

令和7年度
修士学位論文

余剰肢の身体化が自己身体の注意資源配分 に与える影響

Effects of Supernumerary Limb Embodiment on the
Allocation of Attentional Resources

高尾 優一

指導教員 繁 柊 博 昭

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

余剰肢の身体化が自己身体の注意資源配分に与える影響

高尾 優一

近年、身体に新たな腕を追加する「余剰肢」は、作業効率の向上や複雑なタスクの支援を可能にする技術として研究が進められている。一方で、人間の注意に関する研究では、注意資源は有限であり、複数の処理対象間で配分される必要があることが示されている。この枠組みに基づくと、複数の課題や対象を同時に処理するためには、限られた注意資源をそれぞれに配分する必要がある。また、拡張身体として余剰肢を追加した際には視野内に映る手の視覚刺激が増加することになる。手の視覚刺激と注意に関する研究では、手の視覚刺激が注意を誘発するという研究結果が報告されている。これらの先行研究を踏まえると、余剰肢を追加することで視界内に存在する身体視覚刺激の数が増加した場合、自己身体と余剰肢の間で注意資源が再配分される可能性が考えられる。

そこで本研究では、余剰肢（第3・第4の腕）を用いた実験を通して、余剰肢の身体化が自己身体に向けられる注意資源の配分に与える影響を明らかにすることを目的とする。VR空間内で、足で操作する余剰手と手で操作する自己身体を呈示した上で、目標刺激の検出課題を行った。

実験の結果、余剰手を追加した際に注意が再配分されないこと、注意資源配分に操作する身体部位の違いによる効果などの視覚刺激以外の効果が影響を及ぼすことが示唆された。総じて、余剰肢を追加することは自己身体の注意資源配分を変化させるほどの影響を及ぼさないと考えられる。

キーワード 拡張身体, 余剰肢, Virtual Reality(VR)

Abstract

Effects of Supernumerary Limb Embodiment on the Allocation of Attentional Resources

Yuichi Takao

In recent years, research has advanced on "supernumerary limbs"—adding extra arms to the body—as a technology enabling improved work efficiency and support for complex tasks. Meanwhile, studies on human attention have shown that attentional resources are finite and must be allocated among multiple processing targets. Based on this framework, processing multiple tasks or targets simultaneously requires allocating limited attentional resources to each. Furthermore, adding supernumerary limbs as an extended body increases the number of hand visual stimuli within the field of view. Research on hand visual stimuli and attention has yielded findings indicating that hand visual stimuli can attract attention, while other studies have suggested that attentional shifts may be delayed near the hands.

Considering these prior studies, when supernumerary limbs are added and the number of bodily visual stimuli in the field of view increases, attentional resources may be redistributed between one's own body and the supernumerary limbs. Therefore, this study aimed to clarify the effects of supernumerary limb embodiment on the allocation of attentional resources directed toward one's own body through experiments using supernumerary limbs (third and fourth arms). Within a VR space, participants were presented with supernumerary hands operated by the feet and one's own hands operated by the hands as cue stimuli, and compared reaction times when a target stimulus was

presented near the supernumerary hands versus near one's own hands.

The results suggested that adding the supernumerary limbs did not redistribute attention, and that factors other than the visual stimulus, such as the effect of differences in the body part being manipulated, influenced the allocation of attentional resources. Overall, it appears that adding the supernumerary limbs does not exert an influence significant enough to alter the allocation of attentional resources to the own body.

key words Extended Body, Supernumerary Limb, Virtual Reality

目次

第1章	はじめに	1
1.1	拡張身体	1
1.2	注意資源	2
1.3	視覚の手がかり	2
1.4	目的	3
第2章	実験1	4
2.1	目的	4
2.2	実験参加者	4
2.3	実験環境	5
2.3.1	使用機器	5
2.3.2	ソフトウェア	7
2.4	呈示刺激	7
2.5	実験条件	9
2.6	実験手続き	10
2.6.1	球体追従課題	10
2.6.2	配置変更課題	11
2.6.3	検出課題	11
2.6.4	質問紙	13
2.7	結果	14
2.8	考察	17
第3章	実験2	19
3.1	目的	19

目次

3.2	実験参加者	19
3.3	実験環境	20
3.3.1	使用機器	20
3.3.2	ソフトウェア	20
3.4	呈示刺激	21
3.5	実験条件	23
3.6	実験手続き	25
3.6.1	球体追従課題	25
3.6.2	鏡視認課題	26
3.6.3	配置変更課題	26
3.6.4	検出課題	27
3.6.5	質問紙	28
3.7	結果	30
3.8	考察	35
第4章	まとめ	36
	謝辞	37
	参考文献	38

目次

1.1	余剰手の例 ([3] より引用)	1
1.2	実験の様子 ([9] より引用)	2
2.1	実験に用いた机と椅子	5
2.2	HMD (VIVE pro)	6
2.3	VIVE Tracker	6
2.4	使用した手アバタ	7
2.5	余剰手の呈示位置	7
2.6	検出課題時の視覚刺激	8
2.7	手アバタの配置	8
2.8	余剰手の身体化条件	9
2.9	球体追従課題の様子	10
2.10	配置変更課題と検出課題の手順	12
2.11	質問紙の様子	13
2.12	身体化条件と各手がかりにおける反応時間	14
2.13	各手アバタに対する手としての身体化スコア	15
2.14	余剰手感覚	16
3.1	SteamVR Base Station 2.0	20
3.2	実験に使用した机と椅子	20
3.3	4本の腕を有する全身アバタ	21
3.4	余剰手の呈示位置	22
3.5	検出課題における視覚刺激の位置関係	22
3.6	身体化条件	23

図目次

3.7	配置条件の視覚刺激差分	24
3.8	球体追従課題の様子	25
3.9	鏡視認課題の様子	26
3.10	判定用のオブジェクト（本来は透明なオブジェクト）	27
3.11	配置変更課題と検出課題の手順	28
3.12	質問紙の様子	29
3.13	手がかりが，余剰手+自己身体条件における反応時間	30
3.14	手がかりが，余剰手条件における反応時間	31
3.15	手がかりが，自己身体条件における反応時間	32
3.16	各手アバタに対する手としての身体化スコア	33
3.17	余剰手感覚	34

第 1 章

はじめに

1.1 拡張身体

近年，ロボティクスや VR 技術の発展に伴い，人間の身体能力を拡張する「拡張身体 (Extended Body)」に関する研究が注目されている [1, 2]. 拡張身体技術は，人間が本来持たない身体部位や機能を付加し，それをあたかも自己身体の一部であるかのように操作可能にすることを目指している [3]. 中でも，身体に新たな腕を追加する「余剰肢 (Supernumerary Limb)」は，作業効率の向上や複雑なタスクの支援を可能にする技術として研究が進められている [4]. 余剰肢を有効に活用するためには，単に操作可能であるだけでなく，余剰肢が自己身体の一部として知覚・制御される「身体化」が重要であるとされている [5]. これまでの研究では，運動の同期や感覚フィードバックを用い，余剰肢の動きと被験者の身体運動を対応づける実験が行われてきた. その結果，余剰肢に対して身体所有感や運動主体感が生じることが示されている [6].

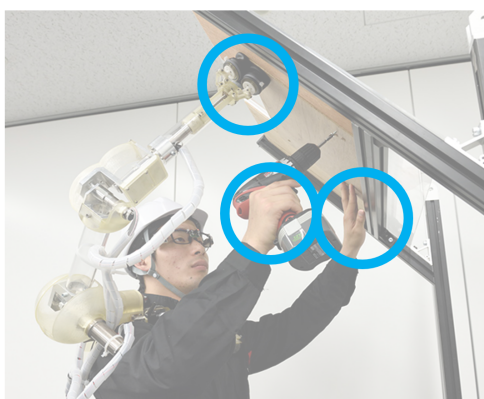


図 1.1: 余剰手の例 ([3] より引用)

1.2 注意資源

1.2 注意資源

人間の注意に関する研究では、注意資源は有限であることが示されている [7]. Kahneman (1973) は、複数の課題を同時に遂行させる二重課題実験の知見に基づき、注意を限られた処理資源として捉える容量制限モデルを提唱した。課題負荷が増大するにつれて成績が低下することから、注意資源は有限であり、複数の処理対象間で配分される必要があることが示されている [8]. この枠組みに基づくと、複数の課題や対象を同時に処理するためには、限られた注意資源をそれぞれに配分する必要がある。

1.3 視覚的手がかり

Reed らは、手の視覚刺激と注意の関係を検討するため、実験参加者の手が視界内に存在する条件と存在しない条件を設定し、手の近傍及び遠方に呈示された視覚刺激に対する検出成績を比較する実験を行った [9]. 参加者の手をディスプレイ近傍に配置した状態で視覚探索課題を実施し、刺激の検出反応時間を測定した。その結果、手が視界内に存在する場合、手の近傍に呈示された刺激に対する反応時間が短縮されることが示され、手の視覚刺激がその周辺空間における視覚的注意を誘発することが報告された。



図 1.2: 実験の様子 ([9] より引用)

一方で、Taylor 及び Witt は、手の視覚刺激が必ずしも注意を促進するわけではないことを示している [10]. 彼らは、被験者の手を刺激呈示空間の近傍または遠方に配置した状態で視覚課題を行い、手の近傍と遠方に呈示された刺激に対する反応特性を比較した。その結

1.4 目的

果、手の近傍では刺激検出が一貫して促進されるのではなく、条件によっては反応時間が遅延することが示された。この結果は、手の近傍空間においては注意が強く固定され、注意の移動や切り替えが抑制される可能性があることを示唆している。すなわち、手の視覚刺激は注意を単純に増強するのではなく、注意の分布様式そのものを変化させる要因であると考えられる。

1.4 目的

これらの先行研究を踏まえると、余剰肢を追加することで視界内に存在する身体視覚刺激の数が増加した場合、自己身体と余剰肢の間で注意資源が再配分される可能性が考えられる。これは本来自己身体に配分されていた注意資源が減少することを意味し、自己身体に対する危険などの事態に適切に反応できなくなる可能性がある。一方で余剰肢に十分な注意が配分されない場合は余剰肢を適切に処理できない可能性もある。これらのことから、余剰肢を追加した際に、注意資源が自己身体と余剰肢にどのように配分されるのか、また余剰肢の身体化がこの配分にどのような影響を与えるのかについて検討する必要がある。

そこで本研究では、余剰肢（第3・第4の腕）を用いた実験を通して、余剰肢の身体化が自己身体の注意資源配分に与える影響を明らかにすることを目的とする。VR空間内で、足で操作する余剰手と手で操作する自己身体の身体アバタを呈示した上で、目標刺激の検出課題を行った。目標刺激の呈示に先立って呈示される身体の視覚刺激を手がかりと定義し、この手がかりの周辺に目標刺激を呈示する。本研究では、Posnerパラダイム [11] で用いられる一時的に呈示される手がかりではなく、常時呈示されている手アバタを手がかり刺激として用いた。これは、危険が事前の予告なく身体周辺に出現する状況を想定し、自己身体および余剰手周辺に恒常的に向けられている注意の状態を検討するためである。目標刺激が余剰手周辺に呈示された場合の反応時間と自己身体周辺に呈示された場合の反応時間を比較した。

第 2 章

実験 1

2.1 目的

余剰手の活用例として、余剰手で物体を押さえつけて固定しながら自己身体で接着を行うといった、4つの手を同時に操作する作業が考えられる。このような作業を行う上で、視界内に4つの手が存在する際に注意資源がどのように配分されるのかを検討する。机に4つの手アバタを配置し、手アバタ周辺に呈示される目標刺激に対する反応時間を計測する検出課題を行った。4つの手アバタは両手足の動きに同期するように実装し、両手で操作する手アバタを自己身体、両足で操作する手アバタを余剰手と定義した。目標刺激が呈示される領域は4つの手アバタ周辺とし、4か所設定した。

2.2 実験参加者

実験1の参加者は正常な視力（矯正含む）を有する右利きの大学生23名であった。

2.3 実験環境

2.3 実験環境

2.3.1 使用機器

実験はデスクトップパソコンを用いた。性能を以下に示す。

- OS: Windows 11
- CPU: Intel(R) Core(TM) i5-14400
- GPU: NVIDIA GeForce RTX 4060 Ti
- メモリ: 32GB

実験参加者は足が床につく高さの椅子に座り、机に手を置いた状態で実験を行った。



図 2.1: 実験に用いた机と椅子

2.3 実験環境

視覚呈示にはヘッドマウントディスプレイ（HMD）の VIVE pro（HTC 社）を使用した。



図 2.2: HMD（VIVE pro）

参加者の手足の動きを取得するためのトラッカーとして VIVE Tracker（HTC 社）を使用し、両手足に装着した。



図 2.3: VIVE Tracker

また、HMD とトラッカーの位置を VR 空間と対応付けるために SteamVR Base Station 2.0 を使用した。

2.4 呈示刺激

2.3.2 ソフトウェア

実験環境はデスクトップパソコン上の Unity (Unity 2019.4.9f1) で構築した。

2.4 呈示刺激

実験参加者は VR 空間で自己身体の両手と両足で 4 つの手アバタを操作した。アバタの見た目はすべて同じであり、Vive Hand Tracking SDK[12] のサンプルアバタを使用した (図 2.4)。VR 空間における自己身体の手 (以降自己身体) は実空間の手に装着したトラッカーの動きに連動して動き、実空間で手が机に触れた際に VR 空間で机に触れ、視覚刺激に同期した力触覚刺激が生じるように設定した。VR 空間における余剰手 (以降余剰手) は実空間の足に装着したトラッカーの動きに連動して動き、実空間で足が床に触れた際に VR 空間で机に触れるように机の高さ分上方向にずらして呈示し (図 2.5)、視覚刺激に同期した力触覚刺激が生じるように設定した。



図 2.4: 使用した手アバタ

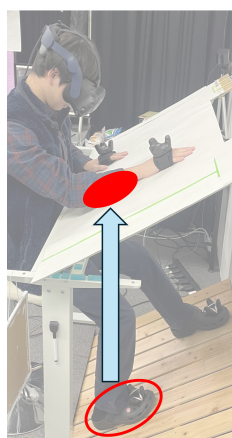


図 2.5: 余剰手の呈示位置

検出課題における視覚刺激は VR 空間の机に図 2.6 に示す位置関係で呈示し、手足を動かさない状態で目標刺激の検出を行った。本実験で行う検出課題では、目標刺激が呈示される可能性がある領域が固視点の周囲に 4 か所存在する。そのため、水平な机に呈示した場合、固視点下部に呈示した目標刺激は上部に呈示した目標刺激より体に近い場所に呈示され、網

2.4 呈示刺激

膜上の大きさが大きくなることが予想される。目標刺激の呈示領域によって目標刺激の網膜上の大きさが変化しないよう、机の面を 30 度傾け、前額平行面になるように設定した。これに合わせて、実世界では 30 度の傾斜のある天板の机と床を用意した (図 2.5)。検出課題における手アバタの配置は図 2.7 の 4 種類であり、配置が反応時間に与える影響を統制するために設定した。この配置によって体性感覚が変化するが、視覚刺激は配置によらず一定であった。

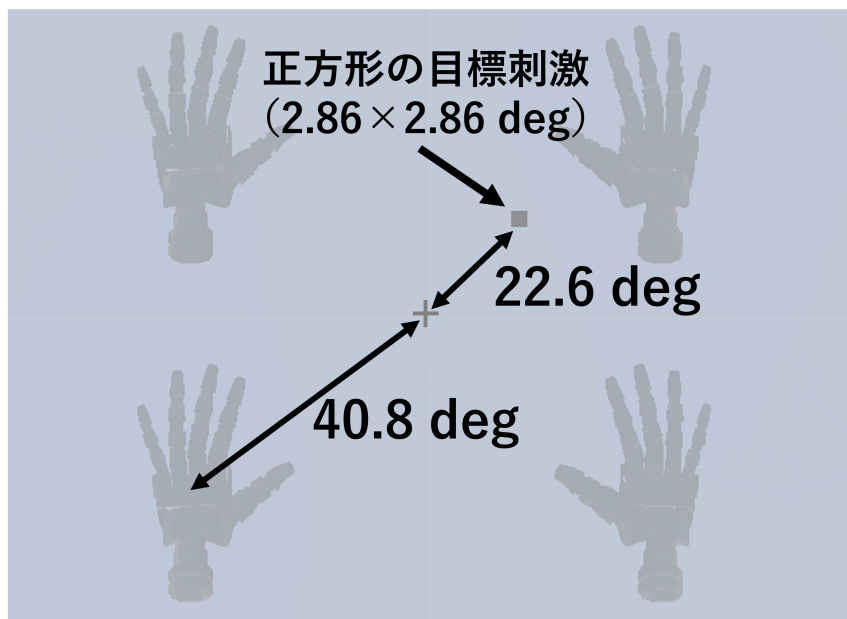


図 2.6: 検出課題時の視覚刺激

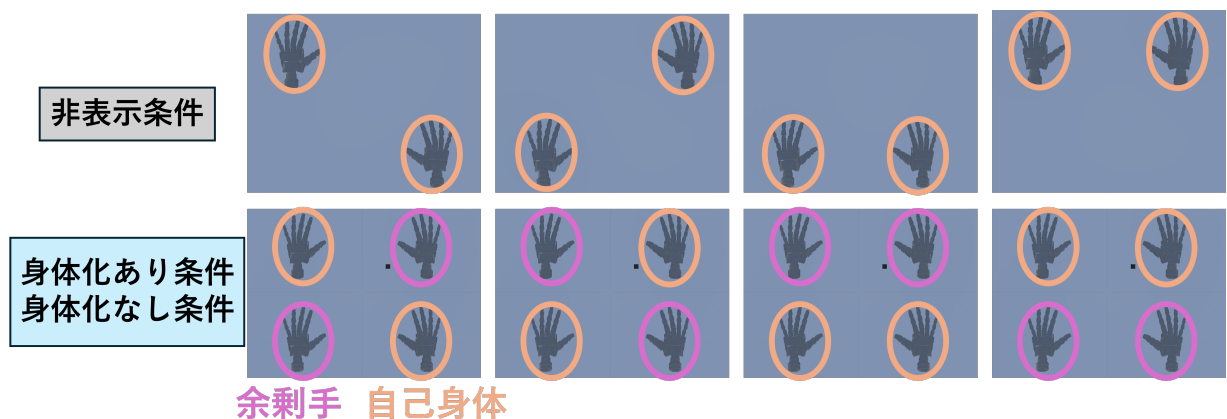


図 2.7: 手アバタの配置

2.5 実験条件

余剰手の身体化条件として「身体化あり条件」「身体化なし条件」「非表示条件」の3条件を設定した。また、これらの身体化条件間で自己身体を手がかりとした場合の反応時間の比較を行うことで、余剰手の身体化が注意の再配分に与える影響を検討した。

- 身体化あり条件

余剰手を足で操作し身体化する条件であり、両手両足で4つの手アバタを操作した。手がかりが余剰手の場合と自己身体の場合の反応時間を比較することで、余剰手と自己身体が誘発する注意の差を検討した。

- 身体化なし条件

余剰手を足で身体化しない条件であり、両手で2つの手アバタを操作し、自分では操作できない手が2つ呈示された。手がかりが余剰手の場合と自己身体の場合の反応時間を比較することで、身体化したアバタと身体化していないアバタが誘発する注意の差を検討した。

- 非表示条件

余剰手を呈示しない条件であり、自分で操作可能な2つの手アバタのみが呈示された。手がかりが存在しない場合と手がかりが自己身体の場合の反応時間を比較することで、自己身体が誘発する注意と、手がかりがない空間に向けられる注意の差を検討した。






身体化条件	拡張身体の身体化	視覚刺激
身体化あり条件	あり	
		
身体化なし条件	なし	
		
非表示条件	なし	

図 2.8: 余剰手の身体化条件

2.6 実験手続き

実験は3日間に分けて行い、1日に1条件の実験を3セット行った。条件の順番は参加者間でカウンターバランスを取った。1セットは、球体追従課題を行った後、手アバタの配置変更課題と目標刺激の検出課題を1試行として32試行行うこととした。3セット終了後に質問紙を実施した。以下に各課題の手続きについて説明する。

2.6.1 球体追従課題

各条件で操作する手アバタを身体化させるための課題であり、移動する球体を30秒間追従する課題を行った。この課題はVR空間内で運動主体感を利用したムービンググラバーハンド錯視を用いることで、余剰手に身体化を生じさせることを目的とした[13, 14]。球体の直径は4.8 degで、水平方向約66.9 deg、垂直方向約47.7 degの範囲内を約3.8 deg/sの速度でランダムな軌道で移動した。

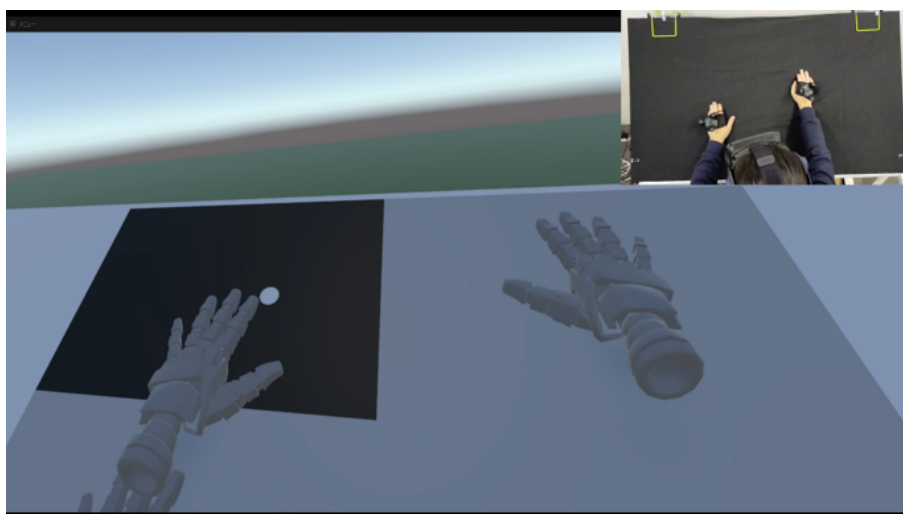


図 2.9: 球体追従課題の様子

2.6 実験手続き

2.6.2 配置変更課題

検出課題ごとに手アバタの配置を変更する課題であり、この課題は、検出課題における手アバタの配置が反応時間に与える影響を統制すること、及び手アバタを動かすことによって身体化を維持することを目的として設定した。

課題が開始されると、それぞれの手アバタの周辺に外向きの矢印が表示された。矢印に従って手足を移動させる操作を行うと、内向きの矢印と正しい座標に配置に対応する半透明な手アバタが呈示された。これに各手アバタを重ねることで課題が終了した。参加者は操作する手アバタを、正しい座標から約 5 mm 以内の誤差範囲に配置する必要があった。

目標刺激の検出課題を行う上で目標刺激と手アバタとの距離を統制するため、配置変更課題終了時に参加者のトラッカーの動きを反映した手アバタを非表示にし、あらかじめ設定した正しい座標に配置された 4 つの手アバタを呈示した。配置変更課題で、参加者は指定された座標に手アバタを配置していたが、図 1 に示すアバタの位置に完全に一致させることは困難であり、わずかな位置のずれが生じる可能性があった。このような位置のずれは、目標刺激の検出時における注意配分に影響を及ぼす恐れがあるため、配置変更課題終了時に正しい座標に配置された手アバタを呈示した。手アバタの切り替えによる位置ずれにより特定の手アバタに注意が誘発されないよう、検出課題開始前に 0.2 秒間の白色のブランク画面を挿入し、その後正しい座標に配置された手アバタを呈示した。

2.6.3 検出課題

目標刺激の検出課題では、机の上に手アバタを配置した状態で、机中心の固視点から 22.6 deg 離れた 4 か所のうち 1 つに目標刺激を呈示した。参加者は、目標刺激が呈示された方向に HMD を装着した頭部をできるだけ早く正確に動かすことで回答した。試行開始のトリガー及び回答の取得には、仮想的な光線による衝突判定を用いた。

検出課題が開始されると、机にオブジェクトを呈示し固視点を見るように促した。

VR 空間のカメラの位置（眉間にあたる位置）から発する仮想の光線が机中心の直径 4.8

2.6 実験手続き

deg の中心円と接触することでオブジェクトが非表示になり，検出課題が開始された．検出課題開始から目標刺激が呈示されるまでの時間は，刺激呈示タイミングの予測を防ぐため，1.5 秒から 3 秒の範囲でランダムに設定した．回答方向は，HMD の光線が中心円との接触を失った時に，4 分割された机領域（右上，左上，左下，右下）のどの部分と接触したかを取得することで判定した．目標刺激が呈示された領域と一致する机領域に光線が接触した場合を正答とし，それ以外の場合は誤答として扱った．反応時間は，目標刺激が呈示された時点から 0 秒とし，参加者が固視点から視線（HMD の向き）を移動させ，HMD の光線が中心円との接触を失った時点までの時間として定義した．

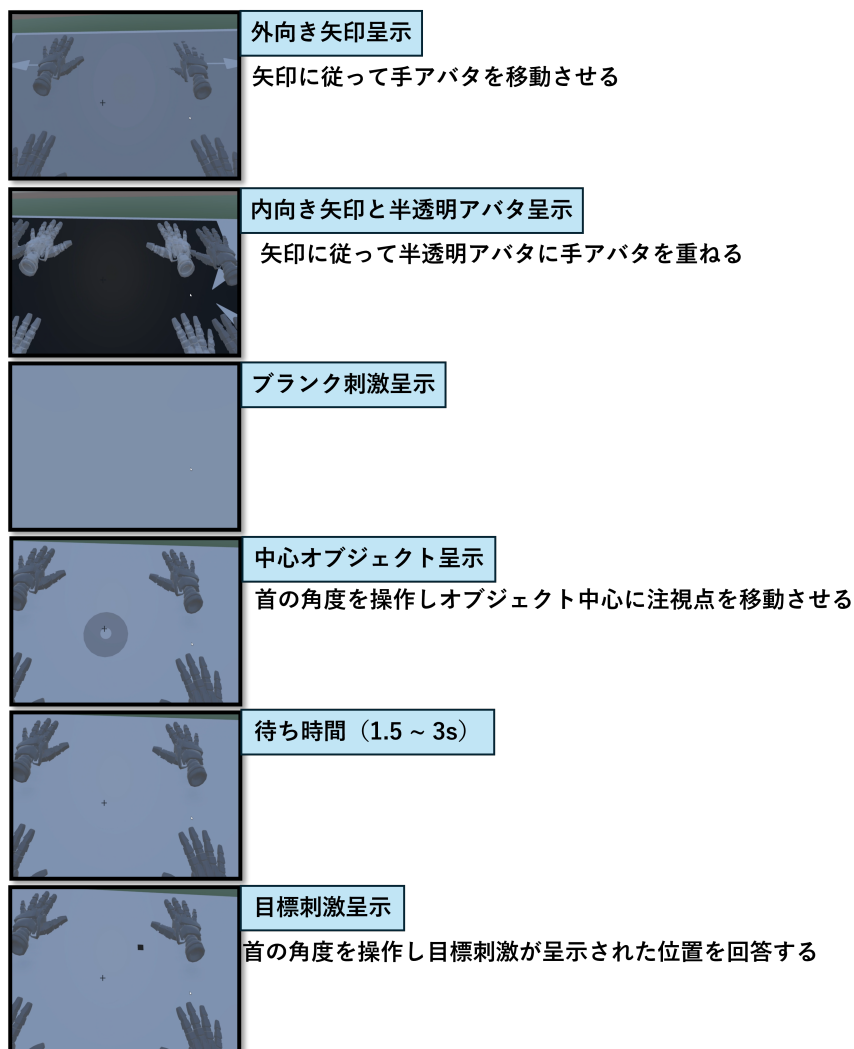


図 2.10: 配置変更課題と検出課題の手順

2.6 実験手続き

2.6.4 質問紙

各条件で実験中に呈示した各手アバタに対して、実験を通してどのように感じたかについての7段階リッカート尺度の質問紙を行った。参加者は1（全くそう感じなかった）から7（非常にそう感じた）の数字で回答を行った。質問紙の内容は、以下の4つであった。

1. 対象を自分の手のように感じた
2. 対象を自分の足のように感じた
3. 対象を自分の思うように操作できたと感じた
4. 自分の腕が3本以上あるように感じた

質問は各手アバタに対してそれぞれ行い、VR空間内で図のように表示し（図 2.11）、机の黒くなっている部分に配置されている手アバタに対して回答するよう指示した。問 1,2 の



図 2.11: 質問紙の様子

身体所有感、問 3 の運動主体感の質問を用いて、各手アバタに対して「手としての身体化スコア」を算出した。手としての身体化スコア = 問 1 + (8 - 問 2) + 問 3 で算出し、値が大きいほど手としての身体化の程度が大きいことを示す。

2.7 結果

身体化あり条件、身体化なし条件、非表示条件の3条件において、自己身体周辺と、自己身体周辺ではない領域（余剰手または非表示側）に目標刺激が呈示された場合の反応時間をそれぞれまとめ、図 2.12 に示す。手がかりが自己身体の場合を橙色で、身体化した余剰手の場合を紫色で、身体化していない余剰手の場合を青色で表示した。また、手がかりがない領域に目標刺激が呈示された場合の反応時間を灰色で表示した。これらの反応時間に対して身体化条件と手がかりを要因とする対応ありの2要因分散分析を行った結果、身体化の要因は有意ではなかったが ($F(1.68, 36.86) = 0.24, p = .768, \eta_G^2 = 0.00$)、手がかりが余剰手及び非表示側に呈示された場合の反応時間が自己身体手がかり側に呈示された場合の反応時間より有意に短いことが示された ($F(1, 22) = 4.48, p = .046, \eta_G^2 = 0.001$)。また交互作用は有意ではなかった ($F(1.68, 36.68) = 0.22, p = .768, \eta_G^2 = 0.001$)。

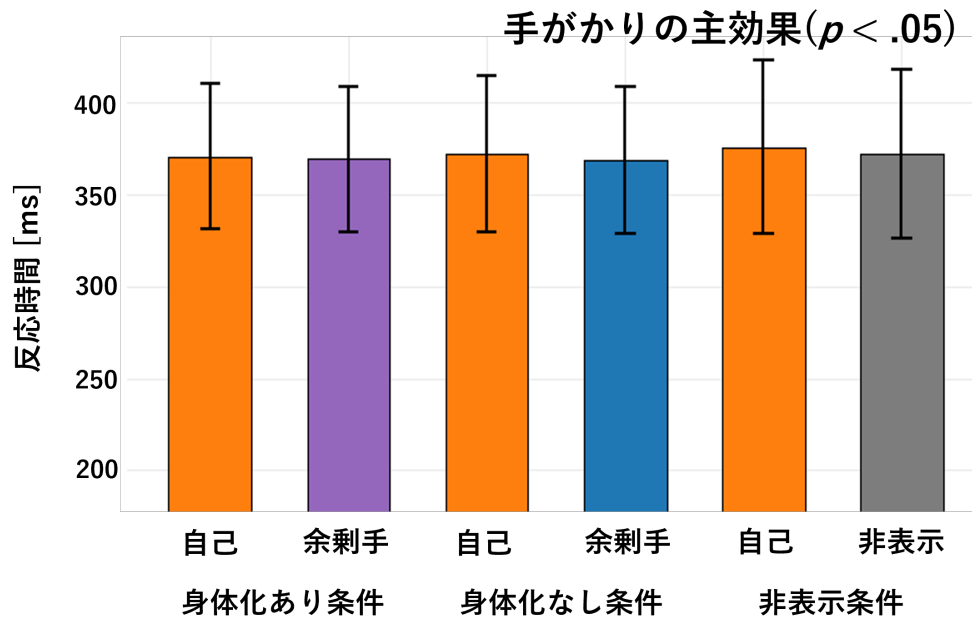


図 2.12: 身体化条件と各手がかりにおける反応時間

2.7 結果

余剰手の身体化条件ごとに、呈示した手がかりに対する「手としての身体化スコア」を図 2.13 に示す。自己身体に対する身体化スコアは橙色で、身体化した余剰手に対する身体化スコアは紫色で、身体化していない余剰手に対する身体化スコアは青色で表示した。また、手がかりがない領域に目標刺激が呈示された場合の反応時間を灰色で表示した。これらの身体化スコアに対して、「どちらともいえない」を意味する評価値 21 との 1 標本のウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、各条件における自己身体への身体化スコアは 21 より有意に大きいことが示された ($p < .001$)。一方で、身体化あり条件における余剰手の身体化スコアは 21 と有意な差はなく ($p = .108$)、身体化なし条件における余剰手の身体化スコアも 21 と有意な差はないことが示された ($p = .725$)。

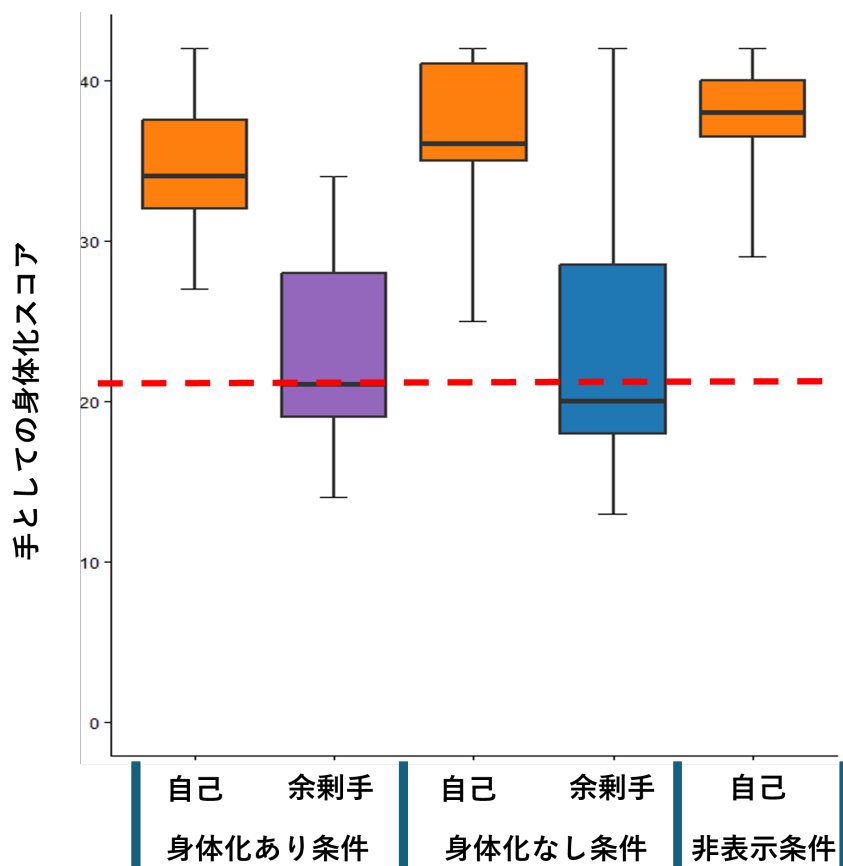


図 2.13: 各手アバタに対する手としての身体化スコア

2.7 結果

腕が増えたように感じる余剰手感覚について、質問紙の「自分の腕が3本以上あるように感じた」の回答を図 2.14 に示す。身体化あり条件を紫色で、身体化なし条件を青色で、非表示条件を灰色で表示した。これらの回答に対して、「どちらともいえない」を意味する評価値 4 との 1 標本のウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、身体化あり条件における余剰手感覚の評価値は 4 と有意な差はなく ($p = .190$)、身体化なし条件と非表示条件における余剰手感覚の評価値は 4 より有意に小さいことが示された ($p < .001$)。

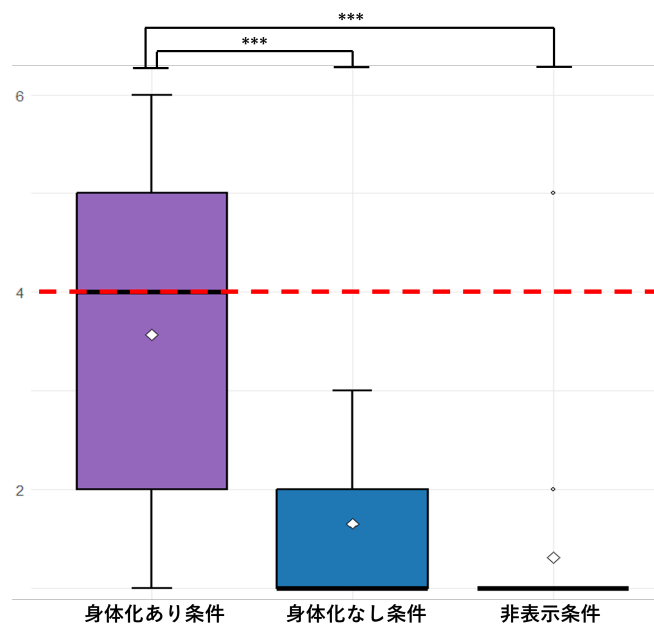


図 2.14: 余剰手感覚

2.8 考察

実験1では、余剰手の身体化条件間で反応時間に有意な差は認められなかった一方で、各条件内において手がかり間に差が認められ、自己身体周辺に刺激が呈示された場合よりもそれ以外の場合の反応時間が有意に短かった。自己身体と余剰手で同じ手アバタの視覚刺激を使用したにもかかわらず両者に差が生じたことから、注意資源配分に、操作する身体部位の違いによる効果などの視覚刺激以外の効果が影響を及ぼすことが示唆された。また、この知見は余剰手の視覚的デザインだけでなく、実際の操作との対応関係が注意制御に重要な役割を果たすことを意味している。近年、追加指の操作訓練により運動野の神経表象が再編成されることが報告されており [15, 16]、拡張身体に対応する神経基盤が形成され得ることが示唆されている。将来的に余剰手に対応する運動表象が形成された際、余剰手は単なる外部ツールではなく身体の一部として機能することが考えられるが、今回の知見から、自己身体の手とは異なる注意資源配分様式を示す可能性がある。

今回の実験結果は自己身体の視覚刺激がその周辺における物体検出を促進するという Reed et al. (2006) の先行研究の知見 [9] とは一致しない。このような結果が得られた理由として、復帰抑制 (Inhibition of Return) [17, 18] が生じていた可能性があげられる。復帰抑制とは、注意が向いていた領域にもう1度注意が向きにくくなる現象である。本研究は、余剰手や自己身体の手アバタを目標刺激検出課題における手がかり刺激として設定しており、配置変更課題終了後のブランク呈示で一度注意がリセットされた後で4つのアバタが呈示されたタイミングが手がかり刺激の呈示タイミングであったと想定される。手がかりが呈示されてから目標刺激が呈示されるまでの待ち時間は、Reed et al. (2006) が用いた 200 ms と比較して大幅に長い値であった。そのため、課題開始時に自己身体周辺へ向けられていた注意が、目標刺激呈示までの間に他の位置へ移動し、その後復帰抑制によって再び自己身体周辺へ注意が向きにくくなった可能性がある。これは自己身体が注意を誘発するという知見に則った仮説である。

本研究では余剰手の身体化条件が反応時間に与える影響は見られなかった。特に非表示条

2.8 考察

件と他 2 条件との間に差がなかったことから、拡張身体として余剰手を追加した際に、注意資源が再配分されないことが示唆された。これは自己身体に配分されていた注意資源が変化しないことを意味しており、自己身体に対する危険に従来と同程度の反応が可能であることを示唆している。

本実験の問題点は二つあり、第一に、手がかりによる反応時間の差が非常に小さかった点が挙げられる。今回の実験では、目標刺激が呈示される領域が 4 か所存在していたことにより、注意資源があらかじめ 4 か所に配分されていた可能性があると考えられる。注意資源が有限であることを踏まえると、刺激が呈示される領域が多かったことで各領域に配分される注意資源が減少し反応時間の差が生じにくくなった可能性がある。

第二に、身体化条件間で手としての身体化度合いに差が生じていなかった点が挙げられる。本実験では、実空間の両手足で操作する 4 つの手アバタを呈示することで余剰肢を表現したが、視覚刺激として呈示した刺激は手アバタのみであった。この呈示方法では、手アバタが肩や腕といった身体構造と結合しておらず、自己身体としての連続性が視覚的に呈示されていなかった。そのため、余剰手が自己身体の一部として十分に身体化されず、注意を誘発しなかった可能性がある。また、余剰手感覚についても身体化あり条件と他 2 条件で差は生じたものの、身体化あり条件で余剰手感覚が生じていたとはいえない結果であったことから、余剰手の身体化が不十分であった可能性がある。

これらの点について実験 2 で検討を行った。

第 3 章

実験 2

3.1 目的

実験 2 では目標刺激検出課題における SOA（手がかり刺激の呈示から目標刺激の呈示までの時間）を操作し、その効果について検討した。

また、余剰手の身体化が不足していた可能性があるため、実験 2 では、手アバタのみを呈示するのではなく、4 本の腕を有する全身アバタを用いることで、余剰手が肩から生えていることを視覚的に明示した。さらに、鏡像を呈示し、参加者自身が操作する 4 本腕の全身アバタを視認させることで、アバタを自己身体として認識させ、余剰手の身体化がより促進されるような手続きに変更した。

さらに、目標刺激が呈示される可能性のある領域を固視点の左右 2 か所に限定し、それに対応する手アバタを手がかりとして配置することで、注意資源が 2 か所に集中する状況を設定した。これにより、左右の手がかりに配分される注意資源の差が大きくなり、手がかりによる反応時間の差がより明確に表れることが期待される。

3.2 実験参加者

実験 2 の参加者は正常な視力（矯正含む）を有する右利きの大学生 21 名であった。

3.3 実験環境

3.3 実験環境

3.3.1 使用機器

実験には実験 1 で使用したデスクトップパソコンを用いた。視覚呈示にはヘッドマウントディスプレイ (HMD) の VIVEpro (HTC 社) を使用した。参加者の手足の動きを取得するためのトラッカーとして VIVE Tracker (HTC 社) を使用し、両手足に装着した。また、HMD とトラッカーの位置を VR 空間と対応付けるために SteamVR Base Station 2.0 を使用した。実験参加者は足が床につく高さの椅子に座り、机に手を置いた状態で実験を行った。



図 3.1: SteamVR Base Station 2.0



図 3.2: 実験に使用した机と椅子

3.3.2 ソフトウェア

実験環境はデスクトップパソコン上の Unity (Unity6 600.0.44f1) で構築した。

3.4 呈示刺激

実験には図に示すように手に接続した腕が4本存在するアバタを使用した(図3.3)。アバタは性別や体格による違和感を考慮してLow Poly Human-Rigged 3D Character[19]を使用した。アバタの頭部はHMDに追従して動き、実空間の両手両足に装着したトラッカーでVR空間の4つの手アバタを操作した。4本の腕のアバタの実装方法としては、同じ座標に上記のアバタを2つ重ねて配置し、それぞれの手アバタの座標にトラッカーの座標を入力することで両手足の動きをアバタに反映させた。腕の動きはスクリプトVR IKを用いて実装し、手アバタの座標から関節の動きを予測し反映させた。

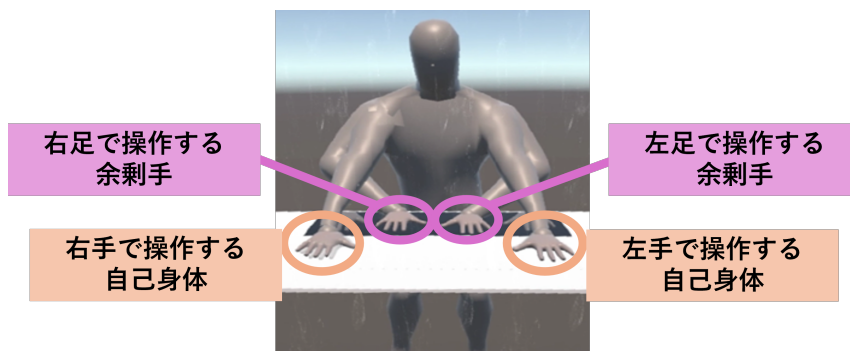


図 3.3: 4本の腕を有する全身アバタ

自己身体は実空間の手に装着したトラッカーの動きに連動して動き、実空間で手が机に触れた際にVR空間で机に触れ、視覚刺激に同期した力触覚刺激が生じるように設定した。余剩手は実空間の足に装着したトラッカーの動きに連動して動き、実空間で足が床に触れた際にVR空間で机に触れるように机の高さ分上方向にずらして呈示し(図3.4)、視覚刺激に同期した力触覚刺激が生じるように設定した。

3.4 呈示刺激

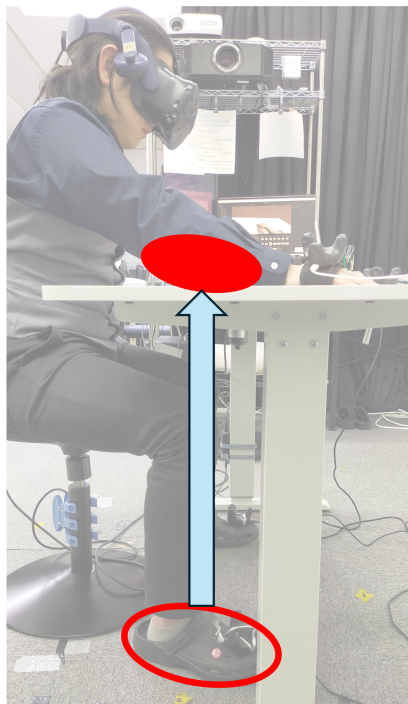


図 3.4: 余剰手の呈示位置

検出課題における視覚刺激は VR 空間の机に図 3.5 に示す位置関係で呈示した。目標刺激が呈示される領域に近い左右の位置に手がかりとする手アバタを配置し、残りのアバタは周辺に配置した。

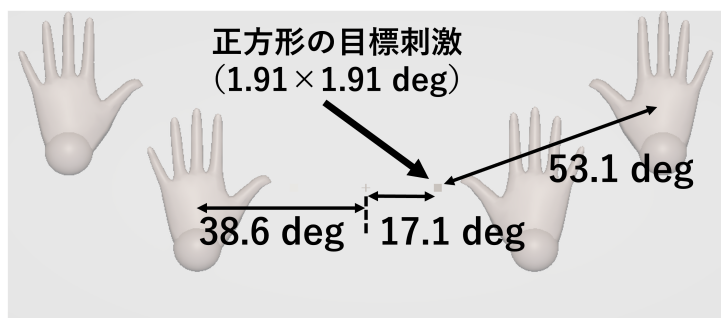


図 3.5: 検出課題における視覚刺激の位置関係

3.5 実験条件

余剰手の身体化条件として「身体化あり条件」「身体化なし条件」の2条件を設定した。また、これらの身体化条件間で自己身体を手がかりとした場合の反応時間の比較を行うことで、余剰手の身体化が注意の再配分に与える影響を検討した。

- 身体化あり条件

余剰手を足で操作し身体化する条件であり、両手両足で4つの手アバタを操作した。手がかりが余剰手の場合と自己身体の場合の反応時間を比較することで、余剰手と自己身体が誘発する注意の差を検討した。

- 身体化なし条件

余剰手を足で身体化しない条件であり、両手で2つの手アバタを操作し、自分では操作できない手が2つ呈示された。手がかりが余剰手の場合と自己身体の場合の反応時間を比較することで、身体化したアバタと身体化していないアバタが誘発する注意の差を検討した。



図 3.6: 身体化条件

3.5 実験条件

配置条件として余剰手+自己身体条件，余剰手条件，自己身体条件の3条件を設定した。

- 余剰手+自己身体条件

余剰手と自己身体の手アバタを手がかりとして呈示する条件である。条件内で反応時間を比較し，余剰手が誘発する注意と自己身体が誘発する注意の差を検討した。

- 余剰手条件

余剰手の1つの手アバタのみを呈示する条件である。条件内で反応時間を比較し，余剰手が誘発する注意と手がかりがない領域が誘発する注意の差を検討した。

- 自己身体条件

自己身体の手アバタのみを呈示する条件である。条件内で反応時間を比較し，自己身体が誘発する注意と手がかりがない領域が誘発する注意の差を検討した。

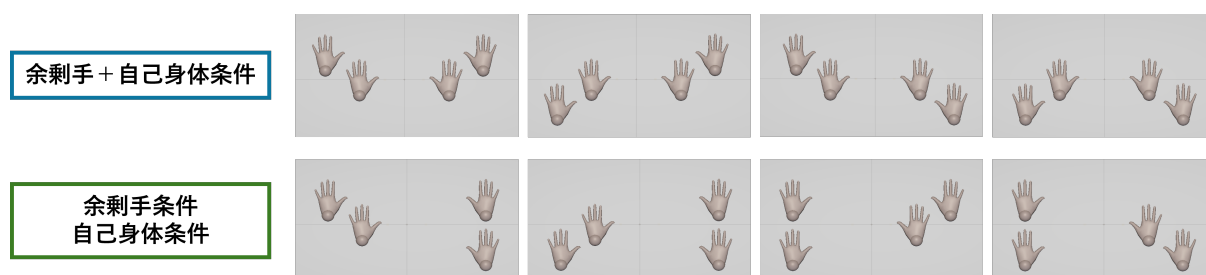


図 3.7: 配置条件の視覚刺激差分

手がかりが呈示されてから目標刺激が呈示されるまでの時間（SOA）を，先行研究 [9] と同じ値の 200 ms，先行研究 [20, 21] を参考に復帰抑制が生じる値の 1500 ms，3000 ms の3水準設定した。

3.6 実験手続き

3.6 実験手続き

実験は2日間に分けて行い、1日毎に余剰手身体化条件、1条件の実験を4セット行った。条件の順番は参加者間でカウンターバランスを取った。1セットは、球体追従課題を行った後、手アバタの配置変更課題と目標刺激の検出課題を1試行として36試行行うこととした。また、1セットの途中で2回（検出課題1、18試行目の前）鏡鏡視認課題を行った。3セット終了後に質問紙を実施した。以下に各課題の手続きについて説明する。

3.6.1 球体追従課題

各条件で操作する手アバタを身体化させるための課題であり、移動する球体を15秒間追従する課題を行った（図3.8）。球体の直径は4.8 degで、水平方向約66.9 deg、垂直方向約47.7 degの範囲内を約3.8 deg/sの速度でランダムな軌道で移動した。

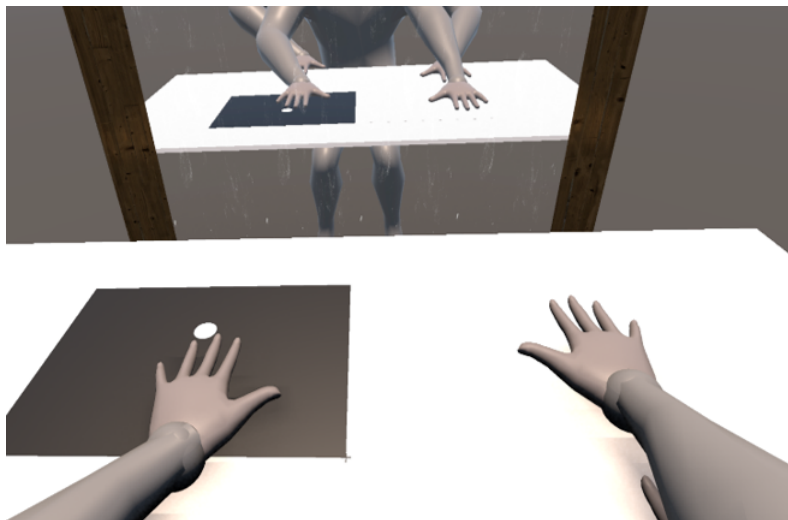


図 3.8: 球体追従課題の様子

3.6 実験手続き

3.6.2 鏡視認課題

検出課題 1, 18 試行目の前に机正面に配置した鏡を見ながら各手アバタを左右に 15 cm 往復移動させる課題を行った (図 3.9). この課題は, 参加者が操作している 4 本の腕を持つアバタを視認することで, 余剰手が自己身体として知覚されやすくなることを目的とした.

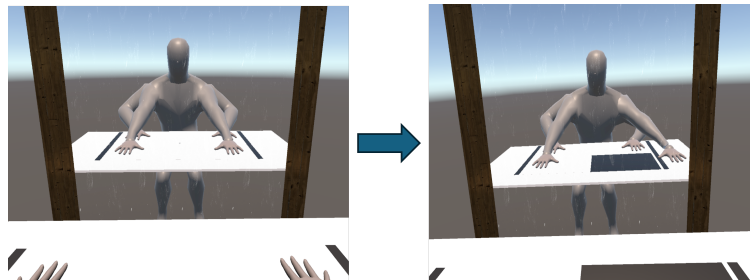


図 3.9: 鏡視認課題の様子

3.6.3 配置変更課題

検出課題ごとに手アバタの配置を変更する課題であり, この課題は, 検出課題における手アバタの配置が反応時間に与える影響を統制すること, 及び手アバタを動かすことによって身体化を維持することを目的として設定した. 課題が開始されると, 手アバタを初期配置に配置させる方向の矢印を呈示した. すべての手アバタが正しい座標から約 2 cm 以内の誤差範囲に配置されると, 次の検出課題の配置を示す半透明のアバタとガイドの矢印が表示された. 半透明のアバタに各手アバタを重ねることで課題が終了した. 参加者は操作する手アバタを, 正しい座標から約 5 mm 以内の誤差範囲に配置する必要があった. 目標刺激の検出課題を行う上で目標刺激と手アバタとの距離を統制するため, 配置変更課題終了時に参加者のトラックの動きを反映した手アバタを非表示にし, あらかじめ設定した正しい座標に配置された 4 つの手アバタを呈示した. 配置変更課題で, 参加者は指定された座標に手アバタを配置していたが, 図 1 に示すアバタの位置に完全に一致させることは困難であり, わずかな位置のずれが生じる可能性があった. このような位置のずれは, 目標刺激の検出時における注意配分に影響を及ぼす恐れがあるため, 配置変更課題終了時に正しい座標に配置された手

3.6 実験手続き

アバタを呈示した。手アバタの切り替えによる位置ずれにより特定の手アバタに注意が誘発されないよう、検出課題開始前に 0.2 秒間の白色のブランク画面を挿入し、その後正しい座標に配置された手アバタを呈示した。

3.6.4 検出課題

目標刺激の検出課題では、机上手アバタを配置した状態で、机中心の固視点から 17.1 deg 離れた左右 2 か所のうち 1 つに目標刺激を呈示した。参加者は、目標刺激が呈示された方向に HMD を装着した頭部をできるだけ早く正確に動かすことで回答した。試行開始のトリガー及び回答の取得には、仮想的な光線と判定用のオブジェクトとの衝突判定を用いた。判定用のオブジェクトはアバタ頭部の前方 30cm の位置で HMD に追従して動き、目標刺激が呈示されたタイミングで追従を行わなくなるように設定した。追従されていない状態で仮想的な光線がオブジェクトのどの部分と接触したかを判定し、左右の回答として取得した。目標刺激が呈示された領域と一致する回答を正答とし、それ以外の場合は誤答として扱った。反応時間は、目標刺激が呈示された時点を 0 秒とし、参加者が固視点から視線（HMD の向き）を移動させ、HMD の光線が中心円との接触を失った時点までの時間として定義した。回答の取得後にオブジェクトは追従を再開した。

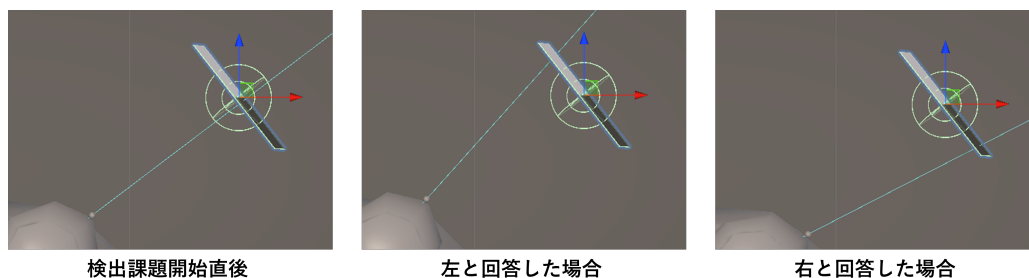


図 3.10: 判定用のオブジェクト（本来は透明なオブジェクト）

3.6 実験手続き

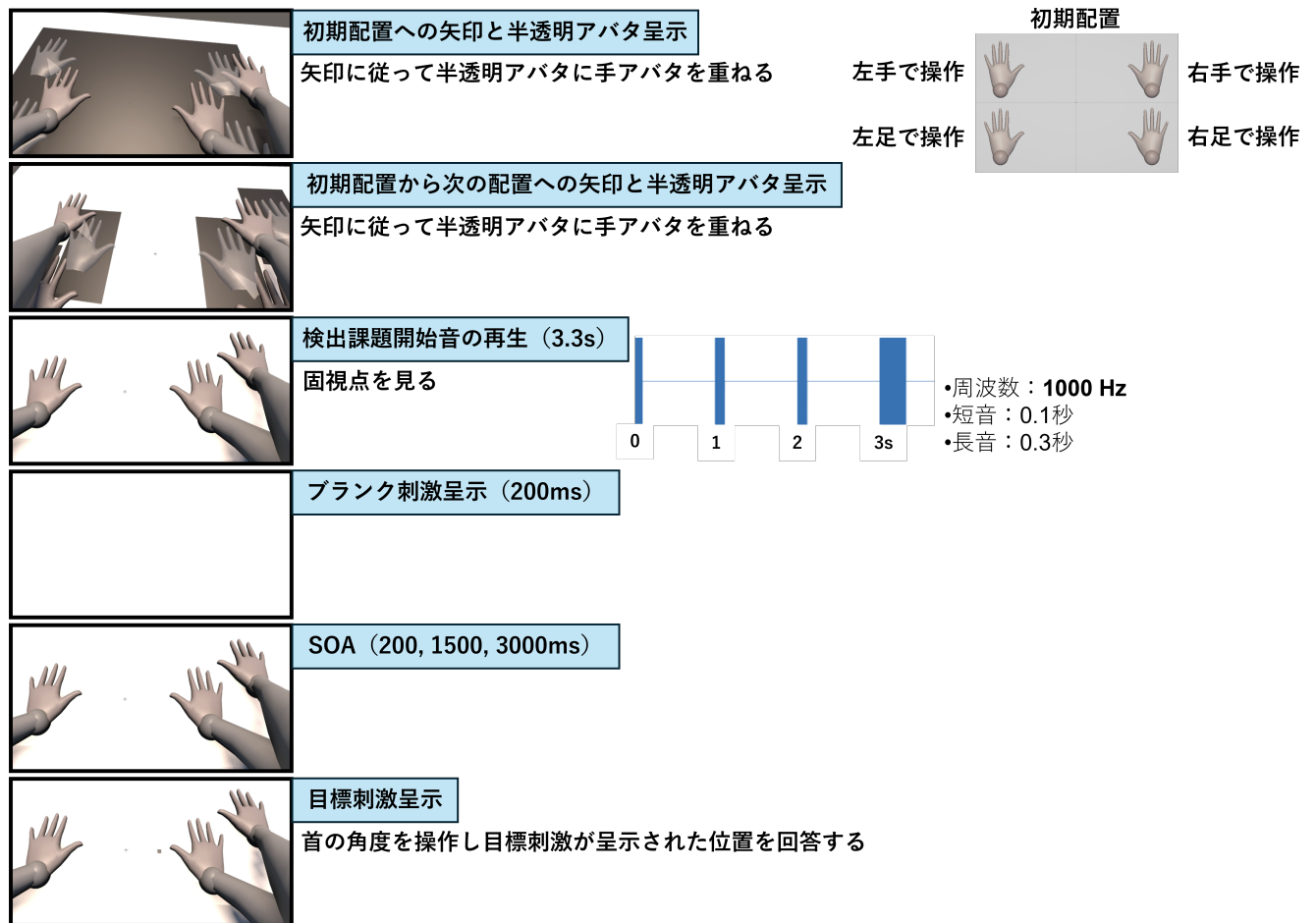


図 3.11: 配置変更課題と検出課題の手順

3.6.5 質問紙

各条件で実験中に呈示した各手アバタに対して、実験を通してどのように感じたかについての7段階リッカート尺度の質問紙を行った。参加者は1（全くそう感じなかった）から7（非常にそう感じた）の数字で回答を行った。質問紙の内容は、以下の4つであった。

- 対象を自分の手のように感じた
- 対象を自分の足のように感じた
- 対象を自分の思うように操作できたと感じた
- 自分の腕が3本以上あるように感じた

3.6 実験手続き

質問は各手アバタに対してそれぞれ行い、VR空間内で図のように表示し、机の黒くなっている部分に配置されている手アバタに対して回答するよう指示した。

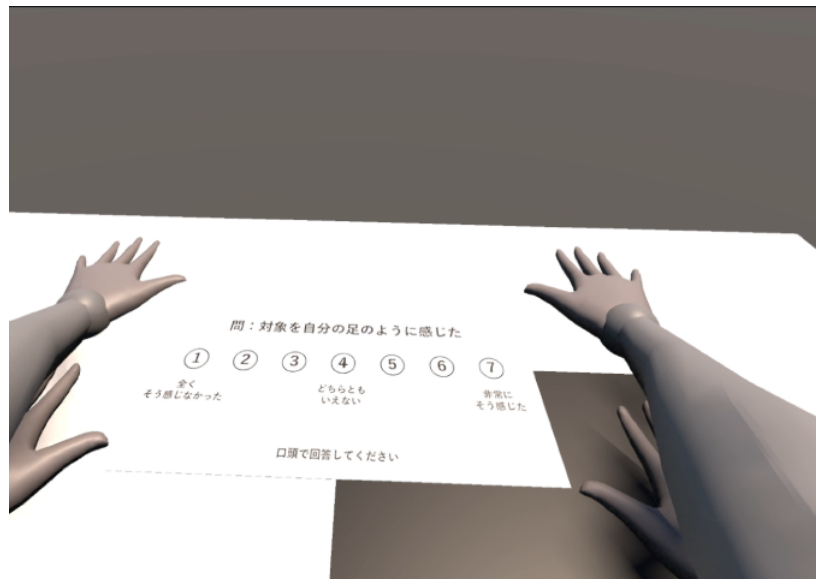


図 3.12: 質問紙の様子

3.7 結果

各条件における反応時間に対して、身体化条件、配置条件、手がかり、SOA を要因とする対応ありの 4 要因分散分析を行った結果、SOA にのみ有意な差が見られた ($F(1.44, 28.75) = 66.25, p = .000, \eta_G^2 = 0.09$),

配置条件が「余剰手+自己身体」の結果を図 3.13 に示す。自己身体側に目標刺激が呈示された場合を橙色で、身体化した余剰手側に目標刺激が呈示された場合を紫色で、身体化していない余剰手側に目標刺激が呈示された場合を青色で表示した。これらの反応時間に対して身体化条件、手がかり、SOA を要因とする対応ありの 3 要因分散分析を行った結果、SOA に有意差が見られたが ($F(1.67, 33.49) = 48.47, p = .000, \eta_G^2 = 0.10$), 身体化条件間にも差は見られなく ($F(1, 20) = 2.14, p = .159, \eta_G^2 = 0.01$), 手がかりによる有意な差は見られなかった ($F(1, 20) = 0.52, p = .478, \eta_G^2 = 0.00$)。また、交互作用も有意ではなかった ($F(1.49, 29.77) = 2.88, p = .085, \eta_G^2 = 0.00$)。SOA に対して多重比較を行った結果、SOA が 200 ms の場合の反応時間が 3000 ms の場合よりも有意に大きく ($t = 7.92, p = .000$), 200 ms の場合の反応時間が 1500 ms の場合よりも有意に大きく ($t = 7.49, p = .000$), 1500 ms の場合の反応時間が 3000 ms の場合よりも有意に大きかった ($t = 2.75, p = .012$)。

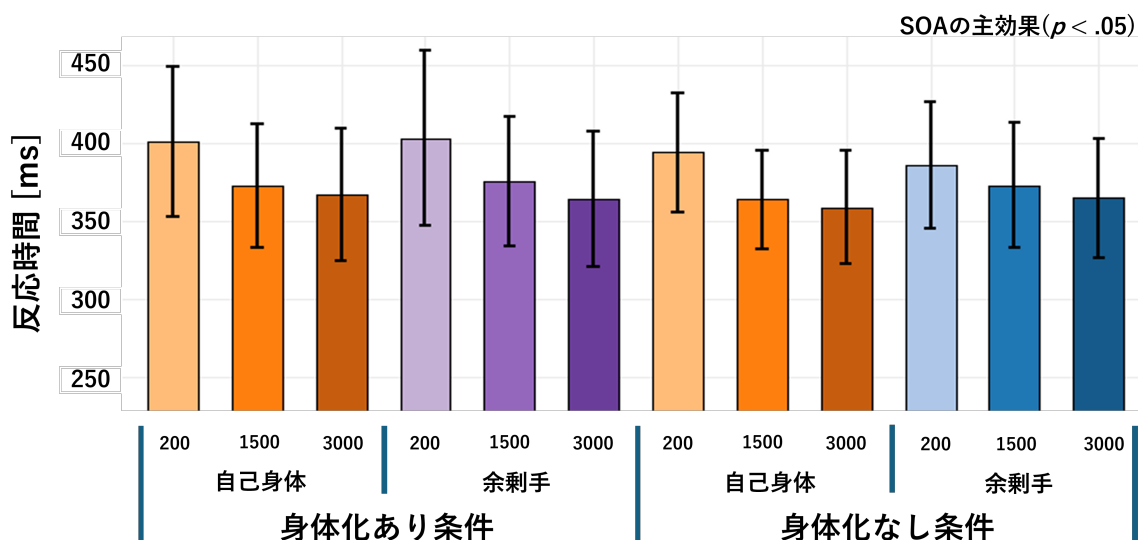


図 3.13: 手がかりが、余剰手+自己身体条件における反応時間

3.7 結果

配置条件が「余剰手」の結果を図 3.14 に示す。身体化した余剰手側に目標刺激が呈示された場合を紫色で、身体化していない余剰手側に目標刺激が呈示された場合を青色で、手がかりがない空間に目標刺激が呈示された場合を灰色で表示した。これらの反応時間に対して身体化条件、手がかり、SOA を要因とする対応ありの 3 要因分散分析を行った結果、SOA に有意差が見られたが ($F(1.66, 32.23) = 54.60, p = .000, \eta_G^2 = 0.09$), 身体化条件間に差は見られなく ($F(1, 20) = 1.86, p = .187, \eta_G^2 = 0.01$), 手がかりによる有意な差はも見られなかった ($F(1, 20) = 0.00, p = .968, \eta_G^2 = 0.00$)。また、交互作用も有意ではなかった ($F(1.97, 39.3) = 2.88, p = .069, \eta_G^2 = 0.00$)。SOA に対して多重比較を行った結果、SOA が 200 ms の場合の反応時間が 3000 ms の場合よりも有意に大きく ($t = 8.43, p = .000$), 200 ms の場合の反応時間が 1500 ms の場合よりも有意に大きく ($t = 7.42, p = .000$), 1500 ms の場合の反応時間が 3000 ms の場合よりも有意に大きかった ($t = 4.12, p = .000$)。

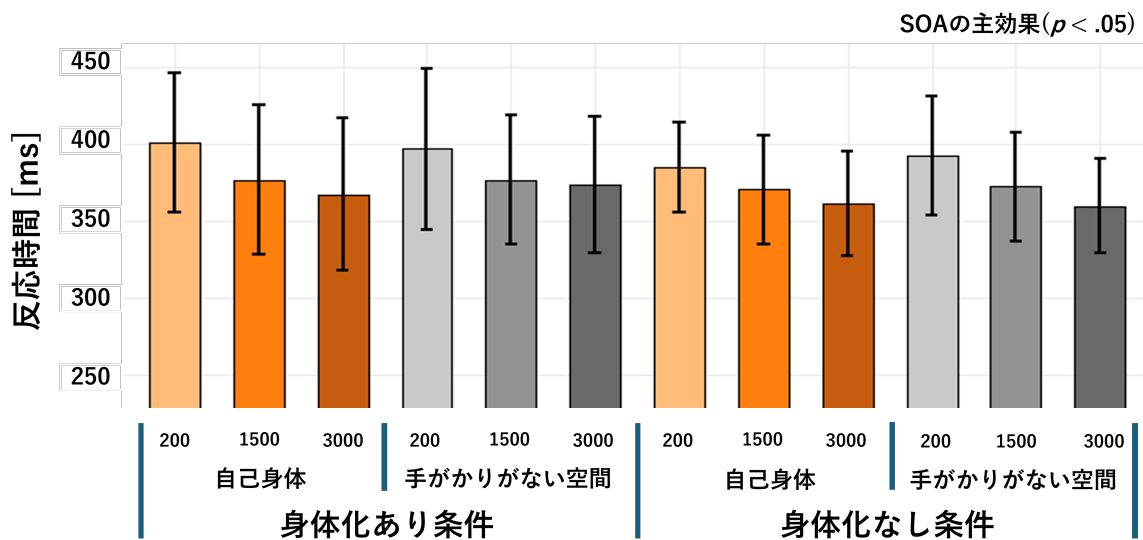


図 3.14: 手がかりが、余剰手条件における反応時間

3.7 結果

配置条件が「自己身体」の結果を図 3.15 に示す。自己身体側に目標刺激が呈示された場合を橙色で、手がかりがない空間に目標刺激が呈示された場合を灰色で表示した。これらの反応時間に対して身体化条件、手がかり、SOA を要因とする対応ありの 3 要因分散分析を行った結果、SOA に有意差が見られたが ($F(1.41, 28.2) = 40.54, p = .000, \eta_G^2 = 0.08$), 身体化条件間に差は見られなく ($F(1, 20) = 2.60, p = .122, \eta_G^2 = 0.01$), 手がかりによる有意な差は見られなかった ($F(1, 20) = 0.72, p = .406, \eta_G^2 = 0.00$)。また、交互作用も有意ではなかった ($F(1.61, 32.15) = 3.44, p = .053, \eta_G^2 = 0.00$)。SOA に対して多重比較を行った結果、SOA が 200 ms の場合の反応時間が 3000 ms の場合よりも有意に大きく ($t = 7.39, p = .000$), 200 ms の場合の反応時間が 1500 ms の場合よりも有意に大きく ($t = 5.53, p = .000$), 1500 ms の場合の反応時間が 3000 ms の場合よりも有意に大きかった ($t = 4.41, p = .012$)。

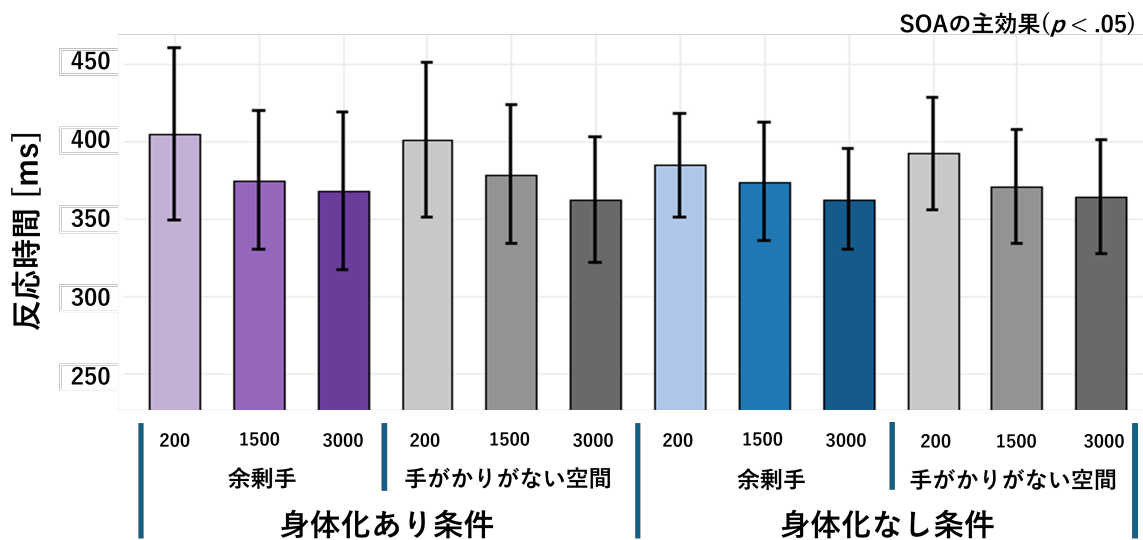


図 3.15: 手がかりが、自己身体条件における反応時間

3.7 結果

余剰手の身体化条件ごとに、呈示した手がかりに対する「手として身体化スコア」を図 3.16 に示す。自己身体に対する身体化スコアはオレンジ色で、身体化した余剰手に対する身体化スコアは紫色で、身体化していない余剰手に対する身体化スコアは青色で表示した。これらの身体化スコアに対して、「どちらともいえない」を意味する評価値 21 との 1 標本のウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、各条件における自己身体の手としての身体化スコアは 21 より有意に大きいことが示された ($p < .001$)。一方で、身体化あり条件における余剰手の身体化スコアは 21 と有意な差はなく ($p = .693$)、身体化なし条件における余剰手の身体化スコアも 21 と有意な差はないことが示された ($p = .144$)。

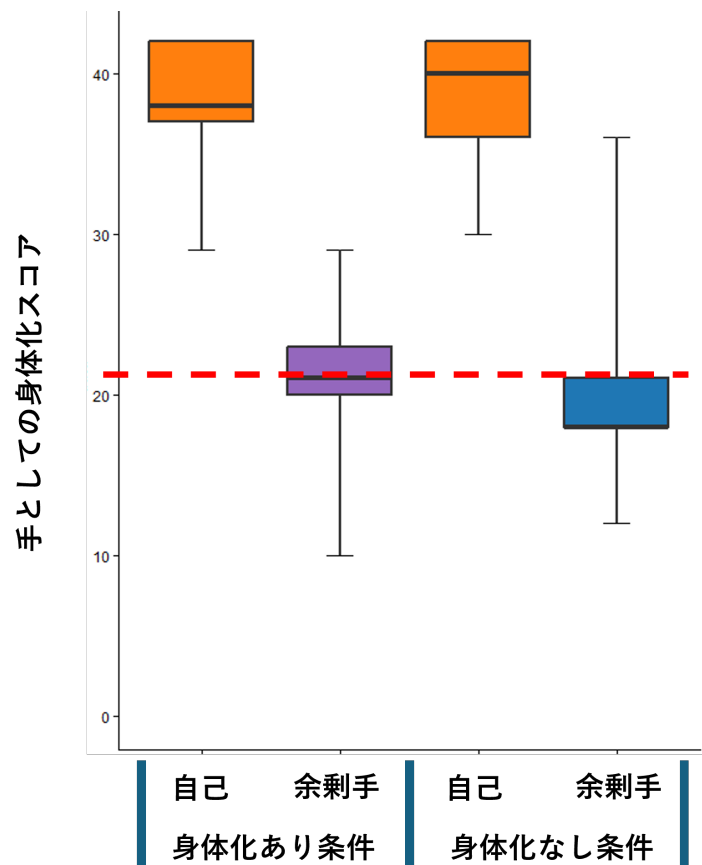


図 3.16: 各手アバタに対する手としての身体化スコア

3.7 結果

腕が増えたように感じる余剰手感覚について、質問紙の「自分の腕が3本以上あるように感じた」の回答を図 3.17 に示す。身体化あり条件を紫色で、身体化なし条件を青色で表示した。これらの回答に対して、「どちらともいえない」を意味する評価値 4 との 1 標本のウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、身体化あり条件における余剰手感覚の評価値は 4 と有意な差はなく ($p = .885$)、身体化なし条件における余剰手感覚の評価値は 4 より有意に小さいことが示された ($p < .001$)。

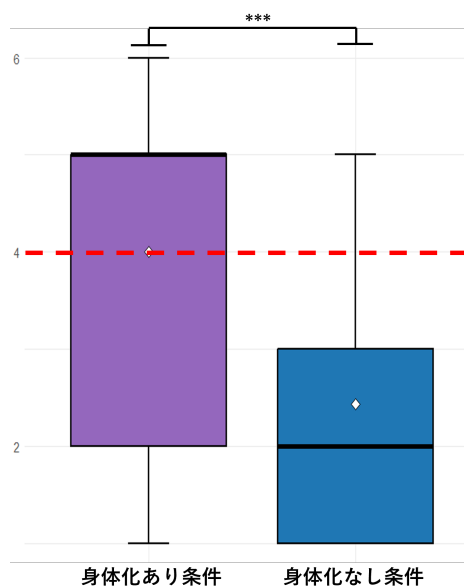


図 3.17: 余剰手感覚

3.8 考察

実験 2 においては、全ての身体化条件、配置条件、SOA においても手がかり間で反応時間に差は見られず、特定の手がかりに注意資源が多く配分されたとは言えない結果となった。

注意資源が配分される対象を 4 つから 2 つに限定することで、手がかりの効果がより明確に現れると予測したが、実験結果として手がかりによる効果は見られず、実験 1 とは異なる結果となった。このことから、2 つの領域に呈示する身体刺激に対しては、検出のパフォーマンスに影響するほど、配分される注意資源に差が生じないことが示唆された。

注意資源が配分される対象が 2 つしかない場合、左右の手がかり間で検出課題のパフォーマンスに差をもたらすような注意配分が生じなくなり、余剰手の身体化が注意資源配分に与える影響が反応時間の差として現れなくなったと考える。これは注意資源が配分される対象が少ない場合には、自己身体と反応時間に差がない程度の注意資源が余剰手にも配分されることを意味しており、操作対象を限定することで、余剰手に対して自己身体と同程度の注意レベルで監視できる可能性がある。

身体化条件間で反応時間に差が見られなかったことについては、余剰手の身体化条件の操作が不十分であった可能性がある。余剰手に対する手としての身体化スコアは身体化条件によらず、「どちらともいえない」を意味する評価値 4 と有意な差がなかった。このことから、4 本の腕を持つ全身アバタの実装や、鏡を視認させる課題などを行ったが、身体化条件の操作が不十分であり、身体化の程度に差が生じず、身体化条件間で反応時間の差が見られなくなったと考える。これについては、今後の研究で、より身体化するような手続きで検討する必要があると考える。

SOA が長くなるにつれて反応時間が短くなる結果からは、注意の再配分には一定の時間を要することが示唆された。本実験では、配置変更課題終了時に注意状態を一度リセットすることを目的としてブランク刺激を呈示し、その後、手がかり刺激の再呈示により注意があらためて再配分されたと考えられる。SOA が長くなるにつれて反応時間が短くなることから、この注意の再配分には一定の時間を要することが示された。

第 4 章

まとめ

本実験では、余剰肢を追加した際に手の視覚刺激が増加することに着目し、余剰肢の身体化が自己身体の注意資源配分に与える影響を検討した。VR 空間内で、足で操作する余剰手と手で操作する自己身体を手がかり刺激として呈示した上で、目標刺激が余剰手周辺に呈示された場合の反応時間と自己身体周辺に呈示された場合の反応時間の比較を行った。

実験 1 では 4 つの手アバタを手がかりとして呈示し、検出課題を行った。その結果、手がかりによる効果が見られたが、身体化条件間で反応時間に差は見られなかった。身体化あり条件、なし条件と非表示条件の間で反応時間に有意な差がなかったことから、余剰手を追加した際に注意が再配分されないことが示唆された。また、手アバタの視覚刺激は自己身体と余剰手で同じであったにもかかわらず、手がかり間で反応時間に差が見られたことから、注意資源配分に操作する身体部位の違いによる効果などの視覚刺激以外の効果が影響を及ぼすことが示唆された。

実験 2 では目標刺激が呈示される可能性のある領域を 4 か所から 2 か所に限定した状態で検出課題を行った。その結果、SOA による効果のみが見られ、手がかりによる効果及び余剰手の身体化条件による効果は見られなかった。このことから、2 つの領域に呈示する身体刺激に対しては、検出のパフォーマンスに影響するほど、配分される注意資源に差が生じないことが示唆された。また、SOA が長くなるにつれて反応時間が短くなる結果からは、注意の再配分には一定の時間を要することが示唆された。

総じて、余剰肢を追加することは自己身体の注意資源配分を変化させるほどの影響を及ぼさないと考えられる。本実験で行った余剰肢の身体化条件では、余剰手の身体化の程度を変化させられなかったため、今後の研究でより身体化するような手続きで検討する必要がある。

謝辞

本研究の実施及び論文の作成にあたり，多大なご支援とご指導を賜りました繁樹博昭先生には深く感謝いたします。また本実験の実装，実施にあたり，ご指導を賜りました HAPUARACHCHI HARIN MANUJAYA さん，本論文の副査を務めていただきました 篠森敬三先生，門田宏先生にも深く感謝いたします。最後に，共に研究活動を行ってきた長原周平さん，佐藤希来さんをはじめとする研究室の皆さん，実験に参加してくださった方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] Won, A. S., Bailenson, J. N., Lee, J., & Lanier, J. (2015). Homuncular flexibility in virtual reality. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 20(3), 241–259.
- [2] Miura, M., et al. (2020). Development of a wearable robotic tail to enhance human balance. *Proceedings of the Augmented Humans International Conference (AHs)*, 1–8.
- [3] 視線と声で操る「第三の腕」、早大とパナソニックが共同開発へ、
<https://www.itmedia.co.jp/news/articles/1901/25/news140.html>
- [4] Yang, B., Huang, J., Chen, X., Xiong, C., & Hasegawa, Y. (2021). Supernumerary robotic limbs: A review and future outlook. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 3(3), 623–639.
- [5] 西田野々香, 岩崎悠希子, 加藤史洋, Gowrishankar Ganesh, 岩田浩康, (2022) 拡張身体の身体化に関する研究—第二報：身体性誘発による要求注意量の低減とパフォーマンス向上効果の検証—日本バーチャルリアリティ学会第 27 回大会,1C5-3
- [6] Arai, K., Saito, H., Fukuoka, M., Ueda, S., Sugimoto, M., Kitazaki, M., & Inami, M. (2022). Embodiment of supernumerary robotic limbs in virtual reality. *Scientific Reports*, 12(1), Article 1.
- [7] Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Prentice-Hall.
- [8] Posner, M. I., Snyder, C. R. R., & Davidson, B. J. (1980). Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109(2), 160–174.
- [9] Reed, C. L., Grubb, R. C., & Steele, C. (2006). Hands up: Attentional prioritization of space near the hand. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32(1), 166–177.
- [10] Taylor, A. B., & Witt, J. K. (2015). Near-hand effects on attention in visual space.

参考文献

- Current Directions in Psychological Science*, 24(4), 287–292.
- [11] Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32(1), 3–25.
- [12] Vive Hand Tracking SDK Documentation. <https://developer.vive.com/resources/openxr/unity/tracking/>
- [13] Ehrsson, H. H., Spence, C., & Passingham, R. E. (2004). That’s my hand! Activity in premotor cortex reflects feeling of ownership of a limb. *Science*, 305(5685), 875–877.
- [14] Slater, M., Spanlang, B., Sanchez-Vives, M. V., & Blanke, O. (2010). First person experience of body transfer in virtual reality. *PLoS ONE*, 5(5), e10564.
- [15] Hussain, I., Salvietti, G., Malvezzi, M., & Prattichizzo, D. (2015). Augmentation of manipulation ability with a robotic sixth finger. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21(4), 2007–2017.
- [16] Kieliba, P., Clode, D., Maimon-Mor, R. O., & Makin, T. R. (2021). Robotic hand augmentation drives changes in neural body representation. *Science Robotics*, 6(54), eabd7935.
- [17] Posner, M. I., & Cohen, Y. (1984). Components of visual orienting. In H. Bouma & D. G. Bouwhuis (Eds.), *Attention and performance X* (pp. 531–556). Erlbaum.
- [18] Posner, M. I., Rafal, R. D., Choate, L. S., & Vaughan, J. (1985). Inhibition of return: Neural basis and function. *Cognitive Neuropsychology*, 2(3), 211–228.
- [19] Low Poly Human – Rigged 3D Character <https://devkore.itch.io/low-poly-human-rigged-3d-character>
- [20] Samuel, A. G., & Kat, D. (2003). Inhibition of return: A graphical meta-analysis of its time course and an empirical test of its temporal and spatial properties. *Psychonomic Bulletin & Review*, 10, 897–906.
- [21] Taylor, T. L., & Klein, R. M. (2000). Visual and motor effects in inhibition of

参考文献

return. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*,
26(5), 1639–1656.