

令和元年度
修士学位論文

自己身体の視覚フィードバックによる
空間知覚の特性

Characteristics of spatial perception
by visual feedback of self-body

1225114 内田 裕基

指導教員 繁榊 博昭

2020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

自己身体の視覚フィードバックによる 空間知覚の特性

内田 裕基

VR 技術の普及にともない、VR 空間上で自己の身体と同期したバーチャルな身体を使用する機会が今後増えていくと予測される。バーチャルな身体は、空間的位置やサイズを自由に変更することができる。そのため、自己身体と視覚フィードバックが異なる場合にどのような影響が生じるか検討する必要がある。関連する知見としてラバーハンド錯覚がある。これは、同期した触覚刺激や運動によって偽物の手を自己の手と感ずる錯覚現象である。錯覚が生じる際、主観的な手の位置が偽物の手へ移動する。この移動量はドリフト量として錯覚の程度を示す定量的指標として用いられている。一方、バーチャルな手のズレの弁別感度自体については、厳密な検討がなされていない。加えて、身体運動の有無が弁別特性に与える影響についても明らかになっていない。過去の研究では運動による自己受容感覚の変化がバーチャルな手に対する自己所有感に影響すると報告されている。これは、自己受容感覚によってバーチャルな手の弁別特性が変化したためだと考えられる。よって、実験 1 ではバーチャルな手に対する弁別特性および運動の有無による弁別特性への影響について検討した。これまでの実験で運動する球体を自己の手と同期したバーチャルな手で追う課題を行なった際、運動していた球体の停止時に運動方向とは反対方向にその球体が動いたと感ずることが確認された。先行研究では体性感覚に対応して視覚による身体知覚の処理が影響することが報告されているため、手の動きを止める遠心性コピー情報により、センサの遅延やズレによるバーチャルな手のわずかな運動が、自己の手ではなく球体の運動であると知覚された可能性がある。そこで、実験 2 ではバーチャルな身体を用いることによる遠心性コピーと視覚

フィードバックの差異によって、外環境のオブジェクトの知覚が影響されるか検討した。その結果、実験1ではバーチャルな手と自己の手が同期することで、偏位の弁別が非常に困難になることが示された。実験2では、同期した手の運動方向に応じてオブジェクトの運動知覚が変化した。バーチャルな手と自己の手が同期しない場合はそのようなオブジェクトの知覚への影響は生じず、遠心性コピーと視覚フィードバックの差異による効果は見られなかった。実験1では、視覚フィードバックと自己受容感覚が矛盾なく同期することで、視覚フィードバックが自己受容感覚よりも優先され、実験2では、視覚フィードバックと自己受容感覚の同期の矛盾により、視覚フィードバックの影響が低下した。これらのことから、バーチャルな環境において自己受容感覚と視覚が同期されるかどうか、自己身体の知覚において視覚が優先的に処理されるかを決定することが示唆された。

キーワード 自己受容感覚, 自己所有感, ラバーハンド錯覚, バーチャルリアリティ

Abstract

Characteristics of spatial perception by visual feedback of self-body

UCHIDA Yuki

With the spread of VR technology, opportunities to use a virtual body synchronized with one's own body in VR space will increase in the future. Since the spatial position and size of the virtual body can be freely changed, it is necessary to examine the effect of the difference between the self-body and the visual feedback. A related phenomenon of the effect is the rubber hand illusion. This illusion is that a fake hand is felt as its own hand evoked by synchronized tactile stimulation or movement. When the illusion occurs, the subjective hand moves (or “ drifts ”) to the fake hand. This amount of movement is used as a quantitative index indicating the degree of illusion as the amount of drift. On the other hand, the discrimination sensitivity of deviation of virtual hand from real hand has not been studied well. Besides, the effects of physical motion on discrimination sensitivity have not been clarified. Previous studies have reported that the modulation of proprioception caused by body movement affect the sense of self-ownership of a virtual hand. This might be because the discrimination characteristics of the virtual hand changed due to the proprioception. Therefore, in Experiment 1, we examined the discrimination characteristics of a virtual hand and the effect of the presence or absence of motion on the discrimination characteristics. In a previous experiment, performing a task to follow a moving sphere with a virtual hand synchronized with its own hand, the sphere appeared to move to the opposite direction of the movement

of hand when the moving sphere stopped. Since the somatosensory processes were reported to affect vision, it is possible that the movement of the sphere (and not of the hand) was perceived with the efferent copy information to stop hand movement and sensor delays and deviations by VR system. Thus, in Experiment 2, whether the difference between efferent copy and visual feedback by using a virtual body affects the perception of objects in the outside environment was investigated. As a result, in Experiment 1, when the virtual hand and own hand were synchronized, the deviation of hands became very hard to discriminate. In Experiment 2, the motion perception of the object changed according to the direction of the synchronized hand motion but did not change by the asynchronization of the efference copy and visual feedback. In Experiment 1, visual feedback was dominant over proprioception by synchronization of visual feedback and proprioception. In Experiment 2, the effect of visual feedback was decreased by the asynchronization of visual feedback and proprioception. These results suggest that whether the vision and proprioception are synchronized determines the dominance of visual information in the perception of the self-body.

key words proprioception, sense of self-ownership, rubber hand illusion, virtual reality

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	バーチャルリアリティ	2
1.3	ラバーハンド錯覚	4
1.3.1	ドリフト量	4
1.3.2	RHI における身体位置の効果	5
1.3.3	能動的運動と RHI	5
1.4	身体知覚	6
1.4.1	自己受容感覚	6
1.4.2	自己所有感と自己主体感	7
1.4.3	遠心性コピー	7
1.5	フラッシュラグ効果	7
1.6	本研究の目的	8
第 2 章	実験 1	10
2.1	装置	10
2.1.1	使用ソフトウェア	10
2.1.2	刺激呈示装置	10
2.1.3	コントローラ	10
2.1.4	方向選択用コントローラ	12
2.1.5	実験環境	12
2.2	刺激	13
2.2.1	自己の手と同期したバーチャルな手	13
2.2.2	運動統制用の球体	13

目次

2.3	評価方法	14
2.4	参加者	14
2.4.1	実験条件	15
2.4.2	手続き	15
2.5	結果	17
2.5.1	解析方法	17
2.5.2	解析結果	18
2.6	考察	21
第 3 章	実験 2	22
3.1	装置	22
3.1.1	使用ソフトウェア	22
3.1.2	刺激呈示装置とコントローラ	22
3.2	刺激	22
3.2.1	自己の手と同期したバーチャルな手	22
3.2.2	運動統制用の球体	23
3.2.3	視覚刺激	23
3.3	評価方法	24
3.4	参加者	24
3.5	実験条件	25
3.6	手続き	26
3.7	結果	27
3.7.1	解析方法	27
3.7.2	解析結果	28
3.8	考察	31
第 4 章	総合考察	33

目次

4.1	実験問の考察	33
4.2	今後の展望	34
4.2.1	運動の有無による弁別特性の変化	34
4.2.2	球体が運動する錯覚	35
4.2.3	停止後の球体の運動方向の知覚	35
第 5 章	まとめ	36
	謝辞	38
	参考文献	39

目次

1.1	バーチャルな手の使用例 [12]	3
1.2	VR の使用例 [14]	4
1.3	一般的なラバーハンド錯覚 [6]	5
1.4	能動的運動 [16]	6
1.5	フラッシュラグ効果	8
2.1	HMD(Oculus Rift cv1)	11
2.2	入力デバイス (Oculus Touch)	11
2.3	赤外線センサ	12
2.4	バーチャルな手	13
2.5	運動統制用の球体	14
2.6	バーチャルな手の偏位距離	15
2.7	運動あり条件	16
2.8	運動なし条件	16
2.9	二肢強制選択画面	17
2.10	運動条件ごとの心理測定関数	18
2.11	参加者 1 (左), 参加者 2 (右)	19
2.12	参加者 3 (左), 参加者 4 (右)	19
2.13	参加者 5 (左), 参加者 6 (右)	19
2.14	参加者 7 (左), 参加者 8 (右)	20
2.15	参加者 9 (左), 参加者 10 (右)	20
2.16	参加者 11 (左), 参加者 12 (右)	20
3.1	運動統制用の橙色の球体	23

図目次

3.2	運動統制用の球体と視覚刺激の球体の位置	24
3.3	遠心性コピーと視覚フィードバックの一致/不一致条件	25
3.4	停止後の青色の球体の運動距離	26
3.5	運動の流れの一例	27
3.6	球体の運動方向を判断する画面	27
3.7	全体平均での心理測定関数	29
3.8	0 cm 条件の割合の平均	29
3.9	参加者 1 (左), 参加者 2 (右)	30
3.10	参加者 3 (左), 参加者 4 (右)	30
3.11	参加者 5 (左), 参加者 6 (右)	30
3.12	参加者 8 (左), 参加者 9 (右)	31
3.13	参加者 10 (左), 参加者 12 (右)	31
3.14	各条件ごとの平均	32

表目次

第 1 章

はじめに

1.1 本研究の背景

VR 技術の普及に伴い、自己の身体と同期したバーチャルな身体を使用する機会が今後も増加すると予測される。実際に、VR Chat や Virtual YouTuber などが普及し利用されている。これらは、図 1.1 のような自己の身体と同期したバーチャルな身体を利用している。そのようなバーチャルな身体は、VR 空間において空間的位置やサイズを自由に変更することができる。そのため、例えば自己の手とバーチャルな手の空間的位置やサイズの視覚フィードバックの間に差異が生じることが考えられる。これは、身体知覚に基づいて最適化された、バーチャルな身体に違和感が生じない VR システムを構築する上で有用な知見となる。また、バーチャルな身体が現実と異なった場合に身体知覚がどのように変容するか明らかにすることは自己身体の知覚の柔軟性を知る上でも重要である。したがって、自己の身体とバーチャルな身体の差異が身体知覚にどのような影響を与えるか検討する必要がある。

視覚フィードバックと身体知覚の差異に関連する知見として、ラバーハンド錯覚 (Rubber Hand Illusion, 以下 RHI と略記) が挙げられる [1]。これは、同期した触覚刺激や運動によって偽物の手を自己の手であると感じる錯覚現象である。この錯覚が生じる際に、主観的な手の位置が自己の手から偽物の手に移動する。この移動量をドリフト量として錯覚の程度を示す定量的指標として多くの研究で用いられている [2-5]。このドリフト量を用いた研究において、偽物の手と自己の手の距離について検討されたものがある。これでは、自己の手から偽物の手が 27.5 cm 離れていると錯覚が生じると報告している [6]。また、別の先行研究では偽物の手が 45 cm の距離に偏位した場合でも RHI が生じたと報告している [7]。垂

1.2 バーチャルリアリティ

直方向の偏位においても偽物の手と自己の手が大きく離れても自己所有感が生じたと報告されている。[8]。このように偽物の手と自己の手の間の距離が大きく離れても自己所有感やドリフトが生じている。この理由として、自己受容感覚の感度が低いため自己の手と偽物の手の位置のズレに対する感度が低いことで自己所有感やドリフトが生じている可能性が考えられる。しかし、この偽物の手に対する弁別特性について検討した研究はない。また、バーチャルな手に対しても行われていない。このバーチャルな手の弁別特性に関連するものとして、運動による自己受容感覚の変化がバーチャルな手に対するドリフト量に影響すると報告している。これまでの研究で運動を行うことによって自己受容感覚の情報の増加により、視覚フィードバックの影響が低下した可能性が示された。これから、運動によってバーチャルな手と自己の手の弁別がしやすくなったと考えられる [9]。しかし、別の先行研究では運動が同期した視覚フィードバックによりドリフト量の増加が報告されている。つまり、バーチャルな手に対する自己所有感の増加が考えられ、運動によってバーチャルな手と自己の手の弁別が困難になった可能性がある [10]。これらの矛盾する報告は、自己受容感覚によってバーチャルな手に対する弁別特性が変化したためだと考えられる。

これまでに行ってきた実験で、運動する球体を自己の手と同期したバーチャルな手で追う手続きを行った [9]。運動していた球体の停止時に、球体がそれまでの運動とは反対方向に動いているように知覚されていた。先行研究において、体性感覚と対応した視覚的変動が促進されると報告されている [11]。そのため、手を止めたとする遠心性コピーによりセンサの遅延やズレによるバーチャルな手の停止位置からのわずかな運動を停止していると知覚し、逆に停止している球体の運動であると知覚された可能性がある。

1.2 バーチャルリアリティ

バーチャルリアリティ (VR) は、コンピュータグラフィックや音響などによって人工的に現実感を作り出す技術のことである。近年は、コンピュータの計算速度の上昇などの技術的革新により、スマートフォンや HMD などを使って簡単に体験できるようになった。また、

1.2 バーチャルリアリティ



図 1.1 バーチャルな手の使用例 [12]

図 1.2 に示すような VRChat や Virtual YouTuber といった，VR 空間上で自己の身体と同期したバーチャルな身体を用いる例が増えている．バーチャルリアリティを満たす特徴的な要点として，3 つの要素が存在する．1 つ目は「3 次元の空間性」，2 つ目は「実時間の相互作用性」，3 つ目は「自己投射性」である．「3 次元空間性」とは，コンピュータによって生成された立体的な視覚空間および聴覚空間が人の周りに広がっていることである．しかし，角度を変えてみたり，物体に触れるなどの干渉ができない．「実時間の相互作用」は，ビデオゲームのように空間の中で回り込んで見る，物体を動かすといった物体との実時間の相互作用のことである．「自己投射性」は，生成された環境と自分がシームレスにつながることで，自分が環境に入りこんだように感じる状態のことである．これら 3 つの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 [13]．特に，「自己投射性」は現実空間における人間の異なる感覚間における矛盾のない状態を人工環境でも矛盾なく実現することが大切となる．しかし，バーチャルな身体は空間的位置やサイズを自由に変更することができる．それによって，視覚と身体知覚の間に矛盾が生じてしまう．そのため，差異による各知覚に与える影響について明らかにすることは，バーチャルな身体に違和感を生じさせない VR システムを構築する上で有用な知見となる．

1.3 ラバーハンド錯覚

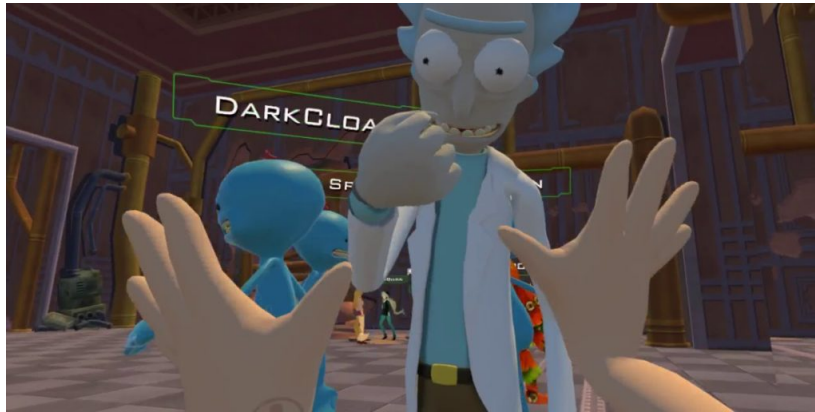


図 1.2 VR の使用例 [14]

1.3 ラバーハンド錯覚

RHI とは、図 1.3 に示すように衝立などを用いて、実験参加者の手を隠した上で、参加者の目の前にゴムの手を並べて置き、筆などで触れる様子を視覚フィードバックとして呈示し、実際の手にも筆を用いて同期した触覚刺激を与えることによって、偽物の手が自己の手のように感じられる錯覚現象である [1]。RHI は、偽物の手と自己の手の空間的距離の近さと形態的類似性、そして時間的に刺激が一致していることが錯覚の生じやすさに関係があると挙げられている [15]。

1.3.1 ドリフト量

RHI が生じた際に、偽物の手をどの程度自己の手であると感じたかの評価手法の 1 つにドリフト量を求めるものがある。RHI が生起すると、主観的な手の位置が自己の手の位置から偽物の手へ移動が見られる。この移動のことをドリフトと呼ぶ。この偽物の手への移動であるドリフトの移動量のことをドリフト量とし、錯覚の程度を示す定量的な指標として多くの先行研究で用いられている [2-5]。

1.3 ラバーハンド錯覚

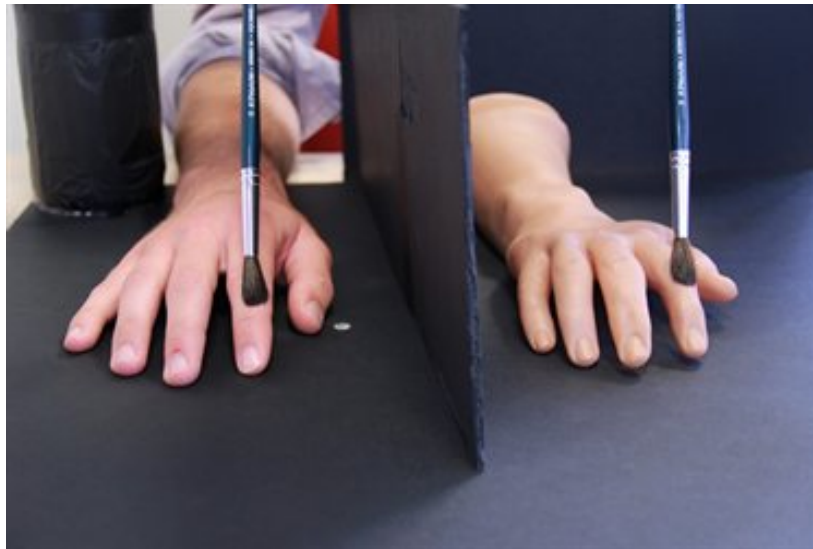


図 1.3 一般的なラバーハンド錯覚 [6]

1.3.2 RHI における身体位置の効果

多くの RHI 先行研究において，偽物の手と自己の手の間の距離による身体知覚の効果について検討されている．Lloyd (2007) は，実際の手から左右方向に離れた位置に偽物の手を配置した場合の RHI への影響について検討を行っており，偽物の手が 27.5 cm 以上離れて置かれると錯覚の程度が低下することを報告している [6]．一方で Zopf et al. (2010) は，45 cm の距離でも RHI が生じたと報告している [7]．また，偽物の手を自己の手から垂直方向の位置に置き，その距離が長くなることで自己所有感が低下したとする報告もある [8]．このように，いくつかの先行研究において偽物の手が自己の手からの偏位距離が大きい場合，低下は見られるが自己所有感やドリフトが生じることが確認されている．

1.3.3 能動的運動と RHI

通常の同期した触覚刺激を与えることによる RHI と同等の錯覚が自己の手に対応する偽物の手が同期して動くことによって，発生すると報告されている [16] [17]．この先行研究で，図 1.4 に示すようにゴムの手と実際の手の手首を棒で繋ぎ，指の動きの同期を行なっている．運動の同期によって錯覚が生じた理由として，触覚以外の自己受容感覚によって知覚

1.4 身体知覚

される身体運動の情報と視覚的フィードバックによる運動情報が同期した場合に，それらの感覚フィードバックが自己身体の運動意図と一致することによって，偽物の手に対して自己所有感や自己主体感が生じることによって，触覚刺激による RHI と同程度の錯覚が生じると考えられる．このことから，触覚刺激を伴わない視覚的フィードバックと能動的運動により，自己受容感覚が影響されることが示されている．また，自己の手と偽物の手の動きが同期した場合非同期の場合に比べドリフト量が低下することが報告されている [10,16,18]

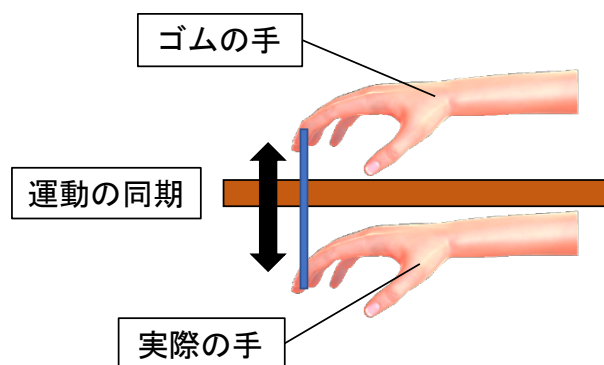


図 1.4 能動的運動 [16]

1.4 身体知覚

1.4.1 自己受容感覚

自己受容感覚（Proprioception）とは，視覚的フィードバックに頼らず，筋，腱，関節の緊張や伸縮などの情報から身体の位置を知覚する感覚である．固有感覚とも呼ばれる．この自己受容感覚によって，目をつぶった状態であっても身体の位置や体勢，運動をある程度知覚することができる．しかし，実際とは異なる視覚的フィードバックを与えることによる影響を受けることを RHI などの先行研究によって示されている [1]．

1.5 フラッシュラグ効果

1.4.2 自己所有感と自己主体感

自己受容感覚に加えて、触覚、視覚的フィードバックなどの身体に関する感覚情報を統合して処理することで、統一した自己の身体を認識していると考えられている。このようにして統合された自己の身体に関する認識として、身体に対する自己所有感 (sense of self-ownership) や自己主体感 (sense of self-agency) がある。自己所有感とは、ある事象が自身の身体で生じていると感じる感覚である。自己主体感とは、身体が行う運動に対して、その運動を自身が行っていると感じる感覚である。

1.4.3 遠心性コピー

私たちは、外環境が変化したことによる網膜像の変化と自分自身が動いたことによる網膜像の変化は同じものであるはずである。しかし、その網膜像の変化を自身が動いたか外環境が変化したかを区別することができる。これは、身体に運動信号を送ると同時にその信号の複製を用意する。この複製が遠心性コピーと呼ばれる。遠心性コピーによって、運動後に送られてくる実際の身体運動の結果として生じる感覚信号が打ち消されることで、自身の身体が動いたと感じている可能性を示している [19]。

1.5 フラッシュラグ効果

運動刺激を呈示しその隣あう位置に瞬間的に別の刺激としてフラッシュ刺激を呈示する。その時、フラッシュ刺激の位置よりも運動刺激がわずかに運動方向側にずれて見える。この錯覚現象がフラッシュラグ効果である [20]

この現象は、運動刺激の知覚時の遅延に対する補正によって生じていると考えられる。人間の網膜に刺激が与えられてから知覚するまでに遅延が生じるが、運動刺激を知覚する場合、その遅延を補正するため空間的位置がずれる。そのため、フラッシュ刺激の呈示時の運動刺激が補正されわずかに知覚される位置が移動する。しかし、フラッシュ刺激は刺激が呈示された位置で知覚される。これらのことから、運動刺激とフラッシュ刺激の知覚された位

1.6 本研究の目的

置にズレが生じたと考えられている。身体運動に対応した視覚的変動が促進される。

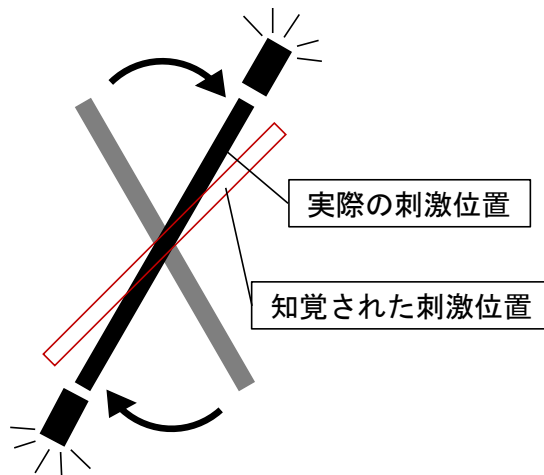


図 1.5 フラッシュラグ効果

1.6 本研究の目的

RHI の先行研究において、偽物の手と自己の手の間の空間的位置の違いについて多くの検討がなされている。そこでは偽物の手と自己の手の間の距離が 27.5 cm や 45 cm の場合の錯覚について報告されている。これらの研究は偽物の手と自己の手の間の距離が大きくなる場合でも自己所有感やドリフトが生じることを報告している。この異なる結果となっている理由として、自己受容感覚が低いため偽物の手に対する弁別感度が低いと考えられる。しかし、この偽物の手に対する弁別特性は検討されていない。また、バーチャルな手に対しても行われていない。このバーチャルな手の弁別特性に関連するものとして、運動による自己受容感覚の変化がバーチャルな手に対するドリフト量に影響することが報告されている。そこで、実験 1 では、バーチャルな手に対する弁別特性および運動の変化が弁別特性に及ぼす影響について検討した。

これまでの実験で、自己の手と同期したバーチャルな手で運動する球体を追従する課題を

1.6 本研究の目的

行った際、停止時にそれまでの運動方向とは反対方向に運動を知覚することが報告された。先行研究で体性感覚と対応する視覚上の変動が促進されることが報告されているため、手の動きを止めたとする遠心性コピーにより、センサの遅延やズレによるバーチャルな手のわずかな運動が、自己の手ではなく球体の運動であると知覚された可能性がある。そこで、実験2ではバーチャルな身体を用いることによる遠心性コピーと視覚フィードバックの差異による、外環境のオブジェクトの知覚が影響されるか検討した。

第 2 章

実験 1

2.1 装置

2.1.1 使用ソフトウェア

視覚刺激と実験を行う VR 環境の作成は Unity 2017 を用いて作成した。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した。収集したデータは Microsoft Excel を用いて分析を行えるよう整理した。算出した結果をもとに心理測定関数を求めるために MATLAB R2017b で Psignifit4 を用いた。

2.1.2 刺激呈示装置

刺激の呈示には図 2.1 に示す HMD(Oculus Rift cv1) を用いた。実験時 HMD と鼻の間に隙間ができ参加者がわずかに下を見ることができた。そのため、視界の邪魔にならないように HMD と鼻の間の隙間に詰め物をするこゝで、隙間から下が見えないようにした。

2.1.3 コントローラ

自己の手とバーチャルな手の同期を行うため、図 2.2 に示すコントローラとして Oculus touch を使用した。参加者は右手にバーチャルな手と同期するコントローラを保持した。自己の手の位置を基準にバーチャルな手を偏位させるため、運動時にコントローラの位置のズレを防ぐ必要がある。そのため、参加者の右手のコントローラは輪ゴムと安全ピンを用いて固定した。コントローラの位置の取得は、図 2.3 に示す赤外線センサ 2 台を用いて行なった。

2.1 装置



図 2.1 HMD(Oculus Rift cv1)



図 2.2 入力デバイス (Oculus Touch)

2.1 装置



図 2.3 赤外線センサ

2.1.4 方向選択用コントローラ

自己の手を基準としたバーチャルな手の位置の方向を示してもらうため、参加者は左手側にも図 2.2 のコントローラを持った。参加者はこのコントローラのアナログスティックを操作することで方向を示した。それ以外のボタン操作も左手側のコントローラを用いた。左手側のコントローラはバーチャルな手と同期していないため手に固定していない。

2.1.5 実験環境

HMD とコントローラ、赤外線センサは PC に接続されて使用された。実験に使用した PC のスペックは以下に示す。

2.2 刺激

- OS : Windows10 Pro
- CPU : Intel CORE i7 (2.80 Hz)
- メモリ : 16 GB
- GPU : NVIDIA GeForce GTX 1060

2.2 刺激

2.2.1 自己の手と同期したバーチャルな手

自己の手の動きと同期したバーチャルな手として図 2.4 に示す手のモデルを用いた。バーチャルな手が自己の手から偏位した場合でも、バーチャルな手を回転軸とするように設定した。これによって、手を回転させたことによる自己の手の位置の特定を行えないようにした。手の動きの同期は、位置と回転のみであり、指を握るなどの動きの同期はさせなかった。手のモデルのサイズは、実際の手と同程度になるように設定した。



図 2.4 バーチャルな手

2.2.2 運動統制用の球体

参加者は実験時に自己の手と同期したバーチャルな手で能動的な運動を行った。運動の統制を行うため、図 2.5 に示す直径 1 cm の青色の球体を用いた。青色の球体は、20 cm の距

2.3 評価方法

離を約 13 s で 2 回往復運動を行った。参加者が示指でこの球体を追従することで運動の統制を行なった。

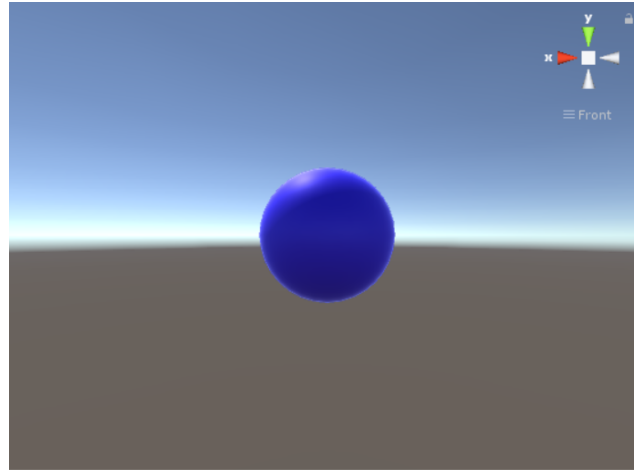


図 2.5 運動統制用の球体

2.3 評価方法

バーチャルな手に対する弁別特性を検討するため、実験 1 では恒常法を用いた。視覚刺激として、自己の手からいくつかの距離に偏位したバーチャルな手を呈示した。そしてそのバーチャルな手を用いて運動を行なった。その後、参加者は自己の手から見てバーチャルな手が左右どちらの方向に存在したかを二肢強制選択法で判断した。

2.4 参加者

20 代の学生 12 名（男性 10 名，女性 2 名）が実験に参加した。全員が裸眼または、矯正レンズを用いた正常な視力を有した。参加者は全員右利きであった。参加者は、実験を行うにあたり実験内容の説明書を読み、実験の目的および実験内容、手続きを理解した。その上で同意書への署名を持って同意を得た後、実験に参加してもらった。

2.4 参加者

2.4.1 実験条件

実験1では、運動の有無の2水準、バーチャルな手の偏位距離が7水準とした。よって、これらの組み合わせで計14条件で構成された。14条件は試行ごとにランダムで切り替わった。運動ありの場合、20 cmの距離を約13 sで2回往復運動を行なった。運動なしの場合は、初期位置のまま約13 s静止した。運動なし条件は運動の課題は行っていないが、自己の手とバーチャルな手の動きは同期されていた。運動あり条件と運動なし条件のどちらの場合も、参加者は青い球体を示指で追従した。バーチャルな手の偏位距離は恒常法によってバーチャルな手に対する弁別特性を検討するため、図2.6に示すように左右に2, 4, 6 cmの距離に偏位させた。0 cmも設定した。これは、自己の手の位置とバーチャルな手の位置が一致していた。

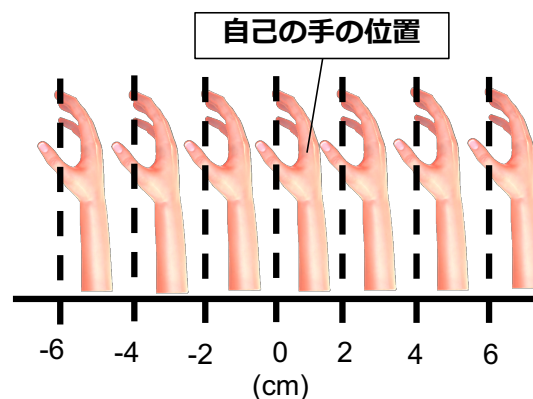


図 2.6 バーチャルな手の偏位距離

2.4.2 手続き

参加者は目の前に表示された青色の球体をバーチャルな手の示指で触れた。条件に応じて青色の球体が動き出した。図2.7に示すように動き出した場合、参加者は青色の球体をバー

2.4 参加者

チャルな手で追従した。青色の球体は 20 cm の距離を約 13 s で 2 回往復した。図 2.8 に示すように青色の球体が動き出さない場合は、参加者は青色の球体をバーチャルな手の示指で触れ続けた。これを約 13 s 続けた。なお、球体に指が触れた時の触覚フィードバックは与えなかった。

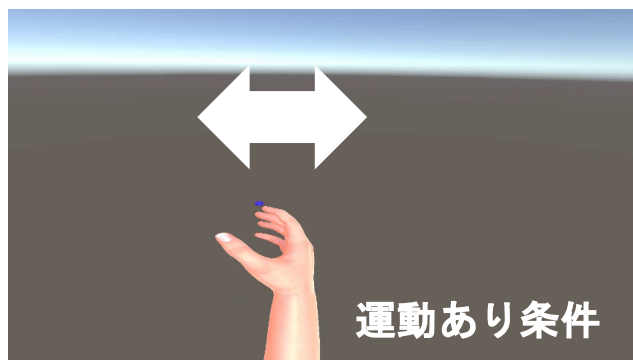


図 2.7 運動あり条件

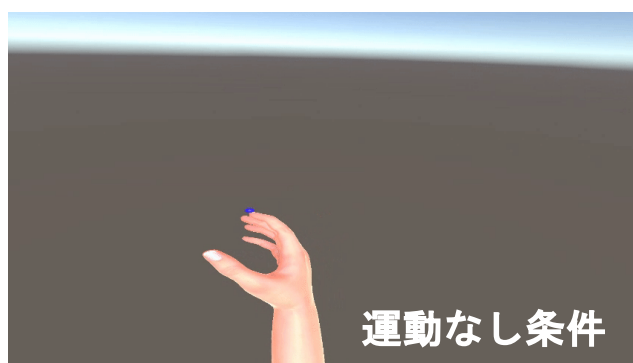


図 2.8 運動なし条件

視覚刺激の呈示後、二肢強制選択を行う画面へ移動した。参加者はここで、自己の手から見てバーチャルな手が左右どちらに存在したかを判断した。この画面では、図 2.9 に示すよ

2.5 結果

うに説明文と左右を示す矢印のみが存在した。参加者は、左手のコントローラのアナログスティックを操作して方向を選択した。選択後決定ボタンを押した。

この呈示から判断の一連の手続きを1試行とした。運動の有無の2水準、自己の手からのバーチャルな手の偏位距離が7水準となった。よって計14条件となった。各条件20試行を行い、計280試行を2日に分けて行なった。



図 2.9 二肢強制選択画面

2.5 結果

2.5.1 解析方法

バーチャルな手の偏位距離ごとに二肢強制選択で右を選択した割合を算出した。算出した割合に対して、MATLABのPsignifitを用いて心理測定関数を当てはめた。その求めた心理測定関数から主観的等価点および弁別閾を求めた。選択率が50%となる偏位距離を主観的等価点とした。選択率が25%と75%になる偏位距離の差異を弁別閾とした。

2.5 結果

2.5.2 解析結果

実験1の分析した結果を図2.10に示す。その結果、多くの参加者が運動の有無に関わらず弁別閾は設定した条件の範囲を超えていた。参加者12名の結果を図2.11, 図2.12, 図2.14, 図2.15, 図2.16に示す。参加者12名中10名はバーチャルな手の偏位が最大の条件であっても正答率が75%以下であった。そのため、心理測定関数から弁別閾を求めることができなかつたと考えられる。

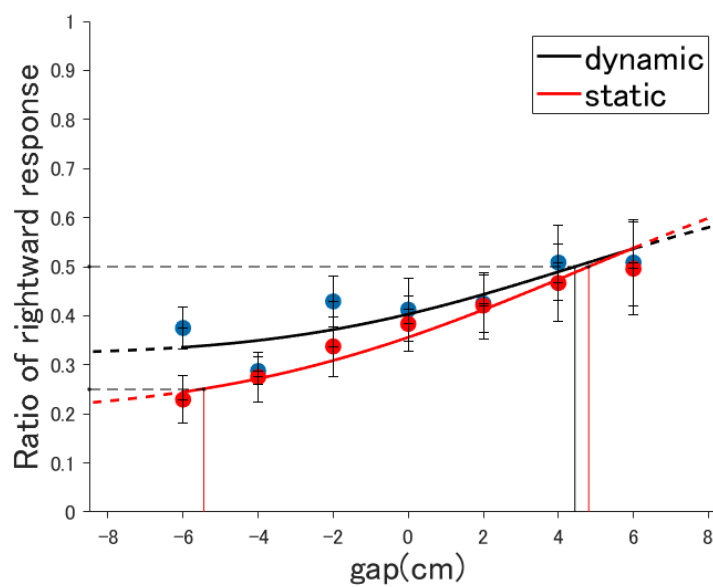


図 2.10 運動条件ごとの心理測定関数

2.5 結果

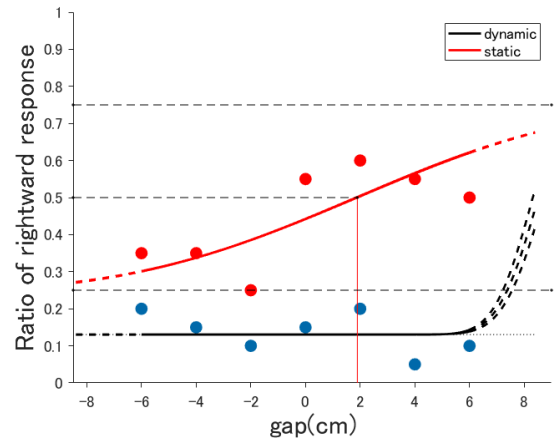
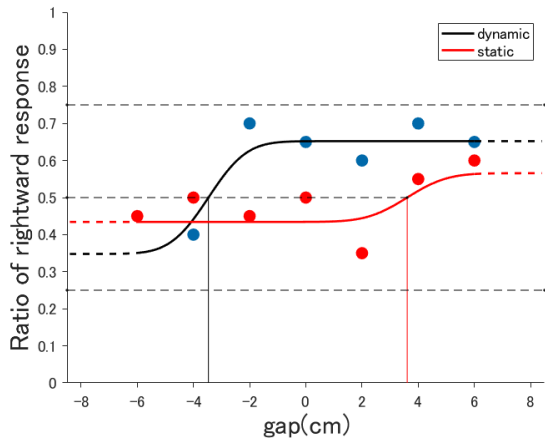


図 2.11 参加者 1 (左), 参加者 2 (右)

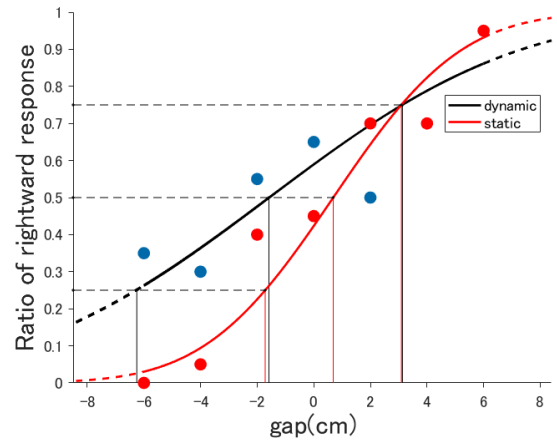
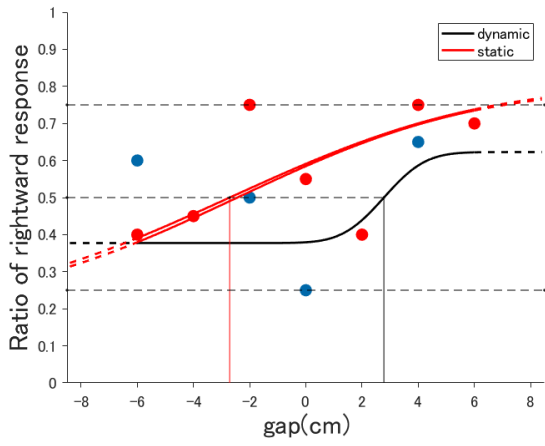


図 2.12 参加者 3 (左), 参加者 4 (右)

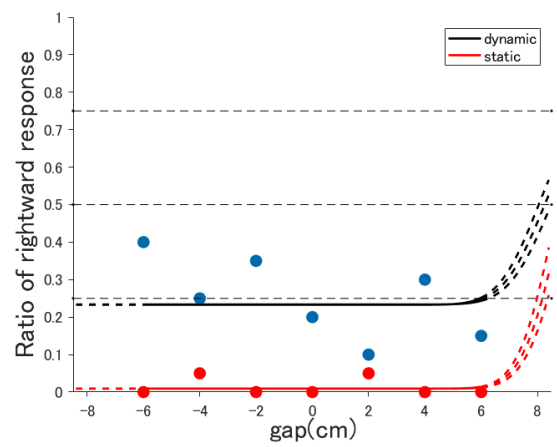
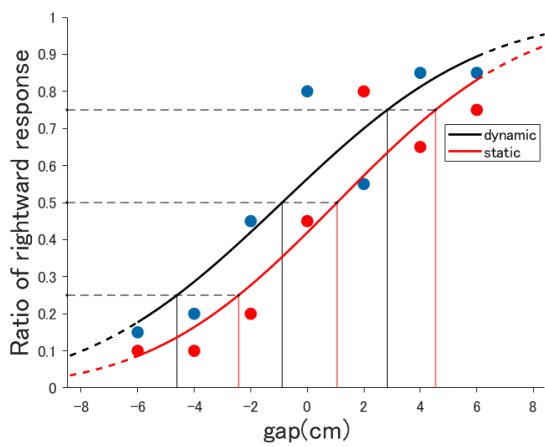


図 2.13 参加者 5 (左), 参加者 6 (右)

2.5 結果

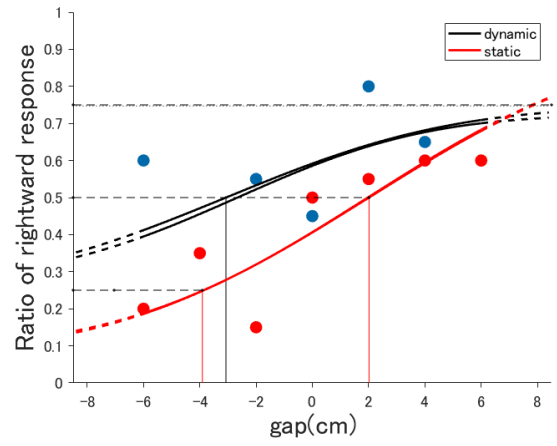
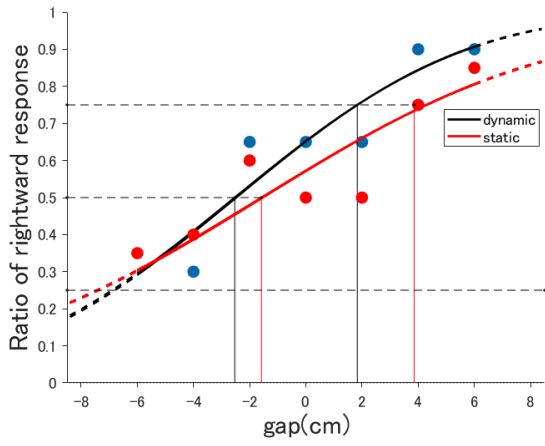


図 2.14 参加者 7 (左), 参加者 8 (右)

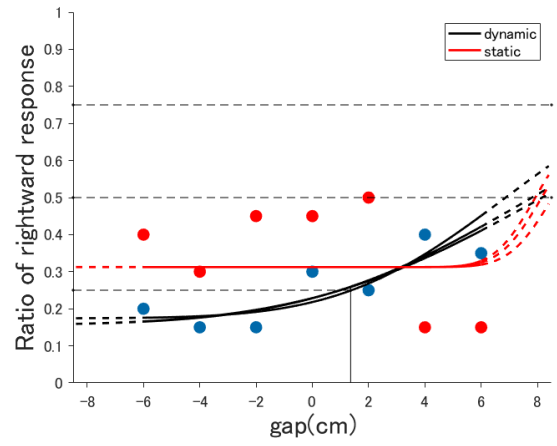
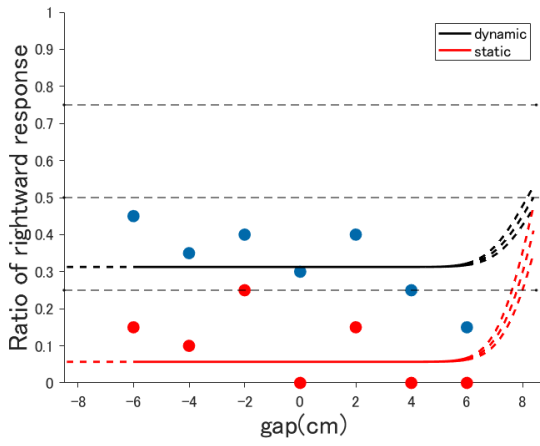


図 2.15 参加者 9 (左), 参加者 10 (右)

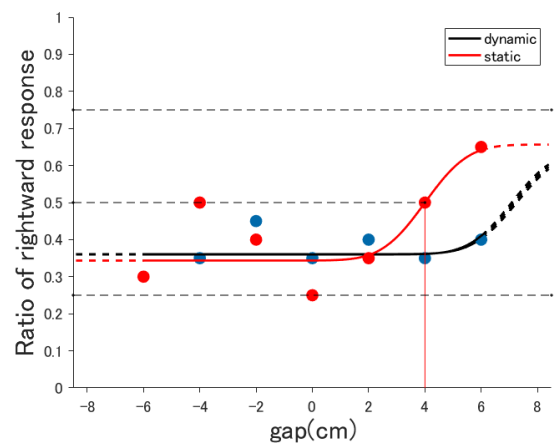
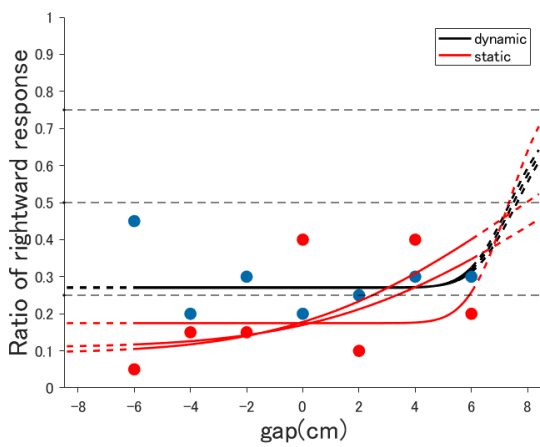


図 2.16 参加者 11 (左), 参加者 12 (右)

2.6 考察

運動の有無に関わらず自己の手からバーチャルな手が 6 cm 偏位した条件であっても、バーチャルな手と自己の手の弁別ができていないという結果が得られた。運動なし条件は、統制用の球体を追うことによる往復運動を行う課題は行なっていない。しかし、運動なし条件は運動あり条件と同じくバーチャルな手と自己の手の運動の同期がなされていた。先行研究において、偽物の手と自己の手が同期した場合、非同期に比べドリフト量が増加することが報告されている [10,16]。これらのことから同期の影響によって課題の運動の有無に関わらず視覚の位置情報に強く依存しバーチャルな手にドリフトが生じた。そのため、自己の手の位置とバーチャルな手の弁別が困難になったと考えられる。なお、過去の実験においても、偏位したバーチャルな手を自己の手と同期させて実験を行なった [9]。その実験では、自己の手とバーチャルな手の位置を判別できていた。それにより、自己の手からバーチャルな手に移動した主観的な手の位置を示すことが出来た。しかし、本研究と異なりその主観的な手の位置を判断するために自己の手と同期していないバーチャルな手を用いた。この理由から過去の実験では自己の手とバーチャルな手の判別が可能であったと考えられる。また、弁別閾を設定した条件を大きく超えていた理由として、参加者の VR 経験の有無が考えられる。条件を設定する際、VR 経験の豊富な参加者が実験を行った。しかし、本実験では VR 経験のない参加者が参加した。これは、VR の経験がない参加者は視覚の重み付けが経験ありに比べ大きかったため、自己の手とバーチャルな手の判別がより困難になった可能性が考えられる。

第 3 章

実験 2

3.1 装置

3.1.1 使用ソフトウェア

視覚刺激や実験を行う環境の作成，実験後のデータの解析は実験 1 と同様のソフトウェアを使用した．各種検定は，R(3.5.1) 上で動作する分散分析関数である `anovakun` Version 4.8.1 を用いた [21]．

3.1.2 刺激呈示装置とコントローラ

刺激呈示装置および運動の同期と評価用のコントローラは実験 1 と同様の物を使用した．コントローラの参加者の手への固定も同様の方法を用いた．

3.2 刺激

3.2.1 自己の手と同期したバーチャルな手

自己の手と同期したバーチャルな手は実験 1 と同様のモデルを使用した．こちらは，実験 1 と異なり自己の手からの偏位はしていなかった．

3.2 刺激

3.2.2 運動統制用の球体

参加者は実験時に自己の手と同期したバーチャルな手で能動的な運動を行う。この運動の統制を行うため、図 3.1 に示す直径 2 cm の橙色の球体を用いた。橙色の球体 13, 11.5, 10, 8.5, 7 cm の距離をランダムに選択しを 1.2 cm/s で運動した。往復運動は行なっていない。参加者が示指でこの球体を追従することで運動の統制を行なった。

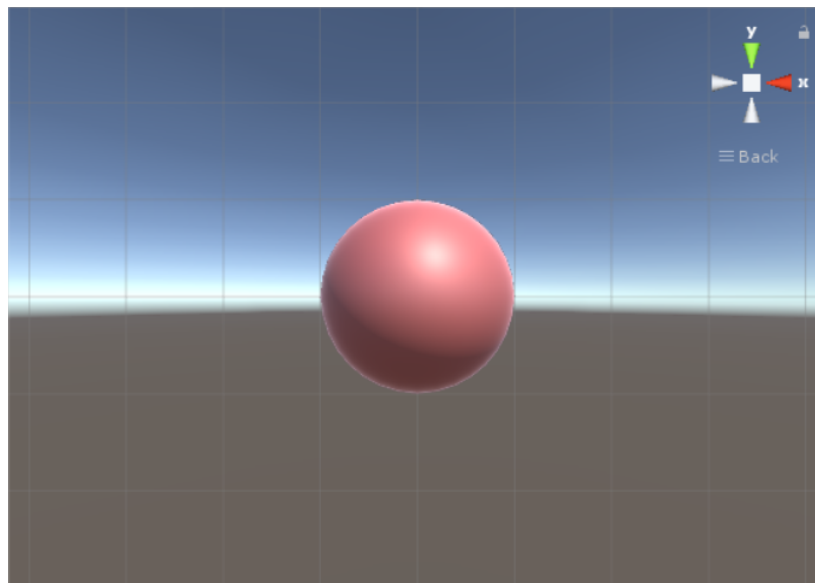


図 3.1 運動統制用の橙色の球体

3.2.3 視覚刺激

視覚刺激として、直径 1 cm の青色の球体を用いた。図 3.2 に示すように青色の球体は参加者側から見て運動統制用の橙色の球体から 9.5 cm 奥に存在した。実験中、参加者はこの青色の球体を注視した。参加者が橙色の球体に触れて一旦停止するまでの間は橙色の球体と動きが同期していた。

3.3 評価方法

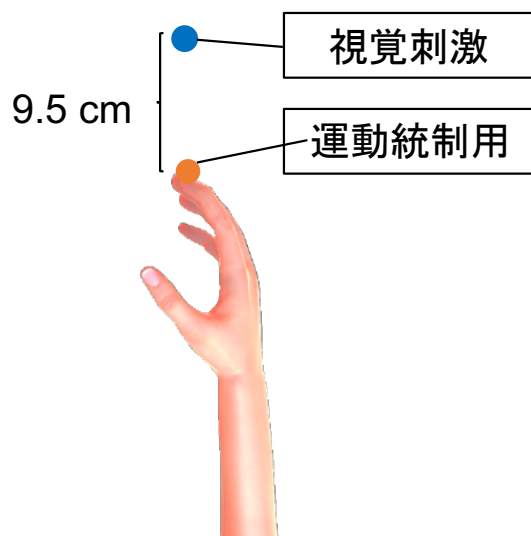


図 3.2 運動統制用の球体と視覚刺激の球体の位置

3.3 評価方法

停止後の青色の球体の運動方向の知覚を検討するため、恒常法を用いた。視覚刺激として、青色の球体は停止後にいくつかの距離に運動した。その後、参加者は青色の球体が停止後左右どちらに運動したかを二肢強制選択法で判断した。

3.4 参加者

20代の学生12名（男性11名，女性1名）が実験に参加した。全員が実験1とは異なる参加者であった。全員が裸眼または、矯正レンズを用いた正常な視力を有した。参加者は全員右利きであった。参加者は、実験を行うにあたり実験内容の説明書を読み、実験の目的および実験内容、手続きを理解した。その上同意書への署名を持って同意を得た後、実験に参加してもらった。

3.5 実験条件

実験 2 では、遠心性コピーと視覚フィードバックの一致不一致の 2 水準、運動方向が左右の 2 水準、青色の球体の停止後の運動距離が 11 水準とした。よって、計 44 条件で構成された。運動方向は 10 試行ごとに切り替わった。遠征コピーと視覚フィードバックの一致不一致と青色の球体の停止後の運動距離はランダムで切り替わった。また、停止位置を参加者に予測されることを避けるため 13, 11.5, 10, 8.5, 7 cm の 5 つの距離でランダムに停止するようにした。遠心性コピーと視覚フィードバックの一致不一致条件の流れを図 3.3 に示す。一致条件は、参加者の実際の手が停止した時にバーチャルな手も停止した。不一致条件は、参加者の実際の手が停止しても、バーチャルな手はそのまま運動を続けた。停止後運動するバーチャルな手は、参加者の自己のとは動きが同期されていなかった。停止後の青色の球体は図 3.4 に示すように、左右に 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0 cm のいずれかの距離に運動した。停止後青色の球体が運動しない条件も設定した。これは停止位置で 0.5 s 静止した。

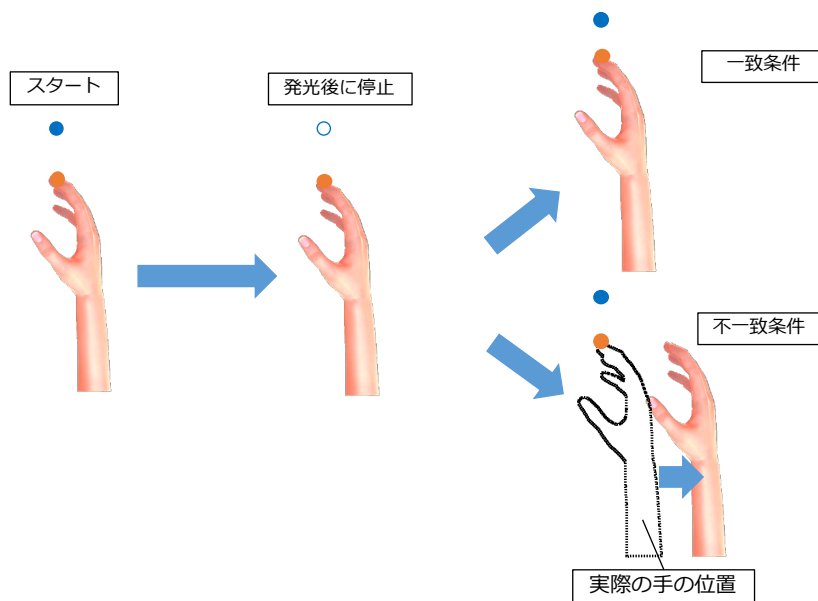


図 3.3 遠心性コピーと視覚フィードバックの一致/不一致条件

3.6 手続き

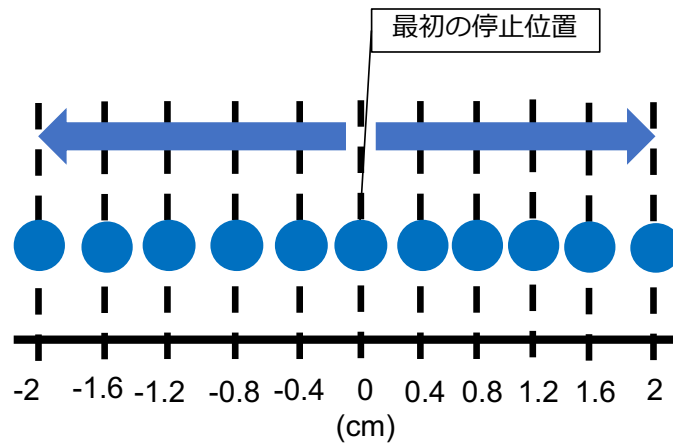


図 3.4 停止後の青色の球体の運動距離

3.6 手続き

参加者は目の前に表示された橙色の球体を示指で触れた。これにより、橙色の球体とそれに同期した青色の球体が条件に応じて左右のどちらかに運動を開始した。この時、参加者は常に青色の球体を注視した。運動中青色の球体が一瞬点滅した。参加者は青色の球体了点滅したら自己の手をその場で停止させた。この時、参加者が点滅を知覚してから手を止めるまでの遅延を抑えるため、青色の球体は点滅後 250 ms の delay を挟んで停止した。その後、青色の球体は条件に応じて左右に運動を開始した。また、バーチャルな手も条件に応じてそれまでの運動方向と同じ方向に青色の球体が停止するまでの 0.3 ~ 1.3 s の間、運動した。

視覚刺激の呈示後、二肢強制選択を行う画面へ移動した。参加者はここで、青色の球体が停止後に左右どちらに運動したかを判断した。この画面では、図に示すように説明文と左右を示す矢印のみが存在した。参加者は、左手のコントローラのアナログスティックを操作して方向を選択した。選択後決定ボタンを押した。この一連の手続きを 1 試行とした。遠心性コピーと視覚フィードバックの一致不一致の 2 水準、運動方向が左右の 2 水準、青色の球体の停止後の運動距離が 11 水準となった。よって計 44 条件とした。各条件 20 試行行い、計 880 試行を 2 日に分けて行なった。

3.7 結果

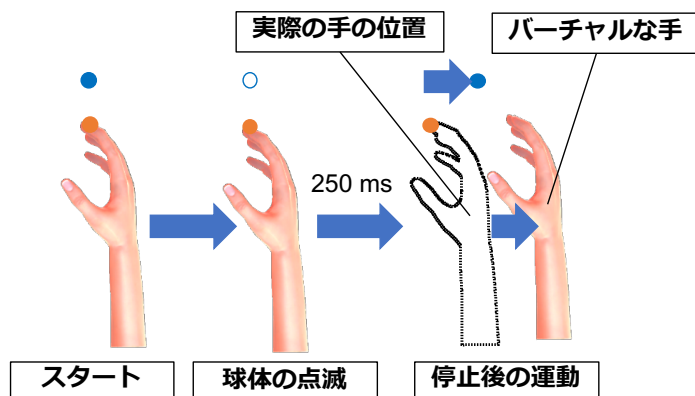


図 3.5 運動の流れの一例

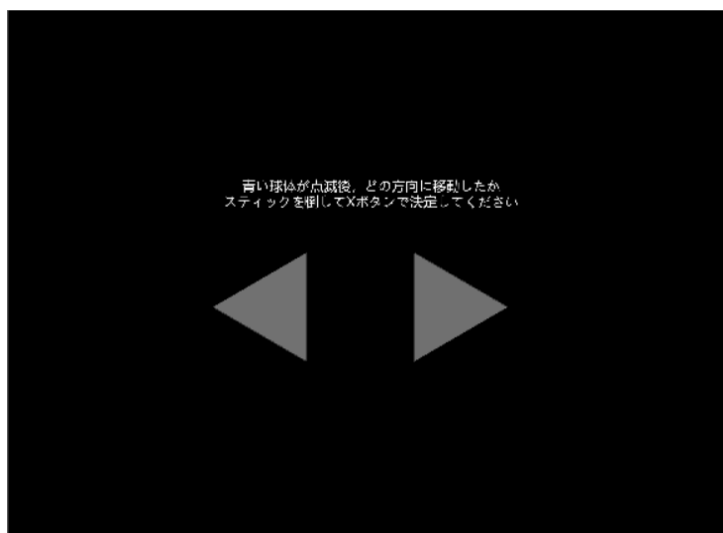


図 3.6 球体の運動方向を判断する画面

3.7 結果

3.7.1 解析方法

各参加者ごとに一旦停止後の青色の球体の運動距離ごとに二肢強制選択で右を選択した割合を算出した。停止後の青色の球体の運動距離が左右に 2 cm の時に割合が 9 割以下の参加者は運動を正確に知覚できていないとして除外した。算出した割合に対して、心理測定関数

3.7 結果

を当てはめた。その求めた心理測定関数から主観的等価点および弁別閾を求めた。選択率が 50 %となる偏位距離を主観的等価点とし、選択率が 25 %と 75 %になる偏位距離の差異を弁別閾とした。

3.7.2 解析結果

参加者 12 名の内、2 名は球体の運動を正確に知覚できていないとして除外した。各運動距離ごとに割合を算出し心理測定関数を求めた。その結果を図??に示す。球体が停止後静止する 0 cm 条件において手の運動方向とは反対の方向を選択した割合に上昇が見られた。しかし、それ以外の停止後に球体が移動する条件において手の運動方向と同じ方向を選択する割合の上昇が見られた。そこで、停止後に球体が静止する条件と移動する条件に分けて分析を行った。0 cm 条件だけでは、主観的等価点を求められないため、割合に対して、運動方向および遠心性コピーと視覚フィードバックの一致不一致の 2 要因の分散分析を行った。その結果、図 3.8 に示すように運動方向に主効果が見られなかった ($F(1, 9) = 2.36, p = .15, \eta_G^2 = .18$)。一致不一致にも主効果が見られなかった ($F(1, 9) = .016, p = .9, \eta_G^2 = .0001$)。次に、停止後に球体が運動する場合における運動方向への影響を検討するため、球体が静止している 0 cm 条件以外のデータで心理測定関数を求めた。各参加者ごとの運動方向が右方向の心理測定関数と運動方向が左方向の心理測定関数をまとめたものを図 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 に示す。また、全体平均の結果を図 3.7 に示す。求めた各参加者ごとの各条件の心理測定関数から主観的等価点を求め、遠心性コピーと視覚フィードバックの一致不一致と運動方向の左右の 2 要因の分散分析を行なった (図 3.14)。その結果、一致不一致には有意な差は見られなかった ($F(1, 9) = .70, p = .80, \eta_G^2 = .0001$)。しかし、運動方向の左右に有意な差が見られた ($F(1, 9) = 17.20, p = .0025, \eta_G^2 = .55$)。

3.7 結果

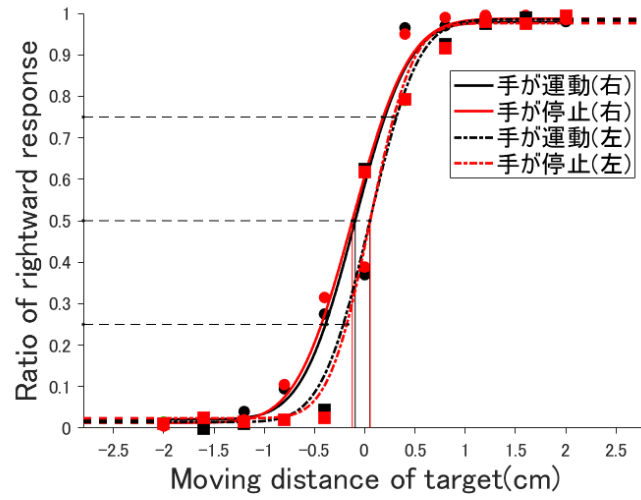


図 3.7 全体平均での心理測定関数

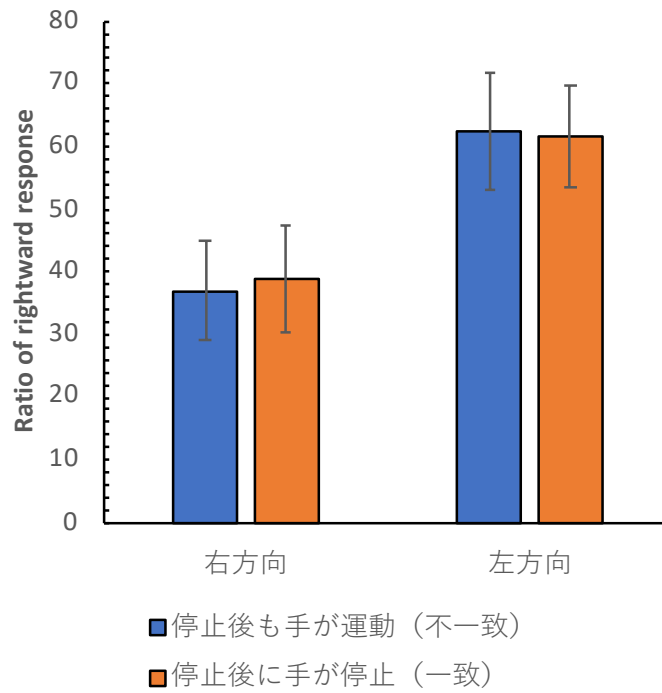


図 3.8 0 cm 条件の割合の平均

3.7 結果

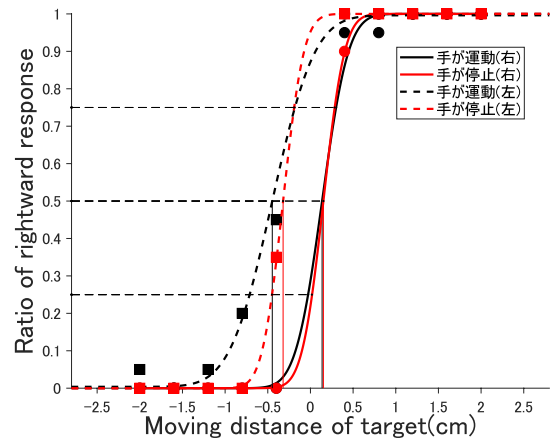
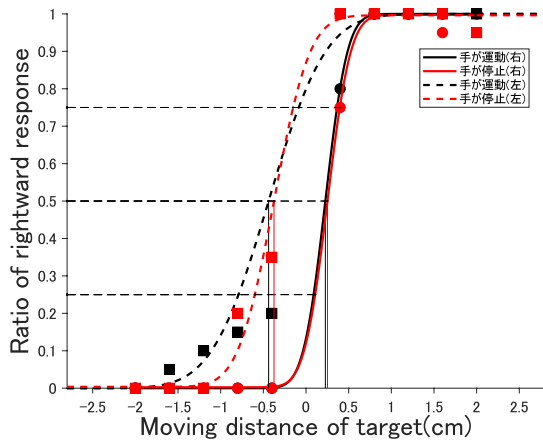


図 3.9 参加者 1 (左), 参加者 2 (右)

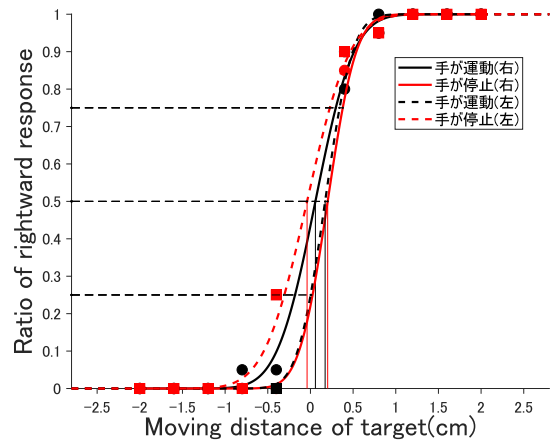
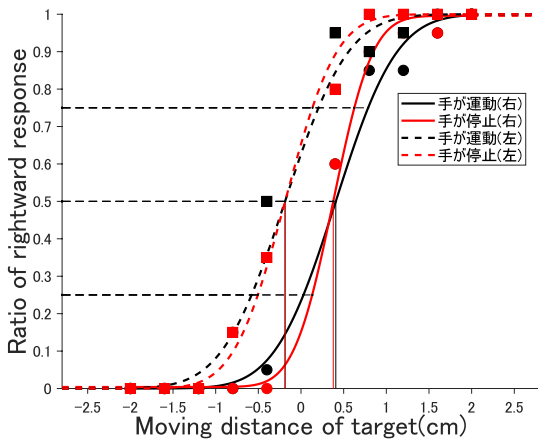


図 3.10 参加者 3 (左), 参加者 4 (右)

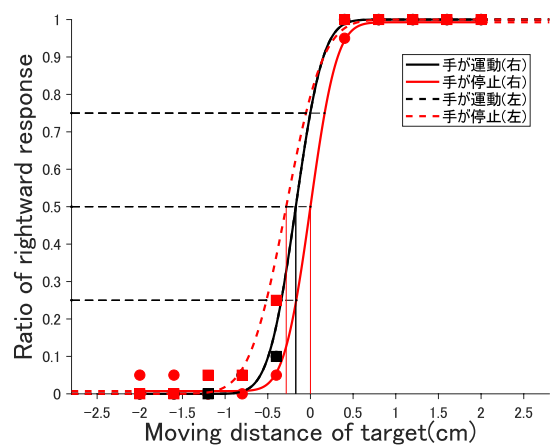
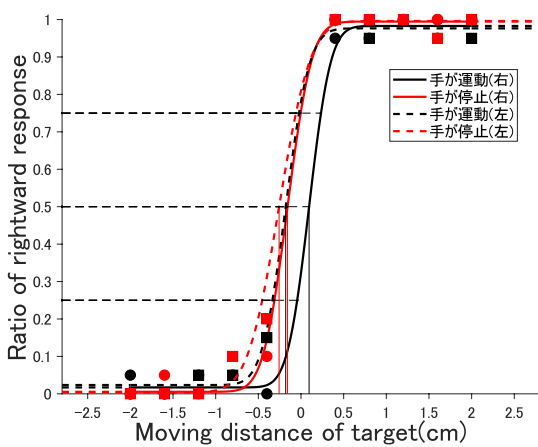


図 3.11 参加者 5 (左), 参加者 6 (右)

3.8 考察

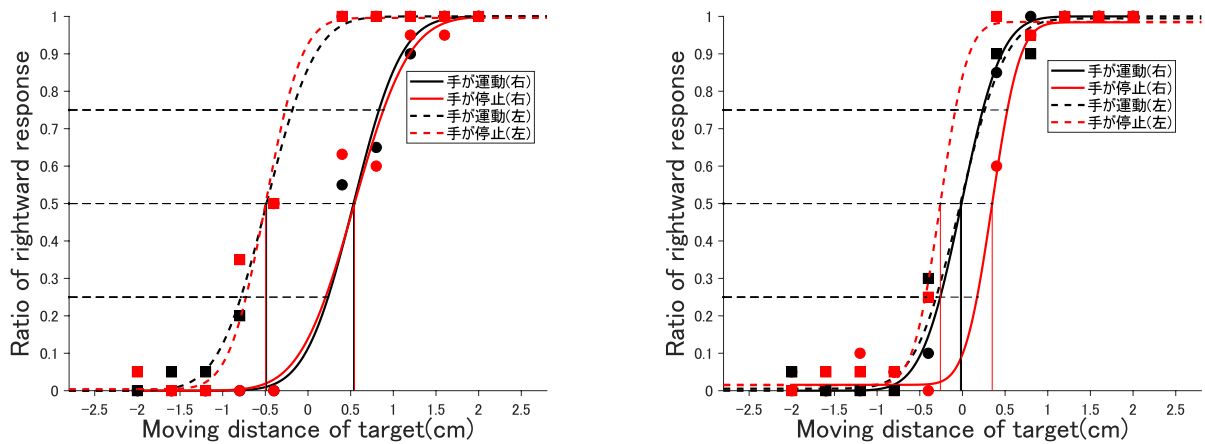


図 3.12 参加者 8 (左), 参加者 9 (右)

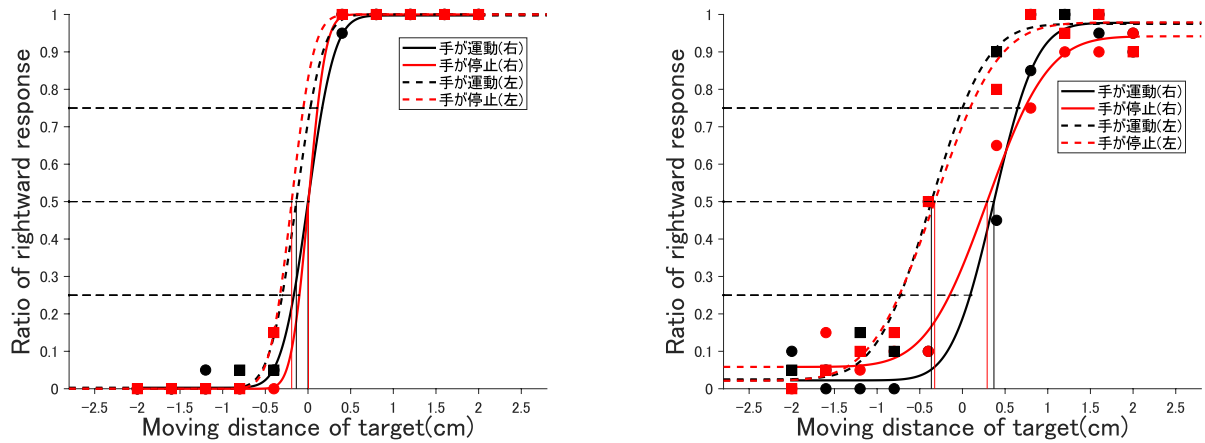


図 3.13 参加者 10 (左), 参加者 12 (右)

3.8 考察

遠心性コピーと視覚フィードバックの一致不一致について検討した結果、条件間の主観的等価点に差が見られなかった。不一致条件において、バーチャルな手は停止後移動を行う。この時のバーチャルな手は自己の手と運動が同期していない。先行研究において、バーチャルな手と自己の手が非同期の場合、同期した場合と比べてドリフト量の低下が報告されている [10,16,18]。このドリフト量の低下はバーチャルな手に対する自己所有感の低下であると考えられる。そのため、不一致条件での停止後のバーチャルな手への自己所有感が低下し、

3.8 考察

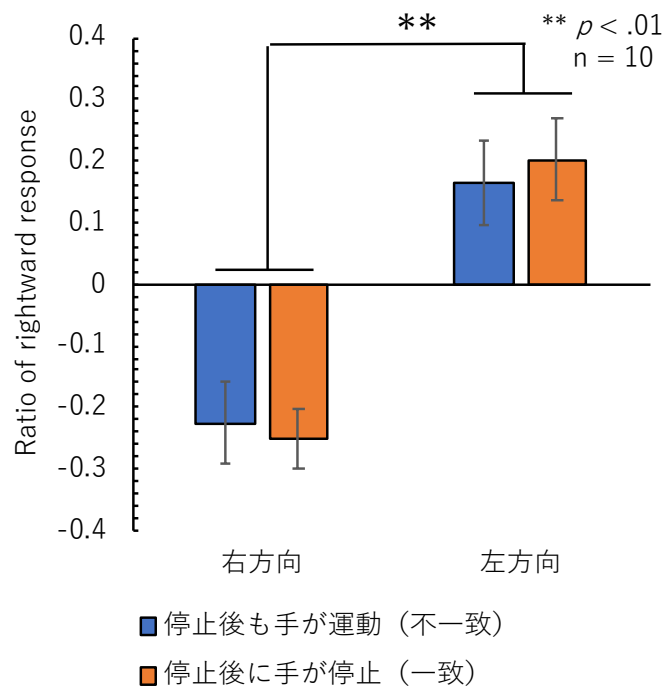


図 3.14 各条件ごとの平均

自己の手の移動であると知覚されなかった可能性がある。これらのことから、遠心性コピーと視覚フィードバックの一致不一致の主観的等価点に差が見られなかったと考えられる。

運動方向に効果が見られた。そのため、青い球体は手の運動方向により動いて知覚され、逆に運動方向と反対側にわずかに運動した球体は静止しているように知覚されたと考えられる。これは、遅延やフラッシュラグ効果により停止時の手の位置は球体の位置よりも運動方向側に移動して知覚されていると考えられる。このことは、停止後に球体が停止する 0 cm 条件において、運動方向とは反対方向に動いたと知覚された傾向が見られたことからとも言える。この、遅延やフラッシュラグ効果による手の位置の移動の直後に、手の運動方向側に球体が運動する場合、球体は停止した実際の手の位置に近づく。逆に、手の運動方向とは反対方向に運動する場合、球体は停止した手の位置よりも遠ざかる。この球体の運動が自己の手に近づく運動が遠ざかる運動よりも感度が高く、手の運動方向側を知覚されたと判断した割合が上昇したと考えられる。

第 4 章

総合考察

4.1 実験間の考察

実験 1 では恒常法を用いてバーチャルな手に対する弁別特性と運動の有無による弁別特性への影響について検討した。その結果、運動の有無に関わらず弁別閾は設定した偏位距離の条件を超えていた。12 名の参加者の内、10 名の参加者は最大の偏位条件でも正答率が 75 %未満であった。また、運動の有無で差が見られなかったため、課題として行なった運動の弁別特性への影響が見られない可能性が示唆された。偏位距離の長さによって偽物の手に対する錯覚の生じ方が一様の結果を示されていない理由として、偽物の手に対する弁別感度がそもそも低いことが結果から示唆された。この弁別感度が低い理由として、両条件の共通部分として運動の同期がある。運動なし条件においても課題の運動は行なっていないが、バーチャルな手と自己の手の運動の同期は行なっていた。先行研究において、自己の手と同期して運動するバーチャルな手を呈示する条件は、静止したバーチャルな手を呈示する条件に比べドリフト量が大きかったことが報告されている [10,16]。これらのことから、能動的な運動の同期の影響によって運動の有無に関わらず視覚の位置情報に強く依存したことで、自己の手とバーチャルな手の弁別が困難になったと考えられる。

実験 2 では、遠心性コピーと視覚フィードバックの一致不一致について検討した。その結果、条件間の主観的等価点に差が見られなかった。不一致条件において、バーチャルな手は停止後移動を行う。この時のバーチャルな手は自己の手と運動が同期されていなかった。先行研究において、バーチャルな手と自己の手が非同期の場合、同期した場合と比べドリフト量の低下が報告されている [10,16]。そのため、不一致条件での停止後のバーチャルな手が

4.2 今後の展望

自己の手と同期されていなかったため、自己所有感が低下し、自己の手が運動していると知覚されなかった可能性がある。これらのことから、遠心性コピーと視覚フィードバックの一致不一致の主観的等価点に差が見られなかったと考えられる。そして、球体が停止後運動する条件において運動方向に主効果が見られた。これは、遅延やフラッシュバック効果によって実際に手が停止した位置よりも知覚された停止位置がわずかに運動方向に移動したことにより、球体が運動方向側に移動する条件では手の停止位置に近づく、逆に運動方向の反対方向に移動する条件では手の停止位置から離れることになる。この近づく運動が遠のく運動よりも感度が高く、手の運動方向側を選択した割合が上昇したと考えられる。

実験1では、バーチャルな手と自己の手の能動的な運動の同期の影響により偏位の弁別が困難になる可能性が示された。そのため、視覚フィードバックと自己受容感覚が矛盾なく同期することで、視覚フィードバックが自己受容感覚よりも優先されたと考えられる。実験2同期した手の運動方向に応じてオブジェクトの運動知覚が影響を受けたが、非同期のバーチャルな手の場合オブジェクトの運動知覚に影響を及ぼさなかった。そのため、視覚フィードバックと自己受容感覚の同期の矛盾により、視覚フィードバックの影響が低下しと考えられる。これらのことから、バーチャルな環境において自己受容感覚と視覚が同期されるかどうか、自己身体の知覚において視覚が優先的に処理されるかを決定することが示唆された。

4.2 今後の展望

4.2.1 運動の有無による弁別特性の変化

実験1では、バーチャルな手に対する弁別特性と運動の有無による弁別特性への影響について検討した。その結果、運動の有無に関わらず弁別感度が低下が確認された。しかし、運動の有無による弁別特性への影響については明らかになっていない。これは、弁別特性に与える影響が、バーチャルな手と自己の手の能動的運動の同期が課題の運動よりも大きかったと考えられる。本研究では運動の有無の両条件とも、バーチャルな手と自己の手の運動の同期が行われていた。そのため、運動の同期による影響を統制することで運動の有無による弁

4.2 今後の展望

別特性への影響を検討することができると考えられる。

4.2.2 球体が運動する錯覚

バーチャルな手で運動する球体を追従した試行において、停止時にそれまでの運動方向とは反対に球体が運動したと知覚された。この現象は非常に明確に知覚されていた。本研究では、この現象は遠心性コピーと視覚フィードバックの不一致によって生じると仮説を立て検証した。その結果、一致不一致条件の主観的等価点に差は見られなかった。このことから、本実験中には錯覚が生じていなかったと考えられる。しかし、本研究における不一致条件は、停止後に運動するバーチャルな手は自己の手と同期していなかった。これによって、停止後に運動するバーチャルな手を自己の手であると感じなかったことで、一致不一致の主観的等価点に差が見られなかった可能性がある。そこで今後の展望として、停止後に運動するバーチャルな手を自己の手と同期させることによる一致不一致の効果の検討およびバーチャルな手の同期非同期による影響について検討する必要があると考えられる。

4.2.3 停止後の球体の運動方向の知覚

球体が停止後にそれまでの運動方向と同じ方向を選択した割合に上昇が見られた。これは、遅延やフラッシュラグ効果によって手が停止したと知覚した位置がわずかに運動方向側に移動したことにより、停止後球体が運動方向側に移動する場合は手の停止位置に近づく、逆に反対方向の移動する場合は手の停止位置から遠ざかる。この近づく移動が遠のく移動よりも感度が高く、手の運動方向側を選択した割合が上昇したと考えられる。このことから、手の運動による自己受容感覚または自己身体の見視フィードバックは必要にならないと考えられる。そのため、手の運動を伴わない環境で同様に知覚がされるか検討することによる自己受容感覚の影響についての検討と視覚フィードバックに自己身体を用いない環境で同様の知覚がなされるか検討することによる自己身体の見視フィードバックの影響についての検討が必要であると考えられる。

第 5 章

まとめ

本研究では、バーチャル環境におけるバーチャルな手に対する弁別特性と運動の有無が弁別特性に与える影響について検討した。加えて、遠心性コピーと視覚フィードバックの一致不一致による外環境のオブジェクト知覚に及ぼす影響について検討した。

実験 1 では、バーチャルな手を自己の手からいくつかの距離に偏位させ、運動あり条件と運動なし条件を行ない条件ごとの心理測定関数を求めた。その結果、運動の有無に関わらず弁別閾が設定した偏位距離を超えていた。このことから、バーチャルな手の弁別感度は運動の有無に関わらずそもそもが低い可能性が示された。要因として、バーチャルな手と自己の手の運動が同期されていたことによって、運動の有無に関わらず視覚の位置情報に依存したことで、自己の手とバーチャルな手の弁別が困難なる可能性が考えられる。

実験 2 では、バーチャルな手の運動を操作することで、遠視性コピーと視覚フィードバックの不一致の効果について検討した。その結果、一致不一致の間の主観的等価点に差が見られなかった。これは、不一致条件における停止後に運動するバーチャルな手が自己の手と非同期であったため、バーチャルな手の運動を手の運動であると知覚しなかった可能性が考えられる。また、手の運動方向の効果について検討した。その結果、球体が停止後運動する条件において運動方向に主効果が見られた。これは、遅延やフラッシュバック効果によって実際に手が停止した位置よりも知覚された停止位置がわずかに運動方向に移動したことにより、球体が運動方向側に移動する条件では手の停止位置に近づく、逆に運動方向の反対方向に移動する条件では手の停止位置から離れることになる。この近づく運動が遠のく運動よりも感度が高く、手の運動方向側を選択した割合が上昇したと考えられる。

実験 1 において、視覚フィードバックと自己受容感覚が矛盾なく同期することで視覚

フィードバックが自己受容感覚よりも優先され、実験2では、視覚フィードバックと自己受容感覚の同期の矛盾により、視覚フィードバックの影響が低下した。これらのことから、バーチャルな環境において自己受容感覚と視覚が同期されるかどうか、自己身体の知覚において視覚が優先的に処理されるかを決定することが示唆された。

謝辞

本研究を進めるにあたり，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，副査を勤めご指導いただいた篠森敬三先生，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被験者を快く引き受けていただいた繁榊研究室，他研究室の皆様にも感謝いたします。

参考文献

- [1] Botvinck, M. and Cohen, J.: “Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see.”, *Nature*, 391, 756, 1998.
- [2] Slater, M., Peres-Marcos, D., Ehrsson, H. H. and Sanchez-Vives, M. V.: “Towards a digital body: the virtual arm illusion.”, *Frontiers in human neuroscience*, 2, 6, 2008.
- [3] Slater, M., Peres-Marcos, D., Ehrsson, H. H. and Sanchez-Vives, M. V.: “Inducing illusory ownership of a virtual body.”, *Frontiers in Neuroscience*, 3, 2, 2009.
- [4] Hara, M., Pozeg, P., Rognini, G. and Higuchi, T., et al.: “Voluntary Self-touch Increases Body Ownership.”, *Frontiers in Psychology*, 6, 1509, 2015.
- [5] Shibuya, S., Unenaka, S. and Ohki, Y.: “Body ownership and agency: task-dependent effects of the virtual hand illusion on proprioceptive drift.”, *Exp Brain Res*, 235, pp. 121-134, 2017.
- [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*, 64(1), pp. 104-109, 2007.
- [7] Zopf, R., Savage, G. and Williams, M.: “Crossmodal congruency measures of lateral distance effects on the rubber hand illusion”, *Neuropsychologia*, 48(3), pp. 713-725, 2010.
- [8] Kalckert, A. and Ehrsson, H. H.: “The spatial distance rule in the moving and classical rubber hand illusions.” *Consciousness and Cognition*, 30, pp. 118-132, 2014.
- [9] 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), pp.61-67,

参考文献

- 2019.
- [10] 川村卓也, 繁榎博昭: “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), pp. 141-147, 2016.
- [11] 一川誠, 政倉祐子: “錯視観察に基づく能動的観察における視覚情報処理特性についての理解—フラッシュラグ効果を中心とした検討—”, 心理学評論, 55, pp.367-375, 2012.
- [12] DosparaExpress, “Oculus が高精度なハンドトラッキングのデモ動画を公開、ただし製品化までは遠そう”, <https://www.dospara.co.jp/express/vr/467330>, 最終閲覧日 (2020/2/3)
- [13] 館, 佐藤誠, 廣瀬通孝, “バーチャルリアリティ学”, コロナ社, 2010.
- [14] Ollie Green, “20 HILARIOUS VRCHAT MOMENTS THAT’LLEAVE YOUR SIDE HURTING FROM LAUGHTER”, <https://www.gamebyte.com/20-hilarious-vrchat-moments-thatll-leave-side-hurting-laughter/>, 最終閲覧日 (2020/2/3)
- [15] 本間元康, ” ラバーハンドイリュージョン: その現象と広がり”, *Cognitive Studies*, 17(4), pp.761-770, 2010.
- [16] Kalckert, A. and Ehrsson, H. H.: ”Moving a rubber hand that feels like your own: a dissociation of ownership and agency.”, *Frontiers in Human Neuroscience*, 6(40), pp. 1-14, 2012.
- [17] Dummer, T., Picot-Annand, A., Neal, T. and Moore, C.: “Movement and the rubber hand illusion.”, *Perception*, 32(2), pp. 271-280, 2009.
- [18] Asai, T.: “Agency elicits bodyownership: proprioceptive drift toward a synchronously acting external proxy.”, *Experimental Brain Research*, pp. 1-12, 2015.
- [19] von Holst EV. and Mittelstaedt H.: “The reafference principle.”, *Naturwissenschaften*, 37, pp. 464-467, 1950.
- [20] Nijihawan, R.: “Motion extrapolation in catching.”, *Nature*, 370, pp. 256-257, 1994.

参考文献

- [21] 井関龍太, “ANOVA 君”, <http://riseki.php.xdomain.jp/index.php?ANOVA%E5%90%9B>,
最終閲覧日 (2020/2/3)