押したときの画面の変化（視覚刺激）と，振動（触覚刺激）が組み合わさることで，ボタンを押したという感覚が得られる。このような多感覚統合により，我々の身体認識は容易に変化する。

多感覚統合により身体認識が変化する例として，ラバーハンド錯覚が挙げられる。ゴム製のラバーハンドを体験者の手と並べて机に置き，間に仕切りを立てる。体験者にはラバーハンドのみが見えるようにして，体験者の手とラバーハンドに同時に刺激すると，ラバーハンドに身体所有感が生じることが知られている [16]。

また，多感覚統合においては，異なる感覚からの入力加重平均され知覚されることが報告されている (cf. [17])。例えば，視覚刺激が不明瞭な場合は触覚刺激の重みが，触覚刺激が不明瞭な場合は視覚刺激の重みが大きくなる。

1.6 体性感覚

体性感覚とは、皮膚にある感覚受容器から受け取る情報（皮膚感覚）と、筋肉や関節にかかる力の感覚（深部感覚）が合わさった感覚のことである [18]. VR 空間では、HMD を通じて視覚刺激や聴覚刺激を呈示することは容易であるが、体性感覚を HMD のみで呈示することは難しい。そのため、皮膚感覚や深部感覚に刺激を与え、体性感覚フィードバックを呈示する手法が取られている。

深部感覚を呈示するコントローラとして、H2L 株式会社が開発した「UnlimitedHand」がある。UnlimitedHand には、腕の位置を取得するモーションセンサと指の動きを取得する筋変位センサアレイが内蔵されており、現実空間の手を VR 空間に取り入れることを可能にしている。加えて、配置した電極から筋肉に電気刺激を与えることで指や腕に体性感覚を呈示する [19].

また、伸長錯覚に関する研究でも、体性感覚を刺激する装置が用いられている。Yamashita らの研究では、前腕の皮膚を物理的に引っ張る装置と、肘から手首にかけて質量を移動させ、皮膚感覚と深部感覚を両方刺激することで、伸長錯覚を発生させている [20].

第 2 章

実験（全体）

以下に記載した項目は全ての実験で共通である。

2.1 実験装置

2.1.1 使用ソフトウェア

VR 環境の構築および視覚刺激の作成には Unity (Ver.2022.3.5f1) を使用した。測定データは CSV ファイルに格納し、Microsoft Excel for mac (Ver.16.97) を用いて整理した。各種検定には、R 言語 (Ver.4.5.0) [22] を用い、分散分析には anovakun を用いた [23]。

2.1.2 刺激呈示装置

VR 空間の呈示には、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) の VIVE Pro (HTC 社) (図 2.1) を使用した。また、実験中の参加者の位置回答の入力には VIVE Controller (HTC 社) (図 2.2) を使用した。手の位置のトラッキングには VIVE Tracker (HTC 社) (図 2.3) を使用した。

2.1 実験装置



図 2.1: VIVE Pro



図 2.2: VIVE Controller

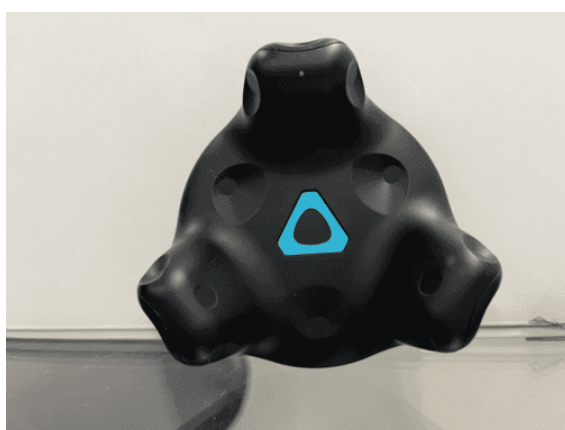


図 2.3: VIVE Tracker

2.1 実験装置

また、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 11 Pro
- CPU : Intel(R) Core(TM) i5-13600KF CPU @ 3.50GHz
- メモリ : 16.0GB
- 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

第3章

実験 1

3.1 目的

伸長錯覚は通常、視覚刺激と他の刺激の多感覚統合により発生する。ラバーハンド錯覚など、身体に関連する錯覚においては、多感覚の刺激が整合性を持ち呈示されることが重要であるが [16][21]、伸長錯覚においても、多感覚刺激の整合性が必要であるのかどうかは明らかになっていない。

整合性を持ち呈示されることが重要であれば、視触覚刺激が不整合である場合、伸長錯覚が生じないと考えられる。一方で、多感覚統合では一般的に異なる感覚からの入力加重平均され知覚されるということが知られており [17]、視覚刺激による身体情報が長ければ、視触覚刺激が不整合であっても伸長錯覚が生じ、視覚刺激と触覚刺激の入力が加重平均され、より伸長して知覚される可能性がある。そこで実験 1 では、視覚刺激と触覚刺激が整合である条件と不整合である条件を設定し、視触覚刺激の整合性が指の伸長錯覚に与える影響を検討した。

3.2 実験参加者

実験参加者は正常な視力 (矯正を含む) を有する右利きの大学生男女 36 名 (平均年齢 21.36, SD = 1.33, 男性 23 名, 女性 13 名) であった。参加者には実験開始前に実験内容と実験手続きについて説明を行った。

3.3 実験装置

3.3 実験装置

3.3.1 触覚刺激呈示装置

触覚刺激の呈示には自作の装置を用いた。装置を図 3.1 に示す。奥にあるのが図 3.2 のターゲット、手前にあるのが滑車付きの台である。滑車付きの台はターゲットへの触れ方を統一することと、参加者の疲労軽減のため用いた。滑車付きの台の上に自身の手を置き、台を前後に動かすことで、ターゲットへのリーチング課題を行った。参加者がターゲットの位置を記憶することを防ぐため、図 3.3 のスライドレールを用いてターゲットの位置を 3 箇所決め、試行ごとにターゲットの位置を変更した。また図 3.4 のように、滑車付きの台が横にずれることや方向が変わることを防ぐためのガイドレールと、滑車付きの台の移動距離を同一にするためのストッパーを机の端に設置した。ターゲットとスライドレール、ガイドレールは 3D プリンタで作成した。



図 3.1: 触覚刺激呈示装置

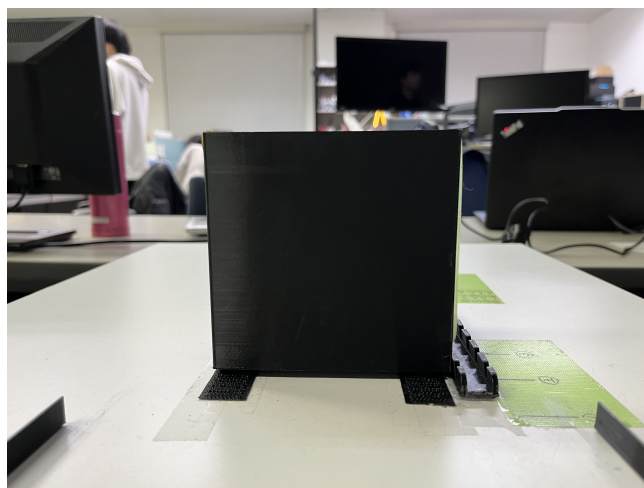


図 3.2: ターゲット

3.3 実験装置



図 3.3: ターゲットの位置を
変更するためのスライドレールと
ターゲットの位置



図 3.4: ガイドレールとストッパー

3.4 実験環境

3.4 実験環境

参加者は HMD を装着した状態で椅子に座り、左手にコントローラを持ち、右手の甲の中央部にバンドを用いて VIVE Tracker を固定して、滑車がついた台の上に置いた。また、VIVE Base Station 2.0 を実験を行う空間内の天井に 3 台、机の横に 1 台設置した。実験環境を図 3.5 に示す。



図 3.5: 実験 1 環境

3.5 呈示刺激

3.5.1 視覚刺激

視覚刺激として、VR 上に右手のアバタ（図 3.6）と、ターゲットとして白い箱（図 3.7）を呈示した。アバタの人差し指の長さは、事前に計測した参加者の右手人差し指の長さを基準として、各条件に応じた長さを加算して呈示した。

3.6 実験条件



図 3.6: VR 上で表示される
右手のアバタ

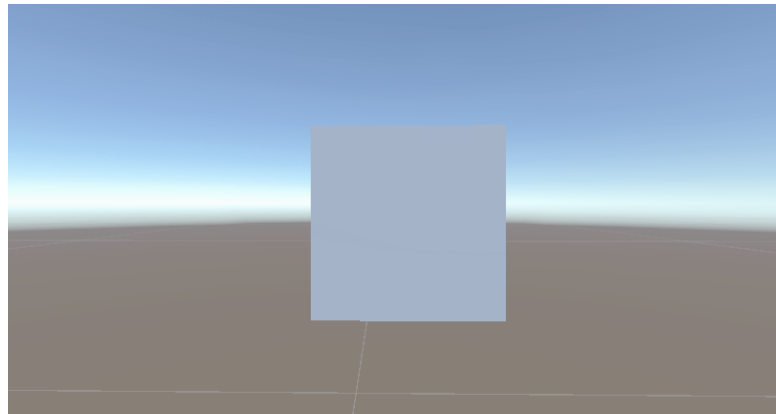


図 3.7: VR 上で表示されるターゲット

3.5.2 触覚刺激

触覚刺激として、図 3.1 の滑車付きの台を動かしてターゲットへ到達、接触するリーチング運動を用いて触覚刺激の呈示を行った。参加者は滑車をつけた台の上に手を置き、台を前に動かして、3D プリンタで作成したターゲットに触れた。その後、手前に設置してあるストッパーの位置まで手を戻して、到達運動を繰り返した。

3.6 実験条件

視覚刺激と触覚刺激の整合性の有無を条件として、ターゲットに触れた時の位置が視触覚で整合する条件と不整合な条件を設定した。両条件について、上から見た模式図を図 3.8 と図 3.9 に示す。また、実際に伸長したアバタを図 3.10 に示す。

整合条件では、右手のアバタの人差し指の視覚フィードバックを、事前に計測した人差し指の長さから 2 cm 伸長させた。図 3.10 の右のアバタが実際に使用したアバタであり、参加者の指の長さが 6 cm ならば、人差し指の長さを 2 cm 伸長させて 8 cm とした。VR 上では、ターゲットは実空間より 2 cm 奥に表示されており、実空間でターゲットに触れて触覚刺激が得られるとき、VR 上のアバタの指がターゲットに触れており、視覚刺激と触覚刺激に整合性があった。

3.6 実験条件

不整合条件では，右手のアバタの人差し指の視覚フィードバックを，事前に計測した人差し指の長さから 4 cm 伸長させた．図 3.10 の左のアバタが実際に使用したアバタであり，参加者の指の長さが 6 cm ならば，人差し指の長さを 4 cm 伸長させて 10 cm とした．VR 上では，ターゲットは実空間より 2 cm 奥に表示されており，実空間でターゲットに触れて触覚刺激が得られるとき，VR 上のアバタの指がターゲットに埋まっており，視覚刺激と触覚刺激に整合性がなかった．

この伸長量については，事前に他の長さでも検討を行ったが大きな違いは見られなかった．一方で，視覚刺激と触覚刺激の位置のずれが大きすぎるとアバタに身体所有感が発生しない可能性があると考え，整合条件では 2 cm，不整合条件では 4 cm の伸長量とした．

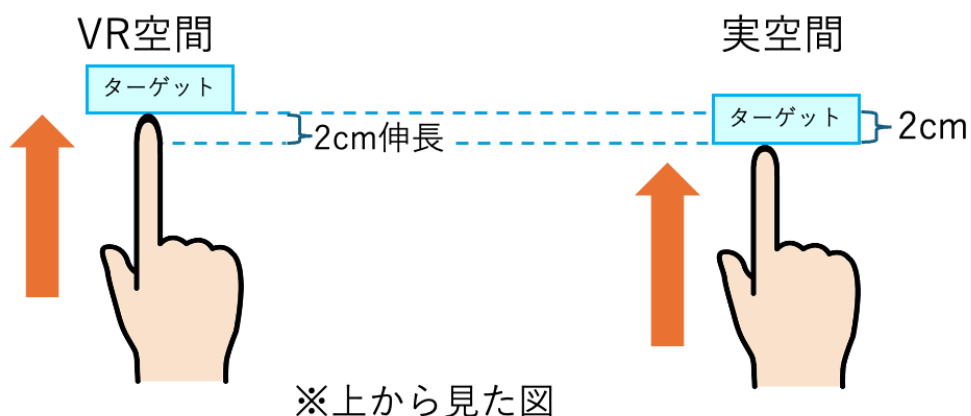


図 3.8: 整合条件の模式図

3.6 実験条件

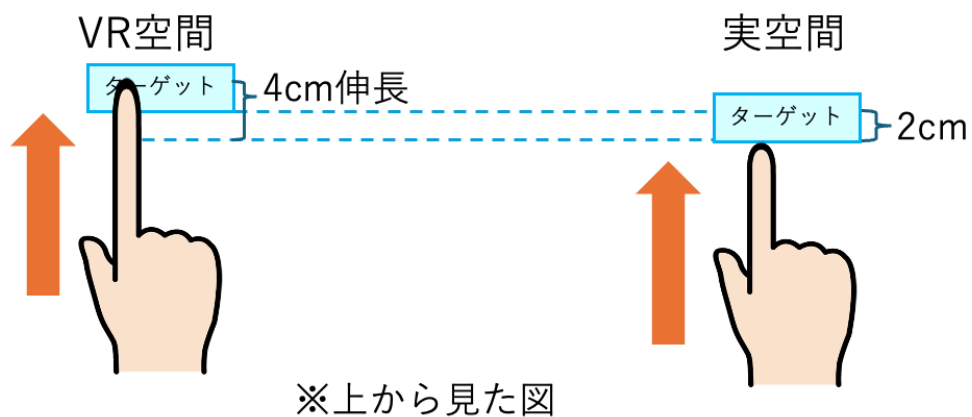


図 3.9: 不整合条件の模式図



図 3.10: 参加者の指の長さが 6 cm の場合に使用したアバタ（左：不整合条件，右：整合条件）

3.7 実験手続き

実験開始前に参加者の右手人差し指の長さを測定した。この値をもとに、それぞれの条件で使用するアバタの人差し指の長さを決定した。

参加者は椅子に座り、右手に VIVE Tracker を、頭部に HMD を装着し、左手に VIVE Controller を持った。試行開始後、参加者は VR 上に表示された板（図 3.11）を前後に動かして調整し、右手人差し指先端に知覚される位置に合わせた。この位置を主観的な指の先端の位置の初期位置とした。その後、アバタの身体化を行うため滑車付きの台を動かし、VR 上で表示されたターゲットに触れるリーチング課題を 100 回行った。台の移動距離の統一のため、一度ターゲットに触れた後は、設置されたストッパーまで台を戻してから再度ターゲットに触れるよう指示した。また、課題中は表示されている手のアバタを見るよう指示した。参加者が表示されている手のアバタを見ているかを確認するため、100 回の課題のうち、ランダムに 4~6 回ターゲットの色を変更し（図 3.12）、ターゲットの色が変わったらコントローラーのボタンを押して回答するよう指示した。リーチング課題後に再度右手人差し指先端の位置回答を行った。この主観的位置の計測は 3 回行った。ここまでの手続きを 1 試行とした。

参加者は整合/不整合条件で 3 試行ずつ、計 6 試行を各条件で日を分け 2 日間で行った。条件とターゲットの位置の順序については参加者間でカウンターバランスを取った。

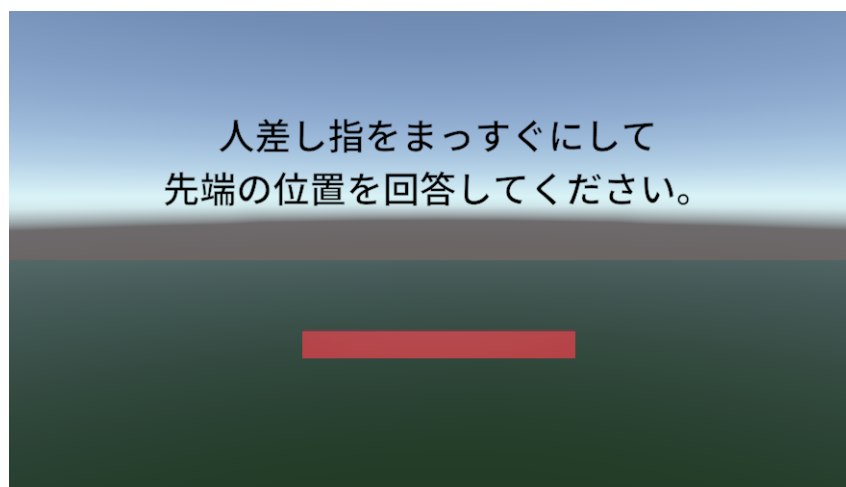


図 3.11: 位置回答時に使用する板

3.8 質問紙

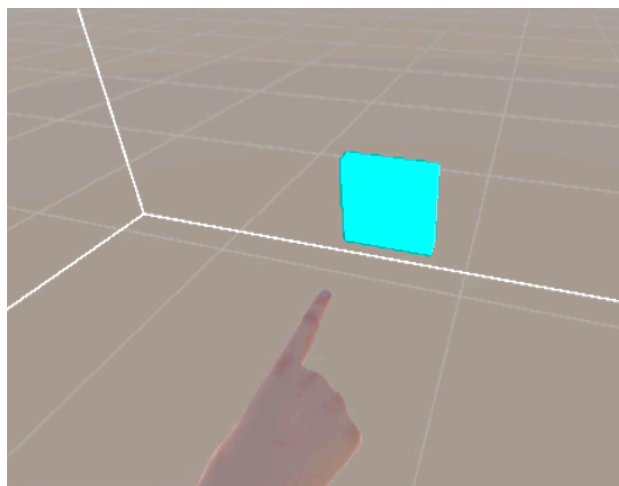


図 3.12: ターゲットの色が変わっている様子

3.8 質問紙

1 条件終了ごとに、身体所有感、運動主体感、伸長錯覚の程度、触覚に関する主観評価の質問を実施し、1 を全く感じない、7 を非常に感じるとして、7 段階のリッカート尺度の質問紙に回答するよう指示した。触覚に関する質問は、視触覚刺激の整合性に有意差が見られた場合に、その差が触覚刺激の知覚に起因するものかを確認するために実施した。実際のアンケート項目は表 3.1 に示す。

表 3.1: 実験 1 質問紙項目

Q1	VR 上の手が自分の手のように感じた
Q2	VR 上の手を自分が動かしているように感じた
Q3	右手の人差し指が長くなったように感じた
Q4	VR 上のオブジェクトに触れているように感じた

3.9 結果

知覚された人差し指先端の位置と VIVE Tracker の位置の間の距離を算出し、課題前と課題後の距離の差を知覚された指の長さの変化量とした。整合/不整合条件ごとの各 3 試行の平均値を各参加者の変化量とし、これらの値と全参加者の平均値をプロットしたグラフを図 3.13 に示す。誤差線は標準誤差を示す。

整合/不整合の各条件について伸長錯覚が発生していたかどうかを検討するため、0 との 1 標本 t 検定を行った。その結果、整合条件では平均値が 0 より有意に低く ($t(35) = -2.32, p = .026, d = -0.39$)、不整合条件では有意な差は認められなかった ($t(35) = -1.02, p = .32, d = -0.17$)。また、整合/不整合の条件の平均値間に差があるかを検討するため、対応あり t 検定を行った結果、有意な差は認められなかった ($t(35) = -0.30, p = .77, d = -0.042$)。

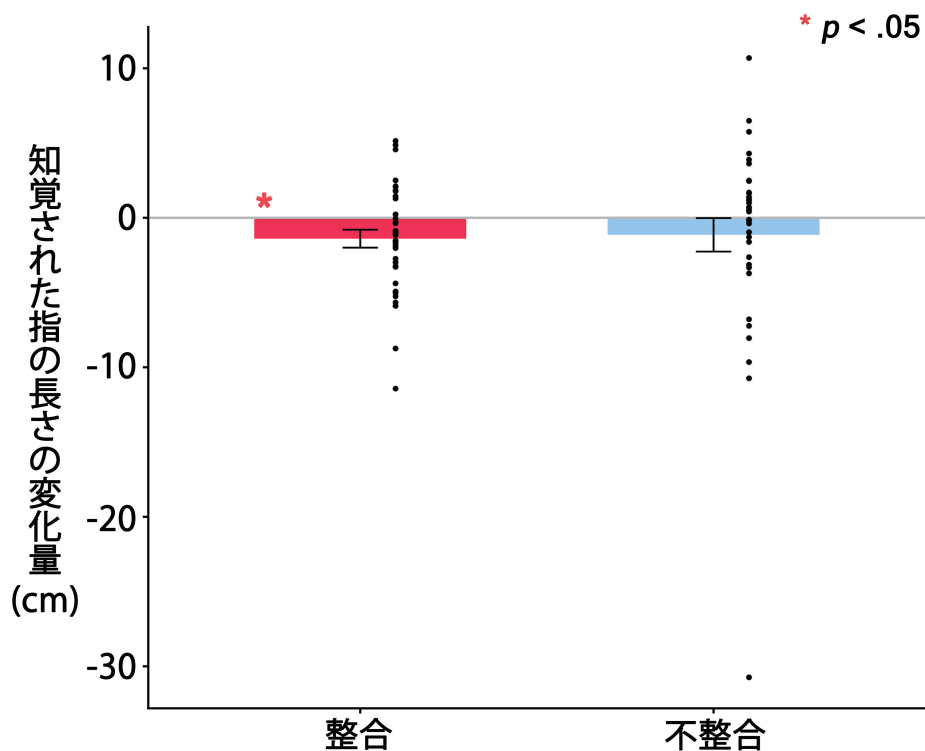


図 3.13: 実験 1: 知覚された平均値

3.10 質問紙の分析結果

質問紙の結果を図 3.14, 図 3.15, 図 3.16, 図 3.17 に示す. 各条件の質問について, 中央値である 4 とそれぞれの値に対し, ウィルコクソンの符号順位検定を行った結果, 整合条件では, 身体所有感, 運動主体感, 触覚に関する質問で評価値が 4 より有意に高かった ($V = 622, p < .001, r = 0.86$; $V = 666, p < .001, r = 0.89$; $V = 588.5, p < .001, r = 0.86$). 伸長錯覚の程度に関する質問では, 有意差は見られなかった ($V = 322.5, p = .45, r = 0.14$).

不整合条件では, 身体所有感, 運動主体感, 伸長錯覚の程度, 触覚に関する質問で評価値が 4 より有意に高かった ($V = 466, p < .001, r = 0.76$; $V = 630, p < .001, r = 0.89$; $V = 504, p = .0013, r = 0.52$; $V = 467, p < .001, r = 0.66$).

続いて, 条件間の評価値に差があるかを調べるため, 2 条件間で対応のあるウィルコクソンの符号順位検定を行った結果, 伸長錯覚の程度, 触覚に関する質問で, 条件間に有意差が見られた ($V = 100.5, p = .017, r = 0.40$; $V = 182, p = .015, r = 0.33$). 伸長錯覚の程度に関する質問では, 不整合条件の方が整合条件よりも評価値が高く, 触覚に関する質問では, 整合条件の方が不整合条件よりも評価値が高かった. 身体所有感, 運動主体感に関する質問では条件間に有意差は見られなかった ($V = 139.5, p = .071, r = 0.34$; $V = 30, p = .28, r = 0.15$).

これらの結果から, 整合条件では, アバタに対して身体所有感, 運動主体感が発生しており, アバタが物体に触れているように見えたことで, 物体に触れた感覚が高かったと考えられる. 一方で, 不整合条件でも, アバタに対して身体所有感, 運動主体感が発生しており, アバタの指がより長くなっていたことで, 指が長くなったように感じられていたと考えられる. したがって, 物体に触れた感覚が低くても, 指が長くなった感覚には影響がなかったと言える.

3.11 考察

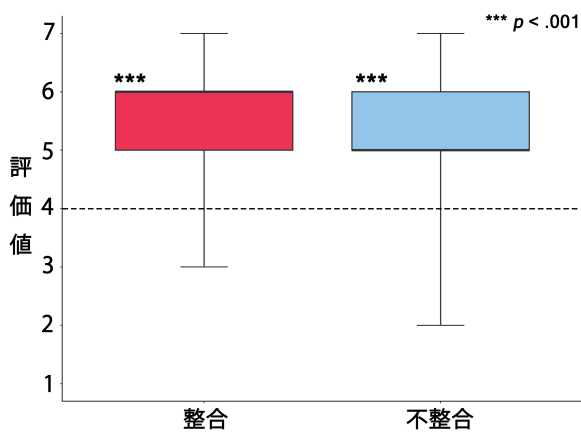


図 3.14: 実験 1:Q1 の結果

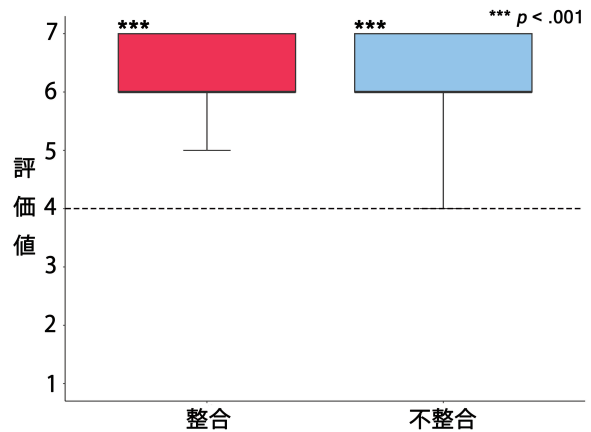


図 3.15: 実験 1:Q2 の結果

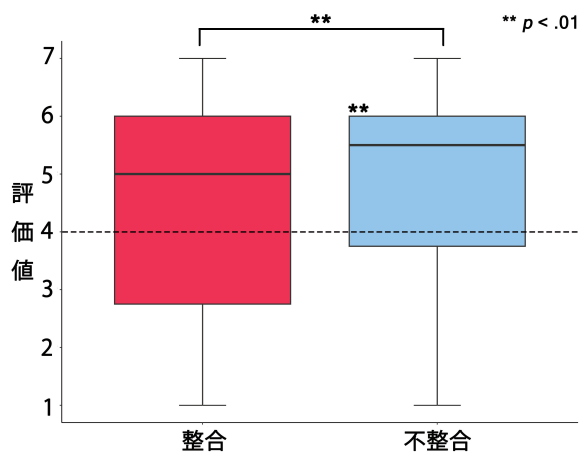


図 3.16: 実験 1:Q3 の結果

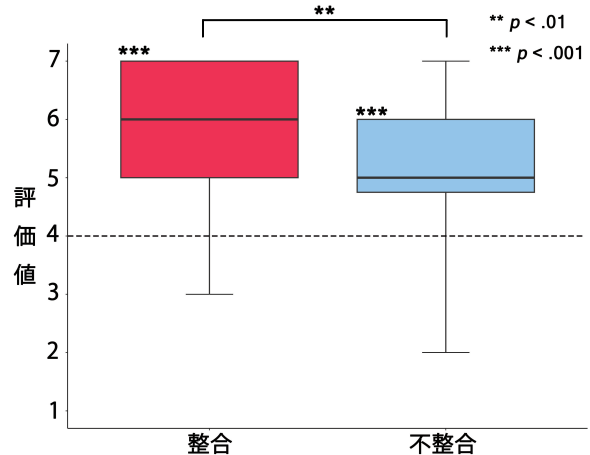


図 3.17: 実験 1:Q4 の結果

3.11 考察

指先の位置回答課題について 1 標本 t 検定を行った結果、整合条件では平均値が 0 より有意に低く、不整合条件では有意差が見られなかった。このことから、伸長錯覚は両条件ともに発生していなかった。両条件で平均値が 0 より小さかった要因として、リーチング課題中の触覚フィードバックにより、アバタの指先が実際の指先（触覚フィードバックが与えられる位置）よりも奥に呈示されていることが意識され、「視覚的な接触点よりも実際の指先が手前にある」と学習された結果、課題後の指先位置が手前方向へシフトした可能性がある。また、視触覚刺激の整合性が保たれていたことで、参加者の回答のばらつきが小さかったため、整合条件のみ平均値が 0 より有意に低かったのではないかと考えられる。一方で、質問

3.11 考察

紙による主観的な報告では、不整合条件で「右手の人差し指が長くなったように感じた」という質問に有意差が見られた。このことから、アバタの伸長量が大きい不整合条件では、視覚的印象により、人差し指がより長くなったように感じられていたと考えられる。

体性感覚に基づいた指の位置の回答値からは伸長錯覚が両条件で見られなかった理由は複数考えられる。

第一に、今回の実験の手続きが伸長錯覚に有効でない可能性がある。本実験では視触覚刺激の整合性の影響を検討するため、先行研究で検討されていない、ターゲットへの接触による触覚刺激を用いたが、この手続きによる視触覚刺激呈示では伸長錯覚が生起しない可能性がある。また、触覚刺激の呈示方法や回数、アバタやターゲットの位置や時間のずれにより同期が厳密に行えていなかったなど、手続きの不備といった理由も考えられる。さらに、100回ターゲットに触れる課題を行う中で、体性感覚による自己身体の位置知覚が強固になり、知覚に変化が生じにくくなった可能性がある。

第二に、指では伸長錯覚が発生しづらい可能性がある。手全体が大きくなるなど、全体が変化する場合に比べ、今回の人差し指のみが伸びるといった、局所的な変化による体性感覚の変化は生じづらい可能性がある。特に、手や指では日常的に視触覚刺激を体験しており、体性感覚による位置の表象が強固であると考えられる。よって、本実験で用いた受動的な接触による触覚刺激のみでは体性感覚が変化しづらく、結果として伸長錯覚が発生しなかったのではないかと考えられる。

第 4 章

実験 2

4.1 目的

実験 1 において、指の形状の局所的な変化は伸長錯覚を生じさせにくいことが考えられたため、実験 2 では身体の視覚刺激の呈示方法を変更して、実験 1 の結果と比較した。実験 1 では指を伸長させたアバタを用いたが、この局所的な形状の変化により伸長錯覚が発生しなかった可能性がある。そこで実験 2 では、アバタの形状を変化させず、手のアバタ全体を前にずらす方法を用いた。これにより、指の形状は変化しないため、体性感覚を維持しつつ伸長錯覚が発生すると考えた。

4.2 実験参加者

実験参加者は実験 1 と参加者間で比較を行うため、実験 1 に参加していない、正常な視力 (矯正を含む) を有する右利きの大学生男女 36 名 (平均年齢 18.5, SD = 0.81, 男性 20 名, 女性 16 名) であった。参加者には実験開始前に実験内容と実験手続きについて説明を行った。

4.3 実験手続き

実験 2 では、実験 1 から視覚刺激と質問紙のみを変更した。

4.3 実験手続き

4.3.1 視覚刺激

図 4.1 のように、視覚刺激として呈示する右手のアバタを手首から先の手部のみに変更した。これは、実験 1 と異なりアバタの形状が変化していないため、質問紙への回答を通じて、参加者がどの部位が伸長したと知覚したかを検討するためである。また、実験 2 では、手の形を維持したまま、整合条件では前に 2 cm、不整合条件では前に 4 cm 手のアバタ全体をずらして検討した。

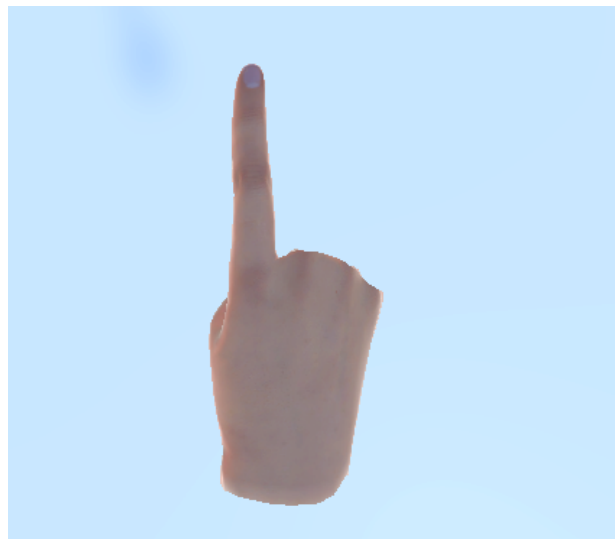


図 4.1: 実験 2 で使用したアバタ

4.3.2 質問紙

1 条件終了ごとに、身体所有感、運動主体感、伸長錯覚の程度、触覚に関する質問に、1 を全く感じない、7 を非常に感じるとして、7 段階のリッカート尺度の質問紙に回答するよう指示した。実際のアンケート項目は表 4.1 に示す。また、伸長錯覚に関する質問項目で 4 の「どちらでもない」より大きい値を回答した参加者には、どの部位が長くなったように感じたかの質問である Q5 から Q8 に回答するよう指示した。

4.4 結果

表 4.1: 実験 2 質問紙項目

Q1	VR 上の手が自分の手のように感じた
Q2	VR 上の手を自分が動かしているように感じた
Q3	自分の右腕が長くなったように感じた
Q4	VR 上のオブジェクトに触れているように感じた
Q5	肩から肘までが長くなったように感じた
Q6	肘から手首までが長くなったように感じた
Q7	手首から指先までが長くなったように感じた
Q8	指が長くなったように感じた

4.4 結果

実験 1 と同様に、各条件について、各参加者の変化量と全参加者の平均値をプロットしたグラフを図 4.2 に示す。グラフの誤差線は標準誤差を示す。

各条件について伸長錯覚が発生していたかどうかを調べるため、0 との 1 標本 t 検定を行った。その結果、整合条件および不整合条件の両条件で有意な差は認められなかった ($t(35) = -0.72, p = .48, d = -0.12; t(35) = 0.67, p = .51, d = 0.11$)。また、整合/不整合の条件の平均値間に差があるかを調べるため、対応あり t 検定を行った結果、有意な差は認められなかった ($t(35) = -1.05, p = .30, d = -0.23$)。

さらに、実験 1 および実験 2 で、整合性と、視覚刺激の呈示方法（アバタの指の伸長／手アバタの位置ずれ）を要因とする 2 要因混合分散分析を行った。その結果、整合性の主効果 ($F(1, 70) = 1.01, p = .32, \eta_G^2 = 0.0045$)、視覚刺激の呈示方法の主効果 ($F(1, 70) = 1.64, p = .20, \eta_G^2 = 0.016$)、および交互作用 ($F(1, 70) = 0.39, p = .54, \eta_G^2 = 0.0017$) のいずれも有意差は見られなかった。

4.5 質問紙の分析結果

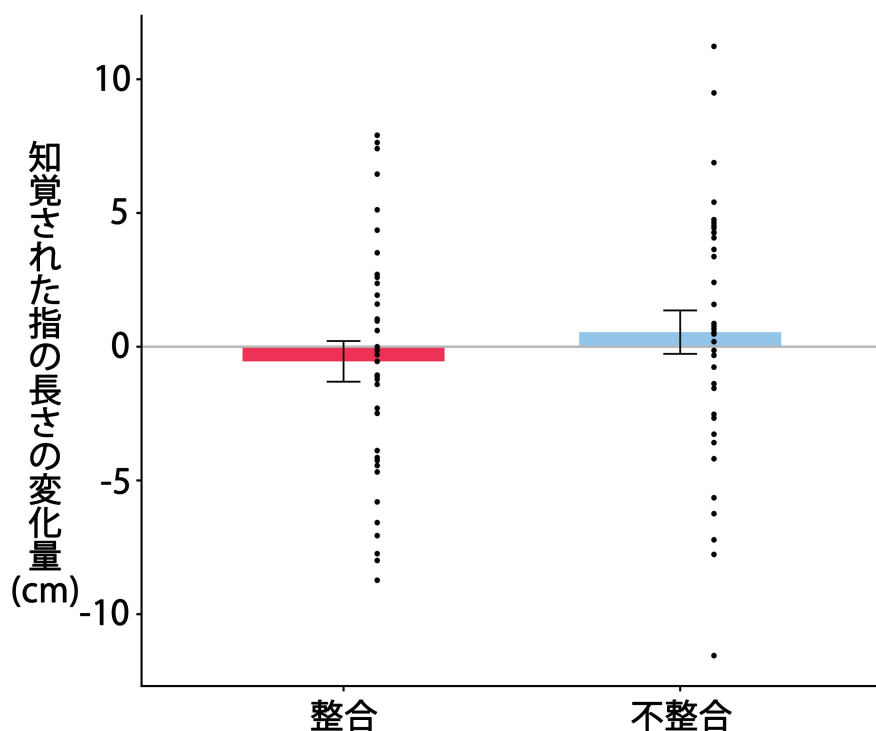


図 4.2: 実験 2: 知覚された平均値

4.5 質問紙の分析結果

質問紙の結果を図 4.3, 図 4.4, 図 4.5, 図 4.6 に示す. 各条件の Q1 から Q4 の質問について, 中央値である 4 とそれぞれの値に対し, ウィルコクソンの符号順位検定を行った結果, 整合条件では, 身体所有感, 運動主体感, 触覚に関する質問で評価値が 4 より有意に高かった ($V = 577, p < .001, r = 0.82$; $V = 666, p < .001, r = 0.89$; $V = 576, p < .001, r = 0.73$). 伸長錯覚の程度に関する質問では有意差が見られなかった ($V = 277.5, p = .73, r = 0.059$).

不整合条件でも, 身体所有感, 運動主体感, 触覚に関する質問で評価値が 4 より有意に高かったが ($V = 561.5, p < .001, r = 0.69$; $V = 655.5, p < .001, r = 0.87$; $V = 413, p = .014, r = 0.39$), 伸長錯覚の程度に関する質問では有意差が見られなかった ($V = 392.5, p = .20, r = 0.22$).

続いて, 条件間の評価値に差があるかを調べるため, 2 条件間で対応のあるウィルコクソンの符号順位検定を行った結果, 触覚に関する質問で, 条件間に有意差が見られた

4.5 質問紙の分析結果

($V = 304.5, p = .0040, r = 0.46$)。整合条件の方が不整合条件よりも評価値が高かった。身体所有感、運動主体感、伸長錯覚の程度に関する質問では条件間に有意差は見られなかった ($V = 177, p = .23, r = 0.19; V = 76.5, p = 1, r = 0.028; V = 111.5, p = .11, r = 0.28$)。

これらの結果から、整合条件および不整合条件の両条件でアバタに対し身体所有感、運動主体感が発生していたと考えられる。また、実験1と同様に、整合条件では、アバタが物体に触れているように見えたことで、物体に触れた感覚が高かったと考えられる。

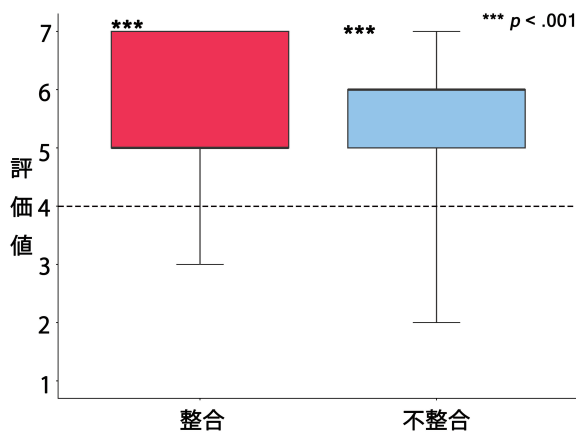


図 4.3: 実験 2:Q1 の結果

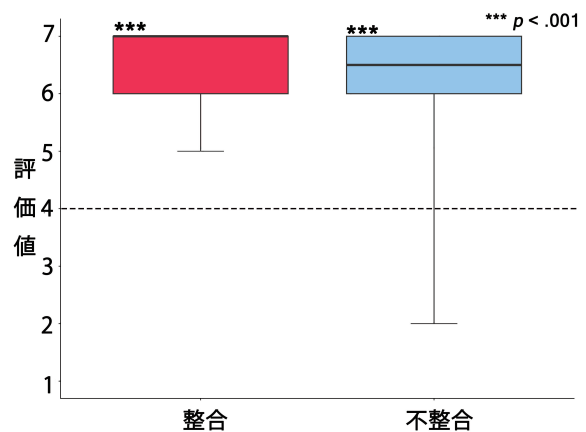


図 4.4: 実験 2:Q2 の結果

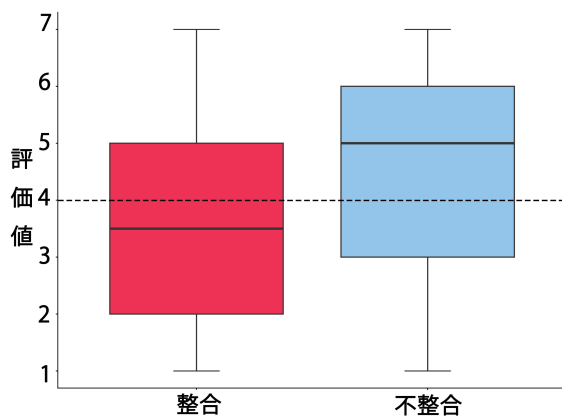


図 4.5: 実験 2:Q3 の結果

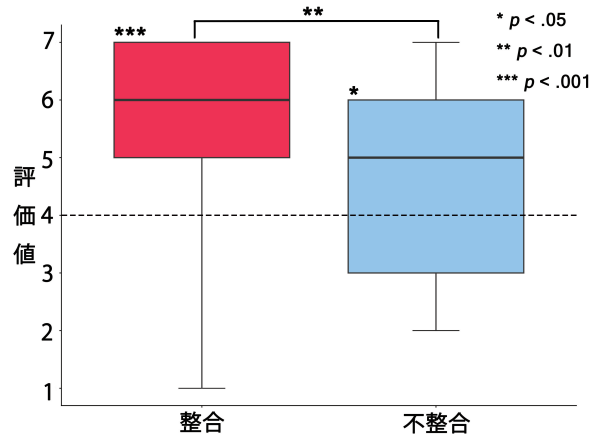


図 4.6: 実験 2:Q4 の結果

4.5 質問紙の分析結果

また、Q3の伸長錯覚に関する質問で、4のどちらでもないより大きい、5以上の値を回答した参加者の数は整合条件で15名、不整合条件で22名であった。Q5からQ8の結果を図4.7、図4.8、図4.9、図4.10に示す。

各条件のQ5からQ8の身体部位ごとの伸長感に関する質問について、中央値である4とそれぞれの値に対し、ウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、Q5は整合条件および不整合条件の両条件で評価値が4より有意に低く ($V = 17, p = .012, r = 0.64; V = 31, p = .0070, r = 0.54$)、Q8では不整合条件のみ評価値が4より有意に高かった ($V = 185, p = .013, r = 0.53$)。

一方でQ6では、整合条件および不整合条件の両条件で有意差が見られなかった ($V = 59.5, p = .70, r = 0.12; V = 59.5, p = .43, r = 0.067$)。同様にQ7でも、整合条件および不整合条件の両条件で有意差が見られなかった ($V = 57, p = .46, r = 0.25; V = 131, p = .16, r = 0.33$)。また、Q8の整合条件でも有意差は見られなかった ($V = 82.5, p = .22, r = 0.34$)。

続いて、条件間の評価値に差があるかを調べるため、マン・ホイットニーのU検定を行った結果、Q5～Q8のいずれの質問でも有意差は見られなかった ($U = 160.5, p = .90, r = 0.024; U = 195.5, p = .35, r = 0.16; U = 157.5, p = .83, r = 0.039; U = 142, p = .47, r = 0.12$)。

これらの結果から、主観的に腕が伸びたように感じられていた参加者は、不整合条件では特に、指が伸びているように感じた人が多かったと考えられる。これは、アバタとして手首から先のみが見えた状態でターゲットに触れる課題を行ったことにより、注意が指に向き、アバタが前方にずれていたことで指が長くなったように感じられていたと考えられる。

4.6 考察

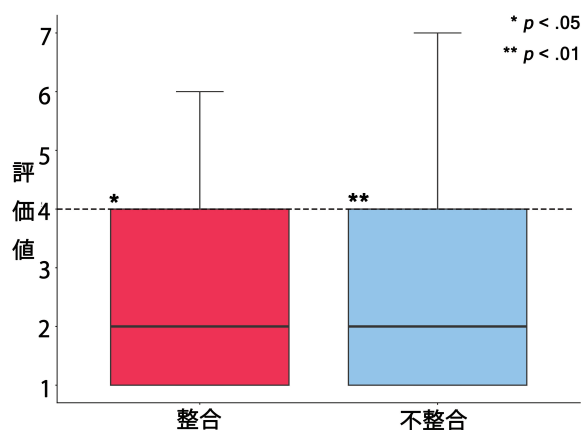


図 4.7: 実験 2:Q5 の結果

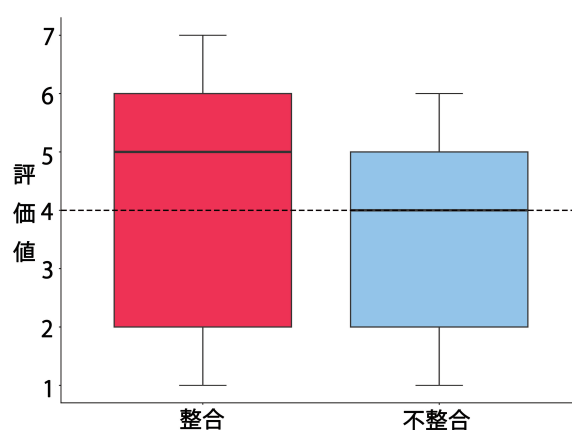


図 4.8: 実験 2:Q6 の結果

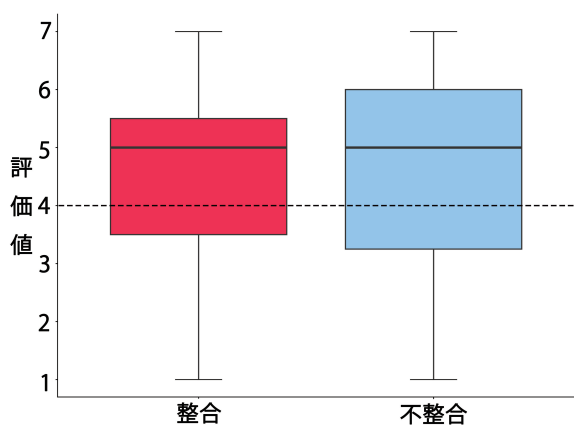


図 4.9: 実験 2:Q7 の結果

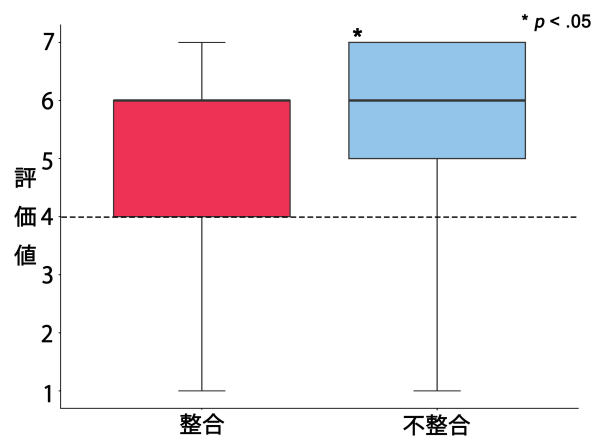


図 4.10: 実験 2:Q8 の結果

4.6 考察

1 標本 t 検定において、両条件で有意差が見られなかったことから、実験 2 でも、体性感覚に基づいた報告において、伸長錯覚が発生しているとは言えない結果となった。また、質問紙の伸長錯覚に関する質問でも有意差は見られなかったことから、実験 1 と異なり、実験 2 では参加者が主観評価においても伸長を感じていなかった。このことから、どの部位が伸長したと感じたかの質問については、十分な分析を行うことができなかった。

実験 1・2 とともに体性感覚に基づく指標では伸長錯覚が発生しなかったことから、今回の実験で用いたようなターゲットに複数回触れることによる触覚刺激の呈示は、伸長錯覚を生起させるには不十分だった可能性がある。一方で、ターゲットに触れる回数や方法を変更し

4.6 考察

たり、アバタやターゲットの空間的、時間的なずれが完全になくなるような仕組みで設計するなど、手続きを変更することで、伸長錯覚が発生する可能性もある。

また、実験1・2ともに、視触覚刺激の整合性の有無による違いは見られなかった。このことから、今回用いた実験手続きでは、視触覚刺激の整合性は伸長錯覚に影響を与えなかったと考えられる。ただし、両実験で伸長錯覚が発生していないため、伸長錯覚における多感覚刺激の整合性については、今後、伸長錯覚が発生した場合で改めて検討する必要がある。

視覚刺激の呈示方法の違いについては、実験1と2の混合計画による分散分析の結果、有意差は見られなかった。一方で、伸長錯覚に対する質問に、実験1の不整合条件のみ有意差が見られた。よって、指の形状が変化する実験1の呈示方法のほうが、主観的に伸長を感じる度合いが強かった可能性がある。視覚刺激の呈示方法についても、今後の実験でさらに検討する必要がある。

これらのことから、伸長錯覚を発生させるために与える刺激は、ターゲットへの接触のような伸長方向への力を持たない刺激ではなく、指を引っ張るなど視覚刺激と一致する方向性を持ち、より直接的に伸長を促す刺激が必要であると考えられる。

第 5 章

実験 3

5.1 目的

実験 1・2 において、物体への接触による触覚刺激では伸長錯覚が発生しなかった。これは、指という部位は他の部位に比べ、触覚刺激を日常的に受けるなど体性感覚による位置の表象が強固であり、単なる接触刺激では体性感覚が変化しなかったためと考えられる。そこで、より直接的に伸長を促す刺激として、腕の伸長錯覚で有効であった引っ張りによる力覚刺激 [4] が、指の伸長錯覚でも有効であるかを検討した。

また、身体位置を判断する際にアバタの視覚フィードバックが伸長錯覚に与える影響を検討するため、位置回答時のアバタを呈示する条件、アバタを呈示しない条件を設定した。アバタを呈示する条件のほうが、アバタが見えることによる視覚刺激の影響から、伸長錯覚が強固になることで伸長したと知覚される長さが長くなると考えた。

5.2 実験参加者

実験参加者は正常な視力 (矯正を含む) を有する右利きの大学生男女 24 名 (平均年齢 22.27, SD = 2.24, 男性 15 名, 女性 9 名) であった。参加者には実験開始前に実験内容と実験手続きについて説明を行った。

5.3 実験装置

引っ張りによる力覚刺激の呈示には図 5.1 のような自作の装置を用いた。ゴム紐は、片側は参加者の右手人差し指に、もう片側は非伸縮性の通常の紐を介して空気入れのハンドル部分に接続した。これは、ゴム紐の伸縮による張力を参加者の指に減衰なく伝えるためである。なお、引っ張りによる力覚刺激の呈示がない条件では、ゴム紐は紐に接続しなかった。ハンドルにはおもりと、ハンドルが動いたことを検知するためのトラッカー（VIVE Tracker）を取り付けた。ハンドルは机の端にあるストッパーにより固定されており、実験者がハンドルをストッパーから外すと、おもりの重さによってハンドルが 5 秒程度かけて下に移動する。これにより、ゴム紐が紐と接続されている場合には、図 5.2 のように実験参加者が右手人差し指に装着したゴム紐がゆっくりと引っ張られ、力覚刺激が呈示されるようになっている。空気入れは三脚およびおもりで固定した。

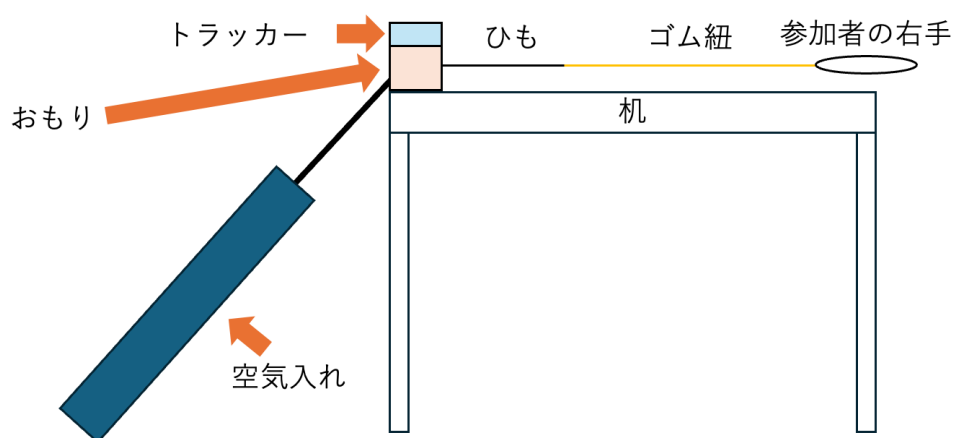


図 5.1: 引っ張りによる力覚刺激呈示前の装置模式図

5.4 実験環境

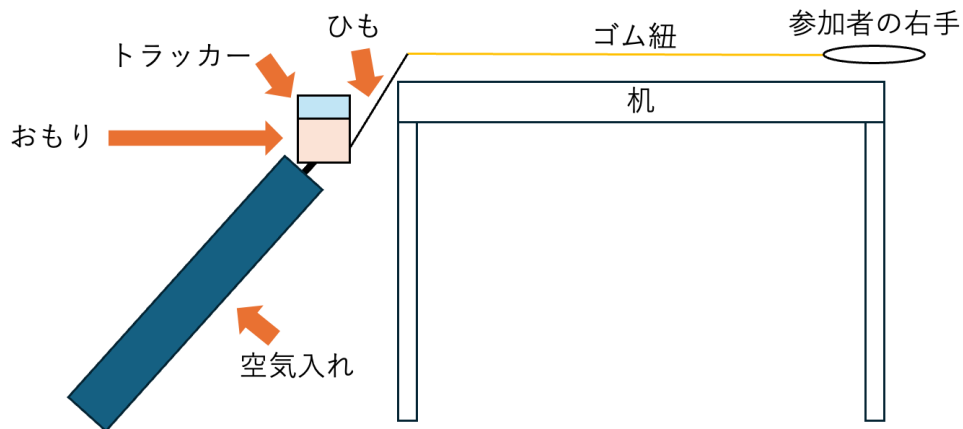


図 5.2: 引っ張りによる力覚刺激呈示後の装置模式図

5.4 実験環境

参加者は HMD を装着した状態で椅子に座り、右手の甲の中央部にバンドを用いて VIVE Tracker を固定して、左手にコントローラを持った。右手の人差し指には、途中でゴム紐が外れることを防ぐため、図 5.3 のようにゴム紐を巻いた上にテーピングを巻き、ゴム紐を固定した。また、VIVE Base Station 2.0 を実験を行う空間内の天井に 3 台、机の横に 1 台設置した。実験環境を図 5.4 に示す。



図 5.3: 右手人差し指に巻いたテーピング



図 5.4: 実験 3 環境

5.5 呈示刺激

5.5.1 視覚刺激

視覚刺激として、図 5.5 のように、机を模した白色の板と、右手のアバタ、人差し指に装着しているものと同色のゴム紐を呈示した。なお、右手のアバタについては、実験開始前に計測した参加者の人差し指の長さと同じ人差し指の長さであるアバタを使用した。また、腕の伸長について検討した先行研究で、元の長さの 3 倍までの長さであれば身体所有感が生じることが報告されている [13]。指でも、元の長さの数倍まで伸長錯覚が発生するといった同様の傾向がみられる可能性がある一方で、指は腕よりも体性感覚による位置の表象が強固であり、長すぎると身体所有感が低下するのではないかと考え、伸長は最初に計測した長さの 2 倍が最大になるように設定した（長さが 7 cm なら、2 倍の 14 cm まで伸長する）。伸長前のアバタを図 5.6、伸長後のアバタを図 5.7 に示す。



図 5.5: 視覚刺激

5.6 実験条件



図 5.6: 伸長前のアバタ

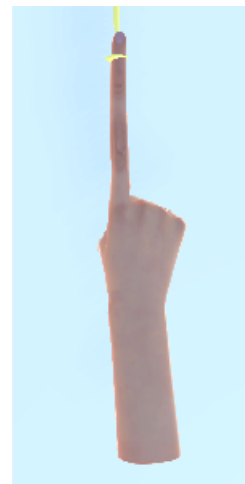


図 5.7: 伸長後のアバタ

5.6 実験条件

引っ張りによる力覚刺激の呈示の有無と、位置回答時のアバタの有無の要因で 2 水準ずつ、計 4 条件を設定した。

引っ張りによる力覚刺激の呈示がある条件では、実験参加者が右手人差し指に装着したゴム紐を図 5.1 のように装置に繋がった紐と接続した。ハンドルをストッパーから外すと、おもりの重さによってハンドルが下に移動し、参加者が装着したゴム紐が引っ張られることで、力覚刺激を呈示した。引っ張りによる力覚刺激の呈示がない条件では、ゴム紐を装置に繋がった紐と接続せず、それ以外は同様の手順を行った。

位置回答時にアバタ呈示あり条件では、課題後の位置回答の際に図 5.8 のように VR 上の視覚刺激である手のアバタを呈示した。一方で、位置回答時のアバタ呈示なし条件では、図 5.9 のように課題後の位置回答の際に、VR 上の視覚刺激である手のアバタを呈示しなかった。

5.7 実験手続き

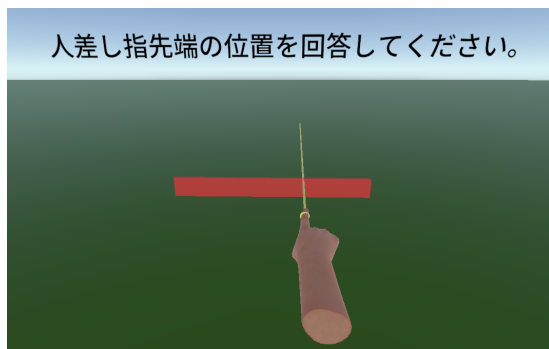


図 5.8: アバタ呈示あり条件

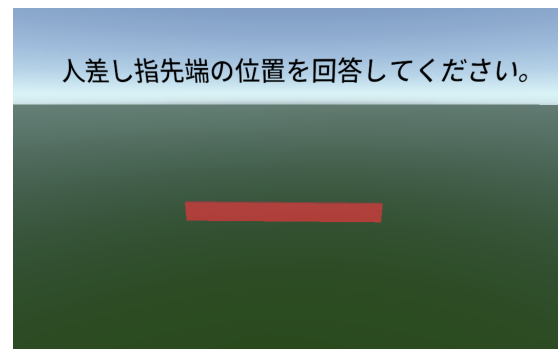


図 5.9: アバタ呈示なし条件

5.7 実験手続き

実験開始前に参加者の右手人差し指の長さを測定した。この値をもとに、使用するアバタの人差し指の長さを決定し、伸長時の最大の長さを測定値の2倍の長さに設定した。

参加者は椅子に座り、右手に VIVE Tracker を、頭部に HMD を装着し、左手に VIVE Controller を持った。試行開始後、参加者はアバタの身体化手続きとして右手のアバタを動かして、ランダムな位置に表示された球体に触れるリーチング課題（図 5.11）を 30 秒間行った。

リーチング課題の終了後、参加者はこの後の観察課題で呈示されるアバタと手の位置を同期させるため、図 5.10 のように VR 上に表示された赤い箱にアバタの指先を、青い円柱にアバタの方向を合わせ、現実の机の上に右手を置いた。次に、画面が切り替わり、VR 上に表示された板（図 5.9）を前後に動かして調整し、右手人差し指先端として知覚される位置に合わせた。さらに、同様の手続きで図 5.12 の板を右手人差し指の根本の位置に合わせて、これらの位置を主観的な指の位置の初期位置とした。

再び画面を図 5.5 に切り替え、参加者は呈示されたアバタの人差し指を 20 秒程度観察した。課題中はアバタを見ておくよう指示した。図 5.1 の装置を動かして、人差し指を最大の長さまで伸長させた。このとき、引っ張りによる力覚刺激の呈示がある条件では、ゴム紐が同時に伸び、力覚刺激の呈示が行われた。

その後、課題前に行った人差し指先端と根本の位置回答を再度行った。なお、引っ張りに

5.7 実験手続き

よる力覚刺激の呈示がある条件では、位置回答時にも力覚刺激を維持した。また、位置回答時には、アバタ呈示あり条件では、人差し指が伸長したアバタを呈示した状態で回答を行い、アバタ呈示なし条件ではアバタを呈示せずに回答を行った。

参加者は2日間に分けて実験に参加した。各日ともに全4条件を実施し、1条件ごとに4試行、計16試行を実施した。条件の順序については参加者間でカウンターバランスを取った。



図 5.10: VR 上で表示されていた赤い箱と青い円柱

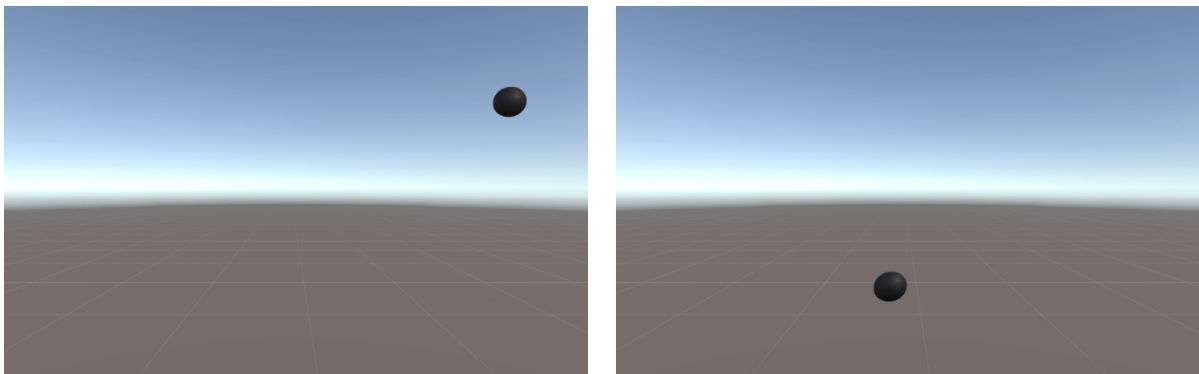


図 5.11: リーチング課題

5.8 質問紙

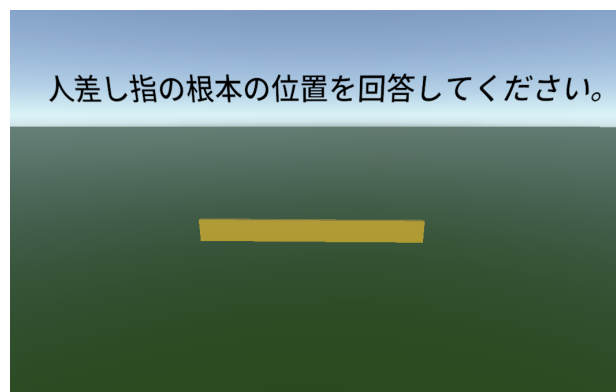


図 5.12: 人差し指根本の位置回答時に使用する板

5.8 質問紙

参加者は両日全 4 条件を経験するため、質問紙は引っ張りによる力覚刺激呈示あり、引っ張りによる力覚刺激呈示なしに分けて、各条件の終了後に実施した。身体所有感の 2 問、運動主体感の 2 問、伸長錯覚の程度に関する質問に、1 を全く感じない、7 を非常に感じるとして、7 段階のリッカート尺度の質問紙に回答するよう指示した。また、身体所有感に関するコントロール質問として Q6 を追加した。実際のアンケート項目は表 5.1 に示す。

表 5.1: 実験 3 質問紙項目

Q1	VR 上の手が自分の手のように感じた
Q2	VR 上の手が他の誰かの手のように感じた
Q3	VR 上の手を自分の思うように操作できたと感じた
Q4	VR 上の手が勝手に動いているように感じた
Q5	右手の人差し指が長くなったように感じた
Q6	自分の手が複数あるように感じた (VR 上の手と現実の手がそれぞれ存在するよう感じた)

5.9 結果

各試行における課題前、課題後の人差し指先端の知覚位置の回答と、人差し指根本の知覚位置の差分を知覚された指の長さとし、さらに課題前と課題後の距離の差分を伸長錯覚による指の長さの変化量とした。各条件 4 試行の平均値を各参加者の変化量とし、これらの値と全参加者の平均値をプロットしたグラフを図 5.13 に示す。グラフの誤差線は標準誤差を示す。

それぞれの条件について、伸長錯覚が発生していたかどうかを調べるため、0 との 1 標本 t 検定を行った。その結果、引っ張りによる力覚刺激呈示あり・アバター呈示なしの条件のみ変化量が 0 より有意に高かった ($t(23) = 2.22, p = .037, d = 0.38$)。一方で、引っ張りによる力覚刺激呈示あり・アバター呈示あり条件 ($t(23) = -0.36, p = .72, d = -0.12$)、引っ張りによる力覚刺激呈示なし・アバター呈示あり条件 ($t(23) = -1.93, p = .066, d = -0.46$)、引っ張りによる力覚刺激呈示なし・アバター呈示なし条件 ($t(23) = 1.20, p = .24, d = 0.08$) では有意差が見られなかった。また、引っ張りによる力覚刺激の呈示の有無および位置回答時のアバターの呈示の有無を要因とする、2 要因分散分析を行った。その結果、引っ張りによる力覚刺激の呈示の有無 ($F(1, 23) = 8.19, p = .0088, \eta_G^2 = 0.030$) と、位置回答時のアバターの呈示の有無 ($F(1, 23) = 6.63, p = .017, \eta_G^2 = 0.087$) の主効果がそれぞれ有意であった。一方で、両要因の交互作用は有意ではなかった ($F(1, 23) = 0.078, p = .78, \eta_G^2 = 0.0001$)。

5.10 質問紙の分析結果

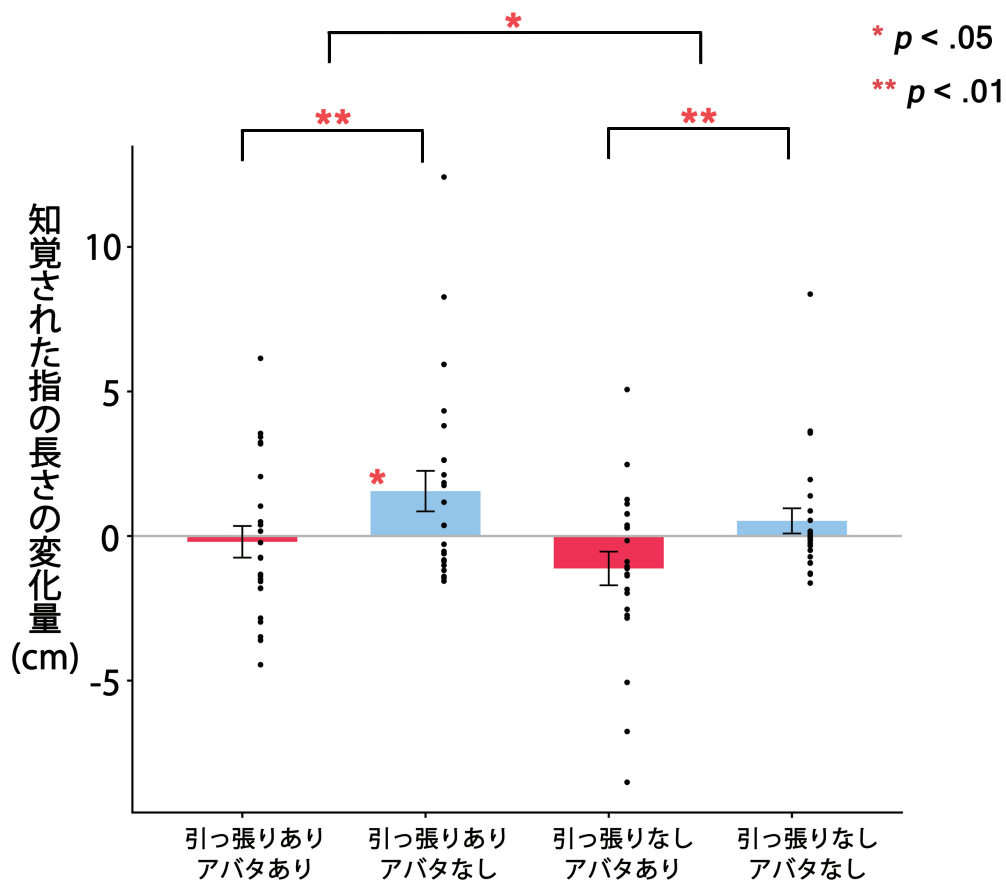


図 5.13: 実験 3: 知覚された平均値

5.10 質問紙の分析結果

質問紙の結果を図 5.14, 図 5.15, 図 5.16, 図 5.17, 図 5.18, 図 5.19 に示す. 各参加者は 2 日間で引っ張りあり, 引っ張りなし条件でそれぞれ 2 回ずつ質問紙に回答したため, 質問紙の回答は平均して分析を行った.

各条件の質問について, 中央値である 4 とそれぞれの値に対し, ウィルコクソンの符号順位検定を行った結果, 引っ張りによる力覚刺激呈示あり条件では, 身体所有感の Q1, 運動主体感の Q3, 伸長錯覚の程度に関する質問で評価値が 4 より有意に高かった ($V = 270, p < .001, r = 0.83$; $V = 300, p < .001, r = 0.88$; $V = 215, p = .0027, r = 0.59$). また, 身体所有感の Q2, 運動主体感の Q4, 身体所有感に関するコントロール質問で評価値が 4 より有意に低かった ($V = 15.5, p < .001, r = 0.78$; $V = 0, p < .001, r = 0.88$; $V =$

5.10 質問紙の分析結果

6, $p < .001, r = 0.83$).

引っ張りによる力覚刺激呈示なし条件では、身体所有感の Q1, 運動主体感の Q3 で評価値が 4 より有意に高かった ($V = 225, p < .001, r = 0.79; V = 300, p < .001, r = 0.89$). また、身体所有感の Q2, 運動主体感の Q4, 身体所有感に関するコントロール質問で評価値が 4 より有意に低かった ($V = 20, p < .001, r = 0.76; V = 7, p < .001, r = 0.82; V = 13, p < .001, r = 0.77$). 伸長錯覚の程度に関する質問では有意差は見られなかった ($V = 119, p = .82, r = 0.056$).

続いて、条件間の評価値に差があるかを調べるため、2 条件間で対応のあるウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、伸長錯覚の程度と、身体所有感に関するコントロール質問に有意差が見られた ($V = 149, p < .001, r = 0.74; V = 24, p = .037, r = 0.41$). 伸長錯覚の程度に関する質問では、引っ張りによる力覚刺激呈示あり条件の方が、引っ張りによる力覚刺激呈示がない条件よりも評価値が高く、身体所有感に関するコントロール質問では、引っ張りによる力覚刺激呈示がない条件の方が、引っ張りによる力覚刺激呈示あり条件よりも評価値が高かった。身体所有感に関する質問の Q1, Q2 および運動主体感に関する質問の Q3, Q4 には有意差は見られなかった ($V = 69, p = .10, r = 0.32; V = 50, p = .76, r = 0.0062; V = 61, p = .68, r = 0.18; V = 56, p = .34, r = 0.19$).

これらの結果から、両条件でアバタに対し身体所有感・運動主体感が発生していたと考えられる。また、参加者は引っ張りによる力覚刺激の呈示がある条件の方が指が長くなったと感じていたと考えられる。

5.10 質問紙の分析結果

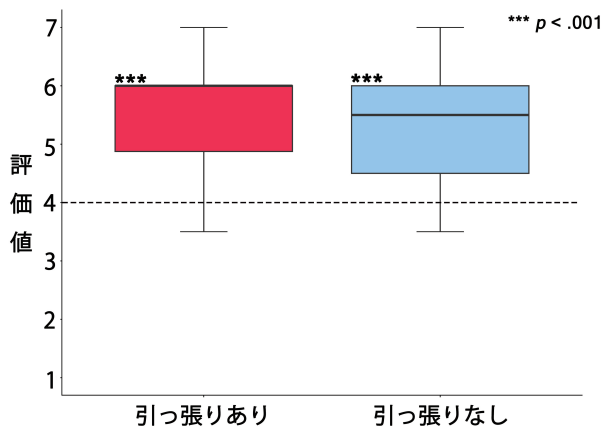


図 5.14: 実験 3:Q1 の結果

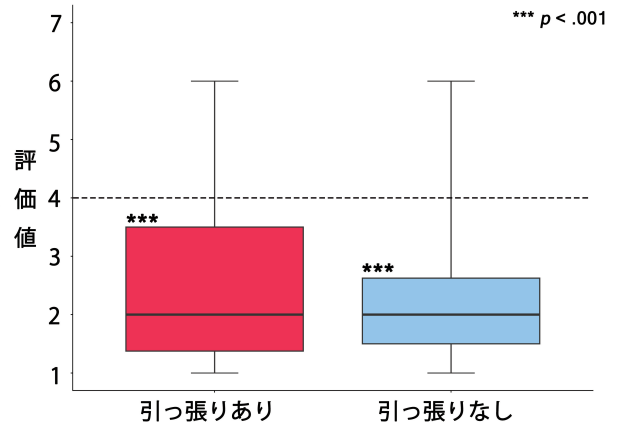


図 5.15: 実験 3:Q2 の結果

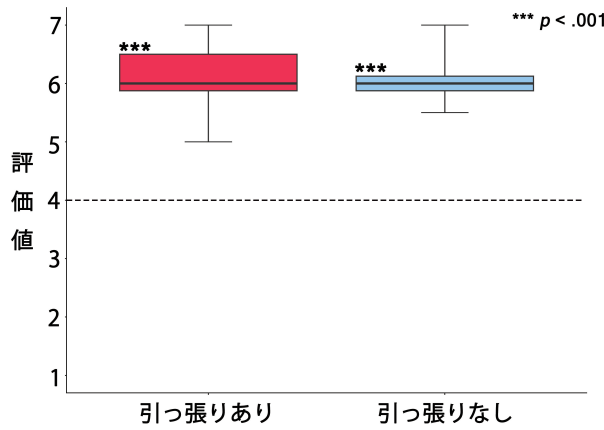


図 5.16: 実験 3:Q3 の結果

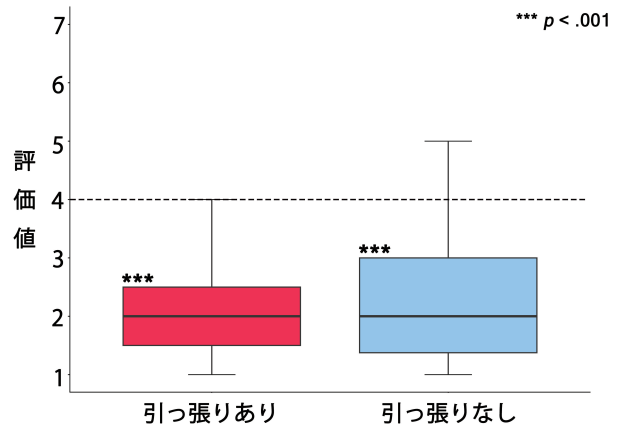


図 5.17: 実験 3:Q4 の結果

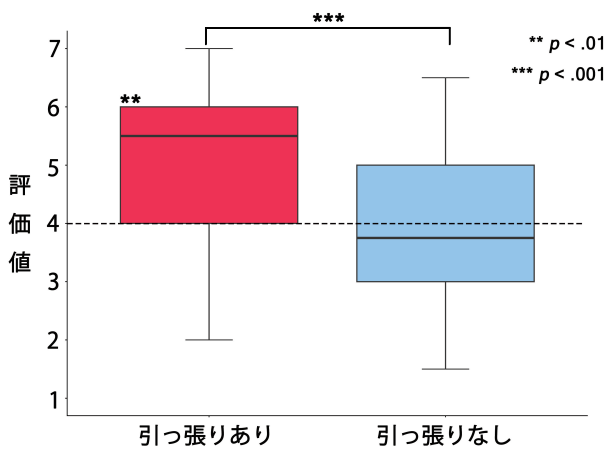


図 5.18: 実験 3:Q5 の結果

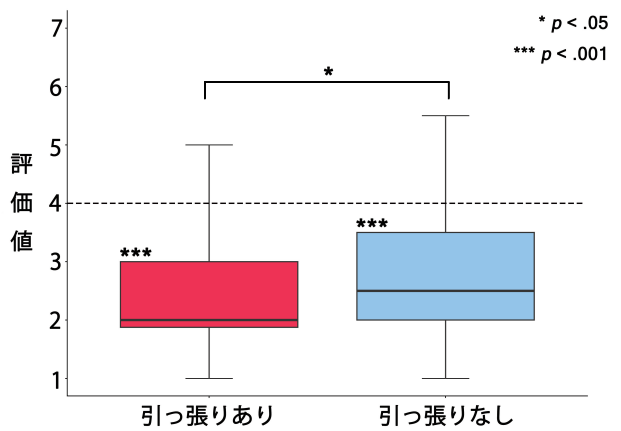


図 5.19: 実験 3:Q6 の結果

5.11 考察

1 標本 t 検定において、引っ張りによる力覚刺激呈示あり・アバタ呈示なしの条件で有意差が見られたことから、この条件では伸長錯覚が発生したと言える。また、2 要因分散分析の結果、引っ張りによる力覚刺激の呈示の有無と、位置回答時のアバタの有無の主効果がそれぞれ有意であった。引っ張りによる力覚刺激の呈示がある条件のほうが、引っ張りによる力覚刺激呈示がない条件に比べて平均値が高いことから、指の伸長錯覚には引っ張りによる力覚刺激が有効であると言える。また、位置回答時のアバタ呈示がない条件のほうが、位置回答時のアバタ呈示がある条件よりも平均値が高いことから、位置回答時にアバタが見えていない方が指の伸長錯覚が強く知覚されると考えられる。

引っ張りによる力覚刺激は腕の伸長錯覚でも有効であり [4]、指の伸長錯覚でも同様の結果であったことから、伸長錯覚に有効な刺激であると考えられる。ただし、この刺激は使用するゴムの種類や引っ張りの強度、ゴムを引く方法によって伸長錯覚の強度が変わる可能性があるため、伸長錯覚の発生に効果的な方法を今後検討していく必要がある。

アバタ呈示の有無の効果については、当初はアバタ呈示あり条件のほうが、アバタが見えることによる視覚刺激の影響から、伸長錯覚が強固になることで伸長したと知覚される長さが長くなると予測していたが、この仮説とは反対の結果であった。これは、アバタ呈示あり条件では、指が伸びたアバタの呈示により、指が通常ではあり得ない長さになっており、非現実的なものであると判断した結果、視覚フィードバックの重みづけが小さくなり、体性感覚により依存して知覚されたと考えられる。また、引っ張りによる力覚刺激呈示あり・アバタ呈示なし条件では、位置回答時に視覚刺激が呈示されなかったことで、体性感覚に与えられる刺激である引っ張りによる力覚刺激の重みづけが大きくなったのではないかと考えられる。今回は元の測定値の 2 倍の長さまで伸長するよう設定したが、伸長錯覚が発生した引っ張りによる力覚刺激呈示あり・アバタ呈示なし条件でも変化量は 1.55 cm と短いため、この程度の伸長量であれば異なる結果が得られる可能性がある。一方で、伸長量が短すぎると、伸長錯覚そのものが発生しなくなる可能性もある。よって、伸長量を変更した場合に傾向が

5.11 考察

変化するかは今後さらに実験を行い，検討する必要がある．

第 6 章

まとめ

本研究では、刺激の特性、視覚刺激の呈示方法など、伸長錯覚を発生させる手法について検討した。実験 1・2 では伸長錯覚が発生しなかったことから、本実験の手続きにおける物体への接触による触覚刺激は、伸長錯覚を発生させるには不十分である可能性が示唆された。また、多感覚刺激の整合性の有無、ならびに視覚刺激の呈示方法（アバタの指の伸長／手アバタの位置ずれ）については、今回の実験では伸長錯覚が発生しなかったため、伸長錯覚が発生した場合で改めて検討する必要がある。

一方で、実験 3 では指の伸長錯覚が発生し、引っ張りによる力覚刺激が伸長錯覚に有効であることが示された。また、位置回答時にアバタを呈示しない条件でのみ錯覚が発生したことから、非現実的な視覚刺激が錯覚を阻害する可能性が示された。これらの結果から、伸長錯覚による指の位置知覚の変化においては、体性感覚に与える刺激の特性が強く影響することが示された。

また、今回用いた位置計測手法では、奥行き感がわかりづらく、特に実験 3 のアバタ呈示条件においてはアバタに板がめり込んだように見えていた。位置計測手法についても、どのように計測を行うと適切に計測できるのかは明らかになっていないため、計測手法を変更して実験を行うなど、最適な計測手法の検討が必要である。加えて今後は、引っ張りに使用するゴム紐の特性や力覚刺激の強度、持続時間、指の伸長錯覚の最大値等を検討することで、伸長錯覚の発生により効果的な手法の検討が必要である。

謝辞

本研究の実施及び論文作成にあたり，多くのご支援と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，本論文の副査を務めていただきました篠森敬三先生ならびに門田宏先生に深く感謝いたします。また，本研究の実験実施にあたりまして数多くの助言を賜りました同研究室所属の長原周平さん，高尾優一さんにも深く感謝いたします。最後に，本研究の実験に参加していただいた皆さん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] K. Kilteni, R. Groten, and M. Slater, “The Sense of Embodiment in Virtual Reality”, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 21, no. 4, pp. 373-387, 2012.
- [2] 曾我部愛子, 森光洋, 小鷹研理, “ぶらさがりによる自重変化を利用した腕が伸縮する感覚の誘発”, *情報処理学会 インタラクション論文集*, pp. 478-480, 2016.
- [3] 石原由貴, 森光洋, 室田ゆう, 小鷹研理, “HMD を介したポールを引っ張り合うことによる腕が伸縮する感覚の誘発”, *エンタテインメントコンピューティングシンポジウム (EC2017) 論文集*, 2017.
- [4] SUN HONG, 柴田史久, 木村朝子, “仮想空間における上肢伸長感覚の誘発要因の分析”, *情報処理学会研究報告*, Vol.2018-HCI-176, No. 22, 2018.
- [5] 石原由貴, 遠藤孝則, “仮想空間における”つまみ動作”を用いた能動的関節位置移動による指の伸縮錯覚の誘発”, *情報処理学会 インタラクション論文集*, pp. 820-824, 2024.
- [6] 石原由貴, “仮想空間における体験者の行為が指の伸長感に与える影響の比較”, *日本認知科学会第42回大会論文集*, P3-8, pp. 614-617, 2024.
- [7] T. Sasaki, M. Y. Saraiji, C. L. Fernando, K. Minamizawa, and M. Inami, “MetaLimbs: Multiple arms interaction metamorphism”, *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*, Article No. 16, pp. 1-2, 2017.
- [8] K. Arai, H. Saito, M. Fukuoka, S. Ueda, M. Sugimoto, M. Kitazaki, and M. Inami, “Embodiment of supernumerary robotic limbs in virtual reality”, *Scientific Reports*, vol. 12, Article No. 9769, 2022.
- [9] 小川奈美, 伴祐樹, 櫻井翔, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝, “えくす手: 変調バーチャルハンドへの即応的な身体所有感の生起による身体拡張システム”, *情報処理学会 インタラクション論文集*, pp. 1022-1027, 2016.

参考文献

- [10] NTT インターコミュニケーション・センター [ICC], “ICC キッズ・プログラム 2008 君の身体を変換してみよ展”, https://www.ntticc.or.jp/ja/feature/2008/Kidsprogram2008/Message/works_j.html (参照 2026/01/17) .
- [11] NTT インターコミュニケーション・センター [ICC], “《伸びる腕》”, <https://www.ntticc.or.jp/ja/archive/works/the-extending-arm/>, (参照 2026/01/17) .
- [12] 中川 航太郎, 井上 康之, Harin Hapuarachchi, 杉本 麻樹, 稲見 昌彦, 北崎 充晃, “伸長する腕に対する身体性の獲得：伸長実装法による違い”, 日本バーチャルリアリティ学会誌, 27 巻 4 号, pp. 341-351, 2022.
- [13] K. Kilteni, J. M. Normand, M. V. Sanchez-Vives, and M. Slater, “Extending body space in immersive virtual reality: a very long arm illusion”, *PloS one*, 7(7), e40867, 2012.
- [14] 藤崎和香, “多感覚が捉える世界”, 日本音響学会誌, 77 巻 3 号, pp. 180-185, 2021.
- [15] 雨宮智浩, “メタバースの教科書 ー原理・基礎技術から産業応用までー”, 株式会社オーム社, 2023.
- [16] M. Botvinick, and J. Cohen, “Rubber hands’ feel’ touch that eyes see”, *Nature*, Vol.391, No. 6669, pp. 756-759, 1998.
- [17] M. O. Ernst, and M. S. Banks, “Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion”, *Nature*, 415, pp. 429-433, 2002.
- [18] 岩田洋夫, “体性感覚呈示技術”, バイオメカニズム学会誌, Vol.31, No.2, 2007.
- [19] H2L Inc., “UnlimitedHand Developer’s site ハードウェア”, <http://dev.unlimitedhand.com/devise/>, (参照 2026/01/18) .
- [20] S. Yamashita, R. Ishida, A. Takahashi, H. Wu, H. Mitake, and S. Hasegawa, “Gum-Gum Shooting: Inducing a Sense of Arm Elongation via Forearm Skin-stretch and the Change in the Center of Gravity”, *Proceedings of the Virtual Reality International Conference*, Article No. 21, pp. 1-3, 2018.
- [21] K. Kilteni, A. Maselli, K. P. Kording, and M. Slater, “Over my fake body: body

参考文献

- ownership illusions for studying the multisensory basis of own-body perception”,
Front. Hum. Neurosci., vol. 9, Article No. 141, 2015.
- [22] R Core Team(2025), “R: The R Project for Statistical Computing”, The R Founda-
tion for Statistical Computing, Vienna, Austria, [https://www.r-project.
org/](https://www.r-project.org/),(閲覧 2026/01/18).
- [23] Ryuta Iseki, “Anovakun version 4.8.9.2023”, [https://riseki.cloudfree.jp/
?ANOVA%E5%90%9B](https://riseki.cloudfree.jp/?ANOVA%E5%90%9B), (閲覧 2026/01/18).