

令和3年度
修士学位論文

VR空間内の身体知覚における
視覚的要因の影響

The Effects of Visual Factors
on Self-Body Perception in VR Space

1245129 中島 翔

指導教員 繁榎 博昭

2022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

VR 空間内の身体知覚における 視覚的要因の影響

中島 翔

VR 空間では視覚情報を操作し、現実と異なる環境を構築することができるため、それが身体知覚に影響を及ぼすことが考えられる。VR 空間での活動をより直感的、かつ正確に行えるようにするためには、このような人間の知覚に影響を与える視覚的要因を検討する必要がある。そこで本研究では、視覚的要因として視覚上の身体位置のずれの変化と VR 空間特有の身体の相対的位置による身体知覚への影響に注目し、VR 空間上における手の位置の視覚フィードバックを操作することで、手の動きを大きく見せることによって生じる視覚上の身体位置のずれの向きの変化が、身体位置の知覚に及ぼす影響、そして、VR 空間特有の相対的位置情報が、身体位置知覚と大きさ知覚に及ぼす影響について検討した。実験の結果、ずれの向きが変化すると、自己受容感覚ドリフトの向きも左右に変化することが示された。ずれの向きが前後に変化する場合、自己受容感覚ドリフトの向きが変化するかは明確にはならなかったが、ずれの向きが変化する位置を基準に、身体知覚位置のずれの向きが変化している傾向が見られることから、前後方向のずれにおいても、身体知覚に影響を及ぼしていることが推測された。また、相対的位置情報の操作内容によらず、自己受容感覚がある方が身体知覚が正確に行われることが示された。先行研究より、相対的位置情報の有無が身体大きさ恒常性に影響を及ぼすことが示唆されていることから、相対的位置情報は恒常性に影響を与えるが、その操作内容にはよらないということが推測される。

キーワード VR, 身体知覚, 視覚, 自己受容感覚ドリフト, 身体位置のずれの向きの

変化, 大きさ恒常性, 相対的位置情報

Abstract

The Effects of Visual Factors on Self-Body Perception in VR Space

Kakeru NAKAJIMA

In the VR space, we can manipulate visual information to construct an environment that differs from reality, which may affect our body's perception. In order to make activities in the VR space more intuitive and accurate, it is necessary to examine the visual factors that affect human perception. In this study, we focused on the changes in the visual misalignment of the body position and the influence of the relative position of the body specific to VR space on the body perception as visual factors, and examined the influence of the change in the direction of the visual body position shift caused by manipulating the visual feedback of the hand position in VR space to make the hand movement appear larger on the body position perception, and the influence of the relative position information specific to VR space on the body position perception and size perception. The results showed that when the direction of the shift changed to the left or right, the direction of the proprioceptive drift also changed to the left or right. The results of the experiment showed that when the direction of the shift changed from left to right, the direction of the proprioceptive drift also changed from left to right. It was not clear whether the direction of the proprioceptive drift changed when the direction of the shift changed from front to back. However, there was a tendency for the direction of the shift in the perceived position of the body to change based on the position where the direction of the shift changes, suggesting that the shift in the forward-

backward direction also affects the perception of the body. In addition, regardless of the manipulation of relative positional information, body perception was more accurate when there was a sense of proprioception. Since previous studies have suggested that the presence or absence of relative positional information influences body size homeostasis, it can be inferred that relative positional information influences homeostasis but is independent of the content of the manipulation.

key words VR, body perception, visual perception, proprioceptive drift, changes in the direction of body position shift, size constancy, relative location information

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	VR	1
1.3	VR 空間における身体知覚	2
1.4	身体知覚に関する先行研究	3
1.5	大きさ恒常性	3
1.6	奥行き知覚	4
1.7	本研究の目的	5
第 2 章	実験方法	8
2.1	実験 1(左右の手の動きによる位置ずれの影響の検討)	8
2.1.1	実験参加者	8
2.1.2	実験環境及び視覚刺激	8
2.1.3	実験条件	10
2.1.4	手続き	11
2.2	実験 2(前後の手の動きによる位置ずれの影響の検討)	13
2.2.1	実験参加者	13
2.2.2	実験環境及び視覚刺激	13
2.2.3	実験条件	13
2.2.4	手続き	14
2.3	実験 3(相対的位置情報の影響の検討)	15
2.3.1	実験参加者	15
2.3.2	実験環境及び視覚刺激	15

目次

2.3.3	実験条件	17
2.3.4	手続き	20
第 3 章	実験結果	21
3.1	実験 1(左右の手の動きによる位置ずれの影響の検討)	21
3.2	実験 2(前後の手の動きによる位置ずれの影響の検討)	27
3.3	実験 3(相対的位置情報の影響の検討)	30
第 4 章	考察	32
4.1	実験 1(左右の手の動きによる位置ずれの影響の検討)	32
4.2	実験 2(前後の手の動きによる位置ずれの影響の検討)	32
4.3	実験 3(相対的位置情報の影響の検討)	33
4.4	総合考察	34
4.5	今後の展望	35
第 5 章	おわりに	36
	謝辞	37
	参考文献	38

目次

1.1	アバターのイメージ	2
1.2	大きさ恒常性のイメージ	4
1.3	手の位置に応じた視覚上の身体位置のずれの向きの変化の例	5
1.4	自身の手で触れずにオブジェクトの位置を動かすイメージ	6
2.1	参加者の体勢 (実験 1, 2)	9
2.2	VR 空間上で操作する左手と青い球体	9
2.3	左右方向の身体位置のずれのイメージ	10
2.4	学習課題時の VR 空間 (実験 1)	11
2.5	赤い球体の出現位置 (実験 1)	12
2.6	前後方向の身体位置のずれのイメージ	13
2.7	赤い球体の出現位置 (実験 2)	14
2.8	参加者の体勢 (実験 3)	15
2.9	VR 空間上で操作する左手	16
2.10	「固定」条件時の背景の動きのイメージ	18
2.11	「同方向」条件時の背景の動きのイメージ	18
2.12	「反対方向」条件時の背景の動きのイメージ	19
2.13	参加者から見えている VR 空間	19
2.14	VR 空間上のバーチャルな左手の動きのイメージ	20
3.1	トラックの取り付け位置	22
3.2	0 cm の位置における知覚される身体位置のずれ	22
3.3	自身の左手を合わせる指標 (赤い球体) の各位置における手の知覚位置の ずれ (エラーバーは標準誤差を示す)	23

目次

3.4	VR空間における手首の曲がり方	24
3.5	自身の左手を合わせる指標 (赤い球体) の各位置における自己受容感覚ドリフトの向きと大きさ (エラーバーは標準誤差を示す)	26
3.6	自身の左手を合わせる指標 (赤い球体) の各位置における手の知覚位置のずれ (エラーバーは標準誤差を示す)	27
3.7	自身の左手を合わせる指標 (赤い球体) の各位置における自己受容感覚ドリフトの向きと大きさ (エラーバーは標準誤差を示す)	29
3.8	PSE の算出方法	30
3.9	実験3の結果	31

第 1 章

はじめに

1.1 本研究の背景

現在，VR 技術はエンターテインメントとしてだけでなく，産業や医療などへの応用においても注目されている．VR 技術の一つであるテレイグジスタンスは，遠隔地にあるロボットを操作することで，その場所に自身がいるように活動することを可能とする．その活動内容は，コンビニなどでの商品の陳列や精密な操作を要求される人体の手術など様々な分野での利用が考えられている．このように自身の身体の代わりとなるものを直感的，かつ正確に操作する場合，自己の代わりとなる身体を自己の体のように操作できることが重要である．VR 空間においても，操作する身体的位置や大きさの知覚が正しく行われな場合，操作ミスなどの問題が生じる可能性が高まることが考えられる．

1.2 VR

バーチャルリアリティ (VR) とは人間の感覚器官 (例：眼球、皮膚、耳) を刺激し、3 次元的な視覚空間や聴覚空間などを構築することで、人工的な現実を人間に体験させる技術のことである．VR に必要な要素として，3 次元の空間性，実時間の相互作用性，そして自己投射性がある．3 次元の空間性は，VR 空間が人間にとって自然であることである．実時間の相互作用性は，リアルタイムで VR 空間と相互に影響を与えることである．自己投射性は，VR 空間の中に違和感なく入り込めることである．これらの 3 要素を満たしたものが理想的なバーチャルリアリティシステムである [1]．VR 技術の発達に

1.3 VR空間における身体知覚

より、VR空間上で図1.1のような現実の身体と異なるアバターを用いて、他者とコミュニケーションすることが行われている [2]。現実と同様に、VR空間上での活動においても、身体を違和感なく操作できることは操作性を良くする上で重要である。また、人間に呈示する感覚刺激を操作できることから、VRを利用した視覚や自己受容感覚といった知覚に関する研究が行われている [3]。



図 1.1 アバターのイメージ

1.3 VR空間における身体知覚

自身の身体の位置や状態は、視覚以外にも自己受容感覚により知覚することができる。自己受容感覚とは、筋、腱、関節の緊張や伸縮などの状態から身体の位置を知覚する感覚である。VR空間では視覚情報を操作し、現実と異なる環境を構築することができるため、それが身体の知覚に影響を及ぼすことが考えられる。そのため、VR空間上での視覚情報の操作による身体知覚への影響により、VR空間での活動に支障が生じる可能性がある。VR空間での活動をより直感的、かつ正確に行えるようにするためには、このような人間の知覚に影響を与える要因を検討する必要がある。また、視覚情報を操作することで、身体知覚がどのように変化するか明らかにすることも重要である。

1.4 身体知覚に関する先行研究

1.4 身体知覚に関する先行研究

視覚情報の操作による身体知覚への影響の代表的な例として、ラバーハンド錯覚 (Rubber Hand Illusion, 以降 RHI) が挙げられる。RHI とは、自己の手が見えない状態で、その近くに置いたゴム製の偽物の手を観察し、自己の手と偽物の手の両方に同期した触覚刺激を与えると、偽物の手に触覚を感じる錯覚現象である [4]。この時、自己の手の位置の知覚が偽物の手の方にずれて知覚される。この自己の手の知覚位置のずれを自己受容感覚ドリフトといい、このドリフト量の大きさは、偽物の手に対しての自己身体化、つまり、自分の身体のように感じているかの指標として、多くの研究で利用されている [5-8]。また、先行研究より、同期した触覚刺激を用いなくても、偽物の手と現実の手の動きを同期させることで RHI が生じ、自己受容感覚ドリフトが発生することが報告されている [9-13]。

1.5 大きさ恒常性

大きさ恒常性とは、対象との距離に応じて、対象の現実の大きさを知覚する現象である [14]。現実の空間では、操作する身体的位置や大きさの知覚は正しく行われている。例として、手などの身体を動かした際に、その身体の網膜上における大きさが変化するが、実際に知覚される大きさは一定である。これは、人間が対象との距離と、対象の網膜上での大きさから、対象の大きさを知覚しているためであり、サルなどの動物にも見られる現象である [15]。この大きさ恒常性が人間に生まれながらに備わっている性質であるか、または経験によって身に着く性質であるかは分かっておらず、現在も議論が行われている [16-18]。大きさの知覚は、心理物理学や神経生理学などの研究により、一次視覚野において複数の情報を統合することにより実現していることが報告されている [19]。また、知覚の恒常性は大きさのみではなく、形や色などにも存在する [20]。

大きさ恒常性が手などの自己の身体において正確に行われているかを調べることで、その身体的位置や大きさを正確に知覚しているかを間接的に知ることが可能である。

1.6 奥行き知覚



図 1.2 大きさ恒常性のイメージ

1.6 奥行き知覚

人間が対象との距離 (奥行き) を知覚する際に用いる視覚的手がかりとして、両眼視差がある [21, 22].

両眼視差とは、両眼から対象を見た時に、2次元の網膜上において生じる対象の像の差異のことである [23]. 眼球ごとに見ている対象の像に差異が生まれる理由は、両眼間に距離があり、対象を見ている眼球の位置が異なるためである [24]. 両眼視差の検出は、脳内における一次視覚野 (V1) において行われている [25, 26]. この両眼視差は、見ている対象との距離に応じて小さくなるため、対象との距離が大きくなるほど、距離の弁別が困難となる.

視角とは、2次元の網膜上における対象の大きさである. 見ている対象が離れた位置にある場合、視角が小さくなりやすく、近くにある場合は視角が大きくなりやすいという特性を利用し、距離の知覚に利用されている.

1.7 本研究の目的

1.4 より，RHI に関する研究は多く行われているが，視覚上の身体位置のずれの向きは一方向のみで一定となっており，自己受容感覚ドリフトの向きも同方向で一定である．そのため，視覚上の身体位置のずれの向きが位置に応じて変化する場合においても，自己身体化が生じ，自己受容感覚のドリフトの向きも変化するかは明らかでない．VR 空間上での活動では，バーチャルな手の動きを大きく見せ，自身の手が届く範囲を拡大させることで，動きをダイナミックにすることがあり得る．実際に現実の手が伸びているのではないため，このような活動時には，現実の手の位置と VR 空間上の手の位置にずれが生じ，手の位置に応じて，ずれの向きが変化することになる．例として，手の左右の動きを大きくした場合，図 1.3 のように，中央を基点とした手の位置に応じて，視覚上の身体位置のずれの向きが変化する．

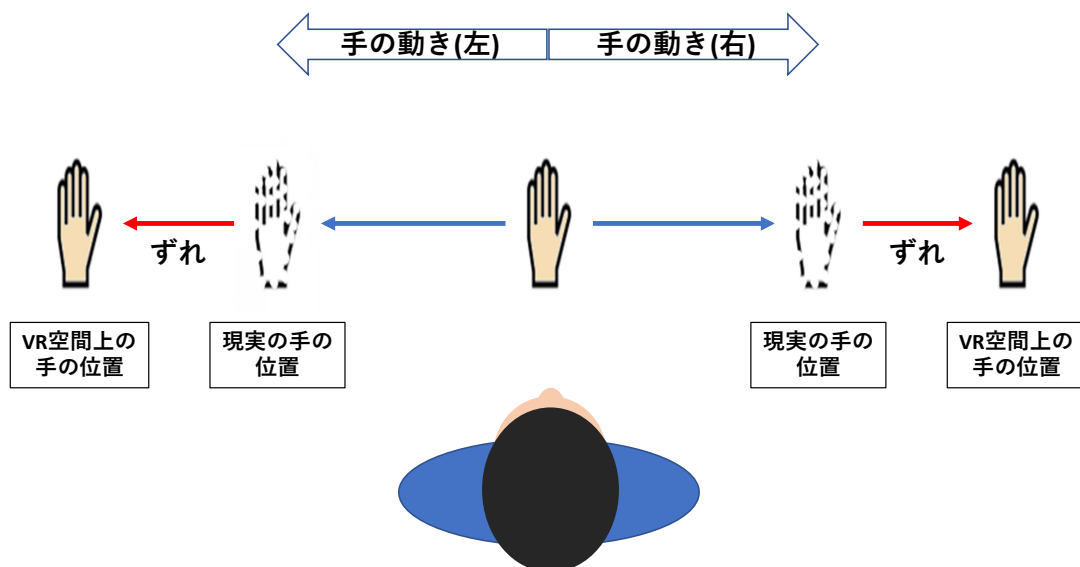


図 1.3 手の位置に応じた視覚上の身体位置のずれの向きの変化の例

1.7 本研究の目的

この身体位置のずれの向きの変化に応じて、自己受容感覚ドリフトの向きも変化することを示すことができれば、人間はVR空間で操作する身体に対して、より柔軟な適応が可能であることを示すことにつながる。

また、VR空間上での活動では、VR空間上のオブジェクトを自身の手で触れずに位置を動かすことがあり得る。例として、VR空間上で自身の手が届かない位置にあるディスプレイを動かすことがあり、これにより、VR空間での活動の利便性を向上させることが考えられる。このような活動時には、操作する身体とオブジェクトの位置が同期して変化し、相対的位置が一定となるが、現実では起こりづらい現象である。相対的位置情報が身体知覚に与える影響に関する研究は少なく、このVR空間特有といえる身体との相対的位置の情報が、身体の位置知覚や大きさ知覚に影響を与える場合、VR空間上での活動に支障をきたすことが考えられる。

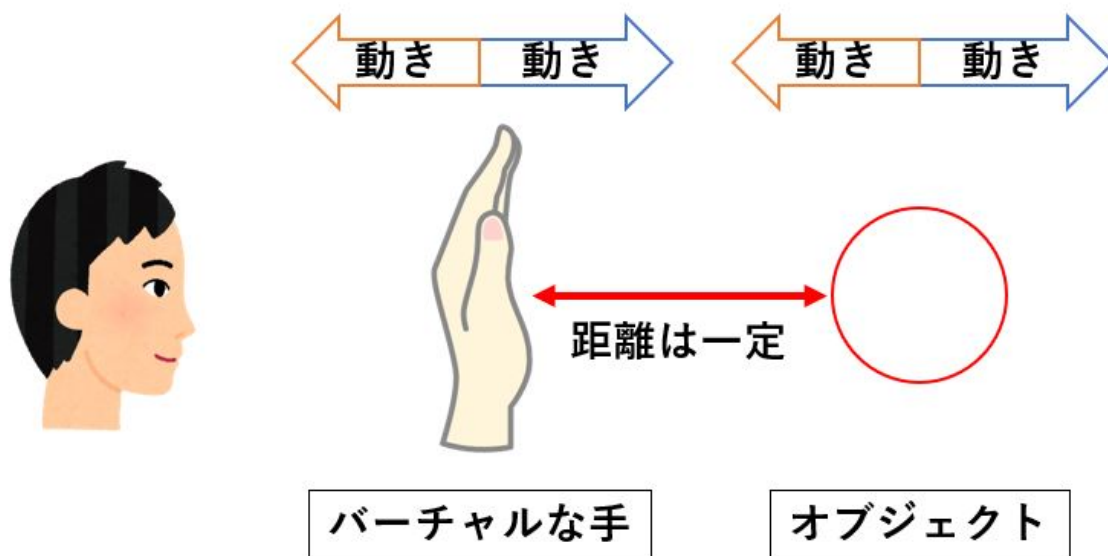


図 1.4 自身の手で触れずにオブジェクトの位置を動かすイメージ

そこで本研究では、VR空間上における手の位置の視覚フィードバックを操作し、手の動きを大きく見せることによって生じる視覚上の身体位置のずれの向きの変化が、身体位置の知覚に及ぼす影響について検討した。また、VR空間特有の相対的位置情報が、

1.7 本研究の目的

身体の位置知覚と大きさ知覚に及ぼす影響についても検討した。実験は3種類に分けられ、実験1では左右、実験2では前後の手の動きによる視覚上の身体位置のずれの影響、実験3では相対的位置情報の影響を検討した。実験1, 2において、左右方向と前後方向の身体位置のずれの影響を検討した理由は、網膜上における身体位置のずれの変化が大きい左右方向のずれと、比較的小さい前後方向のずれの間で、同様の効果が見られるか、あるいは違いが見られるかを明らかにするためである。

第 2 章

実験方法

2.1 実験 1(左右の手の動きによる位置ずれの影響の検討)

2.1.1 実験参加者

各実験の参加者は正常な視力(矯正含む)を有する学生 12 名であり, 全員右利きであった。実験で動かす手は左手であった。

2.1.2 実験環境及び視覚刺激

視覚刺激の呈示には, ヘッドマウントディスプレイ (VIVE Pro, HTC 社) を用いた。また, 実験参加者の手の位置の取得のために, センサ (VIVE Tracker, HTC 社) を左手に装着した。

実験において, 参加者には図 2.2 のようなバーチャルな左手を VR 空間上で呈示した。

2.1 実験 1(左右の手の動きによる位置ずれの影響の検討)

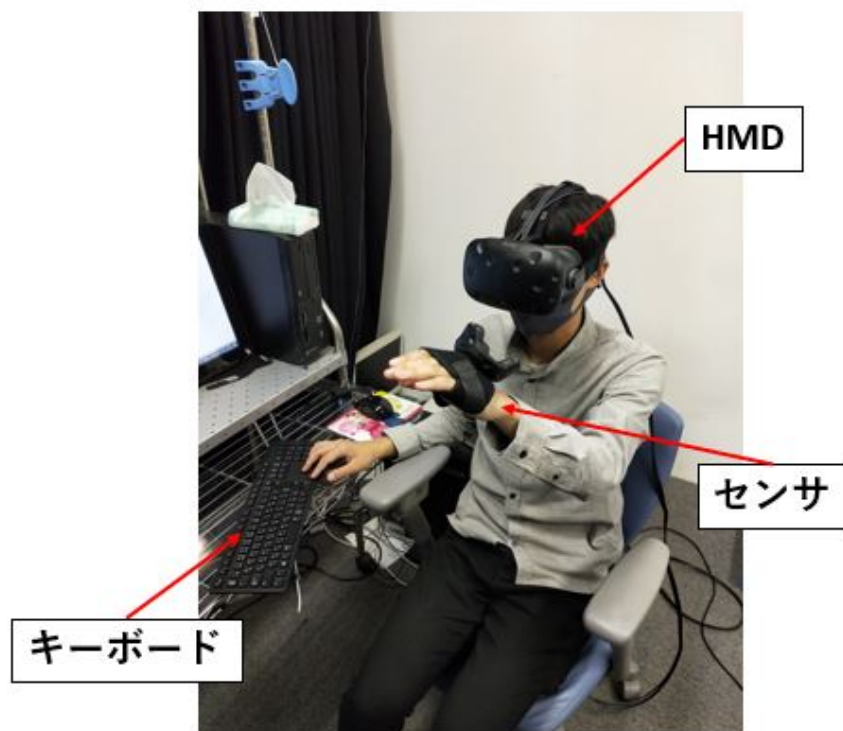


図 2.1 参加者の体勢 (実験 1, 2)

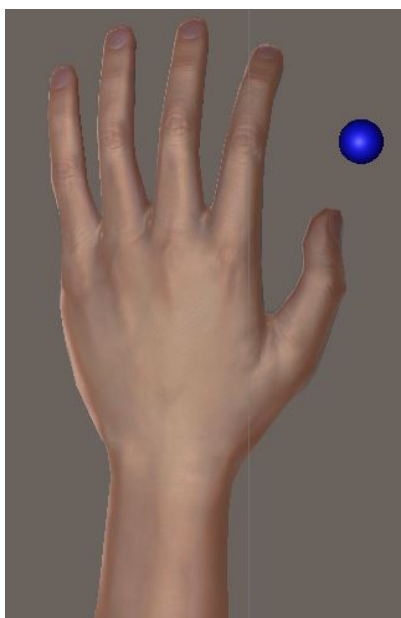


図 2.2 VR 空間上で操作する左手と青い球体

2.1 実験 1(左右の手の動きによる位置ずれの影響の検討)

2.1.3 実験条件

実験条件は、左手の身体位置にずれがある条件とない条件の 2 条件であった。身体位置のずれあり条件では、VR 空間上で実験参加者の頭部から前方 30 cm を中心とし、左右の手の動きを 1.5 倍大きくした。後述の学習課題において、左手は中心から水平方向に最大 20 cm 動かすため、身体位置のずれの大きさは最大 10 cm であった。ずれなし条件では、現実の手の位置と VR の手の位置を一致させた。

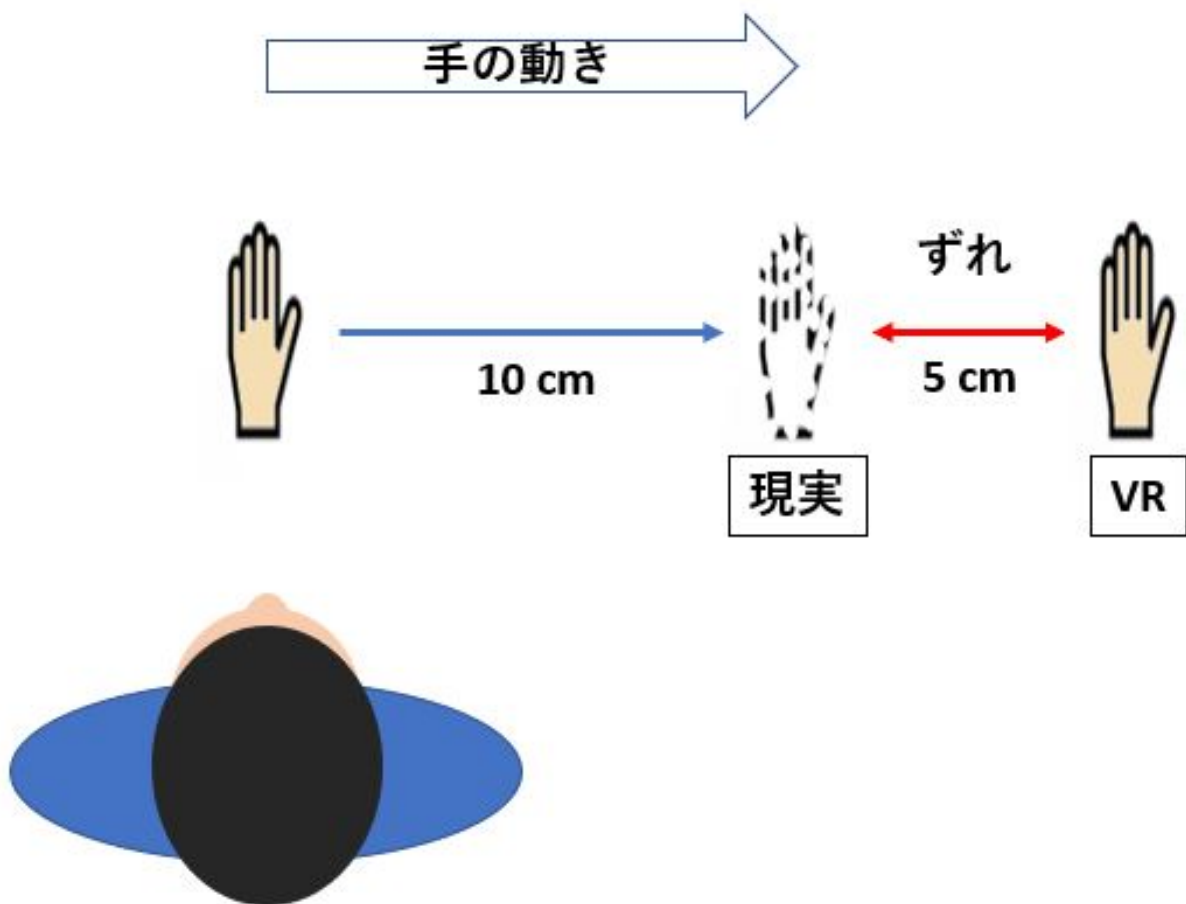


図 2.3 左右方向の身体位置のずれのイメージ

2.1 実験 1(左右の手の動きによる位置ずれの影響の検討)

2.1.4 手続き

参加者は着座した状態で、VR 空間上での左手の動きに慣れることを目的とした学習課題を行った。課題の内容は、図 2.2 のように、前方のランダムな位置に出現する青い球体に対し、バーチャルな左手を到達させる作業を 50 回行うことであった。青い球体の出現位置は、頭部の前方 30 cm の前額平行面上における、縦 20 cm、横 40 cm の領域であった。

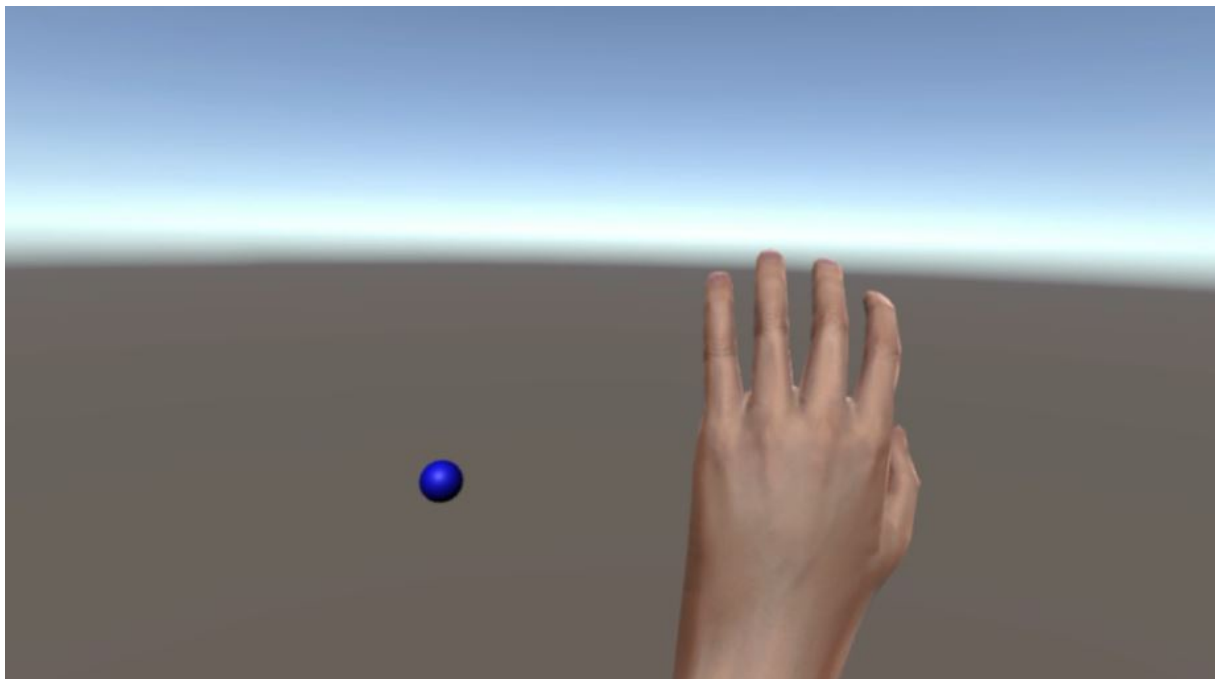


図 2.4 学習課題時の VR 空間 (実験 1)

学習課題の終了後、現実の身体位置と知覚された身体位置のずれの大きさと向きを計測するために、身体位置判断課題を行った。課題の内容は、前方の 7 つのいずれかの位置にランダムに出現する赤い球体に、自身の左手の位置を合わせることであった。赤い球体の出現位置は、頭部の前方 30 cm の前額平行面上において、左右に ± 10 , ± 6.67 , ± 3.33 cm だけずれた 6 か所、および正面の 0 cm の計 7 か所とした。以降、赤い球体の出現位置を、中心から左の 3 箇所は「-」、右の 3 か所を「+」で表現する。参加者は、位置合わせが完了したら、次の試行に移った。この時、VR 空間上では左手が見えてい

2.1 実験 1(左右の手の動きによる位置ずれの影響の検討)

ない状態とし、参加者は自身の自己受容感覚を頼りに身体位置判断課題を行った。赤い球体は7か所の位置に各3回ずつ出現し、計21試行を行った。

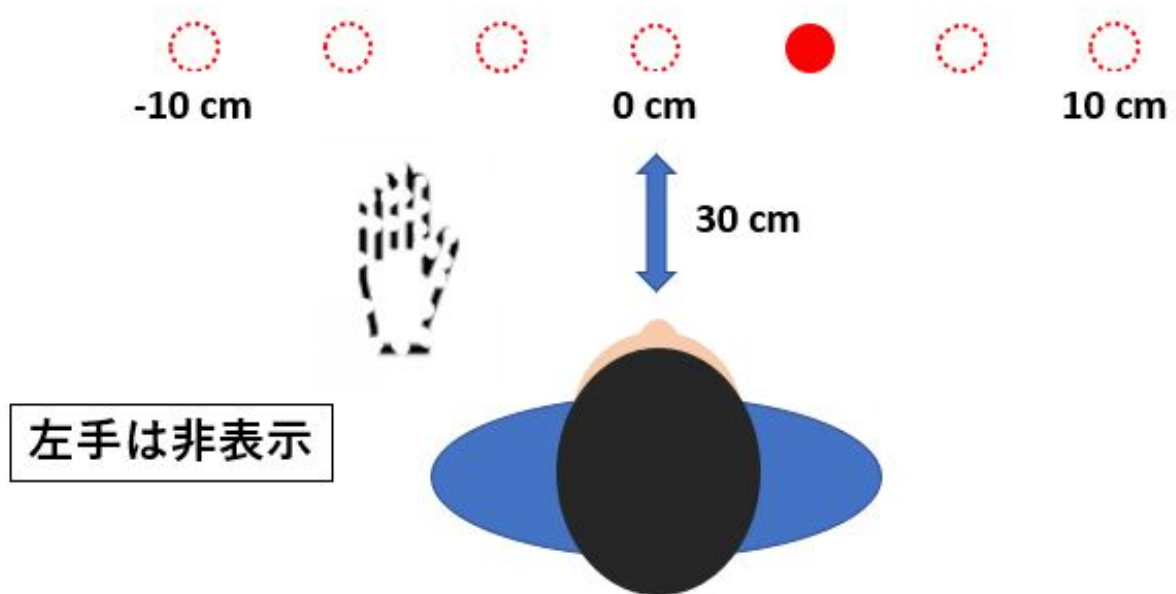


図 2.5 赤い球体の出現位置 (実験 1)

この学習課題と身体位置判断課題を1セットとし、参加者が身体位置のずれの有無の各条件で5セットずつ繰り返した。そのため、各条件の7か所の位置ごとの身体位置判断の試行数は15試行であった。ずれの有無の条件は、それぞれ日を分けて行い、条件の順は参加者間でカウンターバランスを取った。

2.2 実験 2(前後の手の動きによる位置ずれの影響の検討)

2.2 実験 2(前後の手の動きによる位置ずれの影響の検討)

2.2.1 実験参加者

実験参加者は実験 1 と同じ 12 名である。実験 1 と同様に、実験で動かす手は左手であった。

2.2.2 実験環境及び視覚刺激

実験 1 と同様に、ヘッドマウントディスプレイ (VIVE Pro, HTC 社) とセンサ (VIVE Tracker, HTC 社) を用いた。参加者に呈示するバーチャルな左手も、実験 1 と同様に図 2.2 の左手であった。

2.2.3 実験条件

実験条件は、左手の身体位置にずれがある条件とない条件の 2 条件であった。身体位置のずれあり条件では、VR 空間上で実験参加者の頭部から前方 30 cm を中心とし、前後の手の動きを 1.5 倍大きくした。後述の学習課題において、左手は中心から垂直方向に最大 20 cm 動かすため、身体位置のずれの大きさは最大 10 cm であった。ずれなし条件では、現実の手の位置と VR の手の位置を一致させた。

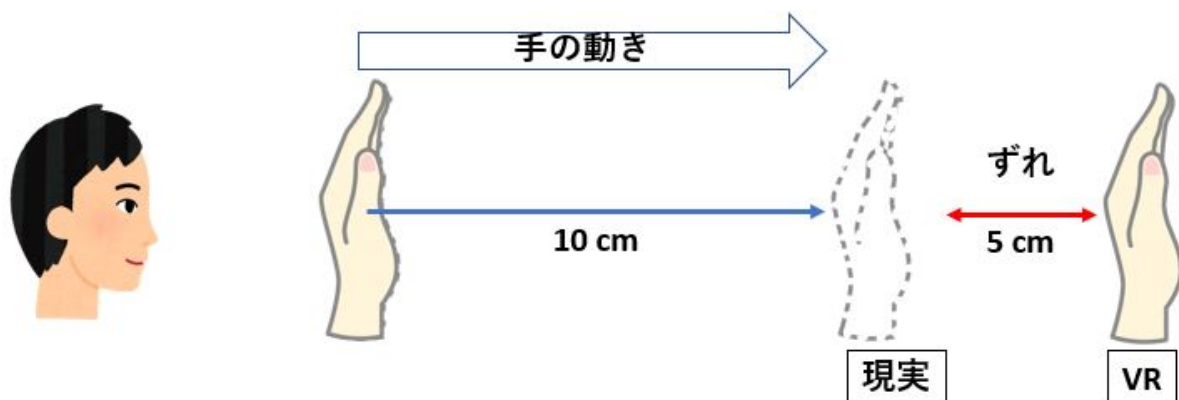


図 2.6 前後方向の身体位置のずれのイメージ

2.2 実験 2(前後の手の動きによる位置ずれの影響の検討)

2.2.4 手続き

参加者は着座した状態で、実験 1 と同様に、VR 空間上での左手の動きに慣れることを目的とした学習課題を行った。青い球体の出現位置は、頭部の前方 30 cm を中心とし、縦 20 cm, 横 20 cm, 奥行き 40 cm の領域であった。

学習課題の終了後、実験 1 と同様に、身体位置判断課題を行った。赤い球体の出現位置は、頭部の前方 30 cm を中心とし、前後に ± 10 , ± 6.67 , ± 3.33 cm だけずれた 6 か所、および基準点の 0 cm の計 7 か所とした。以降、赤い球体の出現位置を、中心から手前の 3 箇所は「-」、奥の 3 か所を「+」で表現する。参加者は、位置合わせが完了したら、次の試行に移った。この時、VR 空間上では左手が見えていない状態とし、参加者は自身の自己受容感覚を頼りに身体位置判断課題を行った。赤い球体は 7 か所の位置に各 3 回ずつ出現し、計 21 試行を行った。

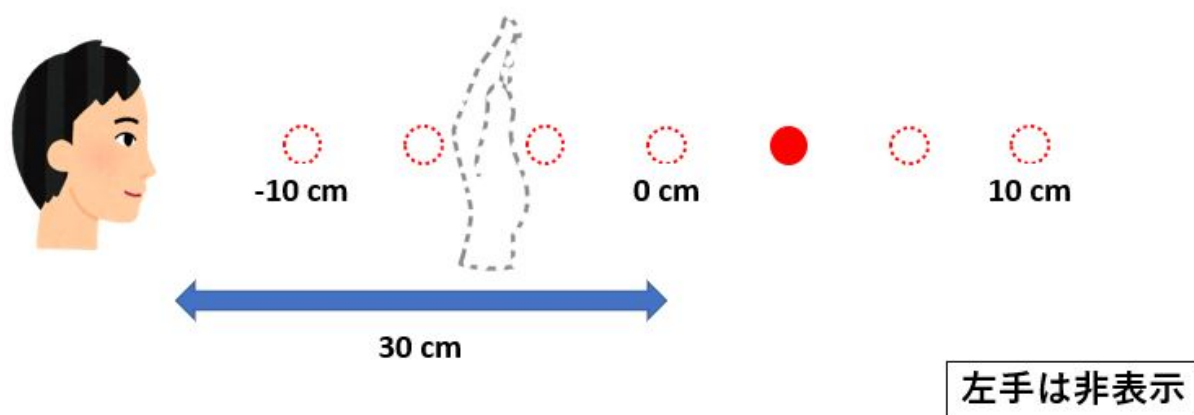


図 2.7 赤い球体の出現位置 (実験 2)

この学習課題と身体位置判断課題を 1 セットとし、参加者が身体位置のずれの有無の各条件で 5 セットずつ繰り返した。そのため、各条件の 7 か所の位置ごとの身体位置判断の試行数は 15 試行であった。ずれの有無の条件は、それぞれ日を分けて行い、条件の順は参加者間でカウンターバランスを取った。

2.3 実験 3(相対的位置情報の影響の検討)

2.3 実験 3(相対的位置情報の影響の検討)

2.3.1 実験参加者

実験参加者は正常な視力 (矯正含む) を有する学生 12 名であり, 全員右利きであった。実験で動かす手は左手であった。

2.3.2 実験環境及び視覚刺激

視覚刺激の呈示には, ヘッドマウントディスプレイ (Oculus Rift, Oculus 社) を用いた。また, 実験参加者の手の位置の取得のために, センサ (Oculus Touch, Oculus 社) を左手に装着した。



図 2.8 参加者の体勢 (実験 3)

2.3 実験 3(相対的位置情報の影響の検討)

実験において、参加者には図 2.9 のようなバーチャルな左手を VR 空間上で呈示した。また、バーチャルな左手との相対的位置情報を操作するために、ランダムモザイクな背景を用いた。バーチャルな左手の位置に応じて、背景の位置を動かすことにより、相対的位置情報を操作した。バーチャルな左手の大きさは、現実の左手と同程度の大きさに設定した。また、この左手の大きさは、参加者の頭部と左手の距離に比例して、移動距離 1 cm 毎に、0.20, 0.13, 0.07 cm だけ拡大あるいは縮小、または変化しないようにした。



図 2.9 VR 空間上で操作する左手

2.3 実験 3(相対的位置情報の影響の検討)

2.3.3 実験条件

実験条件は、左手の位置手掛かりとしての自己受容感覚情報の有無の 2 条件、相対的位置情報の操作の 3 条件を組み合わせた計 6 条件であった。

自己受容感覚情報ありの条件では、現実の手と VR 空間上の手の位置と動きが同期しており、バーチャルな左手を自身の左手で動かした。自己受容感覚情報なしの条件では、VR 空間上の左手の位置の操作は、コントローラのジョイスティックで行った。自己受容感覚情報の有無を実験条件とした理由は、VR 空間上で操作するバーチャルな身体的位置を知覚する際に、その位置手掛かりとして自己受容感覚情報が利用できる場合、その知覚の正確さが向上することが先行研究により示されているため、後述する相対的位置情報の操作による身体知覚への影響がある場合にも、同様に身体知覚の正確さを向上させることができるかを検討するためである。

相対的位置情報の操作の条件は、背景の位置が動かない「固定」、背景が左手のモデルの動きを追従する「同方向」、背景がモデルの動きと逆に動く「反対方向」という 3 つの条件であった。この 3 条件を実験条件とした理由は、VR 空間上において発生する相対的位置の関係として、バーチャルな左手でオブジェクトを動かす際の位置関係である同方向条件、オブジェクトが動かない際の位置関係である固定条件が考えられるからである。また、反対方向条件は、VR 空間上の活動においても起こりづらいと考えられるが、参加者にとって経験のない相対的位置関係が、身体知覚に及ぼす影響を検討することも重要であると考えたため、実験条件とした。

2.3 実験 3(相対的位置情報の影響の検討)

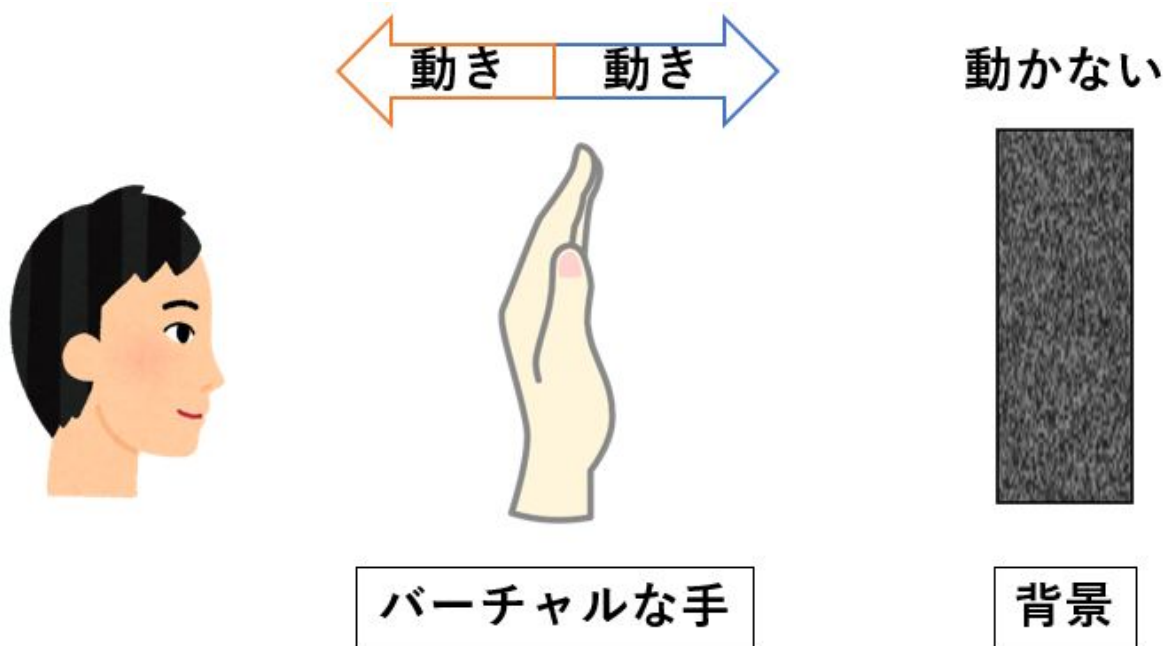


図 2.10 「固定」条件時の背景の動きのイメージ

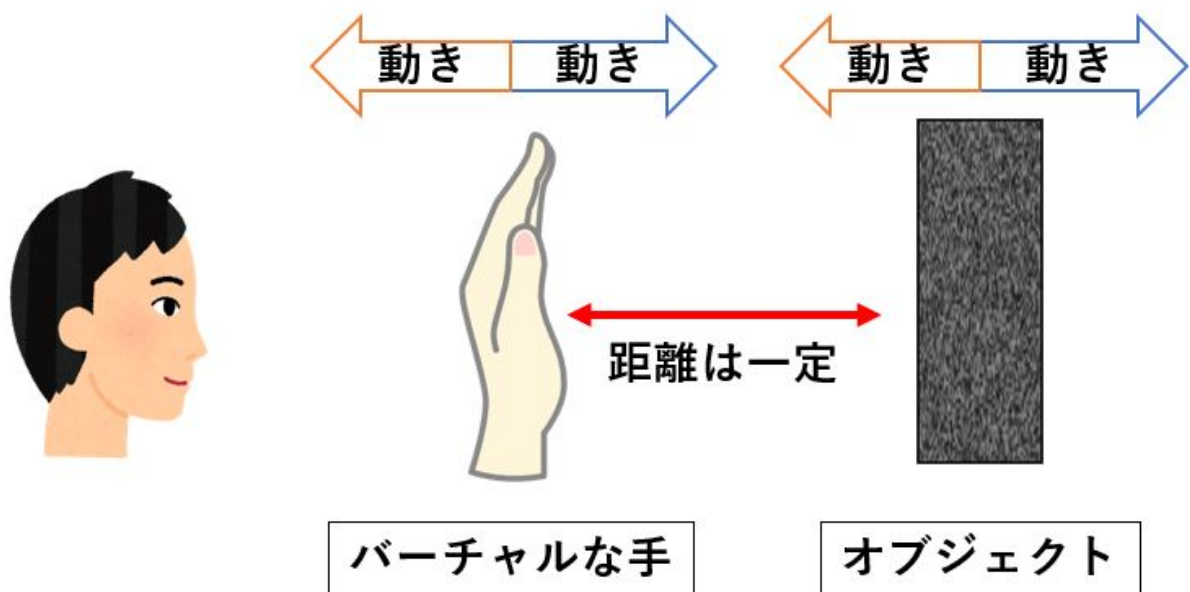


図 2.11 「同方向」条件時の背景の動きのイメージ

2.3 実験 3(相対的位置情報の影響の検討)

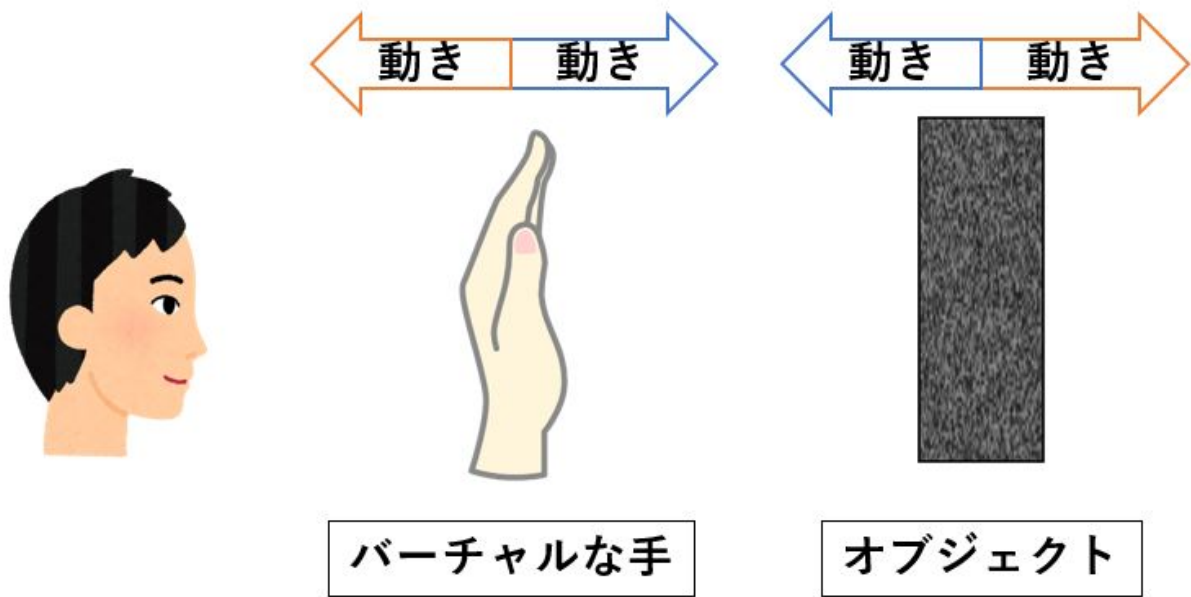


図 2.12 「反対方向」条件時の背景の動きのイメージ



図 2.13 参加者から見えている VR 空間

2.3 実験 3(相対的位置情報の影響の検討)

2.3.4 手続き

参加者には VR 空間上でモデルを図 2.14 のように前後に動かし、モデルが頭部に近づいたときに拡大しているか、縮小しているかを 2 択で判断してもらった。バーチャルな左手の初期位置は頭部の前方 30 cm とし、その前後 8 cm を左手の移動範囲とした。自己受容感覚情報あり条件では、バーチャルな左手が移動範囲から出た場合にコントローラを振動させることで、移動範囲の統制した。自己受容感覚情報なし条件では、左手が移動範囲内でしか動かないようにした。参加者には必ず左手を最低 1 往復させた後に、2 択の判断をしてもらった。

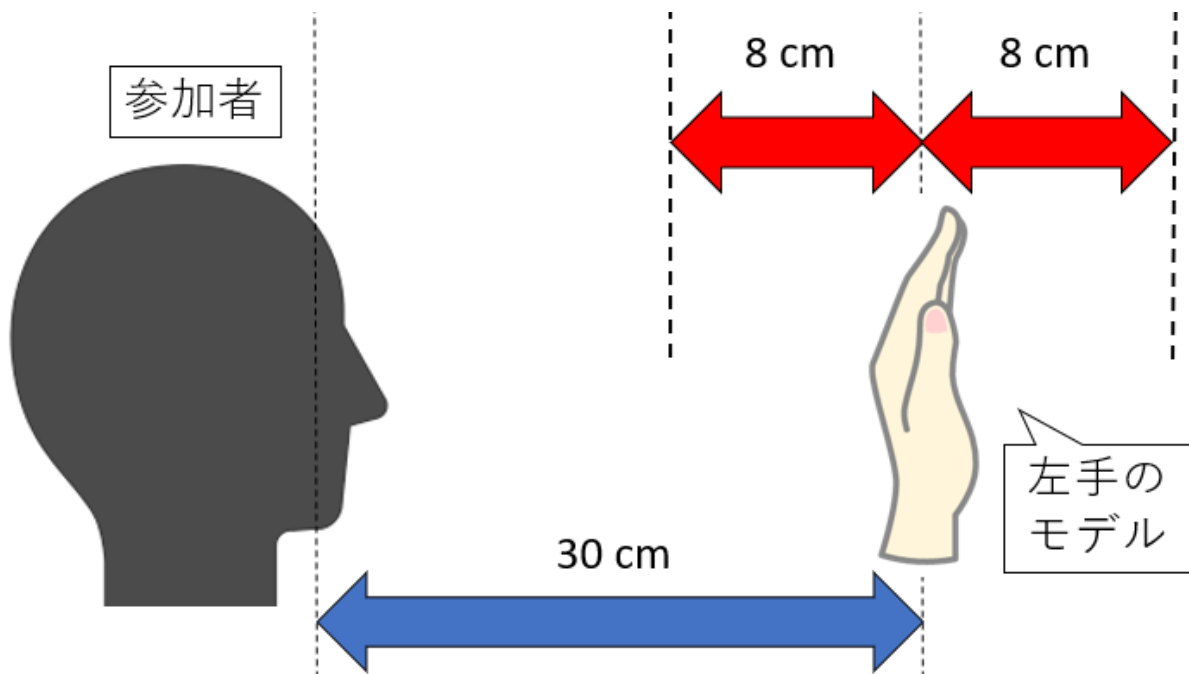


図 2.14 VR 空間上のバーチャルな左手の動きのイメージ

ここまですべて 1 試行とし、各条件で 7 水準の大きさ変化量ごとに 20 試行を行うため、1 日 420 試行を 2 日間行った。条件の順は、自己受容感覚の有無の順は順序効果を考え、カウンターバランスをとった。

第3章

実験結果

3.1 実験1(左右の手の動きによる位置ずれの影響の検討)

知覚される身体位置のずれとして、赤い球体と左手のずれを用いた。ずれの有無の各条件で、赤い球体で示す7つの位置での計測値の平均を算出した。それらの平均値に対して、赤い球体が中央正面に出現したときを基準点として差分を求め、中央以外の残り6つの位置での、手の位置の知覚のずれの向きと大きさを算出した。

中央との差分を指標とした理由は、トラッカーの取付位置のずれの影響を取り除くことと、中央の位置においても生じている参加者ごとの手の位置の知覚のずれを取り除くためである。トラッカーの取り付けを図3.1のように行っており、この取り付け位置の参加者ごとのずれが、左手の位置の計測に影響を与えることが考えられる。そのため、中央(0 cm)との差分を各位置における指標とすることにより、トラッカーの取り付け位置のずれの影響を無くしている。また、図3.2から分かるように、左手の知覚位置のずれが中央の位置においても生じている。図3.2は、0 cmの位置における知覚される身体位置のずれを表している。中央の位置における知覚位置のずれは、ずれの有無の両条件とも、0 cmとなることが予測されるが、ばらつきが生じているため、人によって知覚される中心位置が偏りが生じる可能性が考えられる。本研究では、自己受容感覚ドリフトの方向が、中心を基準に前後・左右の位置によって変化するかを検討することを目的としている。そのため、参加者ごとの知覚上の中心位置を基準に、自己受容感覚による身体位置の知覚位置をとる必要があると考え、中央との差分を指標として用いた。

3.1 実験 1(左右の手の動きによる位置ずれの影響の検討)



図 3.1 トラッカーの取り付け位置

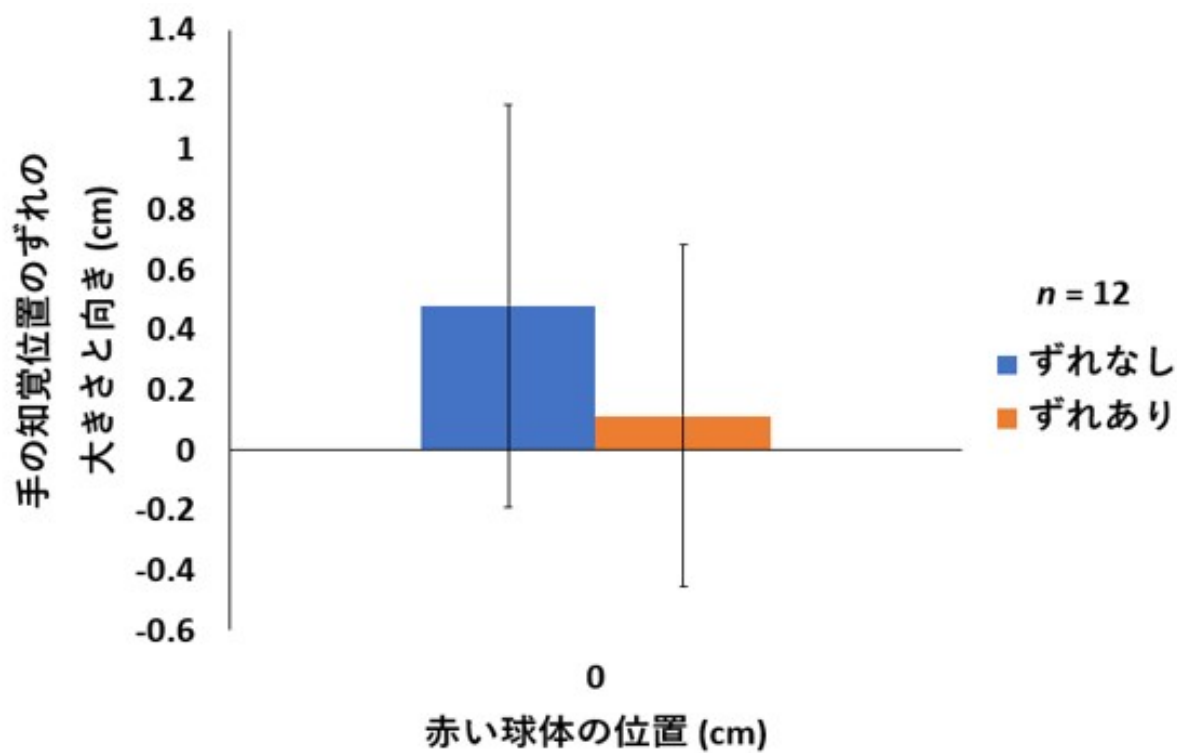


図 3.2 0 cm の位置における知覚される身体位置のずれ

3.1 実験 1(左右の手の動きによる位置ずれの影響の検討)

12 名分の参加者のデータを用いて、身体位置のずれの有無と赤い球体の位置の 2 要因の分散分析を行った。その結果、交互作用が有意となった ($F(5, 55) = 9.27, p = .00, \eta_G^2 = 0.10$)。単純主効果検定を行った結果、赤い球体が -10 cm, $+6.67$ cm, $+10$ cm の位置にある場合に、身体位置のずれの有無の条件間で有意差が認められた (-10 cm: $F(1, 11) = 9.29, p = .01, \eta_G^2 = 0.11$, $+6.67$ cm: $F(1, 11) = 9.10, p = .01, \eta_G^2 = 0.15$, $+10$ cm: $F(1, 11) = 4.85, p = .0498, \eta_G^2 = 0.08$)。赤い球体の各位置における手の知覚位置のずれの結果を図 3.3 に示す。図 3.3 のグラフは、値が「-」の時は、赤い球体の位置に対して、左側に左手の位置を合わせており、「+」の時は、右側に合わせていることを表している。

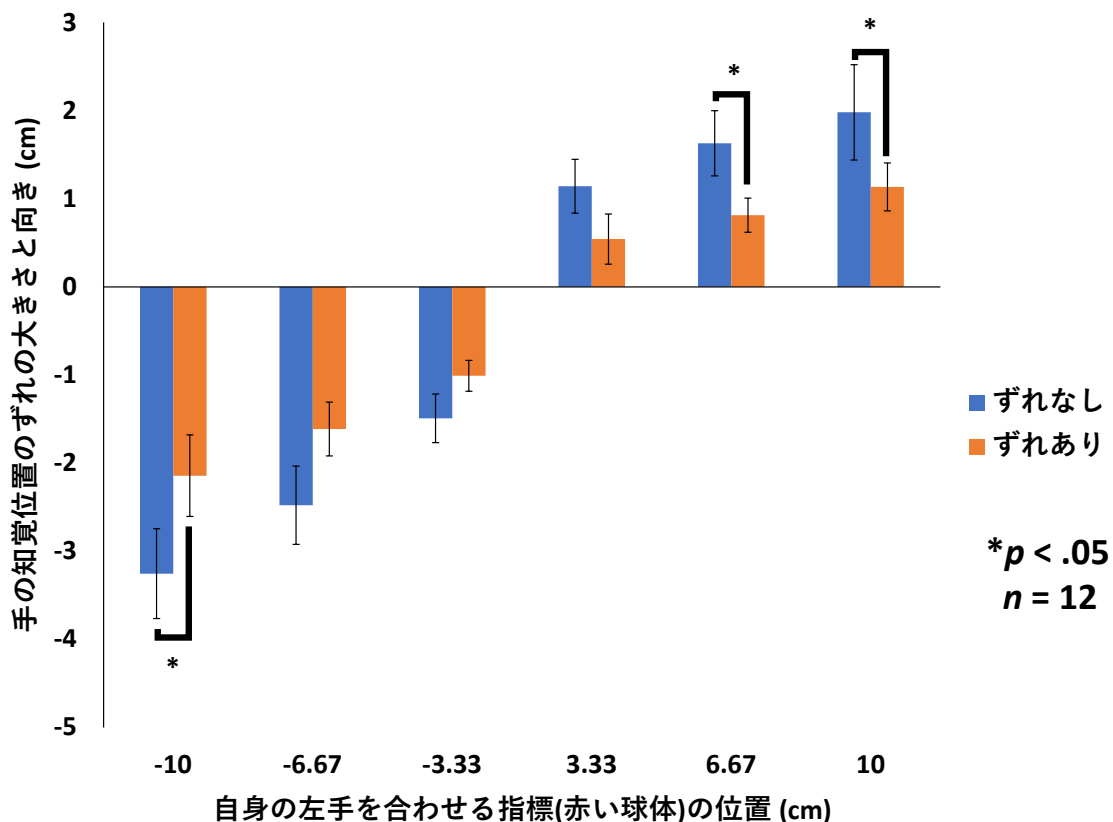


図 3.3 自身の左手を合わせる指標 (赤い球体) の各位置における手の知覚位置のずれ (エラーバーは標準誤差を示す)

3.1 実験 1(左右の手の動きによる位置ずれの影響の検討)

両条件において、自身から見て左側に赤い球体がある時のデータの値が「-」であることから、自分の手をより左の位置に合わせており、右側に赤い球体がある時のデータの値が「+」の場合、自分の手をより右の位置に合わせていることになるため、自身の手の動きを過小評価していることが推測される。左手の動きの過小評価が生じた理由としては、VR と現実の身体の違いが影響していることが考えられる。現実の場合、左右に手を動かすと手首が自然に曲がるが、本研究の VR 環境では、図 3.4 のように手首の曲がり方が緩やかとなっている。そのため、VR の手首の曲がり方から、自身の手をそこまで動かしていないと過小評価の判断をした可能性がある。

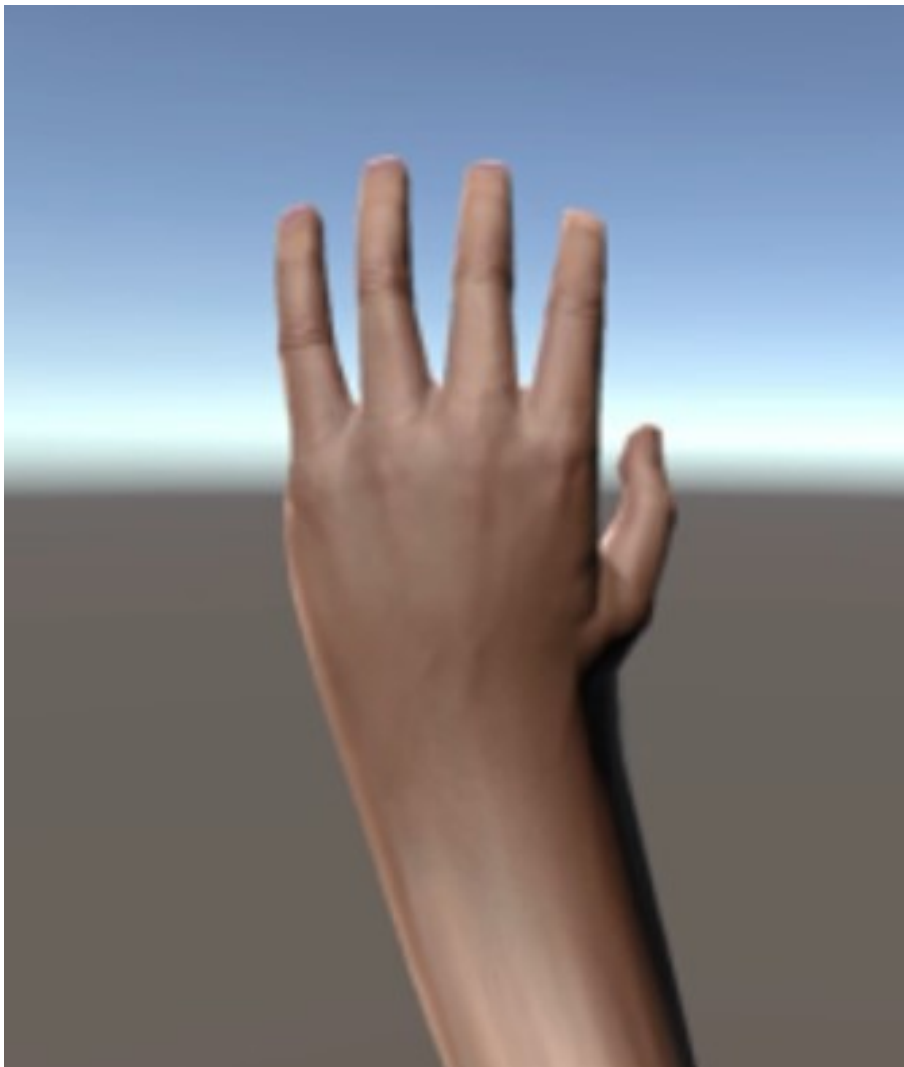


図 3.4 VR 空間における手首の曲がり方

3.1 実験 1(左右の手の動きによる位置ずれの影響の検討)

この過小評価の度合いが、ずれなし条件と比較して、ずれあり条件において減少している場合、手の位置が外側に知覚されていることになる。手の位置が外側に知覚されていることは、「身体位置のずれ」により、自己受容感覚ドリフトが外側の方向に生じていることを示す。つまり、中央を基準にドリフトの方向が変化しているということを示すことになる。

条件間の差分が自己受容感覚ドリフトを表すため、赤い球体の各位置における手の知覚位置のずれの条件間の差分(自己受容感覚ドリフトの向きと大きさ)の結果を図 3.5 に示す。グラフは、ずれあり条件より、ずれなし条件における手の知覚位置が左にある場合は「-」、右にある場合は「+」を示している。結果の図 3.5 において、ずれあり／なしの条件間の差分を示した理由は、ずれなし条件においても身体の知覚位置がシミュレートした位置(赤い球体の出現位置)と大きな乖離(-10 cm の位置において最大 3.25 cm の知覚位置のずれ)があったため、視覚フィードバックによる身体位置の影響を明確化するためである。

3.1 実験 1(左右の手の動きによる位置ずれの影響の検討)

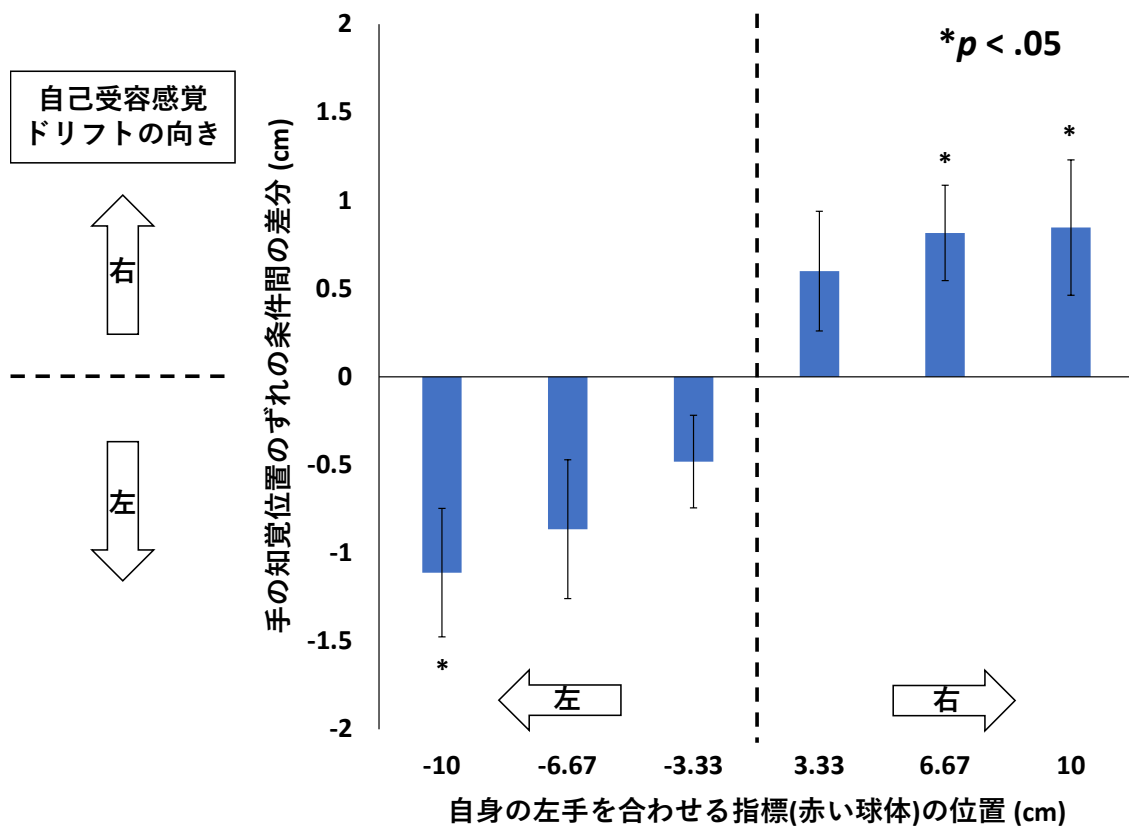


図 3.5 自身の左手を合わせる指標 (赤い球体) の各位置における自己受容感覚ドリフトの向きと大きさ (エラーバーは標準誤差を示す)

2 要因の分散分析により、 ± 10 cm の位置において、手の知覚位置にずれあり／なしの条件間で有意な差が認められ、図 3.5 より、 ± 10 cm の各位置における自己受容感覚ドリフトの向きが異なっていることが分かる。以上のことから、視覚上の身体位置のずれの向きが左右に変化すると、自己受容感覚ドリフトの向きも、その位置に応じて左右に変化することが示された。

3.2 実験 2(前後の手の動きによる位置ずれの影響の検討)

3.2 実験 2(前後の手の動きによる位置ずれの影響の検討)

実験 1 と同様のデータ処理を行い、6 つの位置での、手の位置の知覚のずれの向きと大きさを算出した。

12 名分の参加者のデータを用いて、身体位置のずれの有無と赤い球体の位置の 2 要因の分散分析を行った。その結果、交互作用が有意となった ($F(5, 55) = 5.57, p = .00, \eta_G^2 = 0.06$)。単純主効果検定を行った結果、赤い球体が -10 cm の位置にある場合に、身体位置のずれの有無の条件間で有意差が認められた (-10 cm: $F(1, 11) = 6.92, p = .02, \eta_G^2 = 0.11$)。赤い球体の各位置における手の知覚位置のずれの結果を図 3.6 に示す。図 3.6 のグラフは、値が「-」の時は、赤い球体の位置に対して、手前に左手の位置を合わせており、「+」の時は、奥に合わせていることを表している。

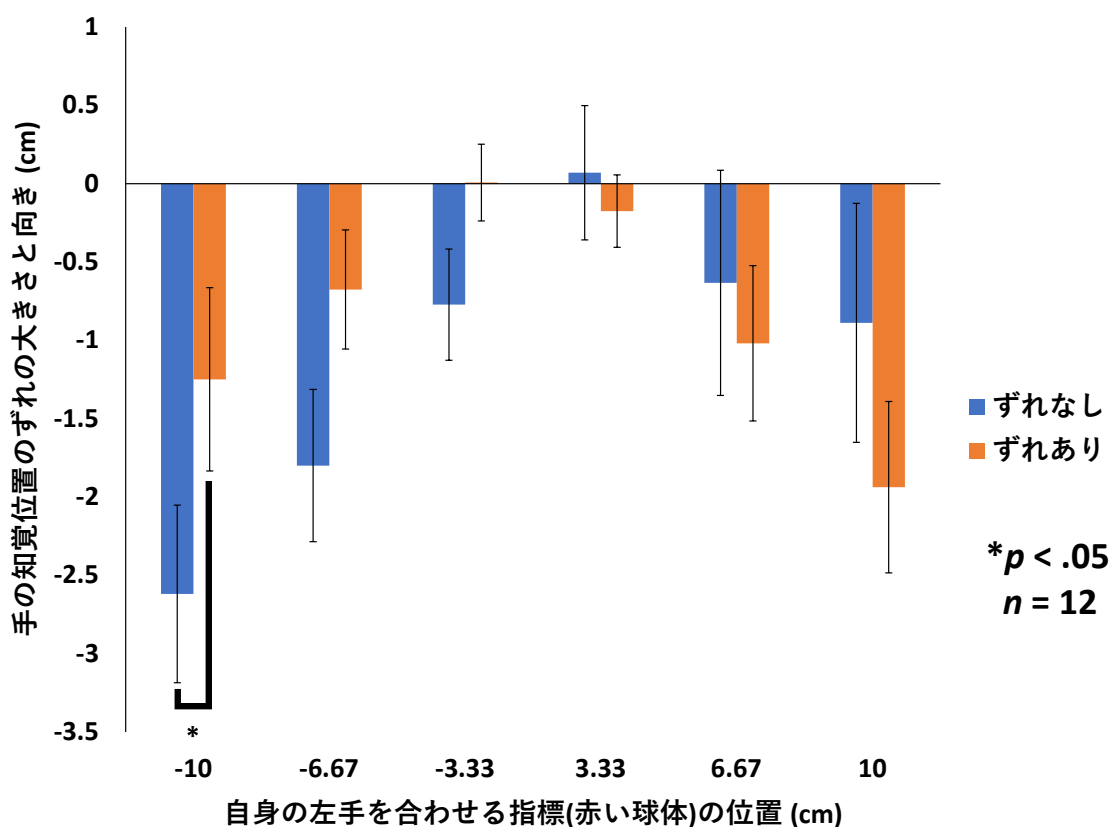


図 3.6 自身の左手を合わせる指標 (赤い球体) の各位置における手の知覚位置のずれ (エラーバーは標準誤差を示す)

3.2 実験 2(前後の手の動きによる位置ずれの影響の検討)

両条件において、手前に赤い球体がある時のデータの値が「-」であることから、自分の手をより手前の位置に合わせており、手の動きを過小評価していることが分かる。しかし、奥に赤い球体がある時のデータの値も「-」であることから、自分の手をより手前の位置に合わせており、自身の手の動きを課題評価していることが分かる。手前の位置の赤い球体の網膜上の大きさは、他の位置の球体より比較的大きいため、他の球体との比較により、手前にあるように知覚されたことが、手の動きの過小評価につながったと推測される。逆に、奥の位置の赤い球体の網膜上の大きさは、他の位置の球体より比較的小さいため、他の球体との比較により、手前にあるように知覚されたことが、手の動きの課題評価につながったと推測される。

手前の位置における過小評価の度合いが、ずれなし条件と比較して、ずれあり条件において減少している場合、手の位置が手前に知覚されていることになる。また、奥の位置における課題評価の度合いが、ずれなし条件と比較して、ずれあり条件において増大している場合、手の位置が奥に知覚されていることになる。

実験 1 の結果と同様に、赤い球体の各位置における手の知覚位置のずれの条件間の差分を図 3.7 に示す。グラフは、ずれあり条件より、ずれなし条件における手の知覚位置が手前にある場合は「-」、奥にある場合は「+」を示している。

3.2 実験 2(前後の手の動きによる位置ずれの影響の検討)

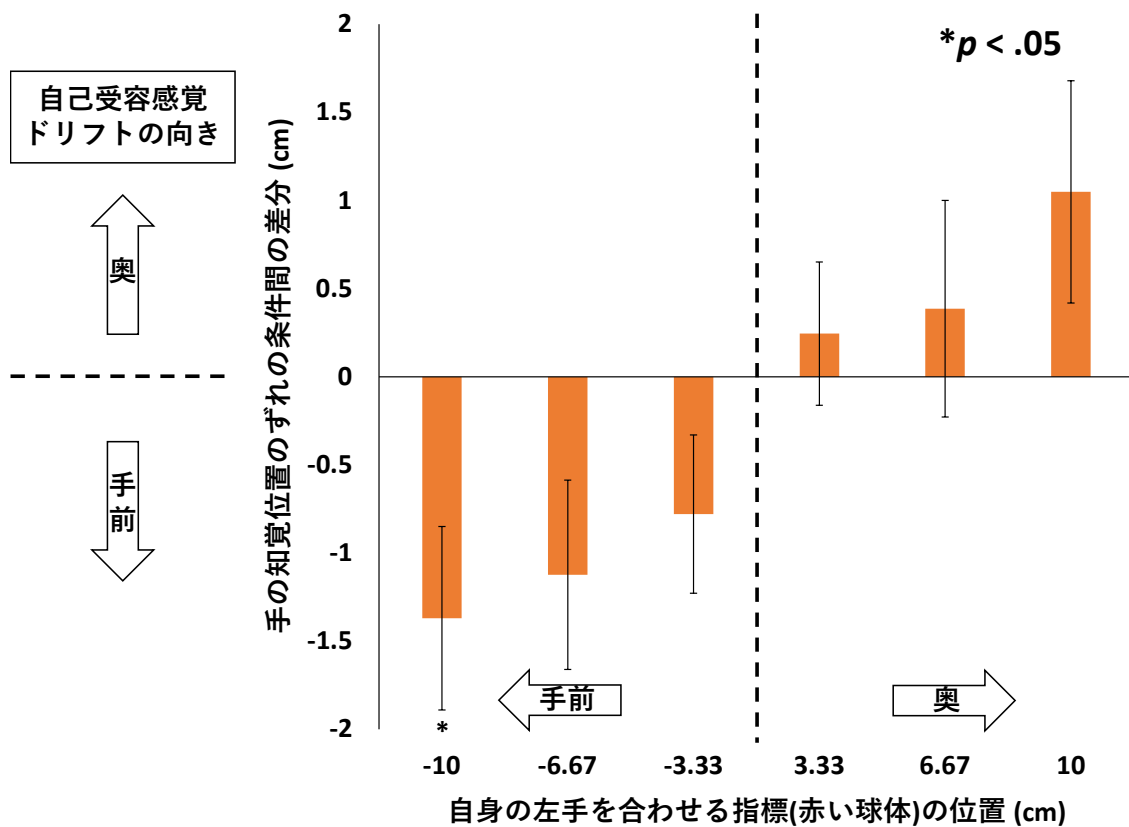


図 3.7 自身の左手を合わせる指標 (赤い球体) の各位置における自己受容感覚ドリフトの向きと大きさ (エラーバーは標準誤差を示す)

手前においては、手前方向のドリフトが生じたものの、奥の条件では個人差が大きく、検定の結果においては有意ではなかった。そのため、視覚上の身体位置のずれの向きに応じて、自己受容感覚ドリフトの向きが変化しているという結果は得られなかった。

3.3 実験 3(相対的位置情報の影響の検討)

3.3 実験 3(相対的位置情報の影響の検討)

参加者の判断結果から各条件での 7 水準の変化量ごとに拡大と判断した反応率を算出し、シグモイド曲線に近似した。その後、その近似曲線の反応率が 50 %となる値を大きさ不変の主観的等価点 (PSE) とした [28]。この主観的等価点が負の値であれば、全体的に左手が拡大して知覚されおり、正の値であれば、縮小して知覚されていることが分かる。主観的等価点の値の絶対値が大きいほど、その知覚が強いため、小さいほど大きさ恒常性が正確であり、身体知覚が正しく行われていることになる。この PSE の値を利用し、各条件の身体知覚への影響を検討する。

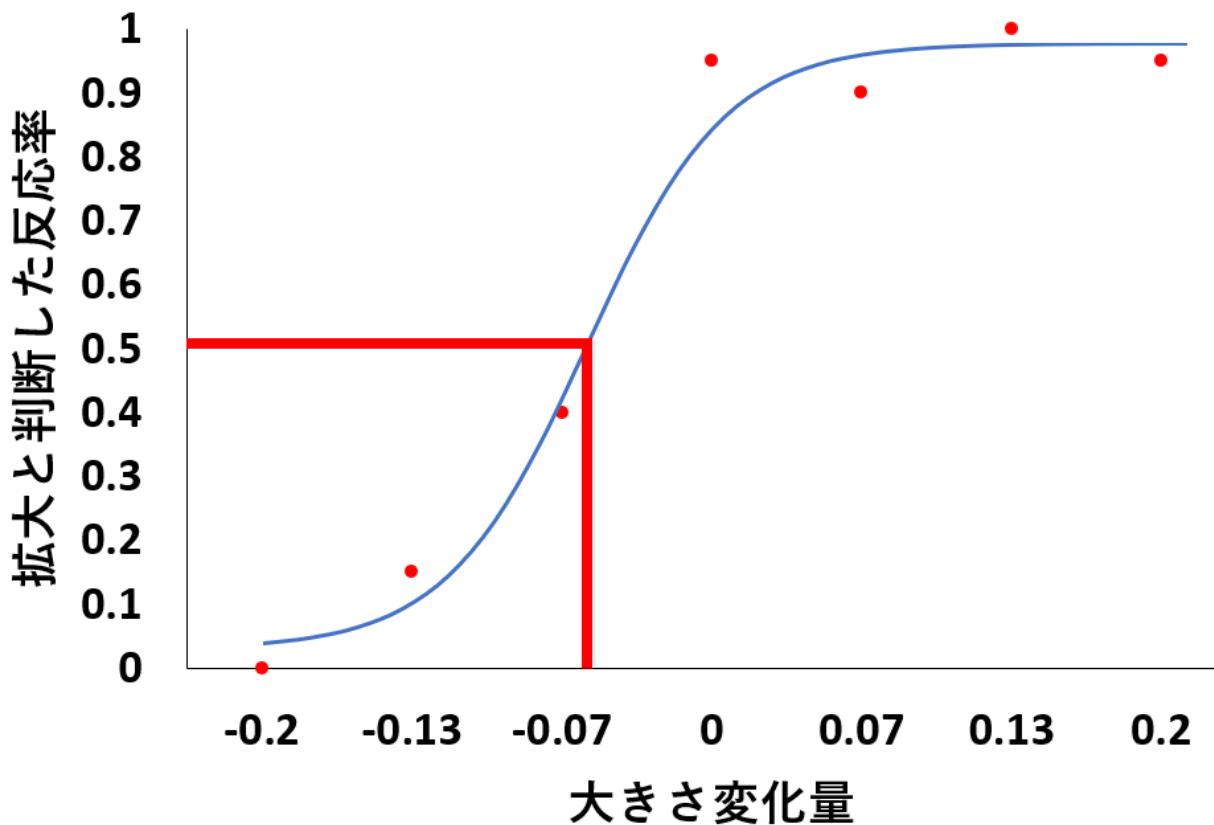


図 3.8 PSE の算出方法

3.3 実験 3(相対的位置情報の影響の検討)

算出した PSE の値を用いて、自己受容感覚情報の有無と相対的位置情報の操作の 2 要因の分散分析を行った。その結果、自己受容感覚情報の有無の主効果が有意であった ($F(1, 11) = 7.56, p = .00, \eta_G^2 = 0.15$)。

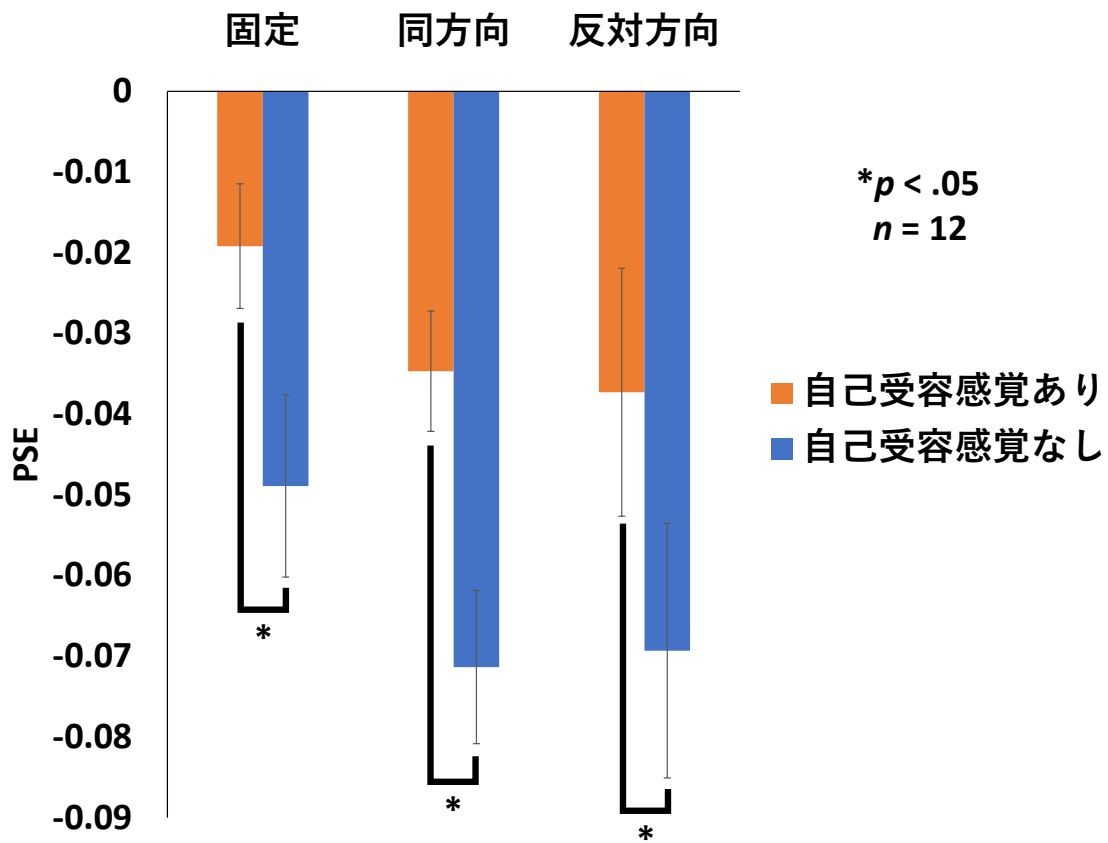


図 3.9 実験 3 の結果

第4章

考察

4.1 実験1(左右の手の動きによる位置ずれの影響の検討)

実験1の結果、視覚上の身体位置のずれの向きが左右に変化する場合、自己受容感覚ドリフトの向きも左右に変化することが示された。なお、 ± 3.33 cm、 -6.67 cmの赤い球体の位置において、条件間で有意な差が認められなかった。これらの位置では、学習課題時の視覚上の身体位置のずれの大きさが小さかったことが原因と考えられる。また、全ての指標の位置において、知覚位置のずれの条件間の差分の大きさが、視覚上の身体位置のずれの大きさと比較して小さかったことも原因として考えられる。ただし、 ± 10 cmの条件では効果が見られたため、本実験のような短時間の学習課題においても方向に応じたドリフトが生じることは明らかとなった。

4.2 実験2(前後の手の動きによる位置ずれの影響の検討)

実験2の結果、視覚上の身体位置のずれの向きが前後に変化する場合、自己受容感覚ドリフトの向きが変化するかは明確にならなかった。しかし、図3.7から、実験1の結果と同様に、視覚上の身体位置のずれの向きが変化する中央を基準に、知覚位置のずれの向きが変化している傾向が見られる。正面の位置でずれの方向が変化する左右のずれより、ずれの方向が変化する位置が判断しづらい前後方向のずれの場合においても、同様に知覚位置のずれの向きが変化している傾向が見られており、前後方向のずれにおいても、ずれの方向に応じた影響が生じていることが推測される。実験2では、参加者の

4.3 実験 3(相対的位置情報の影響の検討)

身体を中心との距離が近い -10 cm の位置において条件間で知覚位置に差が生じ、参加者との距離が比較的遠い $+10$ cm の位置では明確な差が認められなかった。特に遠い位置で明確な差が見られなかった理由として、手の位置が遠くなるほど網膜上での大きさの変化と両眼視差の変化が小さくなり、視覚フィードバックの操作の効果が小さくなったことが考えられる。実際に、 $+10$ cm の遠い位置での身体位置のずれによる視野角・両眼視差の変化の大きさは、 -10 cm の近い位置でのずれによる変化の大きさと比較して、視野角は約 19 %、両眼視差は約 17 パーセントと小さくなっている。また、先行研究より、視覚上の身体位置のずれによる自己受容感覚ドリフトは、身体を中心から離れた位置の場合、ドリフト量が小さくなることが示されている [29,30]。そのため、左手と参加者の身体中心との距離が比較的大きくなることにより、視覚フィードバックの操作の影響が小さくなったことが考えられる。

4.3 実験 3(相対的位置情報の影響の検討)

実験 3 の結果、相対的位置情報の操作内容によらず、自己受容感覚がある方が身体知覚が正確に行われることが分かりました。また、相対的位置情報の操作の条件間において、有意な差が認められなかった。その理由として、操作内容が 3 条件であり、単純であったことが影響していると考えられる。先行研究より、相対的位置情報の有無が身体大きさ恒常性に影響を及ぼすことが示唆されているが、この結果を踏まえると、相対的位置情報の有無は恒常性に影響を与えるが、その操作内容にはよらないということが推測される。

4.4 総合考察

実験 1, 2 の結果から, 人間は, 従来の研究で示されたような一方向のみの身体位置知覚の変化だけでなく, VR 空間で操作する身体の, 現実と異なる動きにも柔軟に適応し, その動きや位置に応じて知覚される身体位置の変化が生じることが推測される. 現在, VR 技術はエンターテインメントとしてだけでなく, 産業や医療などへの応用においても注目されている. そのため, 将来, VR 技術の発展により, VR 空間において人体の手術などの精密な作業を行うことが考えられる. その際に, 操作する身体の動きを調整し, 現実と異なるようにすることがあり得る. 例として, 手の動きを小さくすることにより, 従来より細かな作業が行えるようになることが考えられる. そのような場合においても, 人間は自身の身体のように, バーチャルな身体を操作できる可能性が本研究により示されたといえる.

また, 実験 3 の結果から, 人間は, 操作する身体の位置と大きさを知覚する場合において, VR 空間特有の現実と異なる位置変化をするオブジェクトが身体の近くに存在する場合においても, その位置変化に影響されず, 活動を行えることが推測される. VR 空間上での活動では, 利便性を向上させるために, VR 空間上のオブジェクトを自身の手で触れずに位置を動かすことがあり得る. このような活動時には, 操作する身体とオブジェクトの相対的位置が一定となり, 現実では経験しづらい変化を起こすことになる. そのような場合においても, 操作する身体の位置と大きさの知覚を正確に行い, VR 空間上での活動を行えることが推測される.

4.5 今後の展望

実験1と実験2においては、VR空間における左手の動きを1.5倍にし、現実と異なるようにした場合における身体知覚への影響を検討した。その結果、動きに応じて知覚される身体位置の変化が生じることが推測された。しかし、さらに動きを大きくする(1.5倍以上)場合や、逆に手の動きを小さくする(0.75倍など)場合においても、同様にその動きを学習・適応し、身体知覚が変化するかどうかは検討されていない。手の動きを小さくする場合においても、自己の手のように操作できることを示せば、4.4の総合考察で述べたように、従来より細かな作業ができるようになることが考えられる。そのため、身体の動きの変化量に応じて、身体知覚がどのように変化するか、また、動きを大きくする場合と小さくする場合で身体知覚への影響が異なるかを検討する必要がある。また、両実験の学習課題は短時間で行うことができる簡単なものであった。そのため、課題の内容を長時間行った場合、自己受容感覚ドリフトの大きさがどのように変化するかも検討する必要がある。

第5章

おわりに

本研究では、VR空間上における手の位置の視覚フィードバックを操作し、手の動きを大きく見せることによって生じる視覚上の身体位置のずれの向きの変化が、身体位置の知覚に及ぼす影響について検討した。また、VR空間特有の相対的位置情報が、身体的位置知覚と大きさ知覚に及ぼす影響についても検討した。

実験の結果、ずれの向きが左右に変化すると、自己受容感覚ドリフトの向きも左右に変化することが示された。ずれの向きが前後に変化する場合、自己受容感覚ドリフトの向きが変化するかは明確にならなかった。しかし、ずれの向きが変化する位置を基準に、身体の知覚位置のずれの向きが変化している傾向が見られることから、前後方向のずれにおいても、身体の知覚に影響を及ぼしていることが推測された。このことから、人間は、従来の研究で示されたような一方向のみの身体位置知覚の変化だけでなく、VR空間で操作する身体、現実と異なる動きにも柔軟に適応し、その動きや位置に応じて知覚される身体位置の変化が生じることが考えられる。

また、相対的位置情報の操作内容によらず、自己受容感覚がある方が身体知覚が正確に行われることが示された。先行研究より、相対的位置情報の有無が身体の高さ恒常性に影響を及ぼすことが示唆されていることから、相対的位置情報は恒常性に影響を与えるが、その操作内容にはよらないということが推測される。このことから、人間は、操作する身体的位置と大きさを知覚する場合において、VR空間特有の現実と異なる位置変化をするオブジェクトが身体の高さに存在する場合においても、その位置変化に影響されず、活動を行えることが推測される。

謝辞

本研究および論文の作成においてご指導をいただいた繁榊博昭先生に深く感謝いたします。また，副査を勤めご指導をいただいた篠森敬三先生と門田宏先生に深く感謝いたします。実験を行うにあたり様々な協力および参加者を快く引き受けていただいた繁榊研究室，友人の皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] 館暲, 佐藤誠, 廣瀬通孝, “バーチャルリアリティ学”, コロナ社, 2010.
- [2] VRChat Inc, “VRChat”, <https://www.vrchat.com>, (最終閲覧日: 2022/02/03).
- [3] Sanchez-Vives, M. V., Spanlang, B., Frisoli, A., Bergamasco, M., & Slater, M., “Virtual hand illusion induced by visuomotor correlations”, PLoS ONE, 5, e10381, 2010.
- [4] Botvinick, M. and Cohen, J., “Rubber hands ’ feel ’ touch that eyes see.”, Nature, vol.391, no.756, 1998.
- [5] Tsakiris, M. and Haggard, P., “The Rubber Hand Illusion Revisited: Visuotactile Integration and Self-Attribution”, Journal of Experimental Psychology:Human Perception and Performance, vol.31, 1, 2005.
- [6] Lloyd, D. M., “Spatial limits on referred touch to an alien limb may reflect boundaries of visuo-tactile peripersonal space surrounding the hand”, Brain and Cognition, vol.64, 1, 2007.
- [7] Slater, M., Peters-Marcos, D., Ehrsson, H. H. and Sanchez-Vives, M., “Towards a digital body: the virtual arm illusion”, Frontiers in Human Neuroscience, vol.2, 6, 2008.
- [8] Hara, M., Pozeg, P., Rognini, G., Higuchi, T., Fukuhara, K., Yamamoto, A., Higuchi, T., Blanke, O. and Salmon, R., “Voluntary self-touch increases body ownership”, Frontiers in Psychology, vol.6, 1509, 2015.
- [9] Tsakiris, M., Prabhu, G. and Haggard, P., “Having a body versus moving your body: How agency structures body-ownership”, Consciousness and Cognition, vol.15, 2, 2006.
- [10] Kalckert, A. and Ehrsson, H. H., “Moving a rubber hand that feels like your own:

参考文献

- a dissociation of ownership and agency” , *Frontiers in Human Neuroscience*, vol.6, 40, 2012.
- [11] Dummer, T., Picot-Annand, A., Neal, T. and Moore, C., “Movement and the rubber hand illusion” , *Perception*, vol.38, 2, 2009.
- [12] Kalckert, A. and Ehrsson, H. H., “The moving rubber hand illusion revisited: Comparing movements and visuotactile stimulation to induce illusory ownership” , *Consciousness and Cognition*, vol.26, 2014.
- [13] 川村 卓也, 繁柵 博昭, “自己受容感覚における身体の奥行き位置および能動的運動の視覚情報の効果” , *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 21, 1, 2016.
- [14] Chen, J., Sperandio, I. & Goodale, M.A., “Proprioceptive Distance Cues Restore Perfect Size Constancy in Grasping, but Not Perception, When Vision Is Limited” , *Current Biology*28, 927-932, 2018.
- [15] Humphrey, N. K. & Weiskrantz, L., “Size constancy in monkeys with inferotemporal lesions.” , *The Quarterly journal of experimental psychology*, 21, 3, 225-238, 1969.
- [16] Shimada, T., “A Historical Review on the Developmental Studies of Size Constancy” , *Japanese Psychological Research*, 17, 4, 203-212, 1975.
- [17] Beyrl, F., “Über die Crossenauffassung bei Kindern.” , *Z. Psycho!*, 100, 344-371, 1926.
- [18] Frank, H., “Untersuchung dber Sehgrossenkonstanz bei Kindern.” , *Psychol.Forsch.*, 7, 137-145, 1925.
- [19] Sperandio, I. & Chouinard, P.A., “The mechanisms of size constancy” , *Multisensory Research*, 28(3-4), 253-283, 2015.
- [20] 北岡明佳, “知覚心理学-心の入り口を科学する-” , ミネルヴァ書房, 2011.
- [21] 今野純平, 近藤孝覚, 棚橋重仁, “両眼視差変化が視対象の奥行き運動知覚に及ぼす影響” , *ITE Technical Report*, vol.41, no.8, 2017.

参考文献

- [22] 村上郁也, “イラストレクチャー 認知神経科学 -心理学と脳科学が解く 心の仕組み-”, オーム社, 2014.
- [23] 大塚作一, 陶山史朗, 高田英明, 石樽康雄, “Depth Perception Based on Binocular Disparity and 3-D Display : Examples of “Depth-Fused 3-D (DFD) Display” and “Virtual Frame (VFM)””, ITE Technical Report, vol.24, no.54, 2000.
- [24] 辻雄太, 鈴木広隆, “両眼立体視における立体感の支配要因に関する研究 : 瞳孔間距離, テクスチャー, 図形の複雑さの立体感への効果”, 日本建築学会環境系論文集, no.605, 2006.
- [25] Umeda, K., Tanabe, S., Fujita, I., “Representation of stereoscopic depth based on relative disparity in macaque area V4”, J Neurophysiol, 98, 241-252, 2007.
- [26] Kumano, H., Tanabe, S., Fujita, I., “Spatial frequency integration for binocular correspondence in macaque area V4”, J Neurophysiol, 99, 402-408, 2008.
- [27] Sakano, Y., Kaneko, H., Matsumiya, K., “Effects of Viewing Distance and Past Experiences on the Integration Process of Binocular Disparity and Perspective for the Perception of Surface Slant”, 日本光学会機関誌, 33, 2, 110-121, 2004.
- [28] 岡嶋克典, “感覚・知覚実験法”, 朝倉書店, 2008.
- [29] 内田 裕基, 繁柵 博昭, “バーチャルな身体の運動方向, 偏位方向およびサイズが自己受容感覚ドリフトに及ぼす影響”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 24, 1, 2019.
- [30] Preston, C., “The role of distance from the body and distance from the real hand in ownership and disownership during the rubber hand illusion”, Acta Psychologica, vol.142, 2, 2013.