

バーチャル共身体化における二人の手の共有と結合  
(Two individuals' share and joint of hands  
with virtual co-embodiment)

2024年1月

博士（工学）

勝俣 安伸

豊橋技術科学大学

## 論文内容の要旨 (博士)

博士學位論文名	バーチャル共身体化における二人の手の共有と結合 (Two individuals' share and joint of hands with virtual co-embodiment)
---------	---

(要旨 1,200 字程度)

バーチャル身体化とは、バーチャル空間上に表示されるアバターを自分の身体のように感じられることである。バーチャル身体化によって、さまざまな外見の異なる身体を自分の身体のように感じることができ、さらには人の内的な態度や心理も変容することが明らかになっている。近年では、一人が1つの身体を持っているという制約を超えて、二人あるいはそれ以上の人々が1つのアバターを自己身体として操作・体験する「バーチャル共身体化」も研究されている。しかし、従来のバーチャル共身体化に関する研究では、主に手と腕全体の動きに焦点が当てられており、手指の細かな動きに注目した研究は行われていない。

本論文では、手および指についてのバーチャル共身体化を対象として、バーチャル共身体化に関する新たな知見の獲得と、具体的な応用の可能性を示すことを目的として2つの実験を行った。

実験1では一人が完全に操作する単独身体、二人の参加者の動きを平均する共有身体、部位分担する結合身体を同一の対象で比較し、その身体性（身体所有感と行為主体感）と課題成績から基礎科学的な知見を得ることを目的とした。手および指について二人の参加者がリアルタイムに共有化および結合化できるバーチャル共身体化を実装し、単独身体の手指とも比較した実験を行い、身体所有感、行為主体感、指リーチングの課題成績について調べた。その結果、共有身体では身体所有感・行為主体感が単独身体に比べてもあまり変わらないほどに高く、課題成績も一貫して高いことが示された。一方、結合身体では、ある程度の身体所有感・行為主体感が生じるが共有身体よりも低く、課題成績も共有身体よりも低く、課題難易度が高いときには単独身体よりも課題成績が低かった。

実験2では運動技能の訓練システムへのバーチャル共身体化の応用を検討した。一人称視点によるバーチャル共身体化された手（共有アバター）と、学習者の前に提示される教師の手（教師アバター）を組み合わせたバーチャル手指模倣システムを開発し、学習者のアバターを教師との共有アバターにすること及び教師アバターの提示方向が、運動模倣成績と模倣のしやすさに及ぼす影響を調べた。主観評定の結果、教師アバターが学習者と同じ向きに提示され、共有アバターを用いている方が、教師アバターが学習者の対面方向で提示され、学習者自身の動きのみを反映したアバター（単独アバター）を用いた場合よりも模倣しやすいと評価された。空間誤差の評価からは、学習者のアバターの条件にかかわらず、教師アバターを対面方向で提示する方が、同方向での提示よりも優れていることが示された。時間的遅延の評価では、教師アバターの向きにかかわらず、共有アバターの方が単独アバターよりも優れていることが示された。

今後、本研究を活用して、バーチャルリアリティ技術を用いた技能習得・技能伝承やリハビリテーション、遠隔共同作業など、さまざまな分野での応用システム構築に貢献できると考える。

## Abstract (Doctor)

Title of Thesis	Two individuals' share and joint of hands with virtual co-embodiment
-----------------	--

Approx. 800 words

An avatar displayed in a virtual environment can be felt as if it were one's own body, and this is called virtual embodiment. Virtual embodiment not only allows us to feel various bodies with different appearances as if they were our own, but it can also change a person's internal attitudes and behavior. In recent years, "virtual co-embodiment" in which two or more people operate and experience a single avatar as a self-body, going beyond the restriction of one person having a single body, has also been studied. However, most studies on virtual co-embodiment have focused mainly on the whole hand and arm movements and has not focused on the detailed movements of the hands and fingers.

This study presents two experiments on virtual co-embodiment of the hands and fingers, aiming to uncover new scientific insights into this phenomenon and demonstrate its potential applications.

In Experiment 1, we compared a single body that is completely manipulated by one participant, a shared body that averages the movements of two participants, and a joint body that is partitioned by two, using the same task, and aimed to obtain fundamental scientific findings on their embodiment (sense of body ownership and sense of agency) and task performance. We made a virtual co-embodiment system of hands and fingers, capable of being shared and jointed by two in real time. We then compared the shared and joint bodies to investigate their sense of body ownership, sense of agency, and task performance in finger reaching. The results showed that the sense of body ownership and sense of agency were high in the shared body that they were not so different from those in the single body, and the task performance was consistently higher in the shared body. The joint body produced some sense of body ownership and sense of agency but lower than the shared body, and its task performance was also lower than that of the shared body, and lower than that of the single body with high task difficulty.

Experiment 2 explored the application of virtual co-embodiment to a motor skill training system. We developed a virtual hand imitation system that comprised a virtual co-embodied hand from a first-person perspective and a pre-recorded hand movement of a teacher's hand (teacher avatar). The participant's virtual hand movements were averaged in real-time with those of the teacher (shared avatar hand). We investigated the effects of the participant's hand avatar being a shared avatar with the teacher and the presentation direction of the teacher avatar on the performance and ease of imitation. The results of subjective ratings showed that the teacher avatar was presented in the same orientation as the participant and the shared avatar was rated as easier to imitate than when the teacher avatar was presented in the participant's opposite direction and reflected only the learner's own movements (a single avatar). The evaluation of spatial error indicated that presentation of the teacher avatar in the opposite direction was superior to presentation in the same direction, regardless of the condition of the participant's avatar. The evaluation of temporal latency indicated that the shared avatar was better than the solo avatar, despite the orientation of the teacher avatar.

In the future, we believe that this study can contribute to the construction of applied systems in various fields such as skill acquisition and skill transfer, rehabilitation, and remote collaborative work using virtual reality technology. This study enriches our comprehension of virtual embodiment and highlights its potential to enhance interactive experiences within virtual environments.

# 目次

第1章 序論.....	1
1.1 自分の身体とは何か.....	1
1.1.1 身体所有感.....	1
1.1.2 行為主体感.....	3
1.2 バーチャル身体化による身体変容.....	4
1.3 バーチャル共身体化とは何か.....	5
1.3.1 結合身体アバターによるバーチャル共身体化.....	6
1.3.2 共有身体アバターによるバーチャル共身体化.....	9
1.4 バーチャル共身体化の応用.....	10
1.5 本研究の目的.....	13
1.5.1 本研究のアプローチ.....	13
1.5.2 本研究の位置付け.....	13
第2章 二人の手の共有および結合による指リーチング.....	15
2.1 目的.....	15
2.2 方法.....	16
2.2.1 参加者.....	16
2.2.2 装置.....	16
2.2.3 刺激.....	17
2.2.4 手続き.....	20
2.3 結果.....	21
2.3.1 主観評定.....	21
2.3.2 行動成績.....	24
2.4 考察.....	26
2.4.1 結果のまとめ.....	26
2.4.2 共有身体と結合身体の身体所有感と行為主体感.....	27
2.4.3 課題難易度と身体所有感と行為主体感.....	27
2.4.4 共有身体・結合身体の課題成績.....	28
2.4.5 身体条件の可知性とその影響について.....	29

2.4.6	手の共身体化と腕や全身の共身体化の比較.....	30
2.4.7	限界と今後の課題.....	31
第3章	教師モデルとの手の共有によるアメリカ手話模倣.....	34
3.1	目的.....	34
3.2	システム概要.....	35
3.2.1	装置.....	35
3.2.2	教師モデルデータの作成.....	36
3.3	方法.....	37
3.3.1	参加者.....	37
3.3.2	刺激と条件.....	38
3.3.3	手続き.....	40
3.4	結果.....	41
3.4.1	主観評定.....	41
3.4.2	行動成績.....	43
3.5	考察.....	46
3.5.1	結果のまとめ.....	46
3.5.2	仮説1 手の共有による模倣成績向上について.....	46
3.5.3	仮説2 手の提示方向について.....	47
3.5.4	親指の動きの特有性について.....	47
3.5.5	限界と今後の課題.....	48
第4章	総合考察.....	50
4.1	結果のまとめ.....	50
4.1.1	実験1 (二人の手の共有および結合による指リーチングの実験).....	50
4.1.2	実験2 (教師モデルとの手の共有によるアメリカ手話模倣の実験).....	50
4.2	バーチャル共身体化のリアルタイム性.....	51
4.3	バーチャル共身体化の利点と欠点.....	51
4.4	バーチャル共身体化による脳活動の変化と可塑性.....	51
4.5	バーチャル共身体化の将来と今後の課題.....	52
第5章	結論.....	54
	謝辞.....	55
	引用文献.....	56

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 自分の身体とは何か

私たちは自己の身体を介して世界を経験する。私たちの身体は知覚と行為のためだけではなく意識の基盤でもある。メルロ＝ポンティ (M. Merleau-Ponty) は「意識とは身体を介して物にあることである。一つの運動が習得されるのは、身体がこれを理解したとき、つまり身体がこれをおのれの『世界』に統合したときである。」と、身体を通じた経験が自己の意識を成立させるための基礎であると述べている(Merleau-Ponty, 1945/2015)。

Gallagher は自己の概念について、物語的自己 (Narrative self) と最小限の自己 (Minimal self) を対比し、minimal selfの構成要素として行為主体感 (Sense of Agency) と身体所有感 (Sense of Ownership) を区別して考察した(Gallagher, 2000)。行為主体感は「ある行為を引き起こしたり生み出したりしているのは自分である」という感覚 (例えば、何かを動かしているのは自分だという感覚や、意識の流れの中で特定の思考を生み出しているのは自分だという感覚) であり、身体所有感は「その経験をしているのは私自身である」という感覚 (例えば、自発的か不随意的かにかかわらず、自分の身体が動いているという感覚) である。

身体所有感を人為的に変化させる現象として「ラバーハンド錯覚」が知られている。ブラシでなでられたゴムの手を見ながら、見えないところにある自分の手を同時に同期してなでられると、ゴムの手が自分の手であるかのような錯覚が生じる (ラバーハンド錯覚) (Botvinick & Cohen, 1998)。このように、自己の身体であるという感覚は容易に変化し得るものである。

#### 1.1.1 身体所有感

身体所有感が自己の意識の物理的な側面として寄与することを表す現象として、幻肢や身体失認がある。幻肢は、事故等により腕や脚を失ったにもかかわらず、それが

元あった場所に存在するかのように感じる現象であり、人によっては痛みを感じたりすることもある。これは物理的な身体が存在しなくても、身体的所有感を感じるができる例である。その一方、身体失認の症状のひとつである身体パラフレニア (somatoparaphrenia) は、麻痺した自己の物理的な身体を自分のものではないと主張するものである。その多くは右半球の頭頂葉や前頭葉の損傷により生じることが報告されている(Feinberg & Venneri, 2014; Vallar & Ronchi, 2009)。

健常者においても、先に述べた「ラバーハンド錯覚」を用いて身体所有感の錯覚が生じる。これは、視覚と触覚の統合による身体所有感の錯覚の例である。一方、ゴムの人差し指を本物の人差し指と繋げた状態で、自分の手を動かして同期して動くゴムの指だけを見ていると、ゴムの指が自分の指のように感じる(Dummer et al., 2009; Kalckert & Ehrsson, 2014; Newport et al., 2010)。さらに、ゴムの指の方が実験者によって動かされて自分の指が受動的に動かされても同様の錯覚が生じる。これらは身体運動と同期した運動の観察による身体所有感の錯覚である。このように、人は視覚と触覚の統合や自分の身体運動と同期した身体運動の観察によって、自分以外の身体に対して身体所有感の錯覚を感じる。また、ラバーハンド錯覚は上腕切断者においても生じる(Ehrsson et al., 2008)ことから、必ずしも物理的な身体が存在する必要はない。

その他の身体感覚に関する錯覚として体外離脱体験 (Out-of-Body Experience; OBE) が知られている(Blanke & Arzy, 2005)。ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着して、自分自身を背後から撮影した映像を観察しながら、実際の身体と映像の視点に合わせた illusory body の位置を同時に棒で刺激すると、自分の身体を第三者的な視点から観察しているような感覚を生じる(Ehrsson, 2007; Lenggenhager et al., 2007)。この方法を応用して、マネキンの身体と入れ替わることや、他者の身体と入れ替わり元の自分の身体と握手をする体験もできる(Petkova & Ehrsson, 2008)。これらの実験的な操作により自分の意識が実際の身体から離れた位置にあるように感じる状態を作り出すことができる。

身体所有感の錯覚とその強さをどう計測するかという点について、いくつかの方法が提案されている。質問紙による主観評定は、ラバーハンド錯覚について最初に報告した研究で用いられており(Botvinick & Cohen, 1998)、その後も質問項目についての評価と提案がなされている(Longo et al., 2008; Peck & Gonzalez-Franco, 2021; Roth & Latoschik, 2020)。

身体所有感の錯覚が生じる際に、実際の手の位置からゴムの手の位置へ固有感覚ドリフト (proprioceptive drift) が生じることも、最初の研究で示されている。しかし、質問紙による主観評定と固有感覚ドリフトを比較した実験では、視覚と触覚刺激が非同期であっても固有感覚ドリフトが生じ、質問紙によるゴムの手に対する所有感の評価とは一致しないという報告もある(Rohde et al., 2011)。

生理学的指標としては、皮膚コンダクタンス反応 (skin conductance response) がよく用いられている。自分の身体のように感じている対象に対して、ハンマーで叩く、ナイフで突き刺すといった、物理的に傷つけるような刺激を加えた時の皮膚コンダクタンス反応が、身体所有感の錯覚の大きさを反映することが示されている(Armel & Ramachandran, 2003; Ehrsson et al., 2007)。

脳活動を計測した研究も行われている。例えば、ラバーハンド錯覚により所有感の錯覚が生じている時の脳活動を機能的 MRI (functional magnetic resonance imaging; fMRI) で測定し、腹側運動野の神経活動が所有感の錯覚に関連することが調べられている(Ehrsson et al., 2004)。fMRI の他には、ポジトロン CT (positron emission tomography; PET) が用いられることもある(Tsakiris et al., 2007)。

### 1.1.2 行為主体感

行為主体感、自分自身の行動を他者の行動と区別し、自分がある行動の起点となっているという感覚である。Frith らは行為主体感を予測された状態と実際の状態を比較する運動制御のコンパレータモデルを用いて説明した(Frith et al., 2000)。このモデルでは、遠心性コピー (efference copy) をもとにした運動の結果の予測と、実際の感覚フィードバックから得られる運動の結果の誤差をもとに予測器の学習が起こる。この誤差の大きさが、自分が引き起こした運動であるかに影響すると説明した。期待された結果が、実際に観察した結果と区別できない場合には高い主体感が得られる。さらに、予測されたフィードバックと実際のフィードバックの間の差異が行為主体感を変化させる一方で、身体所有感の感覚を変化させなかったことから、それぞれの感覚は別のメカニズムから生じることが示唆される(Sato & Yasuda, 2005)。

Synofzik らは、コンパレータモデルをもとに、行為主体感を Feeling of Agency (FoA) と Judgement of Agency (JoA) という 2 つのレベルに分けて説明した(Synofzik et al., 2008)。FoA は自分が行動の起点となっているかどうかの比較的低レベルの分類に関す

る感覚であり、一方 JoA は例えば比較器での不一致があるとき、ある出来事の行為主体ではないという感覚と、その状況を合理的に解釈するための判断によって、行為の帰属が形成される。

統合失調症患者において行為主体感に変化が生じることが知られている。自分の行動が外部から操られているような感覚を生じること(Graham et al., 2014)や、他人の動きを見ているときに、その動きが自分によって引き起こされたものであるかのように感じること(Garbarini et al., 2016)が報告されている。

高次の認知的な要因が行為主体感と関連することも報告されている。Wen らはコンピュータ上でのキーボード操作によるタスクによる実験で、タスクパフォーマンスが良いほど行為主体感が上がることを示した(Wen et al., 2015, 2017)。また、実施したタスクの主体感が高い場合に作業記憶が向上する例も報告されている(Zou et al., 2023)。

## 1.2 バーチャル身体化による身体変容

VR (Virtual Reality、バーチャルリアリティ) 技術とは、現実感や臨場感を人工的に発生することを可能とする技術である。VR 技術を用いたアプリケーションでは、バーチャル空間に表示されるバーチャルな身体をアバターとして操作するものが多くある。

バーチャル空間上に表示されるバーチャルな腕に対しても、視覚と触覚の同期によるラバーハンド錯覚が生じることが示されている(Slater et al., 2008)。また、手と腕をモーションキャプチャで計測しアバターの腕を連動させると、視覚と身体運動の同期による身体所有感の錯覚が生じる(Sanchez-Vives et al., 2010)。バーチャル空間でのアバターは単なる操作の対象ではなく、自己の身体として感じられるものであり、人の身体をバーチャルなものに置き換えるこのようなプロセスをバーチャル身体化(virtual embodiment) と呼ぶ(Spanlang et al., 2014)。

この方法を用いて、さまざまな外見の異なる身体を自分の身体のように感じることができる。例えば、異なる肌の色(Martini et al., 2013; Peck et al., 2013)、異なる年齢(Banakou et al., 2013; Tajadura-Jiménez et al., 2017)、異なる性別(Schulze et al., 2019)、動物(Krekhov et al., 2019)、ロボット(Aymerich-Franch et al., 2015)、透明な身体(Kondo et al., 2018; Kondo, Tani, Sugimoto, Inami, et al., 2020)、通常よりも長い腕(中川 et al., 2022; 近藤 et al., 2019)などの自己身体化が報告されている。また、外見だけではなく、本当の指でバーチャルな腕を動かしたり(Kondo, Tani, Sugimoto, Minamizawa, et al., 2020)、本当の脚

や顔の表情で第三・第四のバーチャルな腕を動かしたりできることが報告されている(Arai et al., 2022; Fukuoka et al., 2023; 福岡 et al., 2020)。これらを身体部位のリマッピングと呼ぶ。

これらのバーチャル身体化による身体の変容は、人の内的な態度や心理の変容をももたらす(Maister et al., 2015)。視覚と触覚の同期刺激を用いることで、異なる皮膚色を持つ顔が鏡に映っているように配置された映像をみると、その顔が自分の顔と同様に感じるが、元々外集団への潜在的偏見が強い参加者では、外集団の顔に対して体所有感が生じることで潜在的偏見が減少した(Fini et al., 2013)。同様に、ラバーハンド錯覚で異なる皮膚色を持つ腕を自己身体化することで潜在的偏見が軽減される(Maister et al., 2013)。視覚と運動の同期を行うことで全身所有感を誘発する手法も、異人種に対する潜在的偏見の減少を報告している(Peck et al., 2013)。成人参加者が視覚・運動同期によって4歳の子どものアバターを自己身体として体験すると、外界の物体の大きさが過大に知覚され、自らを子どもらしい属性と関連付ける潜在的な傾向を示されている(Banakou et al., 2013)。視覚・触覚同期による身体所有感を裸のマネキンあるいは何も無い空間に誘発する研究では、大勢の人に見られているという状況において、参加者の社会的緊張や不安が何も無い空間に透明な身体への所有感を感じる条件では社会的緊張や不安が抑制されることが示されている(Guterstam et al., 2015)。

また、HMDを着用し、自らがスーパーヒーローとして街の上空を飛び回る体験をすると、ただ空を遊覧飛行する体験に比較して、体験の後に他者への援助行動が促進される(Rosenberg et al., 2013)。2人の参加者が視線と同じになるようにカメラをつけたHMDを装着し、カメラとHMDの接続を入れ替え、相手の視点から自分を見て互いに握手をすると、自分と相手の身体が入れ替わった感覚が生じる(Petkova & Ehrsson, 2008)。このような視点交換をVRでのアバターと参加者に適用して、苦悩する自分とそれに対処するカウンセラーの身体を交互に体験して自己カウンセリングするシステムが開発され、その効果が検討されている(Osimo et al., 2015)。

### 1.3 バーチャル共身体化とは何か

バーチャル身体化(virtual embodiment)は、原則的には一人が1つの身体を持っているという制約の中にある。近年では、この制約を超えるバーチャル身体化が研究対象となっている。

二人あるいはそれ以上の人が 1 つのアバターを自己身体として操作・体験するものをバーチャル共身体化 (virtual co-embodiment) (Fribourg et al., 2020; Hagiwara et al., 2020; Hapuarachchi et al., 2023; Hapuarachchi & Kitazaki, 2022) または合体と呼ぶ。その逆に一人が 2 つあるいはそれ以上の身体を自己身体として操作・体験するものを、バーチャル多体化 (MultiSoma) (Miura et al., 2022; Takada et al., 2022; Verhulst et al., 2022) または分身と呼ぶ。例えば、4 つのアバターの視点からの映像を操作者が装着する HMD に表示し、観察者の運動とアバターの動きが同期する場合に、4 つのアバターすべてが自分の身体のように感じられる (Miura et al., 2021)。これらは、人間拡張 (human augmentation) の一種であり、合体や分身とも呼ばれる (Inami, 2023; Inami et al., 2022)。

バーチャル共身体化あるいは合体には、二人がアバターの異なる部位を担当するものと、二人の動きを重み付け平均して 1 つのアバターに反映させるものがある。本論文では、身体の部位を分担する前者を結合身体アバター (joint body avatar) と呼び、後者の重み付け平均によるものを共有身体アバター (shared body avatar) と呼ぶ。

### 1.3.1 結合身体アバターによるバーチャル共身体化

二人がアバターの左右半身を分担する結合身体では、他者 (パートナー) が担当する身体部位は自分の意志とは関係なく動くことから強い違和感が生じ、基本的に身体所有感も行為主体感も生じない (図 1.1)。そこで、どのような情報によって他者が操作する身体部位への違和感を低減し、身体所有感・行為主体感を改善することが可能かについて調べられている。

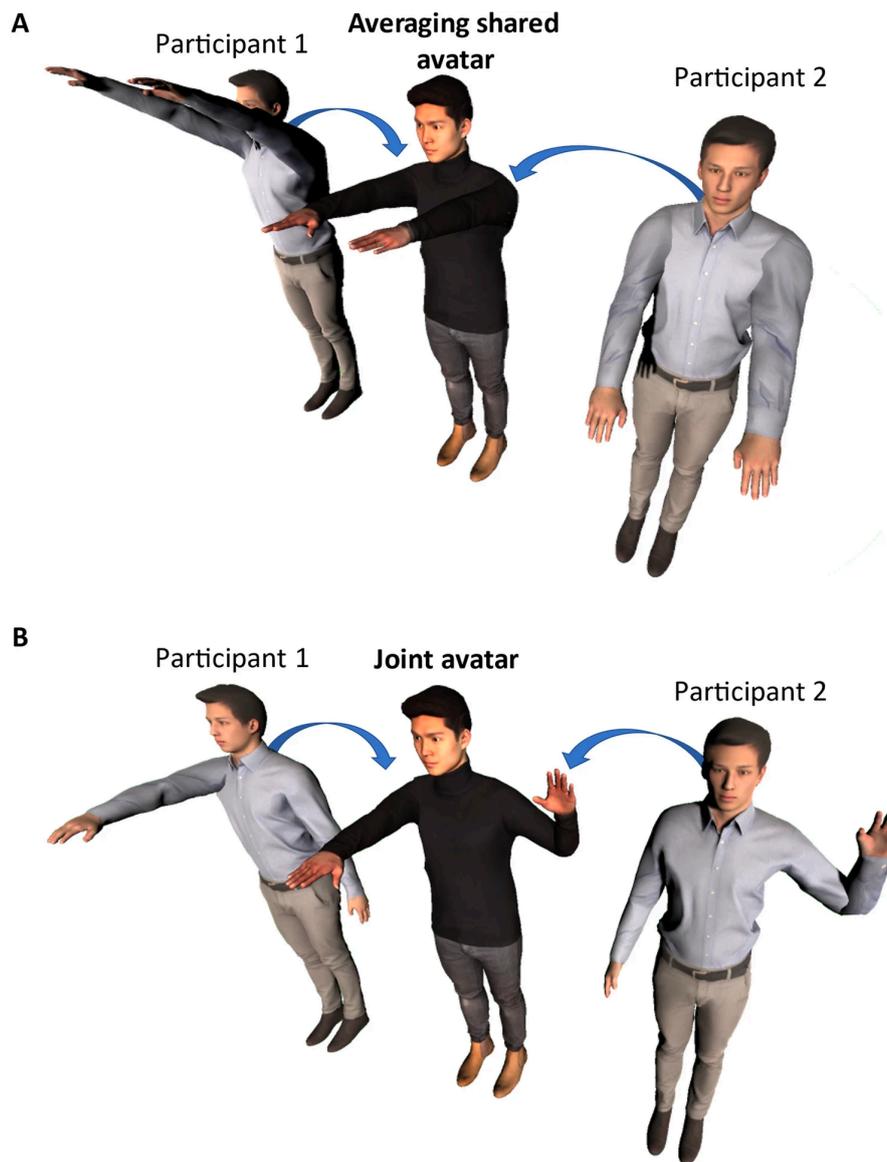


図 1.1 結合身体の概念図 (Hapuarachchi and Kitazaki, 2022 の Figure 1, CC-BY)

二人の参加者間に身体運動の力触覚フィードバックがあり、他者が操作する身体部位の運動についてタイミングや方向が分かることで、身体所有感・行為主体感が改善する (図 1.2, Hapuarachchi et al., 2023)。また、パートナーと共通の目標をリーチングする条件、異なる目標をリーチングするがパートナーの目標も見えている条件、異なる目標をリーチングし、パートナーの目標は分からない条件を比較したところ、パートナーの目標が自分と共通であれ異なる場合であれ、知覚できることが行為主体感・身体所有感を増加させることが示されている (図 1.3, Hapuarachchi & Kitazaki, 2022)。

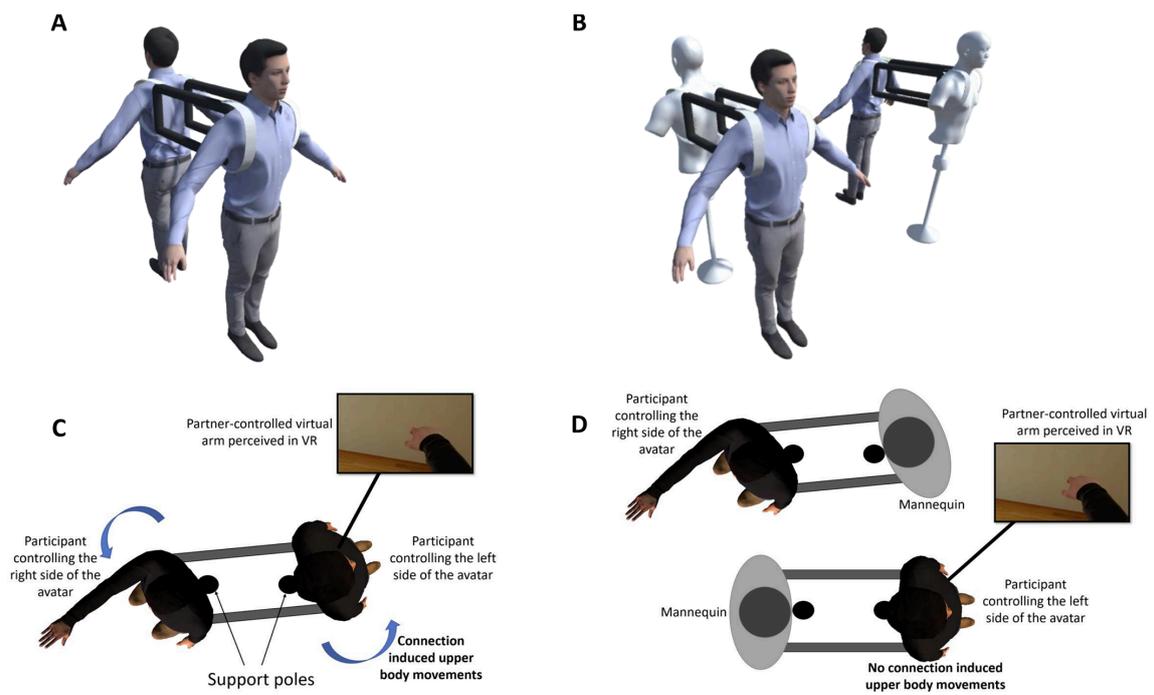


図 1.2 反力フィードバックを用いた結合身体  
(Hapuarachchi et al., 2023 の Figure 1, CC-BY)

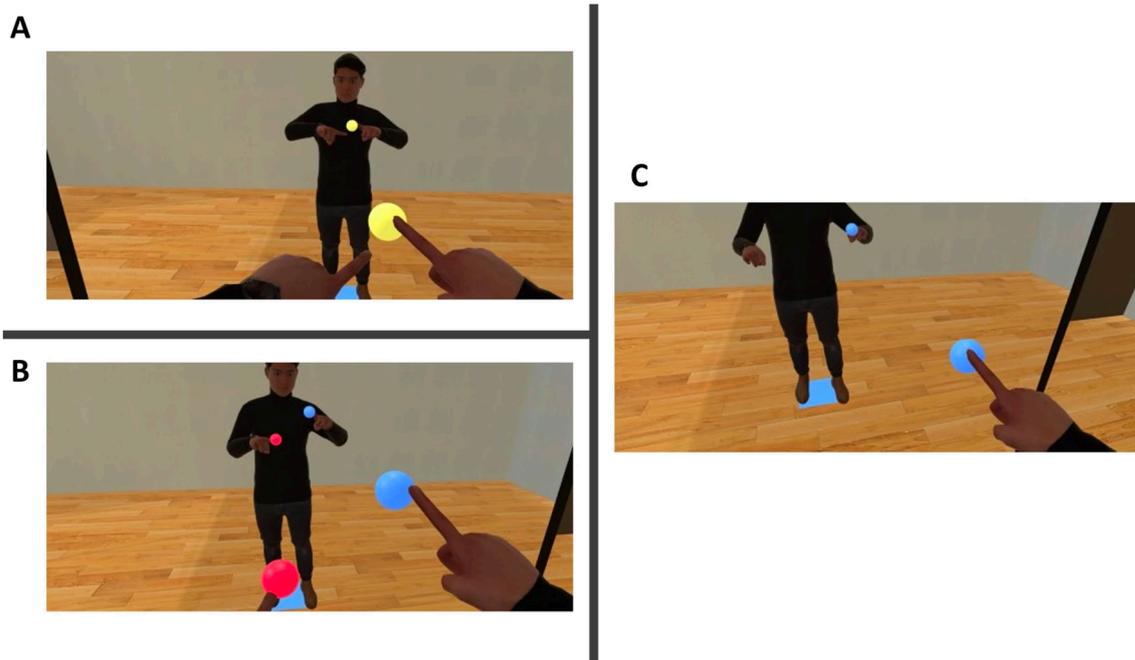


図 1.3 結合身体における目標共通性・可視性の操作。A 二人の目標が共通している条件。B 目標は異なるがお互いの目標が見えている条件。C 目標が異なり、パートナーの目標が見えない条件 (Hapuarachchi and Kitazaki, 2022 の Figure 2, CC-BY)

### 1.3.2 共有身体アバターによるバーチャル共身体化

二人の動きを重み付け平均する共有身体アバターについて、二人がアバターを制御する割合（例えば一人が70%を担当すると、もう一人は残りの30%を担当する）を段階的に変えた研究が行われており、実験参加者はかなり正確にその割合を判定できることが示されている(Fribourg et al., 2020)。そして、アバターを共有する二人の目標が一致している時には、自分が担当している割合を実際の割合よりも過大評価することも知られている(Fribourg et al., 2020; Hagiwara et al., 2020)。

共有身体アバターの身体運動解析を行った研究では、操作する二人それぞれの手の動きよりも共有身体アバターの手の動きの方が直線的になり、動きが滑らかになること、一方操作する人の手は目標から徐々にずれていくことが示されている(Hagiwara et al., 2020)。このことから、共有身体アバターを操作する二人は、目標が共通しているなら、アバターが最適な運動をするように協調していることが示唆されている（図1.4, 1.5）。

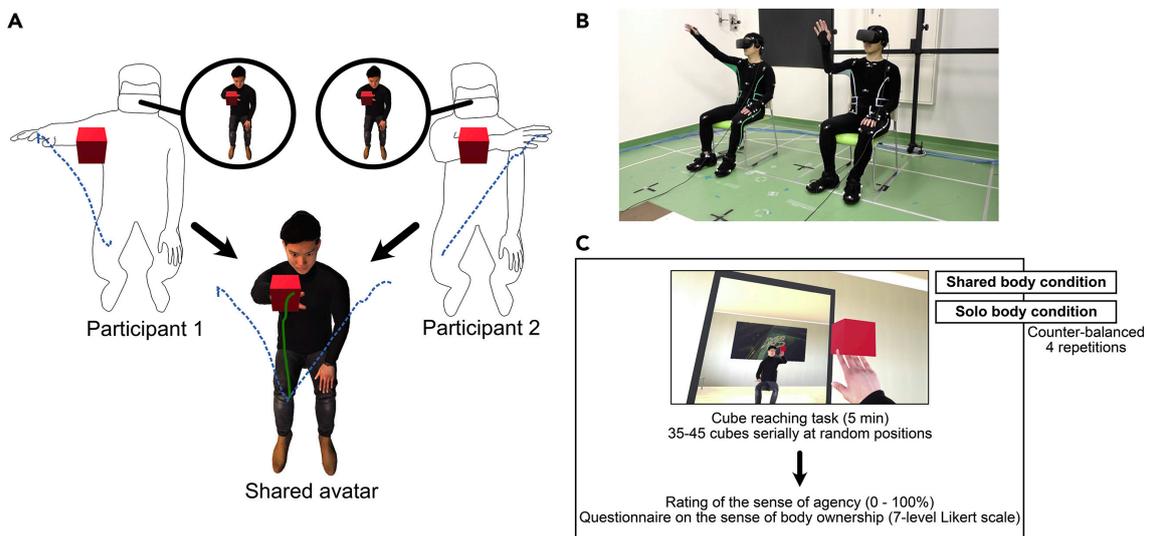


図 1.4 共有身体の様式図 (A) と実験風景 (B)、手続き (C) (Hagiwara et al., 2020 の Figure 1, CC-BY)

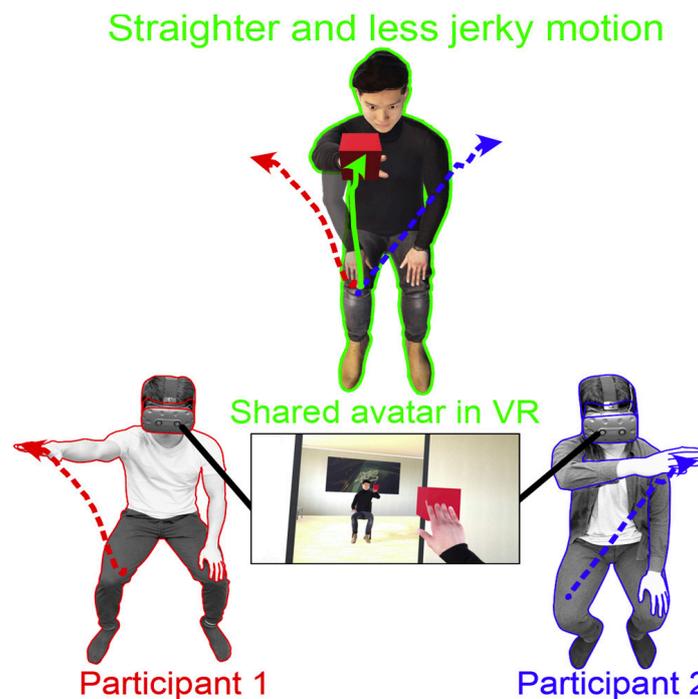


図 1.5 共有身体の運動特性の模式図 (Hagiwara et al., 2020 の Graphical Abstract, CC-BY)

## 1.4 バーチャル共身体化の応用

教育、訓練は VR の主要な応用分野である。一定のコストで安全に何度でも練習でき、より適切なフィードバックを提供することも可能になる。学習者が VR 空間に没入することで、より真剣に長く学習を続けられることが示されている(Alhalabi, 2016)。ジャグリングやけん玉、装置の組み立てなどの運動技能の学習では VR の利用が効果的である(Borglund et al., 2021; Kawasaki et al., 2022; Ragan et al., 2015; Sportillo et al., 2015)。VR は、恐怖症への暴露療法やストレスマネジメントのような感情に関するような訓練にも効果的である(Anderson et al., 2013; Pallavicini et al., 2016; Rothbaum et al., 2000)。しかし、記憶などの認知スキルについては VR を用いた訓練はあまり効果がないかむしろ悪化させる(Hine & Tasaki, 2019; Polcar & Horejsi, 2015)。また、VR を用いた訓練では、実際の環境では実現できない難易度の調整も可能である。これまでに、時間の進む速さ(Yang & Kim, 2002)や重力(Adolf et al., 2019)を変化させた環境でトレーニングを行うシステムが提案されている。

共有身体は、実際の環境では実現できない身体を共有するという方法で、特に VR の利用が効果的な運動技能の学習や伝承への応用が期待されている。運動学習や技能伝

承では、熟練者（エキスパート）の動作を初心者が模倣して学習することが多い。その際、共有身体アバターを熟練者と初心者で共有し媒体とすることで、より直接的に模倣を促進できるのではないかと提案されている。実際、実験参加者が教師役の操作者と1つのアバターを50%ずつ共有することで、一人で学習する場合よりも早く運動成績が向上し、共有身体での学習終了後に行った一人での操作においても一人で学習した参加者よりも高い成績を示すことが示されている(Kodama et al., 2023a; Takita et al., 2023)。そして、共有身体での学習後に一人で課題を実施する際に生じる成績低下を低減するために、参加者と教師役の担当割合を適応的に変化させる方法も検討されている(Kodama et al., 2023a)。



図 1.6 教師役と学習者が1つのアバターを共有する運動技能学習の模式図  
(Kodama et al., 2023a, Figure 1-A, CC-BY)

二人がアバターの異なる部位を担当する結合身体では、自分が担当していない身体部位には基本的には身体所有感や行為主体感が生じず、むしろ自己身体としての違和感が問題となる。現象としては、自分の腕が勝手に動いて感じられるエイリアンハンド症候群(Hassan & Josephs, 2016)と似ている。既に述べたようにアバターの左右半身を分担する結合身体では、二人の参加者間に身体運動の力触覚フィードバックがあること、そして、パートナーの目標が知覚できることが行為主体感・身体所有感を増加させることが示されている(Hapuarachchi et al., 2023; Hapuarachchi & Kitazaki, 2022)。したがって、結合身体研究の応用としては、エイリアンハンド症候群への対処や自律動作する自動化義手に対する違和感の軽減などが想定されている。

バーチャルアバターによる研究の他には、1つのロボットアバターを2人が操作するものがある(Tanaka et al., 2022)。バーチャルアバターの場合と同様に、1人での操作と同等の行為主体感と身体所有感が生じ、2人での操作によりタスクパフォーマンスが向上することが示されている(萩原 et al., 2022)。二人がそれぞれの手を物理的にリンクし

て、一方の動きをもう一方に伝えるデバイスが提案されている(Nishida et al., 2022)。この方法では、教師が学習者に細かな動きをリアルタイムに伝えることが可能である。身体にロボットアームによる3,4本目の腕を装着し、これを別の人が遠隔操作することにより2人がひとつの身体として共同作業を行うことができる技術もある(Saraiji et al., 2018)。



図 1.7 ウェアラブルロボットによる遠隔共同作業システム  
(Saraiji et al., 2018, Figure 2 より引用)

## 1.5 本研究の目的

### 1.5.1 本研究のアプローチ

本研究の目的は、バーチャル共身体化に関する新たな知見を獲得し、どのような応用が可能であるかを示すことである。このために、2種類の異なるシステムを構築し、それらを用いて実験を行った。

第1のシステムは、手および指について二人の参加者がリアルタイムに共有化および結合化できるバーチャル共身体化を実現するものである。一人が完全に操作する単独身体、平均する共有身体、部位分担する結合身体を同一の対象で比較し、その身体性（身体所有感と行為主体感）と課題成績（パフォーマンス）を調べた（実験1）。

第2のシステムは、手および指について参加者があらかじめ記録された教師の身体と共有化できるものである。教師の動きを手本として手の動きを真似する場合について、参加者自身の動きに基づくアバターを用いた場合と、共有アバターを用いた場合の真似のしやすさと行動成績を調べた（実験2）。

### 1.5.2 本研究の位置付け

まず、対象とする身体部位と研究の対象を軸とした本研究の位置付けについて、関連研究と共に表1.1に示す。バーチャル共身体化に関する先行研究では、ほぼ全てが手のリーチングなど手と腕全体を動かす課題を対象にしている。一方、手は通常5本の指を有し、細やかな作業に向いており、手工芸を始め高度な手技に利用されているが、バーチャル共身体化についてほとんど研究されていない。そこで本研究では、手および指についてのバーチャル共身体化を対象として設定した。そのうえで、実験1では身体性（身体所有感と行為主体感）と課題成績（パフォーマンス）に関する基礎科学的な知見を得ることを主目的とした。一方、実験2では運動スキルのトレーニングシステムへの応用を検討することを目的とした。

表 1.1 研究の位置付け（身体部位と研究アプローチによるマッピング）

		研究アプローチ	
		基礎解明	応用（トレーニング）
身体部位	腕	Fribourg et al., 2020 Hagiwara et al., 2020 Hapuarachchi & Kitazaki, 2022 Hapuarachchi et al., 2023	Kodama et al., 2023 Takita et al., 2023
	手指	実験1 二人の手の共有および結合による指リーチング	実験2 教師モデルとの手の共有によるアメリカ手話模倣

また、バーチャル共身体化について、動きの平均による共有身体と部位の分担による結合身体の方法による違いに基づいて研究の位置付けを行った場合、表 1.2 のようになる。これまで結合身体と共有身体は別個に研究されており、両者を比較する研究はない。実験 1 では、共有および結合によりバーチャル共身体化を実現し、単独身体の手指とも比較した。実験 2 では共有身体アバターによるバーチャル共身体化を手指の動きに適用した。

表 1.2 研究の位置付け（身体部位と共身体化の方法によるマッピング）

		バーチャル共身体化の方法	
		結合（部位の分担）	共有（動きの平均）
身体部位	腕	Hapuarachchi & Kitazaki, 2022 Hapuarachchi et al., 2023	Hagiwara et al., 2020 Fribourg et al., 2021 Kodama et al., 2023 Takita et al., 2023
	手指	実験1 二人の手の共有および結合による指リーチング	実験2 教師モデルとの手の共有によるアメリカ手話模倣

## 第2章

# 二人の手の共有および結合による指リーチング

### 2.1 目的

バーチャル共身体化について、重み付け平均する共有身体と部位を分担する結合身体のそれぞれに対して、身体所有感・行為主体感に及ぼす要因や身体運動特性の変化、そして応用などが研究されている。しかし、共有身体と結合身体を直接比較している研究はない。本実験の目的の1つは、一人が完全に操作する単独身体、平均する共有身体、部位分担する結合身体を同一の対象で比較することである。

バーチャル共身体化の研究の多くは、手のリーチングなど手と腕全体を動かす課題を対象にしている。一方、手は通常5本の指を有し、細やかな作業に向いており、筆記や手工芸を始め高度な手技に利用されているが、バーチャル共身体化についてほとんど研究されていない。そこで、本実験のもう1つの目的は、手および指について二人の参加者がリアルタイムに共有化および結合化できるバーチャル共身体化システムを構築し、その身体性（身体所有感と行為主体感）と課題成績（パフォーマンス）を調べることである。

実験では参加者二人がペアとなり課題を行った。単独身体条件では、一人がアバターの手と指を100%操作し、もう一人の手の動きはアバターに反映されなかった。共有身体条件では、手と指（関節）の動きは、二人の動きが50%ずつ平均された。結合身体条件では、一人が親指（第一指）、人差し指（第二指）、中指（第三指）を担当し、もう一人が薬指（第四指）と小指（第五指）を担当した。いずれの条件でも、一人称視点から自分の本当の手がある位置に手を観察した。これらを使用して、手の位置や方位は固定して、指を曲げて目標に到達する指リーチング課題を行った。目標が出現する時間間隔を操作することで難易度を操作した。

最初の仮説として、身体所有感および行為主体感は単独身体を100%担当するとき最も高く、共有身体、結合身体の順に低下する（H1）、とした。次に、課題成績が良いほど行為主体感が上がること(Wen et al., 2015, 2017)から、課題難易度が下がるほど成績が向上し、行為主体感が増加し、それに伴い身体所有感も向上するとの仮説（H2）

を立てた。課題成績については、共有身体が最も高く、結合身体、単独身体の順で低下すると仮説 (H3) を立てた。これは従来の研究で共有身体の手運動制御の優位性が示されていること(Hagiwara et al., 2020; Kodama et al., 2023b; Takita et al., 2023)、および結合身体と単独身体は各指を一人の人が担当するという意味では同等であるが、結合身体では参加者が担当する指の目標だけに注目すれば良いので課題負荷が低くなり成績が上がると考えたためである。

なお、本章の内容は、日本バーチャルリアリティ学会論文誌に採録された。

## 2.2 方法

### 2.2.1 参加者

実験の目的を知らない 30 名 (15 組) の学生が実験に参加した (女性 1 名、男性 29 名、平均 21.37 歳、標準偏差 0.71)。日本語版 FLANDERS 利き手テスト(Nicholls et al., 2013; 大久保 et al., 2014)を行ったところ、実験参加者のうち 25 名が右利き、両利きが 1 名、左利きが 4 名であった。後述する被験者内要因 3 x 3 条件 (計 9 条件) の分散分析、効果量中  $f=0.25$ 、 $\alpha=0.05$ 、 $\text{power}(1-\beta)=0.80$  として G\*Power 3.1(Faul et al., 2009, 2007)で例数設計をすると  $N=15$  となることから、サンプルサイズとして 15 組 (30 名) を選択した。本研究は豊橋技術科学大学人を対象とする実験倫理審査委員会の承認を得て実施され、実験はその内容に従って実施された。被験者はインフォームド・コンセントを理解し、同意書に署名した上で実験に参加した。また、被験者は裸眼または矯正視力、身体能力が正常な状態であった。

### 2.2.2 装置

コンピュータ (Intel Core i9-13900 5.6GHz, NVIDIA GeForce RTX4070Ti, RAM 32.0GB, OS Windows 11 Home 64 ビット) を 2 台用いて、それぞれに頭部搭載型ディスプレイ (HMD ; HTC Vive Pro EYE、各眼 1440 x 1600pixel、リフレッシュレート 90Hz) とモーションキャプチャグローブ装置 (Manus Prime II, Manus Core ver. 1.9.0) を接続し、Unity のネットワークライブラリ Mirror Networking (ver. 71.0.0) を用いてローカルなネットワーク環境で通信を行った。2 つのシステムの同期には、Mirror の Syncvar 機能を用い、安定した 120Hz での同期を確認して実験を行った。モーションキャプチャグ

ローブの位置は、手の甲につけたトラッカー（HTC Vive Tracker 3.0）で計測し、Mirrorを介して同期した。二人の参加者はともに右手のグローブだけを装着して机の上に前腕手首までを置き、指を自由に動かせる姿勢で、HMD から自分の右手の位置にアバターハンドを観察した（図 2.1）。実験の制御や刺激の生成・制御は Unity（ver.2021.3.25f1）で行った。



図 2.1 実験参加者の姿勢と装置

### 2.2.3 刺激

参加者の手のアバターとして人の手と同様の関節を有するロボットハンドが本当の手の位置に提示された。指をまっすぐ伸ばした姿勢で、親指を除く 4 指、つまり人差し指、中指、薬指、小指の先 4cm（手の平の法線方向）に半透明な立方体（一辺 1 cm）が提示され、そのうちの 1 つがランダムに選択されて赤い球のターゲット（直径 1cm）が提示された（図 2.2）。各立方体の中に提示された赤い球のターゲットはそれぞれの指が到達し、200 ms 接触が続くと当たり判定（指リーチング）がなされ成功判定の効果音が再生された。次のターゲットが提示されるまでの時間は固定されており、あるターゲットが出現し、次のターゲットが出現するまでの時間間隔は、700 ms、850 ms、1000 ms のいずれかとした。これは、成功判定の時点から次のターゲット出現までの時間間隔ではなく、あるターゲット出現から次のターゲット出現までの時間間隔であり、

リーチングの成功失敗に関わらずこの時間間隔で新しいターゲットが出現した。つまり、ターゲットの提示時間間隔内でリーチング出来た場合に成功となった。ターゲットはリーチングに成功した場合もそのまま提示され、所定の時間間隔を過ぎるとそのターゲットが消失したと同時に次のターゲットが出現した。この時間間隔は予備実験から難易度が高中低となるように決定した。

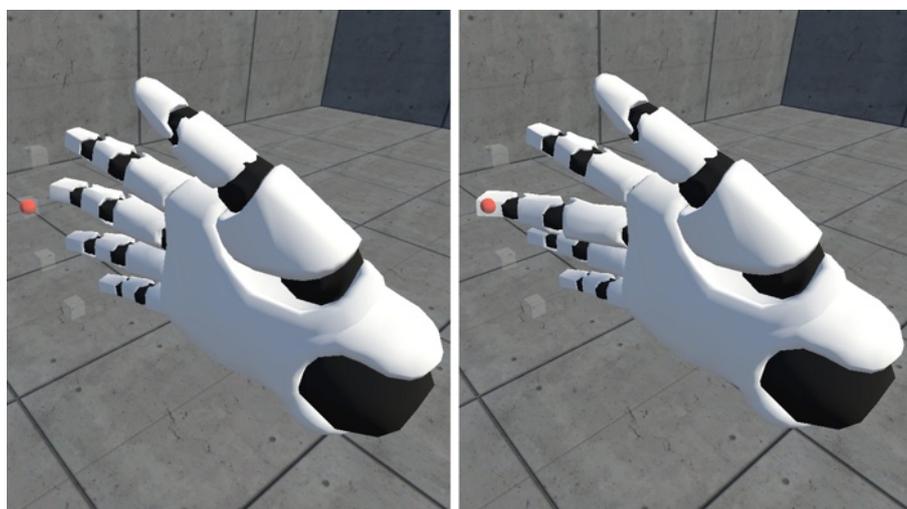


図 2.2 アバターハンドとターゲット

(左) ターゲット候補の半透明立方体とターゲットの赤い球の提示。(右) 指がリーチングした状態

アバターハンドの制御方法として、単独身体、共有身体、結合身体の 3 条件を設定した。単独身体条件では、ペアのうち 1 名がアバターハンドを 100%制御し、もう 1 名の手の動きは全くアバターハンドに反映されなかった。共有身体条件では、ペアの二人の手の動きが平均されてアバターハンドに反映された。結合身体条件では、1 名が親指、人差し指、中指を担当し、もう 1 名が薬指と小指を担当した (図 2.3)。実験全体を通してペアの役割は変更なく固定した。



図 2.3 手の条件の模式図

中央がアバターハンド、左右が参加者の手の姿勢。(上) 単独身体条件。左が 100%制御。(中) 共有身体条件。(下) 結合身体条件。左が親指、人差し指、中指を担当、右が薬指と小指を担当。

## 2.2.4 手続き

参加者はペアで実験に参加したが、実験中はお互いに話したりしないように伝えた。椅子に座り、前腕から手首を机の所定の位置に置き、一人称視点から自分の手の位置にアバターハンドを観察した。実験条件は、被験者内要因で、手の種類 3 水準（単独身体、共有身体、結合身体）とターゲットの出現時間間隔 3 水準（700、850、1000 ms）であった。これらの組合せ 9 条件をランダムな順で 1 回のみ行った。なお、本実験では 1 つのターゲットに対して行うリーチング 1 回を試行と呼び、各条件でブロック化された多数の試行からなるまとまりをセッションと呼ぶ。

条件については、どのような条件が設定されているのか、これからどの条件を行うかについて、参加者に事前に知らせなかった。

参加者は、各条件の時間間隔で出現するターゲットへ対応する指で、正確に早くリーチングを行うことが求められた。各セッションで出現するターゲット数は、700 ms 条件で 208 個、850 ms 条件で 170 個、1000 ms 条件で 145 個であり、いずれもセッション時間は 146s であった。つまり、1 セッションは、700 ms 条件で 208 試行、850 ms 条件で 170 試行、1000 ms 条件で 145 試行であった。

指がターゲットに 200 ms 連続して触れることで当たり判定となった。単純な瞬時当たり判定を用いなかったのは、指をただ曲げてターゲットを通り過ぎるような運動を防ぎ、指をターゲットの位置に到達させ止めるリーチング運動を行わせるためであった。また、毎試行、最初に指をまっすぐ伸ばす初期姿勢に戻すように教示した。成功数と反応時間が記録された。

各セッションの終了後には、7 件法のリッカート尺度（1：全く同意できない、3：どちらでもない、7：強く同意する）で以下の 2 つの質問項目について参加者に回答を求めた。最初の質問は身体所有感の項目、次が行為主体感の項目である。

- バーチャルハンドが自分の手のように感じた。
- バーチャルハンドの動きは、まるで自分の動きのようであった。

全セッション終了後に参加者は日本語版 FLANDERS 利き手テストに回答した。

## 2.3 結果

### 2.3.1 主観評定

身体所有感と行為主体感の質問項目のスコアを条件毎に求めた。単独身体条件では、100%制御担当者と全く動きが反映されなかった者（0%）とに分けて算出した。共有身体条件と結合身体条件ではペアの評定値の平均を算出し利用した。リッカート尺度であることからノンパラメトリック検定として、整列ランク変換による分散分析（ANOVA-ART）（Wobbrock et al., 2011）を用いて二元配置（手の種類（単独身体 100%、単独身体 0%、共有身体、結合身体） x 時間間隔（700 ms, 850 ms, 1000 ms））の被験者内要因分析を行った。多重比較の補正には、Kenward-Roger の自由度補正を適用した Tukey 法を用いた。

身体所有感については、手の種類（ $F(3,42)=26.39$ ,  $p<0.001$ ,  $\eta^2=0.65$ ）と時間間隔（ $F(2,28)=15.77$ ,  $p<0.001$ ,  $\eta^2=0.53$ ）のいずれの主効果も有意であったが、交互作用（ $F(6,84)=0.36$ ,  $p=0.899$ ,  $\eta^2=0.01$ ）は有意ではなかった（図 2.4）。手の種類については、単独身体 100%が最も身体所有感が高く、次いで共有身体が高かったが、2つの条件間に有意差はなかった（ $t(42)=1.54$ ,  $\text{adj.}p=0.423$ ,  $d=0.52$ ）。結合身体はそれらよりも身体所有感が有意に低く（共有身体・結合身体間  $t(42)=3.16$ ,  $\text{adj.}p=0.015$ ,  $d=1.065$ ）、さらに単独身体 0%は有意に低かった（結合身体・単独身体 0%間  $t(42)=3.50$ ,  $\text{adj.}p=0.006$ ,  $d=1.179$ ）。時間間隔については、1000 ms で身体所有感が最も高く、850 ms が次に続いたが、両者間に有意差はなく（ $t(28)=0.925$ ,  $\text{adj.}p=0.630$ ,  $d=0.189$ ）、700 ms 条件では有意に低下した（ $t(28)=4.335$ ,  $\text{adj.}p<0.001$ ,  $d=0.888$ ）。

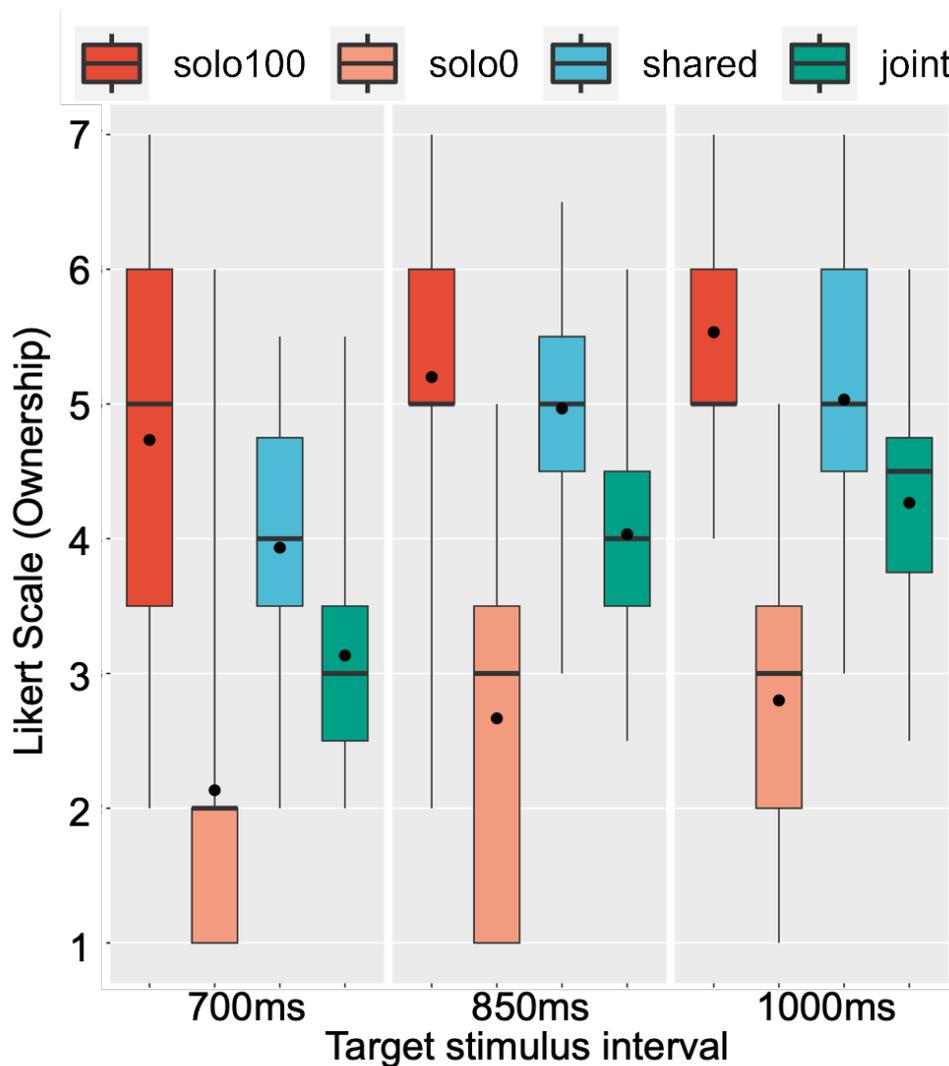


図 2.4 身体所有感スコアの結果

横軸は時間間隔と手の種類、縦軸は身体所有感スコア。solo100 は単独身体 100%担当、solo0 は単独身体 0%担当、shared は共有身体条件、joint は結合身体条件を示す。箱ひげ図は、箱が第一四分位点から第三四分位点を示し、太い横線が第二四分位点（中央値）、黒丸が平均値を示す。ひげは最大値から最小値までを示す。

行為主体感についても身体所有感と同じ結果であった。手の種類 ( $F(3,42)=35.63$ ,  $p<0.001$ ,  $\eta^2=0.72$ ) と時間間隔 ( $F(2,28)=15.10$ ,  $p<0.001$ ,  $\eta^2=0.52$ ) のいずれの主効果も有意であったが、交互作用 ( $F(6,84)=0.72$ ,  $p=0.641$ ,  $\eta^2=0.01$ ) は有意ではなかった (図 2.5)。手の種類については、単独身体 100%が最も行為主体感が高く、次いで共有身体が高かったが、2つの条件間に有意差はなかった ( $t(42)=2.21$ ,  $adj.p=0.137$ ,  $d=0.661$ )。結合身体はそれらよりも行為主体感が有意に低く (共有身体・結合身体間  $t(42)=3.19$ ,  $adj.p=0.014$ ,  $d=0.953$ )、さらに単独身体 0%は有意に低かった (結合身体・

単独身体 0%間  $t(42)=4.33$ ,  $\text{adj.}p=0.005$ ,  $d=1.294$  )。時間間隔については、1000 ms で行為主体感が最も高く、850 ms が次に続いたが、両者間に有意差はなく ( $t(28)=1.028$ ,  $\text{adj.}p=0.566$ ,  $d=0.237$ )、700 ms 条件では有意に低下した ( $t(28)=4.161$ ,  $\text{adj.}p<0.001$ ,  $d=0.959$ )。

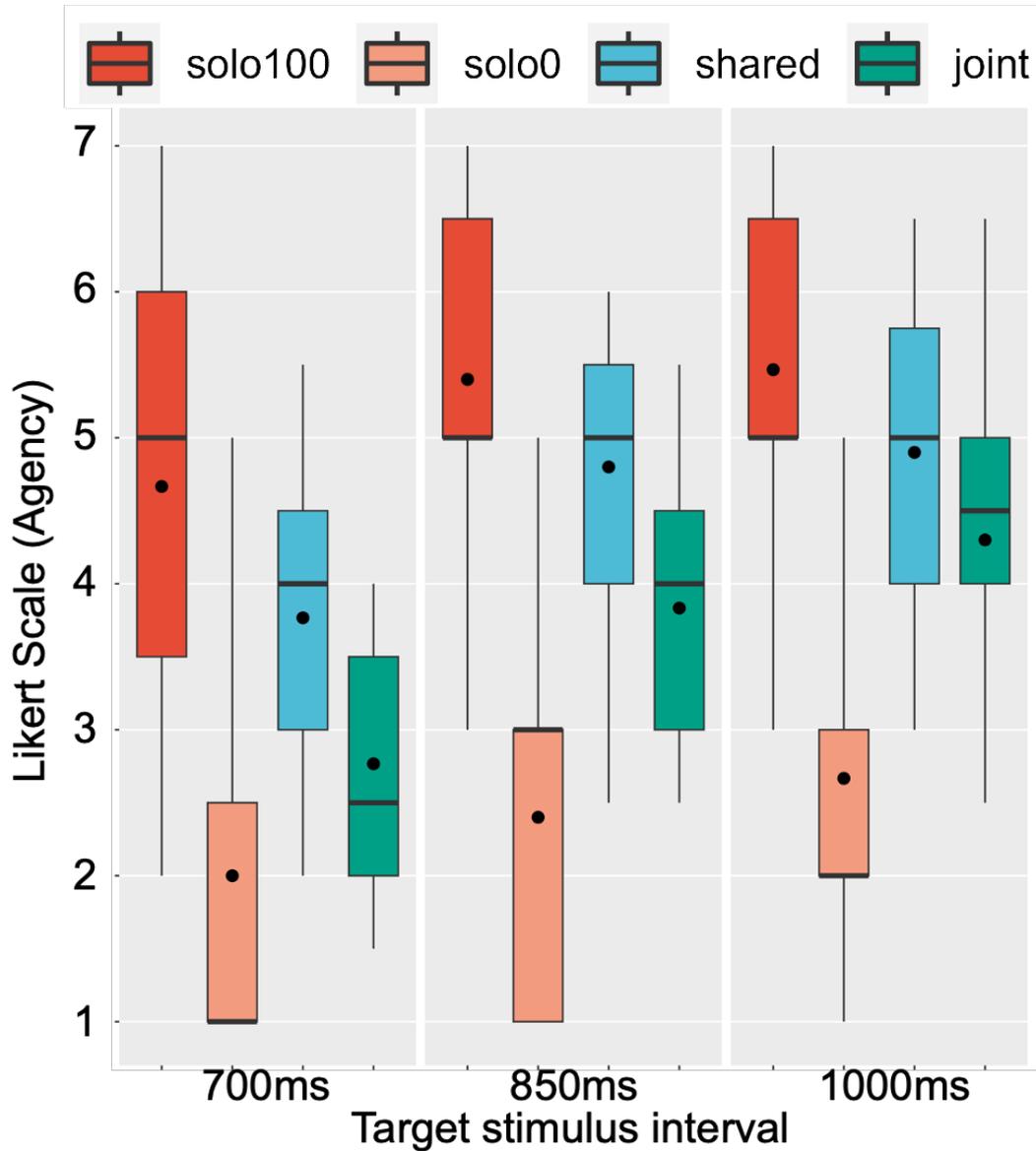


図 2.5 行為主体感スコアの結果

横軸は時間間隔と手の種類、縦軸は行為主体感スコア。solo100 は単独身体 100%担当、solo0 は単独身体 0%担当、shared は共有身体条件、joint は結合身体条件を示す。

### 2.3.2 行動成績

指リーチングの成功率と反応時間を条件毎に求めた。成功率は、ターゲットが出現して消失するまでの時間間隔中にリーチングできた割合とした。反応時間は、成功した試行について、ターゲットが出現してから当たり判定が出たときの接触時点までの時間とした。接触から 200 ms 触り続けることで当たり判定が出るため、700, 850, 1000 ms の各時間間隔条件では、500, 650, 800 ms より短い反応時間となり、それ以上の場合には失敗・誤答試行となった。また、各試行において反応時間が 150 ms より短いデータは外れ値として除外した。

単独身体条件では 100% 制御担当者のデータ、共有身体条件と結合身体条件ではペアのデータを利用した。二元配置（手の種類（単独身体、共有身体、結合身体） x 時間間隔（700 ms, 850 ms, 1000 ms））の被験者内要因分散分析を行った。球面性の仮定が破られているときには Greenhouse-Geisser の方法で自由度を補正した。多重比較の補正には Holm の方法を用いた。

成功率については、手の種類 ( $F(1.5, 20.97)=15.06, p<0.001, \eta^2=0.52$ ) と時間間隔 ( $F(2, 28)=132.27, p<0.001, \eta^2=0.90$ ) の主効果および交互作用 ( $F(4, 56)=6.64, p<0.001, \eta^2=0.32$ ) が有意であった (図 2.6)。交互作用があることから、時間間隔ごとの手の種類の単純効果をみると、いずれの時間間隔でも手の種類の効果が有意であるが、850 ms で最も効果が強く、1000 ms で最も低かった (700 ms:  $F(2, 28)=8.02, p=0.001, \eta^2=0.39$ ; 850 ms:  $F(2, 28)=17.88, p<0.001, \eta^2=0.56$ ; 1000 ms:  $F(2, 28)=4.11, p=0.027, \eta^2=0.23$ )。それぞれの多重比較をみると、700 ms では、共有身体と単独身体は同程度で有意差がなく ( $t(14)=0.598, \text{adj.}p=0.559$ )、結合身体が他の 2 条件に比べて成功率が有意に低かった (共有身体・結合身体間  $t(14)=4.806, \text{adj.}p<0.001$ ; 単独身体・結合身体間  $t(14)=2.766, \text{adj.}p=0.031$ )。850 ms では、共有身体が有意に最も成功率が高く (共有身体・単独身体間  $t(14)=4.443, \text{adj.}p=0.001$ ; 共有身体・結合身体間  $t(14)=5.874, \text{adj.}p<0.001$ )、それより低い単独身体と結合身体の間には有意差はなかった ( $t(14)=2.112, \text{adj.}p=0.053$ )。1000 ms では、いずれの条件間にも有意差はなかった ( $ps>0.05$ )。また、ターゲットの出現時間間隔が長くなるに従い、全体的に成功率は向上した。

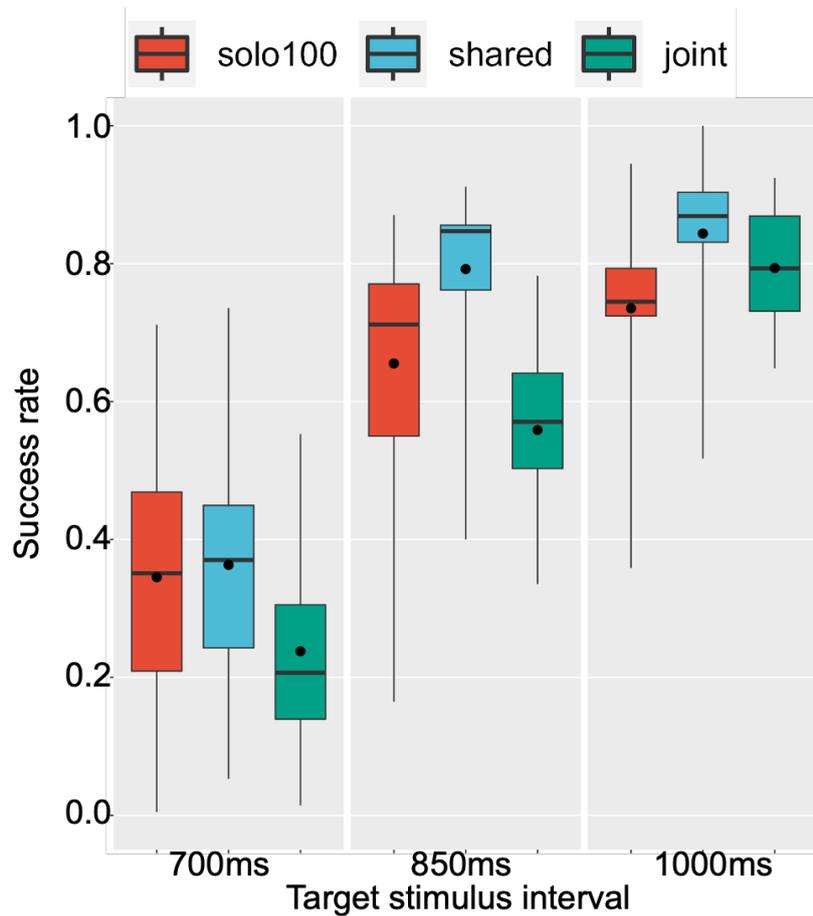


図 2.6 リーチング成功率の結果

横軸は時間間隔と手の種類、縦軸はリーチングの成功率。solo100 は単独身体 100%担当、shared は共有身体条件、joint は結合身体条件を示す。

反応時間については、時間間隔 ( $F(2,28)=104.02, p<0.001, \eta^2 p=0.88$ ) の主効果のみが有意であり、手の種類 ( $F(2,28)=0.263, p=0.771, \eta^2 p=0.018$ ) の主効果と交互作用 ( $F(4,56)=0.902, p=0.435, \eta^2 p=0.06$ ) は有意でなかった (図 2.7)。時間間隔が長くなるにつれて有意に反応時間が長くなった (1000-850 ms 間  $t(14)=4.264, \text{adj.}p<0.001$ ; 850-700 ms 間  $t(14)=11.146, \text{adj.}p<0.001$ )。

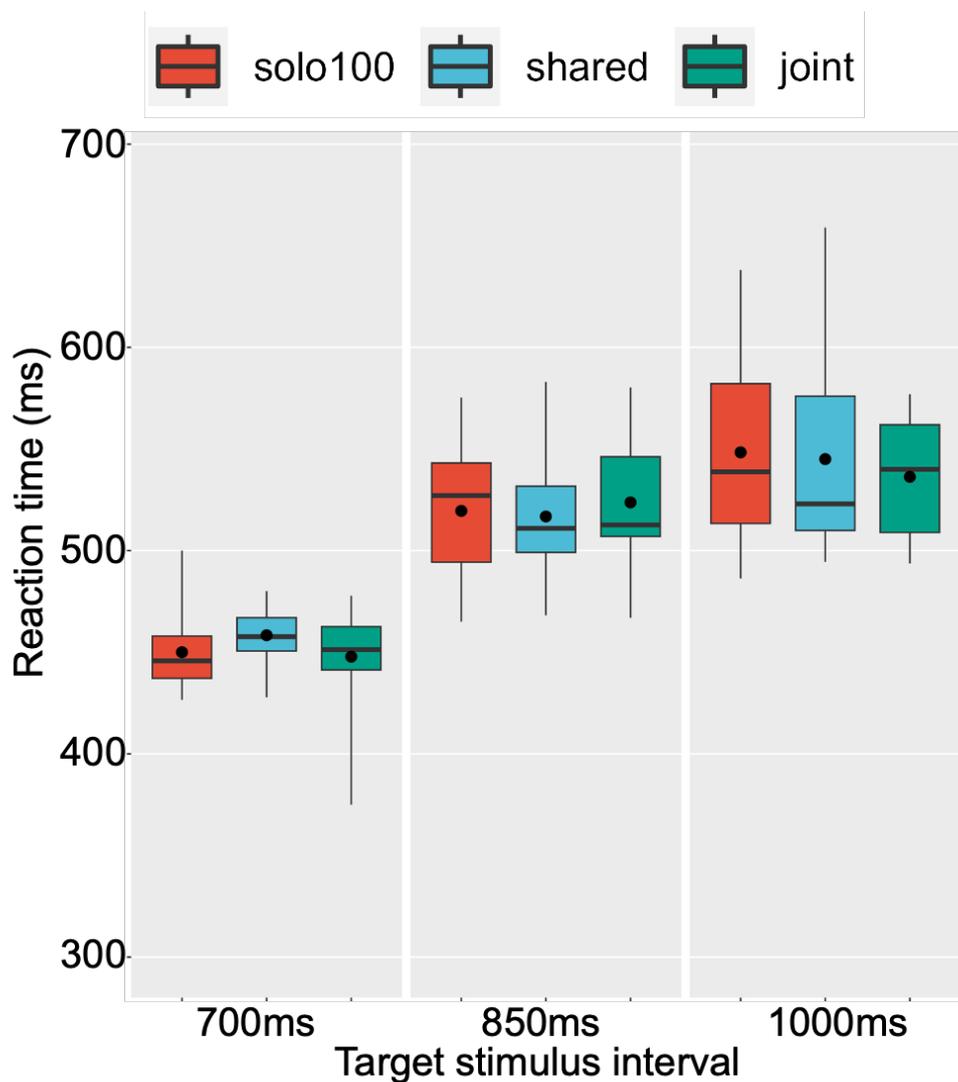


図 2.7 リーチング反応時間の結果  
 横軸は時間間隔と手の種類、縦軸はリーチングの反応時間。solo100 は単独身体 100% 担当、shared は共有身体条件、joint は結合身体条件を示す。

## 2.4 考察

### 2.4.1 結果のまとめ

身体所有感と行為主体感は、一人で操作するアバターハンドと二人の動きを平均して操作する共有身体ハンドで高く、結合身体ハンドはそれよりも低いですが、全く操作していない場合よりは高かった。また、ターゲットの出現間隔が長くなるにしたがって、身体所有感と行為主体感は向上した。バーチャルな指によるターゲットへのリーチン

グの成功率は、ターゲット出現間隔が長くなるにつれて全体的に向上したが、850 ms で中難易度の時に共有身体が他の 2 条件よりも優位であった。700 ms の難易度が最も高い時には結合身体が他の 2 条件よりも成功率が低く、1000 ms で最も容易な時には手の種類間で有意な差はなかった。反応時間は、時間間隔が長くなるに従い長くなり、手の種類間の差はなかった。

#### 2.4.2 共有身体と結合身体の身体所有感と行為主体感

最初の仮説「H1：身体所有感および行為主体感は単独身体を 100%担当するとき最も高く、共有身体、結合身体の順に低下する」は、主観評定の結果から概ね支持された。ただし、統計的には単独身体と共有身体の間には有意な差は見られなかった。これは、全身の動きや腕の動きでは共有身体の身体所有感・行為主体感は単独身体に対して有意に低下すること(Fribourg et al., 2020; Hagiwara et al., 2020)と対照的である。ただし、この点については、後に議論するように指の運動範囲の狭さや自由度の低さから生じた可能性がある。

これまでの結合身体の研究では、自分が担当する部位と他者が担当する部位に対する身体所有感と行為主体感を分けて計測していた(Hapuarachchi et al., 2023; Hapuarachchi & Kitazaki, 2022)ため、共有身体が結合身体よりも身体所有感・行為主体感が高いことを示したのは本研究が初めてである。結合身体では、一部が自分の意志と相反する動きをすることが身体所有感および行為主体感を阻害していると考えられる。共有身体でも平均化により操作者の意図はある一定割合しか反映されないが、完全にゼロではなく一定割合であっても意図や自分の身体運動とアバターが連動することが結合身体ほどの違和感を生じさせないと推察される。

#### 2.4.3 課題難易度と身体所有感と行為主体感

次の仮説「H2：課題難易度が下がるほど成績が向上し、行為主体感が増加し、それに伴い身体所有感も向上する」は、課題成績が時間間隔増加とともに向上した結果および主観評定におけるターゲット出現時間間隔の主効果から支持された。単独身体条件で全く運動がアバターに反映されなかった参加者においても、時間間隔の増加によりある程度身体所有感・行為主体感が上昇したことは興味深い。これらの結果は、外部からの介入があり操作者の予測と運動制御の結果が一致しない状況であっても課題

成績が良いなら行為主体感が上がるという知見(Wen et al., 2015, 2017)とも一致しており、頑健な現象であることを示唆する。

探索的分析として、単独身体、共有身体、結合身体のそれぞれで、成功率と行為主体感および身体所有感との間の相関を分析した。ターゲット提示時間間隔の条件についてはまとめて分析した (N=45)。なお、8つの相関分析間の補正は行っておらず、各相関の p 値を示した。行為主体感と身体所有感がリッカート尺度であることから Spearman の順位相関を用いた。その結果、単独身体条件で全く運動が反映されなかった参加者の行為主体感 (Spearman's rho = 0.219, p=0.148) と身体所有感 (rho = 0.244, p=0.106) は成功率と有意な相関が示されなかった。したがって、自分が全く操作していないアバターハンドの動きを見ているだけで、その課題成績が行為主体感・身体所有感を向上させるとは言えないことが示唆された。単独身体を自分で制御している参加者においては、成功率と行為主体感 (rho = 0.387, p=0.009) および身体所有感 (rho = 0.320, p=0.032) の間に有意な相関が見られた。共有身体においても、成功率と行為主体感 (rho = 0.658, p<0.001) および身体所有感 (rho = 0.615, p<0.001) の間に有意な相関が見られた。結合身体においても同様に、成功率と行為主体感 (rho = 0.646, p<0.001) および身体所有感 (rho = 0.560, p<0.001) の間に有意な相関が見られた。したがって、アバターハンドをある程度制御しているなら、成功率が上がれば行為主体感・身体所有感が向上することが示唆された。ただし、逆に行為主体感・身体所有感が向上したことにより、成功率が上昇した可能性も考えられる。これについては本実験では検討しきれないため、今後の課題である。

#### 2.4.4 共有身体・結合身体の課題成績

最後の仮説「H3：課題成績については、共有身体が最も高く、結合身体、単独身体の順で低下する」は、課題難易度によって、単独身体・共有身体・結合身体の成功率の優位性が異なる結果となり、支持されなかった。反応時間については、手の種類条件に関わらずターゲット出現時間間隔が長くなると遅くなり、基本的には課題成績の違いは成功率に現れた。

どの課題難易度でも概ね共有身体の成功率は高く、特に課題難易度が中程度では単独身体・結合身体よりも有意に高かった。単独身体と結合身体では、難易度が高い時には結合身体の方がより成功率が低かった。結合身体では参加者が担当する指のター

ゲットだけに注目すれば良いので個人の負荷が下がり成績が上がると考えたが、時間間隔が短い時には担当する指のみに注意を向けるのが難しく、むしろなんらかの干渉が阻害が生じたと思われる。この結合身体での成績低下については、原因解明のために今後のさらなる研究が必要である。

課題成績は、身体所有感と行為主体感の強さによって説明できるのではないかとこの懸念の検討の為に、課題成績を従属変数として、身体所有感と行為主体感、身体条件（単独、共有、結合）を説明変数とする重回帰分析を追加の探索的分析として行った。ターゲット提示時間間隔の条件についてはまとめて分析した（ $N=135$ ）。モデル全体の回帰係数  $R=0.627$ （決定係数  $R^2=0.393$ ）であり、有意な回帰式が得られた（ $F(4,130)=21.035, p<.001$ ）。行為主体感の係数は有意であり、標準回帰係数  $\beta=0.562$  であった（ $t=4.224, p<.001$ ）。身体所有感の係数は有意ではなく、標準回帰係数  $\beta=0.118$  であった（ $t=0.907, p=.366$ ）。身体条件の係数も有意であった（ $t=3.048, p=.003$ ）。なお、行為主体感と身体所有感には相関が想定されるので、多重共線性を検討したところ VIF（Variance Inflation Factor）は 3.617 であり、弱い共線性が認められた。身体所有感と行為主体感、身体条件の課題成績への寄与を比較するために偏相関係数をみると、行為主体感 0.347、身体所有感 0.079、身体条件 0.337 であり、行為主体感と身体条件が同程度の影響を課題成績に与えていると判断された。したがって、課題成績は身体所有感と行為主体感の強さのみによっては説明されず、少なくとも身体条件の違いと行為主体感の強さが影響することが示唆された。

#### 2.4.5 身体条件の可知性とその影響について

実験参加者には事前にどのような条件があるか、身体条件と時間条件のそれぞれの内容についても、次にどの条件を行うかも事前に伝えなかった。これは、事前に条件を知ること、参加者が実験者の意図を読み、あるいは推定することで、特に主観評定の結果に影響が及ぶこと（要求特性、demand characteristics）を懸念したからである。身体所有感の実験については、要求特性の影響があることが知られており（Lush, 2020; Lush et al., 2021）、実験の条件や目的、仮説を伝えないことでその懸念を低減することを目指した。

また、実験後に条件を説明する前と後に自由な感想を集めたところ、15 ペアのうち、手の違和感に気づいたと明示的に発言したペアが 12 であった。残り 3 ペアは発言がな

かった。また、共有条件に気づいたと明言したペアが3、気づかなかったと明言したペアが3であり、結合条件に気づいたと明言したペアが5、気づかなかったと明言したペアが1であった。したがって、多くの参加者がなんらかの身体条件の違いに気づいていたが、共有身体条件はやや気づかれにくかったと推察された。これは、本実験においては、指先から手の平の法線方向に 4cm 離れたターゲットにリーチングする課題を用いており、運動の軌跡が単純で自由度が低いこと、そして距離が短いことから、共有身体条件と単独身体 100%の違いに気づかなかったのではないかという懸念とも一致する。したがって、このような不可知性の影響により、単独身体 100%条件と共有身体条件の間で身体所有感および行為主体感の有意な差が生じなかった可能性がある。

結合身体に気づかなかった参加者は少ないと想定されたが、事前にどの指を担当するかを知識として知っていれば担当する指に集中し、使用しない指を無視する戦略をとることで、より課題成績が向上する可能性がある。本実験では、参加者がそのような戦略をとったのかとらななかったのかを特定することはできない。今後は、このような戦略が有効かについて条件の情報提示の有無を操作した実験が必要である。

#### 2.4.6 手の共身体化と腕や全身の共身体化の比較

腕や全身を重み付け平均して共身体化する共有身体においては、参加者は自分の担当割合をかなり正確に知覚できるが(Fribourg et al., 2020; Hagiwara et al., 2020)、手の共有身体を実現した本実験では、行為主体感においても単独身体 100%との差は小さく正確には知覚できない可能性が示唆された。ただし、これは本実験の課題設計により指の可動範囲が狭く、距離も短かったことによる可能性がある。この点を明らかにするためには、より自由度の高い手指の運動課題を採用した実験を行う必要がある。

腕のリーチングの課題成績については、共有身体の方が単独身体よりも反応時間が短い、ただし課題達成時間には差は無いという報告がある(Hagiwara et al., 2020)。一方、指リーチングを用いた本実験では反応時間に差は無かった。ただし、両者の反応時間の定義が異なる。前者では、各試行においてリーチングの最大速度の 10%に到達するまでの時間を反応時間（潜時）としており、本実験では実際にターゲットに到達するまでの時間を反応時間とした。したがって、本実験での反応時間は、先行研究における課題達成時間に類似しており、単独身体条件と有意差がない点も一致している。な

お、本実験課題は指の移動量が少ないために先行研究と同様の潜時（最大速度の 10% 到達までの時間）を算出することができなかった。

腕や全身の共身体化では、ターゲットが共通しているか(Fribourg et al., 2020)、パートナーのターゲットが見えているか(Hapuarachchi & Kitazaki, 2022)が身体所有感や行為主体感に影響する。共有身体においては、ターゲットが一致する時には自分の担当割合の推定値あるいは行為主体感が過剰評価となる(Fribourg et al., 2020)。結合身体においてはターゲットが共通しているかパートナーのターゲットが見えているときに、パートナーが操作する身体部位の身体所有感および行為主体感が増加する(Hapuarachchi & Kitazaki, 2022)。本実験では常にターゲットは共通でありペアの両者から見えていたために、ターゲットが異なる条件や見えない条件との比較はできないが、単独身体0%条件でもある程度の身体所有感と行為主体感が報告されていることから、ターゲットの共通性・可視性について同様の傾向が推察される。

上記の点を鑑みると、手指の共身体化と全身四肢の共身体化を正しく比較するためには、課題の自由度や難易度などをそろえた実験が必要である。

#### 2.4.7 限界と今後の課題

手指の平均共有身体と分担部位結合身体を通常の単独制御身体と比較したが、共有身体については制御レベルを定量的に変化させた場合（例えば 70%と 30%）にどうなるか、結合身体については指の分担を異なる組合せにした場合にも同じ結果が得られるかは調べていない。また、共有身体と結合身体を組み合わせるように、指毎に操作者間で制御レベルを変える方法もあり得る。これらは本研究では対象としておらず限界でもあり同時に、今後の追求されるべき課題である。

特に、指の分担については、薬指と小指を操作する方が、親指、人差し指、中指を担当するよりも負荷が高く難易度が高いために、身体所有感・行為主体感の主観評定や課題成績が異なる可能性があり、ペアの評定値を見ることが妥当ではないのではないかと懸念が指摘されうる。事前に、今回採用した「1名が親指、人差し指、中指を担当し、もう 1 名が薬指と小指を担当する」方法（空間的に親指側と小指側に半分に分割）と「1名が親指、中指、小指を担当し、もう 1 名が人差し指と薬指を担当する」方法（空間的に交互に分担）を比較検討したところ、指を交互に分担する方法は、空間的に隣り合っていない指を担当することになり、空間把握の困難さからむしろ操作

が難しいことが判明した。そこで、全身の結合身体を左右半身で分けている研究 (Hapuarachchi et al., 2023; Hapuarachchi & Kitazaki, 2022)も参考にし、手を空間的に半分に分割して分担する方法を採用した。ただし、バーチャル共身体化によって期待される認知の we-mode 化(Gallotti & Frith, 2013; Kodama et al., 2023b; 北崎, 2016) を考えるとき、ペアの間に負荷・難易度が異なることは we-mode 化を阻害する可能性も考えられる。今後は、ペアの難易度の違いを統制、あるいは操作した研究が求められる。

本実験では、各条件のセッションの時間 (146s) を固定し、ターゲットの出現時間間隔 3 条件間でのターゲットの個数 (試行数) が異なっていた (700 ms 条件で 208 試行、850 ms 条件で 170 試行、1000 ms 条件で 145 試行)。これは先行研究において、課題時間や刺激時間が固定されていることが多いことを踏襲したためである ((Botvinick & Cohen, 1998; Hagiwara et al., 2020; Kondo, Tani, Sugimoto, Inami, et al., 2020; 中川 et al., 2022)など)。身体所有感・行為主体感の生起についてその時間特性が研究されており、ラバーハンド錯覚は18s程度で生じ、ゴムの手と本当の手の距離が離れるほど時間がかかる(Kalckert & Ehrsson, 2017; Lloyd, 2007)。自己運動と同期して運動するアバターを鏡の中に観察する実験では、身体所有感は5sで生じる(Keenaghan et al., 2020)。これらのことも時間を固定した理由である。一方、時間ではなく試行数を固定する方法もある(Fribourg et al., 2020)。特に本実験では、出現時間間隔が異なることから、条件間での試行数の違いは大きく、試行回数が多いことや運動量が多いことによって身体所有感・行為主体感が増加し、課題に慣れることで課題成績が向上する可能性も考えられる。ただし、身体所有感・行為主体感については逆に試行数が少ない条件で高く、課題成績も試行数が少ない条件で高かったことから、試行数が多いことによる疲労が逆に主観評定や行動成績を低下させた懸念もある。つまり、セッション時間を固定した場合には、出現時間間隔の操作に試行数や運動量の違いが交絡しており、出現時間間隔の効果のみを取り出すことが困難である。この問題を解決するためには、本実験とは逆に試行数を固定した実験を行い、本研究と比較することが必要である。

本研究の実験参加者のうち女性は3.3%であり、極端な性別の偏りがあった。これは参加者を工科系単科大学の内部から募り、自発的な参加を呼びかけたために生じたと考えられる。バーチャルリアリティの体験には性別による差があり(Peck et al., 2020; Stanney et al., 2020)、バーチャル身体化にも性による影響があることが報告されている(Schwind et al., 2017)。男性は本実験で使用したようなリアルな人の手ではないものに対して臨場感が低く、女性は男性の手に対して臨場感が低い(Schwind et al., 2017)。し

たがって、本研究についても性別による影響があることが懸念される。それゆえ、本実験結果の一般化には限界があり、将来的には性別に加えて年齢などについても広い範囲でバランスのとれた参加者を用いた実験が必要である。

利き手の調査は実験終了後に行い、利き手を統制した実験計画とはなっていない。本研究では、右利きが多いことを想定し、右手のみを使う実験系を構築した。右利きのみを参加者の対象としたり、ペアの利き手を揃えなかったのは、参加者募集に制限をかけないこと、利き手についてもある程度の分散した特性の参加者を対象とすることを優先したためである。ただし、ペアの利き手の一致性やそれによる身体能力の一致性がバーチャル共身体化によって期待される認知の **we-mode** 化に影響する可能性は懸念される。これも本研究の限界の1つである。

指リーチングを本実験では採用したが、手技では工芸品の制作やマッサージ、手話など滑らかで連続的な動きを多用するものも多い。それらについて同様の結果が得られるかは本研究の結果だけからは分からない。今後は、動作の種類による違いについても検討すべきである。

## 第3章

### 教師モデルとの手共有によるアメリカ手話模倣

#### 3.1 目的

これまでのバーチャル空間での共身体化に関する研究は、腕によるリーチングと線の描画による手の動きに注目したものであった(Fribourg et al., 2020; Hagiwara et al., 2020; Hapuarachchi et al., 2023; Hapuarachchi & Kitazaki, 2022; Kodama et al., 2023b, 2023a; Takita et al., 2023)。筆記やハンドジェスチャー、指の動きのような繊細な動きは様々な運動タスクに必要であるが、このような動きの共身体化については十分に研究されていない。そこで本研究では、手と指の動きを共有身体アバタにより共身体化するシステムを開発し、アメリカ手話の指文字を被験者が真似する動きを対象として用いた。

模倣とは、観察された他者の行動や動作を真似ることであり、人では幼児期から成人期まで様々な場面で観察されている(Duffy & Chartrand, 2015; Jones, 2007)。模倣は自然発生的に行われることが多く、向社会的行動を増加させるなど社会的相互作用に有益である(van Baaren et al., 2004)。一方、専門家の動作を意識的かつ明示的に模倣することは、複雑な技能を習得するための基礎となる(Darden, 1997; Goldenberg & Karnath, 2006)。

手話のジェスチャーは、指の動きを伴う細かい動きを含むため、本研究での運動模倣の刺激として採用した。手話は、手指による明瞭な表現を伴う視覚言語である。多くの学生が高校、大学、専門学校でアメリカ手話を学んでいる(Quinto-Pozos, 2011)。

教師の手は実験参加者（学習者）の前に配置され第三者視点で観察できる位置に呈示された。この時に、学習者の手の動きのみを反映したアバター（単独アバター）を用いる場合と、教師の手の動きと学習者の手の動きを平均化したアバター（共有アバター）を用いる場合とを比較した。教師の手が対面方向で提示される場合と同方向で提示される場合の真似のしやすさを、アンケートによる主観評定と、時間的な遅れと空間的な誤差による行動成績のそれぞれについて評価した。

先行研究では、実験参加者が教師役の操作者と1つのアバターを50%ずつ共有することで、一人で学習する場合よりも早く運動成績が向上し、共有身体での学習終了後に行った一人での操作においても一人で学習した参加者よりも高い成績を示すことが

示されている(Kodama et al., 2023a; Takita et al., 2023)。このことから、教師の手の動きが共有される共有アバターを用いた場合の方が動作をより上手に模倣できると仮説を立てた (H1) なお、本実験では、学習プロセスではなく、運動学習に基づく模倣のパフォーマンスに注目し、被験者内計画で条件間の比較を行った。

通常の手話学習では、教師（指導者）は学習者の対面で手本となる動きを示すため、学習者と教師の手は対面方向となる。もし教師と学習者の手の向きが同じであれば、学習者は手本の動きと自分の手の動きをより簡単に比較できると仮定し、同じ向きで提示される場合の方がよりパフォーマンスが高いという仮説を立てた (H2)。

なお、本章の内容は、IEEE Access 誌にて刊行済みである。

## 3.2 システム概要

### 3.2.1 装置

実験参加者は頭部搭載型ディスプレイ (HMD; HTC Vive Pro EYE、各眼 1440 x 1600 pixel、視野角 110°、リフレッシュレート 90 Hz) を装着し、右手にモーションキャプチャグローブ (Manus Prime II、Manus Core ver. 1.9.0) と、トラッカー (HTC Vive Tracker 3.0) を装着した。実験はコンピュータ (Intel Core i7 10700 2.9GHz CPU、NVIDIA GeForce RTX 3060 Graphics、DDR4 32GB メモリ) で制御された。実験の制御や刺激の生成・制御は Unity (ver.2020.3.9f1)で行った。



図 3.1 実験参加者の姿勢と装置

### 3.2.2 教師モデルデータの作成

実験刺激として、アルファベット 3 文字から成る無意味音節（例：YOS、WEF、HUI）の単語を用意した。単語の意味や既知の単語に対する個人の知識・経験による影響を排除するため、一般的な単語ではなく無意味音節を採用した。

最初に、無意味音節リスト(Hull, 1933; Trapp & Kausler, 1959)から 30 個の候補単語を選択した。次に、アメリカ手話のアルファベットで表現された候補単語の 3 次元の手の動きを、モーションキャプチャシステム（Manus Prime II）を用いて記録した。その後、3次元の手の動きをもとに評価用の 2 次元映像に変換した。映像中での視点は、一般的に手話を観察する時と同じ対面方向とした。

これらの記録された手の動きそれぞれについて、専門家が映像を観察しアルファベット指文字として妥当なものであるかを 10 段階（1：妥当でないと思う、10：妥当であると思う）で評価した（図 3.2）。合計 60 個の映像を観察し、評価スコアが上位であった 20 単語を実験で使用する教師の手の動きとして選択した。選択された手の動きの映像はいずれも評価スコアが 9 以上であった（平均 6.55、標準偏差 2.91）。

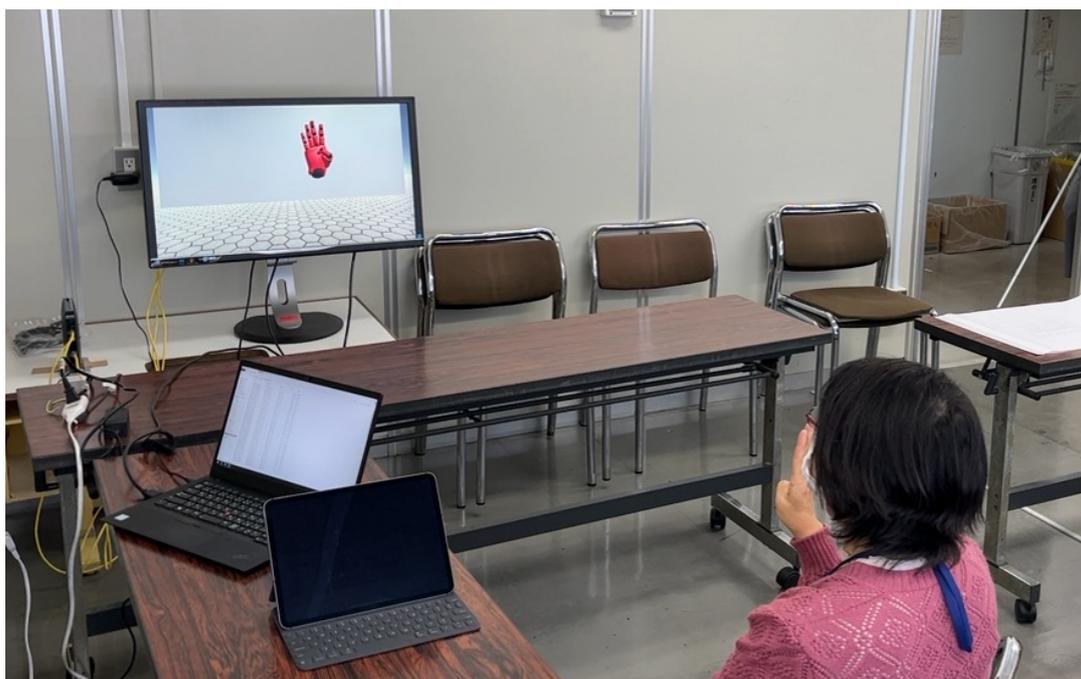


図 3.2 教師モデルデータ評価中の様子

### 3.3 方法

#### 3.3.1 参加者

実験の目的を知らない 26 名の健康な成人（女性 3 名、男性 23 名、平均 21.69 歳、標準偏差 1.44、全員右利き）が実験に参加した。サンプルサイズは G\*Power 3.1 (Faul et al., 2009, 2007) を使用した検出力分析によって決定した。後述する被験者内要因 2 x 2 条件の分散分析、中程度の効果量  $f = 0.25$ 、 $\alpha = 0.05$ 、検出力 = 0.8 として、最小 24 人の参加者が必要と推定された。10% 程度のドロップアウトを考慮して 26 名の参加者を募集した。参加者は全員、裸眼または矯正視力、身体能力が正常な状態であった。参加者の中にアメリカ手話を学んだ者はおらず、2 名は日本手話の経験があった。参加者は実験前に書面によるインフォームド・コンセントを理解し、同意書に署名した上で実験に参加した。実験の方法は、豊橋技術科学大学人を対象とする研究倫理審査委員会の承認を得ており、実験はその内容に従って実施された。

### 3.3.2 刺激と条件

アメリカ手話のアルファベットの指文字で表現された 20 個の無意味音節の単語が刺激として用いられた。教師の手はあらかじめモーションキャプチャグローブを用いて記録されたデータに基づいて自動的に動いた。その時間は約 13 秒（平均 13.27 秒、標準偏差 1.97、最小 10.07 秒、最大 15.53 秒）であった。参加者の仮想の手は、本当の手がある位置に提示され、教師の手は参加者と対面に向かい合った場合の教師の右手に相当する位置に提示された。教師の手は、参加者と対面方向（図 3.3 上）または同じ方向（図 3.3 下）に提示された。参加者の仮想の手は、参加者の完全なコントロールで動く条件（単独アバター条件）と、参加者の手の動きとあらかじめ記録された教師の手の動きをリアルタイムで 50%ずつ平均化した共有アバター条件の 2 種類のいずれかで動いた（図 3.4）。したがって、条件は 2x2（単独/共有アバターx 対面/順方向）であった。

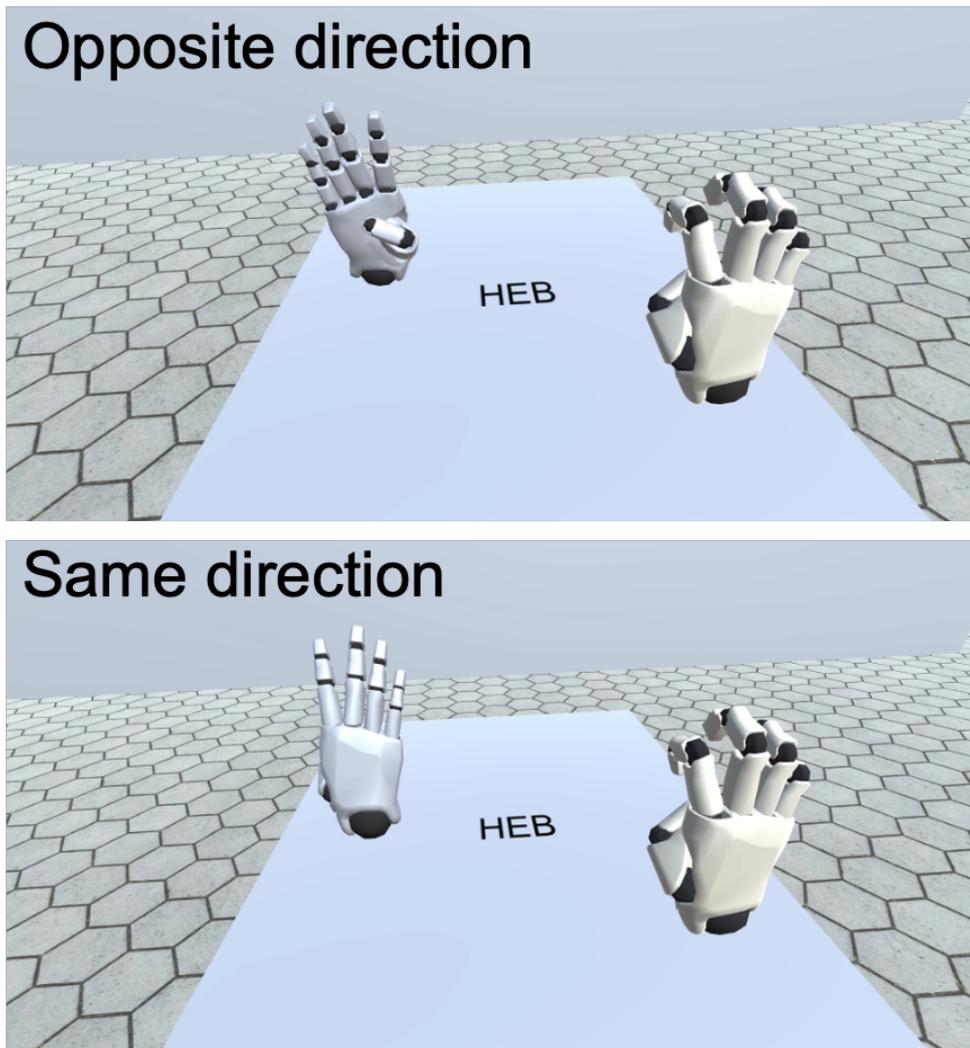


図3.3 アバターの向きの条件（上：対面方向、下：同方向）  
左側は教師アバターの手、右側が実験参加者（学習者）のアバターの手。

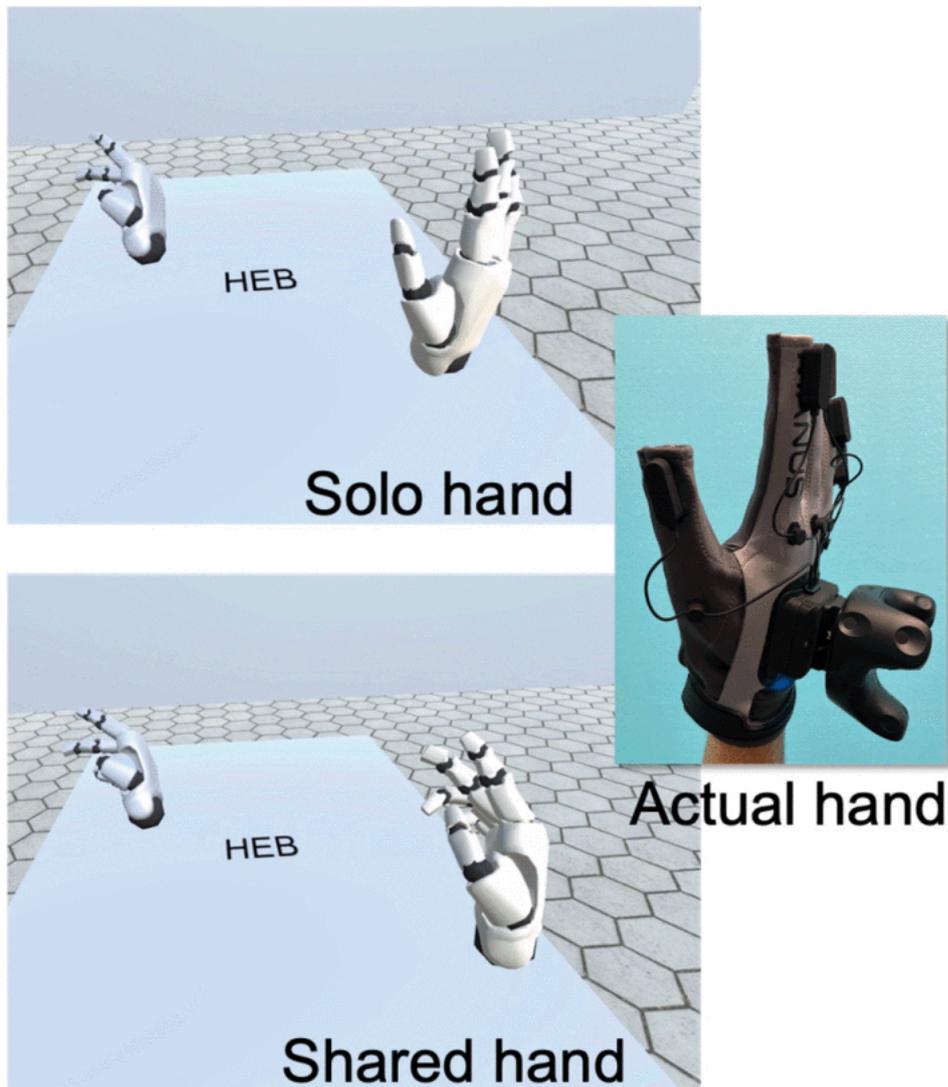


図3.4 アバターハンドの共有条件（上：単独、下：共有）  
 左側は教師アバターの手、右側が実験参加者（学習者）のアバターの手。右外の写真は参加者の実際の手の姿勢を示す。単独条件では参加者アバターの手と同一であるが、共有条件では、参加者の共有アバターの手の姿勢は、教師の手と参加者の手の平均（中間）となる。

### 3.3.3 手続き

参加者は、各試行の最初に手を初期姿勢で初期位置に保つように指示された。初期姿勢を 3 秒間維持した後、被験者の手の左前方に教師の手のアバターが現れ、同時に床の上に刺激語（3 文字）が文字として視覚的に提示された。1 秒後、左前方に表示されていた教師の手が動き始め、アメリカ手話のアルファベットの指文字で単語が示された。参加者は、自分の手のアバターを観察しながら、教師の手の動きをできるだけ

正確に模倣するよう求められた。5 試行を 1 ブロックとして、各ブロックではランダムに選ばれた 5 つの単語が使用され、4 つの条件のいずれかが設定された。1 セッションは合計 4 ブロックからなり、各ブロック（条件）の最後に、参加者は模倣のしやすさを 7 段階（1：非常に難しい、7：非常に簡単）で評価した。セッション内では 20 個の単語が 1 回ずつ使用された。4 つの条件はセッション内でランダムな順序に配置された。各参加者は 5 セッションを繰り返し行った。各試行での参加者の手の動きが実験システムにより記録された。

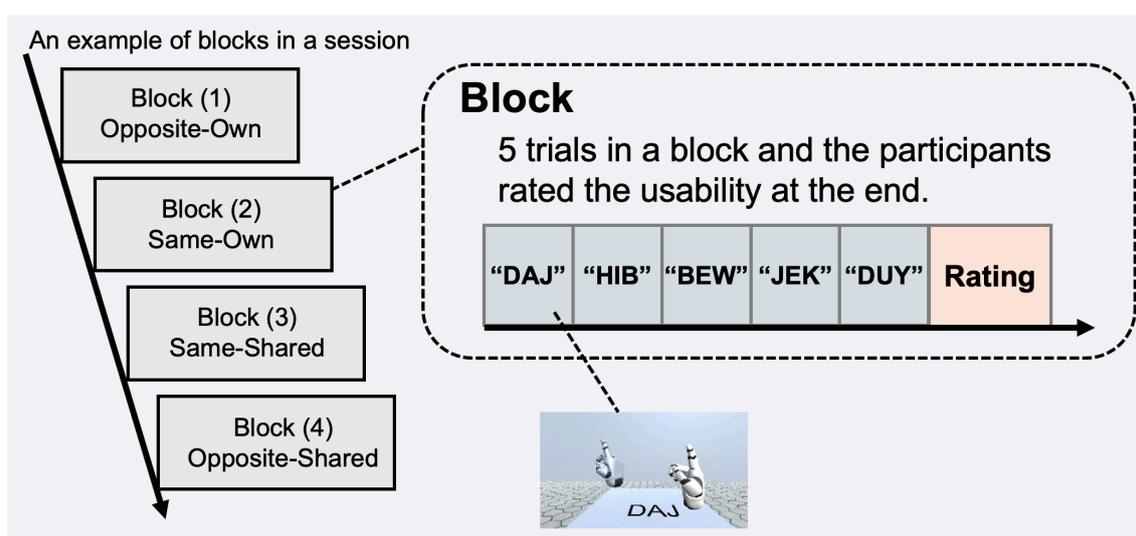


図 3.5 セッション内の手続きの例

## 3.4 結果

本実験では被験者による主観評定と行動成績のそれぞれについて評価を行った。行動成績については空間的な誤差と時間的な遅れの 2 つに着目した。

### 3.4.1 主観評定

模倣のしやすさに対する主観評定値（7 段階の離散データ）について、Shapiro-Wilk 検定を用いて正規性を確認した。全てのデータセットで正規性からの逸脱はなかった（単独アバター x 順方向： $W=0.960$ ， $p=0.389$ 、共有アバター x 順方向： $W=0.954$ ， $p=0.287$ 、単独アバター x 対面方向： $W=0.963$ ， $p=0.457$ 、共有アバター x 対面方向：

W=0.958 , p=0.348 ) 。そこで、これらの評定値に対して、参加者のアバターの種類 ( 単独 / 共有アバター ) と教師の手の提示方向 ( 対面 / 順方向 ) の 2 要因を被験者内要因とした反復測定による二元配置分散分析を行った。

アバターの種類 ( F(1,25)=30.21, p<0.001 ,  $\eta^2p=0.547$  ) と提示方向 ( F(1,25)=10.44, p=0.003 ,  $\eta^2p=0.295$  ) とともに主効果が見られた ( 図 3.6 ) 。アバターの種類と提示方向との交互作用は有意ではなかった ( F(1,25)=0.01, p=0.99 ,  $\eta^2p=0.001$  ) 。事後分析の結果、共有アバターの評定値は単独アバターよりも高く ( t(25) = 5.496, p<0.001 ) 、順方向の評定値は対面方向より高かった ( t(25) = 3.231, p=0.003 ) 。

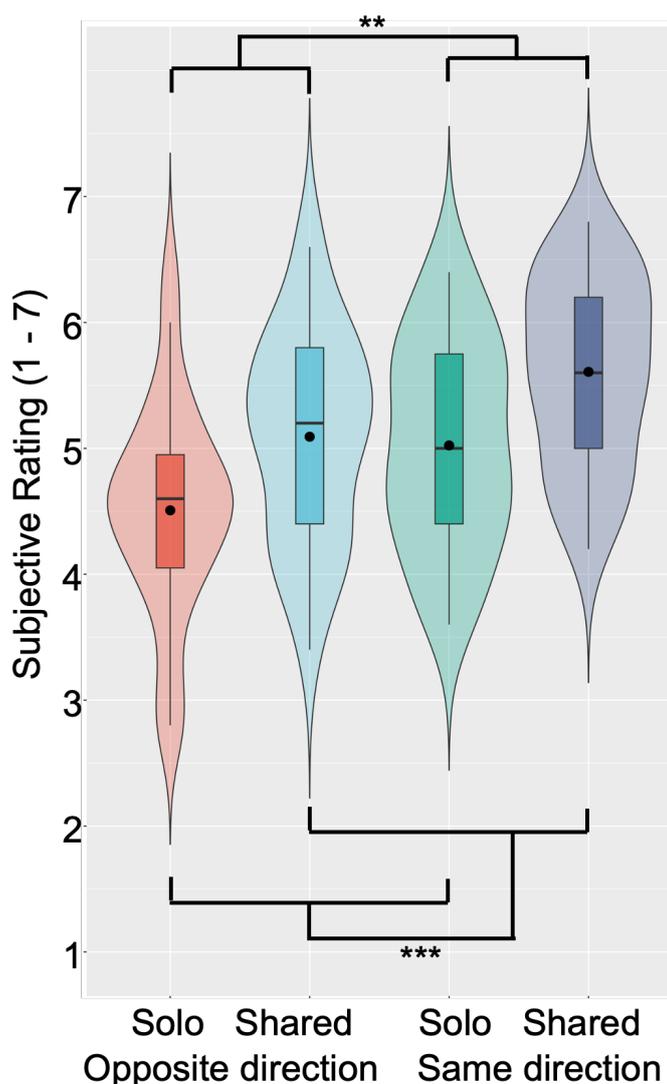


図 3.6 主観評定の結果

データは箱ひげ図とバイオリンプロットにより表示した。ボックスは Q1 ( 25% ) と Q3 ( 75% ) の間の範囲を示し、ボックス内の太線は中央値 ( Q2 ) を示し、ひげは最大値と

最小値を示す。箱の中の点は平均を示す。バイオリンのような幅広の形は、カーネル密度推定器による確率分布を表す。\*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$

## 3.4.2 行動成績

### 3.4.2.1 手の動きの空間的誤差

行動成績の指標として、教師の手の動きと参加者の（実際の）手の動きを比較し、二乗平均平方根誤差（RMSE）を算出した。5指の3関節（計15関節）のデータを30Hzでサンプリングし、各関節の曲げ角度を算出した。これらのデータを各試行で平均した。

RMSE に対する反復測定による二元配置分散分析（単独／共有アバター × 対面／順方向）を行った結果、教師の手の提示方向の主効果（ $F(1,25)=4.86$ ,  $p=0.037$ ,  $\eta^2p=0.163$ ）は認められたが、アバターの種類の主効果は認められなかった（ $F(1,25)=0.47$ ,  $p=0.50$ ,  $\eta^2p=0.018$ ）。交互作用は有意ではなかった（ $F(1,25)=0.17$ ,  $p=0.69$ ,  $\eta^2p=.0007$ ）。事後分析の結果、同方向条件の RMSE は逆方向条件よりも大きかった（ $t(25)=2.205$ ,  $p=0.037$ ）。条件間で比較すると RMSE は順方向提示よりも対面方向提示の方が有意に小さかった（図 3.7）。

このように、アバターの種類（単独／共有アバター）にかかわらず、教師の手の対面方向提示は順方向提示よりも高い成績であった。これは主観評価と比較して議論の余地がある。

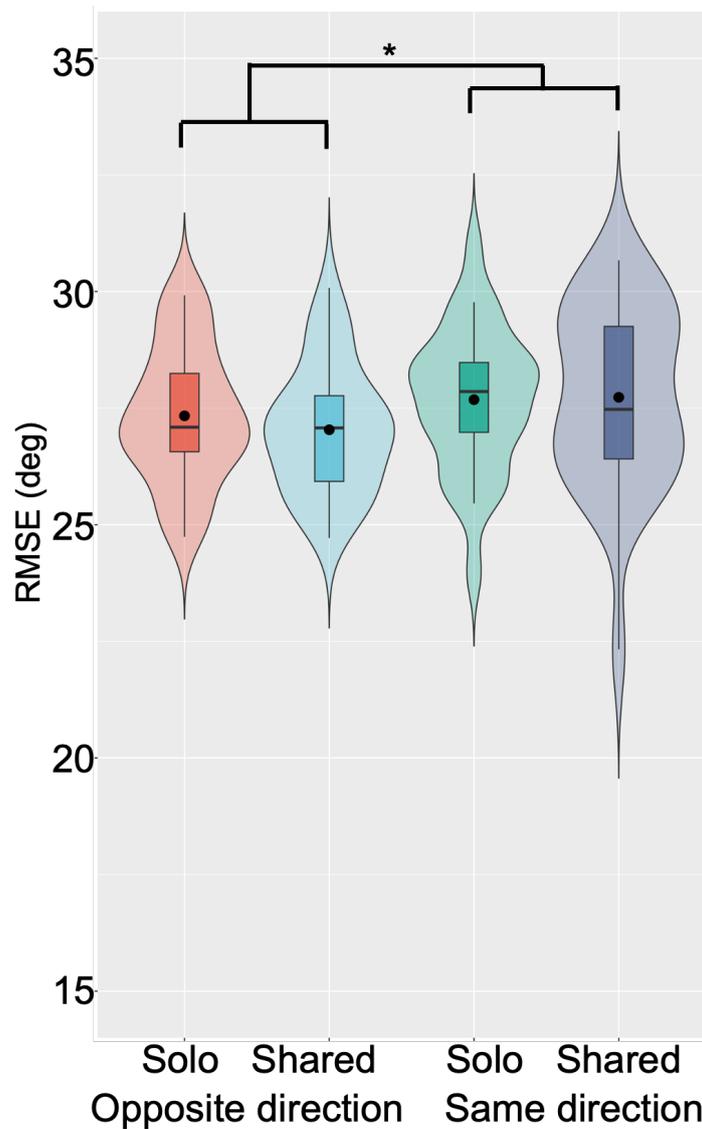


図 3.7 手の動きの空間的誤差

データは図 3.6 と同じように箱ひげ図とバイオリンプロットにより表示した。\* $p < 0.05$

### 3.4.2.2 手の動きの時間的遅れ

空間的な誤差とは別の指標として、時間的な遅れについて評価した。教師の手の動きと参加者の手の動きの相互相関が最大値を示すタイムラグを評価対象の値として用いた。5 指の 3 関節（計 15 関節）のデータを 30Hz でサンプリングし、各関節と各試行において相関が最大となるタイムラグを算出した。タイムラグの範囲は -2 ~ +2 秒に制

限して算出した。得られたタイムラグの値は各試行の全関節で平均した。正のタイムラグは、参加者の手の動きが教師の手に比べて遅れていることを示す。

算出されたタイムラグを用いて、反復測定による二元配置分散分析（単独/共有アバター×対面/順方向）を行った。交互作用は有意ではなかった（ $F(1,25)=0.04$ ,  $p=0.85$ ,  $\eta^2p=0.002$ ）。アバターの種類の主効果は有意であったが（ $F(1,25)=7.50$ ,  $p=0.011$ ,  $\eta^2p=0.231$ ）、手の方向の主効果は認められなかった（ $F(1,25)=1.30$ ,  $p=0.266$ ,  $\eta^2p=0.049$ ）。事後分析の結果、共有アバターによるタイムラグは単独アバターよりも小さかった（ $t(25)=2.738$ ,  $p=0.011$ ）。

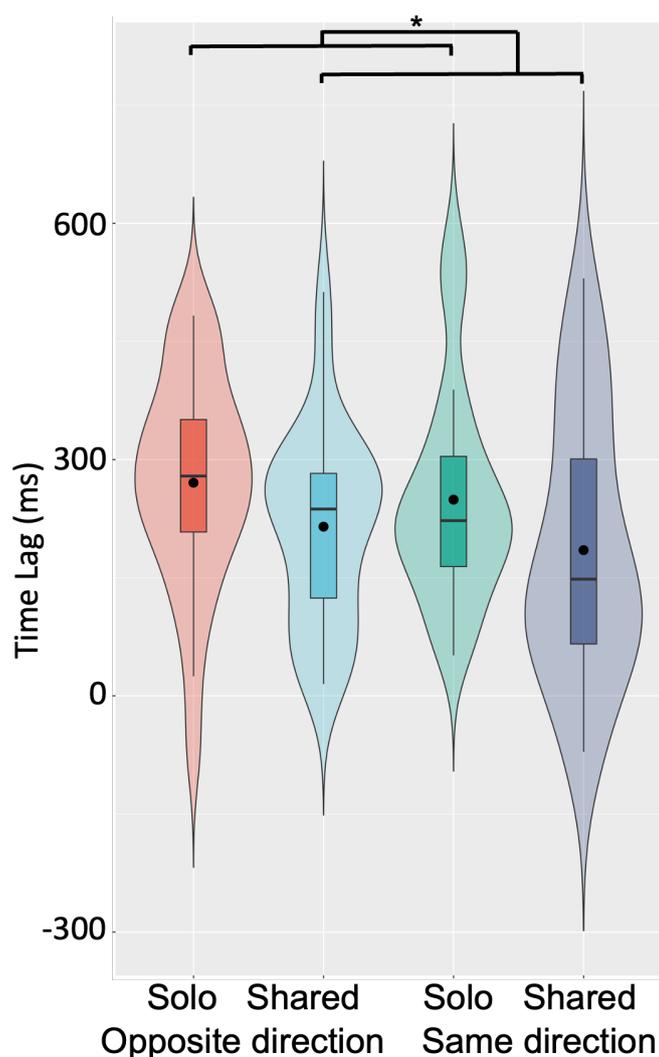


図 3.8 手の動きの時間的遅れ

データは図 3.6, 3.7 と同じように箱ひげ図とバイオリンプロットにより表示した。

\* $p < 0.05$

参加者の手の動きの時間遅れは、共有アバターの方が単独アバターよりも有意に小さかった（図 3.8）。したがって、教師の手の向きに関係なく、共有アバターの方が単独アバターよりも成績が高かった。これは、共有アバターに対する主観評定と一致する。

## 3.5 考察

### 3.5.1 結果のまとめ

本実験では、一人称視点によるバーチャル共身体化された手（共有アバター）と、学習者の前に提示される教師の手（教師アバター）を組み合わせたバーチャル手指模倣システムを開発し、共有アバターと教師アバターの提示方向が、運動模倣パフォーマンスと主観的印象（模倣のしやすさ）に及ぼす影響を調べた。主観評定の結果、教師の手が学習者と同じ向きに提示され、共有アバターを用いている方が、教師の手が学習者の対面方向で提示され、学習者自身の動きのみを反映したアバター（単独アバター）を用いた場合よりも評価が高いことが示された。空間誤差のデータからは、アバターの手の種類にかかわらず、教師の手を対面方向で提示する方が、同方向での提示よりも優れていることが示された。時間的遅延のデータは、教師の手の向きにかかわらず、共有アバターの方が単独アバターよりも優れていることを示していた。

### 3.5.2 仮説 1 手の共有による模倣成績向上について

主観評価と運動パフォーマンスの時間的遅延の結果は、仮説 H1（共有アバターハンドは単独アバターハンドよりも模倣を改善できる）を支持した。しかし、運動パフォーマンスの空間的誤差は、共有アバターによって有意に改善されなかった。Hagiwara ら（2022）によれば、共有アバターの手が目標に向かうにつれて、参加者の手の動きは互いにずれる(Hagiwara et al., 2020)。同じ効果は運動学習中にも示されている(Kodama et al., 2023a)。参加者は自分の動きよりも共有アバターの動きを優先する。したがって、共有アバターは学習者の実際の手の空間的な正確さを必要とするタスクには向かないかもしれない。

ここで留意すべきなのは、共有アバター条件の方が単独アバター条件よりも遅延が小さいという事実は、方法論的効果によるものではないということである。教師のアバターハンドはあらかじめ記録されたものを使用しているため、実験参加者の手の動きによる影響を受けず、教師アバターの動きは共有アバター条件と単独アバター条件で同じであった。加えて、運動パフォーマンスの分析では、アバターの動きではなく、実験参加者の実際の手の動きと教師アバターの動きを比較した。

### 3.5.3 仮説 2 手の提示方向について

仮説 H2（教師の手を学習者と同じ方向に提示した方が、反対方向に提示した場合よりもパフォーマンスが向上する）については、主観評定の結果からは支持された。しかし、運動パフォーマンスの時間的遅れは教師アバターを同方向で提示した場合に有意に改善されず、運動パフォーマンスの空間的誤差は教師アバターを逆方向で提示した場合に改善された。同方向での提示では、教師の手の甲により遮蔽される部分が生じるため、教師の手指の詳細な姿勢が学習者から十分に観察できない可能性がある。

手話の学習では、教科書や対面での講義に加えて、ビデオ教材が使用されることも多い。これまでに、畳み込みニューラルネットワークを用いた 2 次元画像サンプリングに基づく手話学習システムが開発されている(Ji et al., 2017)。ゲームベースの手話学習システムも開発されており、従来の対面式学習法と比較した利点が示されている(Kamnardsiri et al., 2017)。これは、Kinect モーションキャプチャを用いて学習者の手の動きを 3 次元データとして取得し、教師が保存しているデータと比較し、類似度のスコアでフィードバックを提供するものである。これらの方法により、学習者は適切なフィードバックを受けながら一人で手話を学ぶことができる本研究で開発した共有アバターハンドは、主観的な模倣のしやすさ、詳細な手の動きの運動模倣の時間遅延を改善できるため、手話学習システムへの応用が期待できる。

### 3.5.4 親指の動きの特有性について

親指は、他の指とは関節の位置が異なることから指を周囲に回す動きや他の指と対向させることが容易であり、複数の拮抗する筋の協調動作により複雑な動作が可能である(Duncan et al., 2013)。ピンチ動作で見られるように、親指は他の指とは異なる動きをしていることが多い。

本実験で対象とした指文字の模倣に関しては、指の曲げ角度が主要な動きを反映しているという前提のもと、行動成績の分析において初期位置を基準とした指の曲げ角度を用いた。親指の動きに関しては曲げ角度による分析の他に 3 次元的な動きに対する分析を行うことも考えられる。他の動作や課題を用いる実験を行う際には、親指の動きの特有性を考慮する必要がある。

### 3.5.5 限界と今後の課題

今回の実験の焦点は模倣動作のパフォーマンスであり、運動スキルの学習過程ではない。これは本研究の限界である。今後、詳細な手指動作の運動スキル学習過程を調べることで、新たな手話学習システムや手工芸の技能伝承システムの開発に貢献できる可能性がある。

この実験の参加者サンプルには性別と年齢に偏りがあり、参加者の大半は男性の大学生であった。今後、性別も年齢もより多様な母集団で実験を実施すれば、より普遍的な結果が得られる可能性がある(Peck et al., 2020)。

本実験では、学習者の手の動きは事前に記録された教師の手の動きと平均化された。したがって、教師の手の動きは学習者の手の動きの影響を受けない。これに対して、バーチャル共身体化に関する先行研究では、共有されたアバターを通じて 2 人の人物が相互作用していた(Fribourg et al., 2020; Hagiwara et al., 2020; Hapuarachchi et al., 2023; Hapuarachchi & Kitazaki, 2022; Kodama et al., 2023b, 2023a; Takita et al., 2023)。本実験では、学習者のパフォーマンスから独立した理想的な動きを目指して、教師の動きを事前に記録した。この方法は、理想的な動きが明確に定義されている場合には、運動模倣において有利である。しかし、教師と学習者の相互作用が運動模倣にどのように影響するかは明らかではない。これは本研究のもう一つの限界である。

本実験では、実験参加者は教師の手の動きをできるだけ正確に模倣するよう教示されたが、表示される単語と手本の動きの対応について覚えることについては伝えられていない。また、模倣動作のパフォーマンスが評価されたが、単語に対応する手の動きの記憶については評価されていない。しかし、実際に手話を使用する場面においては、記憶に基づいて単語に対する手の動きを手本なしで行うことが求められる。したがって、今後は単語に対応する手の動きの記憶についても検討すべきである。学習シ

システムの機能としては、単語が提示されたときに、手本なしでその動きを行うことができるかどうかを判定して学習者にフィードバックする方法が提案できる。

## 第4章

### 総合考察

#### 4.1 結果のまとめ

##### 4.1.1 実験1（二人の手の共有および結合による指リーチングの実験）

手指の平均共有と分担部位結合によるバーチャル共身体化を実現し、単独身体の手指とも比較して、身体所有感、行為主体感、指リーチングの課題成績について調べた。その結果、共有身体は身体所有感・行為主体感が単独身体に比べてもあまり変わらないほどに高く、課題成績も一貫して高いことが示された。一方、結合身体は、ある程度の身体所有感・行為主体感が生じるが共有身体よりも低く、課題成績も共有身体よりも低く、課題難易度が高いときには単独身体よりも課題成績が低かった。

##### 4.1.2 実験2（教師モデルとの手の共有によるアメリカ手話模倣の実験）

教師の手の動きと実験参加者（学習者）の手の動きを平均化したアバター（共有アバター）を用いて、教師の手が対面方向で提示される場合と同方向で提示される場合の模倣のしやすさを、アンケートによる主観評定と、時間的な遅れと空間的な誤差による行動成績のそれぞれについて評価した。その結果、共有アバターを用いる場合に主観的な模倣のしやすさと運動を模倣した際の時間的遅延が改善した。教師の手が参加者自身のアバターの手と同じ方向に提示されたとき、主観的な模倣のしやすさが向上した。一方、教師の手が学習者自身のアバターの手と対面方向に提示された場合、運動を模倣した際の空間的精度が向上した。

## 4.2 バーチャル共身体化のリアルタイム性

実験1では実験参加者間でリアルタイムな共有・結合を行った。一方、実験2では教師の手の動きはあらかじめ記録されたものを再生し、学習者はその動きに合わせて手を動かした。この方法はある決まった動作について習得する場合には向いているが、教師からの介入やリアルタイムでのフィードバックを得ることはできない。共有身体を用いた先行研究では、共有身体アバターの操作者自身の動きは単独アバターを使用している場合とは異なる軌道となる(Hagiwara et al., 2020)ことから、本システムで教師と学習者がリアルタイムで手の動きを共有した場合には、相互作用により異なる結果が得られる可能性がある。この点については別途研究が必要である。

## 4.3 バーチャル共身体化の利点と欠点

手話などの手技の学習や伝承のために、手と指の動きを平均する共有身体を提案できる。すでに手や腕の大きな運動については共有身体が技能獲得に貢献することが示されている (Kodama et al., 2023a; Takita et al., 2023)。同様の学習効果が手・指の共有身体においても期待できる。

バーチャル共身体化を応用してバーチャル空間で共同作業を行う場合には、身体の動き以外の情報をどのように共有することが効果的かという点も課題となる。視覚情報を例に挙げると、もう一方の操作者の視野を提示するだけでは自己身体感覚入力との不一致によるVR酔いを生じる可能性がある。また、身体の動きのように視覚情報を単純に平均化することも困難である。このことに関連して、教師と学習者が共身体化した場合に、学習者に適切な視覚情報を提示するための視覚的ガイダンスの技術が検討されている(Nikolaos et al., 2022)。

## 4.4 バーチャル共身体化による脳活動の変化と可塑性

本研究では、バーチャル共身体化が人の身体性の認知や行動に及ぼす影響を調べることを目的とした。一方、バーチャル共身体化を一定時間使用することによる技能学習への促進効果が報告されている(Kodama et al., 2023a; Takita et al., 2023)。しかし、バーチャル共身体化が脳活動に及ぼす影響については調べられていない、また、数時間から数日の中長期、あるいはより長い期間に渡ってバーチャル共身体化を使用した際

の行動や心の変化、特にそれによる脳活動の可塑性については未だ調べられていない。二人の共同作業によって脳波の同期が増えることが知られており(Yun et al., 2012)、バーチャル共身体化ではより明確に脳活動の同期が見られる可能性がある。脳活動の同期の程度と共有身体・結合身体を用いた際の課題成績が相関することも推察される。

## 4.5 バーチャル共身体化の将来と今後の課題

本研究の結果は、運動スキルのトレーニングにバーチャル共身体化したアバターを用いることの利点を支持するものである。バーチャル共身体化のコンセプトは、今後、手話の効率的な学習システムや手工芸の他の技能伝承システムの開発に貢献する可能性がある。手話の他にも、筆記、手芸、料理など、手指の繊細な動きが必要となるタスクは多数存在する。運動学習プロセスにおける共身体化したアバターの効果を探るためには、さらなる研究が必要である。

今回開発し、明らかにした手・指の共身体化は、遠隔手術ロボットの操作等に応用されれば、結合身体を用いて空間的に限られた手術室のような場所であっても、複数の人が視点を共有しながら同時に作業ができる。作業内容に応じて結合身体から共有身体に切り替えて操作を行うなど、それぞれの特徴を使い分けることのできるシステムとして応用することもできる。

今後、腕や手以外の部位や動作を用いたタスクについて研究が行われることで、バーチャル共身体化の効果的な適用範囲を明らかにしていくことが求められる。また、触覚、反力のフィードバックなど、他の感覚入力を加えることも提案できる。この場合、視覚とのクロスモーダル相互作用も検討対象となる。

その他の分野での応用について、例えば、心理療法における患者とセラピスト間の同期が治療効果に影響するとされており(Koole & Tschacher, 2016)、バーチャル共身体化はこのような場面においても応用できる可能性がある。

二人またはそれ以上の人間が共身体化して行動を行う場合の共同行動における主体感の共有についても、基礎的な研究課題として取り組むべきものである。

実際の自分の身体とは異なるアバターを自分の身体として感じられることから、結合・共有身体それぞれのアプローチによる特徴が活かされるアバターの形態やタスクの種類を調べることは有用である。例えば、腕が6本あるアバターを3人のユーザーが結合身体として操作するシステムや、手が10本あるアバターハンドを2人のユーザー

が結合身体として操作するシステムは、狭い場所や小さな物体に対する作業の効率や精度を上げる可能性がある。

ロボット技術や情報技術を用いて人間の行動を補助する人間拡張的なアプローチが近年活発に行われており、今後は人間と人間以外の人工物との共身体化についても研究の対象となる。

## 第5章

### 結論

自己の身体であるという感覚は容易に変化し得るものである。このことを踏まえて、二人の身体を共身体化して1つのアバターを自己身体として操作・体験できることを示した。

一人が完全に操作する単独身体、平均する共有身体、部位分担する結合身体を同一の対象で比較し、その身体性（身体所有感と行為主体感）と課題成績（パフォーマンス）について調査した。共有身体は身体所有感・行為主体感が単独身体に比べてもあまり変わらないほどに高く、課題成績も一貫して高いことが示された。一方、結合身体は、ある程度の身体所有感・行為主体感が生じるが共有身体よりも低く、課題成績も共有身体よりも低く、課題難易度が高いときには単独身体よりも課題成績が低かった。

教師の動きを手本として手の動きを模倣する場合について、参加者自身の動きに基づくアバターを用いた場合と、共有アバターを用いた場合の模倣のしやすさと行動成績を調べた。共有アバターを用いる場合には、主観的な模倣のしやすさと運動を模倣した際の時間的遅延が改善した。教師の手が参加者自身のアバターの手と同じ方向に提示されたとき、主観的な模倣のしやすさが向上した。一方、教師の手が学習者自身のアバターの手と対面方向に提示された場合、運動を模倣した際の空間的精度が向上した。

上記のように、バーチャル共身体化に関する新たな知見の獲得と、具体的な応用の可能性を示した。

## 謝辞

この博士論文を執筆するにあたり、関係者各位のご支援とご協力をいただいたことに深く感謝しております。

まず初めに、長きにわたり懇切丁寧なご指導を賜りました北崎充晃教授に心より感謝いたします。研究に関する貴重なご指導を頂くとともに様々な相談にのっていただき、大変お世話になりました。

本論文の審査委員として南哲人教授、福村直博准教授より適切なご助言を賜りましたことを感謝いたします。

富山県立大学の井上康之講師には、研究を遂行するにあたり的確な助言と様々な観点からの議論を賜りました。

萩原隆義氏には、研究の立ち上げ時にご支援をいただきました。石本浩気氏には、実験の計画から遂行にあたり意見交換の機会をいただくとともに、実験プログラムに関する助言をいただきました。鳥海智志氏には、実験の実施、データの分析など幅広く多大なご助力を賜りました。

対面で研究を進めることが難しい環境においても研究生活を継続できたのは、皆様とオンラインで意見交換できたことが助けとなりました。

最後に、本研究・博士論文に関わったすべての皆様へ、厚くお礼申し上げます。

## 引用文献

- Adolf, J., Kán, P., Outram, B., Kaufmann, H., Doležal, J., & Lhotská, L. (2019, November 12). Juggling in VR: Advantages of Immersive Virtual Reality in Juggling Learning. *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. VRST '19: 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, Parramatta NSW Australia. <https://doi.org/10.1145/3359996.3364246>
- Alhalabi, W. (2016). Virtual reality systems enhance students' achievements in engineering education. *Behaviour & Information Technology*, *35*(11), 919-925.
- Anderson, P. L., Price, M., Edwards, S. M., Obasaju, M. A., Schmertz, S. K., Zimand, E., & Calamaras, M. R. (2013). Virtual reality exposure therapy for social anxiety disorder: a randomized controlled trial. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, *81*(5), 751-760.
- 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), 9769.
- Armel, K. C., & Ramachandran, V. S. (2003). Projecting sensations to external objects: evidence from skin conductance response. *Proceedings. Biological Sciences / The Royal Society*, *270*(1523), 1499-1506.
- Aymerich-Franch, L., Petit, D., Ganesh, G., & Kheddar, A. (2015). Embodiment of a humanoid robot is preserved during partial and delayed control. *2015 IEEE International Workshop on Advanced Robotics and Its Social Impacts (ARSO)*, 1-5.
- Banakou, D., Groten, R., & Slater, M. (2013). Illusory ownership of a virtual child body causes overestimation of object sizes and implicit attitude changes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *110*(31), 12846-12851.
- Blanke, O., & Arzy, S. (2005). The out-of-body experience: disturbed self-processing at the temporo-parietal junction. *The Neuroscientist: A Review Journal Bringing Neurobiology, Neurology and Psychiatry*, *11*(1), 16-24.
- Borglund, F., Young, M., Eriksson, J., & Rasmussen, A. (2021). Feedback from HTC Vive Sensors Results in Transient Performance Enhancements on a Juggling Task in Virtual Reality. *Sensors*, *21*(9). <https://doi.org/10.3390/s21092966>
- Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). Rubber hands "feel" touch that eyes see. *Nature*, *391*(6669), 756.

- Darden, G. F. (1997). Demonstrating Motor Skills—Rethinking that Expert Demonstration. *Journal of Physical Education, Recreation & Dance*, 68(6), 31-35.
- Duffy, K. A., & Chartrand, T. L. (2015). Mimicry: causes and consequences. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 3, 112-116.
- Dummer, T., Picot-Annand, A., Neal, T., & Moore, C. (2009). Movement and the rubber hand illusion. *Perception*, 38(2), 271-280.
- Duncan, S. F. M., Saracevic, C. E., & Kakinoki, R. (2013). Biomechanics of the hand. *Hand Clinics*, 29(4), 483-492.
- Ehrsson, H. H. (2007). The experimental induction of out-of-body experiences. *Science*, 317(5841), 1048.
- Ehrsson, H. H., Rosén, B., Stocksélius, A., Ragnö, C., Köhler, P., & Lundborg, G. (2008). Upper limb amputees can be induced to experience a rubber hand as their own. *Brain: A Journal of Neurology*, 131(Pt 12), 3443-3452.
- 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.
- Ehrsson, H. H., Wiech, K., Weiskopf, N., Dolan, R. J., & Passingham, R. E. (2007). Threatening a rubber hand that you feel is yours elicits a cortical anxiety response. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(23), 9828-9833.
- Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., & Lang, A.-G. (2009). Statistical power analyses using G\*Power 3.1: tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, 41(4), 1149-1160.
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007). G\*Power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39(2), 175-191.
- Feinberg, T. E., & Venneri, A. (2014). Somatoparaphrenia: evolving theories and concepts. *Cortex: a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 61, 74-80.
- Fini, C., Cardini, F., Tajadura-Jiménez, A., Serino, A., & Tsakiris, M. (2013). Embodying an outgroup: the role of racial bias and the effect of multisensory processing in somatosensory remapping. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 7, 165.
- Fribourg, R., Ogawa, N., Hoyet, L., Argelaguet, F., Narumi, T., Hirose, M., & Lecuyer, A. (2020). Virtual Co-Embodiment: Evaluation of the Sense of Agency while Sharing the Control of a Virtual Body among Two Individuals. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1-1.

- Frith, C. D., Blakemore, S. J., & Wolpert, D. M. (2000). Abnormalities in the awareness and control of action. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 355(1404), 1771-1788.
- Fukuoka, M., Nakamura, F., Verhulst, A., Inami, M., Kitazaki, M., & Sugimoto, M. (2023). Sensory Attenuation with a Virtual Robotic Arm Controlled Using Facial Movements. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, PP. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2023.3246092>
- Gallagher, S. (2000). Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(1), 14-21.
- Gallotti, M., & Frith, C. D. (2013). Social cognition in the we-mode. *Trends in Cognitive Sciences*, 17(4), 160-165.
- Garbarini, F., Mastropasqua, A., Sigaud, M., Rabuffetti, M., Piedimonte, A., Pia, L., & Rocca, P. (2016). Abnormal Sense of Agency in Patients with Schizophrenia: Evidence from Bimanual Coupling Paradigm. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 10, 43.
- Goldenberg, G., & Karnath, H.-O. (2006). The neural basis of imitation is body part specific. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 26(23), 6282-6287.
- Graham, K. T., Martin-Iverson, M. T., Holmes, N. P., Jablensky, A., & Waters, F. (2014). Deficits in agency in schizophrenia, and additional deficits in body image, body schema, and internal timing, in passivity symptoms. *Frontiers in Psychiatry / Frontiers Research Foundation*, 5, 126.
- Guterstam, A., Abdulkarim, Z., & Ehrsson, H. H. (2015). Illusory ownership of an invisible body reduces autonomic and subjective social anxiety responses. *Scientific Reports*, 5, 9831.
- Hagiwara, T., Ganesh, G., Sugimoto, M., Inami, M., & Kitazaki, M. (2020). Individuals Prioritize the Reach Straightness and Hand Jerk of a Shared Avatar over Their Own. *IScience*, 101732.
- Hapuarachchi, H., Hagiwara, T., Ganesh, G., & Kitazaki, M. (2023). Effect of connection induced upper body movements on embodiment towards a limb controlled by another during virtual co-embodiment. *PLoS One*, 18(1), e0278022.
- Hapuarachchi, H., & Kitazaki, M. (2022). Knowing the intention behind limb movements of a partner increases embodiment towards the limb of joint avatar. *Scientific Reports*, 12(1), 11453.
- Hassan, A., & Josephs, K. A. (2016). Alien Hand Syndrome. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, 16(8), 73.
- Hine, K., & Tasaki, H. (2019). Active View and Passive View in Virtual Reality Have Different Impacts on Memory and Impression. *Frontiers in Psychology*, 10, 2416.

- Hull, C. L. (1933). The Meaningfulness of 320 Selected Nonsense Syllables. *The American Journal of Psychology*, 45(4), 730-734.
- Inami, M. (Ed.). (2023). *Theory of JIZAI Body: Towards Mastery Over the Extended Self*. Springer Nature.
- Inami, M., Uriu, D., Kashino, Z., Yoshida, S., Saito, H., Maekawa, A., & Kitazaki, M. (2022). Cyborgs, Human Augmentation, Cybernetics, and JIZAI Body. *Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2022*, 230-242.
- Ji, Y., Kim, S., & Lee, K.-B. (2017, April). Sign language learning system with image sampling and convolutional neural network. *2017 First IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*. 2017 First IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC), Taichung, Taiwan. <https://doi.org/10.1109/irc.2017.40>
- Jones, S. S. (2007). Imitation in infancy: the development of mimicry. *Psychological Science*, 18(7), 593-599.
- Kalckert, A., & Ehrsson, H. H. (2014). The moving rubber hand illusion revisited: comparing movements and visuotactile stimulation to induce illusory ownership. *Consciousness and Cognition*, 26, 117-132.
- Kalckert, A., & Ehrsson, H. H. (2017). The Onset Time of the Ownership Sensation in the Moving Rubber Hand Illusion. *Frontiers in Psychology*, 8, 344.
- Kamnardsiri, T., Hongsit, L.-O., Khuwuthyakorn, P., & Wongta, N. (2017). The Effectiveness of the Game-Based Learning System for the Improvement of American Sign Language using Kinect. *Electronic Journal of E-Learning*, 15(4), 283-296-pp283-296.
- Kawasaki, H., Wakisaka, S., Saito, H., Hiyama, A., & Inami, M. (2022). A System for Augmenting Humans' ability to Learn Kendama Tricks through Virtual Reality Training. *Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2022*, 152-161.
- Keenaghan, S., Bowles, L., Crawford, G., Thurlbeck, S., Kentridge, R. W., & Cowie, D. (2020). My body until proven otherwise: Exploring the time course of the full body illusion. *Consciousness and Cognition*, 78, 102882.
- Kodama, D., Mizuho, T., Hatada, Y., Narumi, T., & Hirose, M. (2023a). Effect of Weight Adjustment in Virtual Co-embodiment During Collaborative Training. *Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2023*, 86-97.
- Kodama, D., Mizuho, T., Hatada, Y., Narumi, T., & Hirose, M. (2023b). Effects of Collaborative Training Using Virtual Co-embodiment on Motor Skill Learning. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1-11.
- Kondo, R., Sugimoto, M., Minamizawa, K., Hoshi, T., Inami, M., & Kitazaki, M. (2018). Illusory body ownership of an invisible body interpolated between

- virtual hands and feet via visual-motor synchronicity. *Scientific Reports*, 8(1), 7541.
- Kondo, R., Tani, Y., Sugimoto, M., Inami, M., & Kitazaki, M. (2020). Scrambled body differentiates body part ownership from the full body illusion. *Scientific Reports*, 10(1), 5274.
- Kondo, R., Tani, Y., Sugimoto, M., Minamizawa, K., Inami, M., & Kitazaki, M. (2020). Re-association of Body Parts: Illusory Ownership of a Virtual Arm Associated With the Contralateral Real Finger by Visuo-Motor Synchrony. *Frontiers in Robotics and AI*, 7, 26.
- Koole, S. L., & Tschacher, W. (2016). Synchrony in Psychotherapy: A Review and an Integrative Framework for the Therapeutic Alliance. *Frontiers in Psychology*, 7, 862.
- Krekhov, A., Cmentowski, S., & Krüger, J. (2019). The Illusion of Animal Body Ownership and Its Potential for Virtual Reality Games. *2019 IEEE Conference on Games (CoG)*, 1-8.
- Lenggenhager, B., Tadi, T., Metzinger, T., & Blanke, O. (2007). Video ergo sum: Manipulating bodily self-consciousness. *Science*, 317(5841), 1096-1099.
- Lloyd, D. M. (2007). 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), 104-109.
- Longo, M. R., Schüür, F., Kammers, M. P. M., Tsakiris, M., & Haggard, P. (2008). What is embodiment? A psychometric approach. *Cognition*, 107(3), 978-998.
- Lush, P. (2020). Demand characteristics confound the rubber hand illusion. *Collabra: Psychology*. <https://online.ucpress.edu/collabra/article-abstract/6/1/22/113067>
- Lush, P., Seth, A. K., & Dienes, Z. (2021). Hypothesis awareness confounds asynchronous control conditions in indirect measures of the rubber hand illusion. *Royal Society Open Science*, 8(11), 210911.
- Maister, L., Sebanz, N., Knoblich, G., & Tsakiris, M. (2013). Experiencing ownership over a dark-skinned body reduces implicit racial bias. *Cognition*, 128(2), 170-178.
- Maister, L., Slater, M., Sanchez-Vives, M. V., & Tsakiris, M. (2015). Changing bodies changes minds: owning another body affects social cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(1), 6-12.
- Martini, M., Perez-Marcos, D., & Sanchez-Vives, M. V. (2013). What Color is My Arm? Changes in Skin Color of an Embodied Virtual Arm Modulates Pain Threshold. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 438.
- Merleau-Ponty M. (2015). *知覚の現象学〈改装版〉* (中島盛夫, Trans.). 法政大学出版局. (Original work published 1945)

- Miura, R., Kasahara, S., Kitazaki, M., Verhulst, A., Inami, M., & Sugimoto, M. (2022). MultiSoma: Motor and Gaze Analysis on Distributed Embodiment With Synchronized Behavior and Perception. *Frontiers in Computer Science*, *4*. <https://doi.org/10.3389/fcomp.2022.788014>
- Miura, R., Kasahara, S., Kitazaki, M., Verhulst, A., Inami, M., & Sugimoto, M. (2021). MultiSoma: Distributed Embodiment with Synchronized Behavior and Perception. *Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2021*, 1-9.
- Newport, R., Pearce, R., & Preston, C. (2010). Fake hands in action: embodiment and control of supernumerary limbs. *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Experimentation Cerebrale*, *204*(3), 385-395.
- Nicholls, M. E. R., Thomas, N. A., Loetscher, T., & Grimshaw, G. M. (2013). The Flinders Handedness survey (FLANDERS): a brief measure of skilled hand preference. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, *49*(10), 2914-2926.
- Nikolaos, C., Amemiya, T., Oyanagi, A., Ito, K., Aoyama, K., & Kuzuoka, H. (2022). Basic study on view matching between users in virtual co-embodiment. *日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 (CD-ROM)*, *27*, 2-3.
- Nishida, J., Tanaka, Y., Nith, R., & Lopes, P. (2022). DigtuSync: A Dual-User Passive Exoskeleton Glove That Adaptively Shares Hand Gestures. *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 1-12.
- Osimo, S. A., Pizarro, R., Spanlang, B., & Slater, M. (2015). Conversations between self and self as Sigmund Freud—A virtual body ownership paradigm for self counselling. *Scientific Reports*, *5*(1), 1-14.
- Pallavicini, F., Argenton, L., Toniuzzi, N., Aceti, L., & Mantovani, F. (2016). Virtual Reality Applications for Stress Management Training in the Military. *Aerospace Medicine and Human Performance*, *87*(12), 1021-1030.
- Peck, T. C., & Gonzalez-Franco, M. (2021). Avatar Embodiment. A Standardized Questionnaire. *Frontiers in Virtual Reality*, *1*. <https://doi.org/10.3389/frvir.2020.575943>
- Peck, T. C., Seinfeld, S., Aglioti, S. M., & Slater, M. (2013). Putting yourself in the skin of a black avatar reduces implicit racial bias. *Consciousness and Cognition*, *22*(3), 779-787.
- Peck, T. C., Sockol, L. E., & Hancock, S. M. (2020). Mind the Gap: The Underrepresentation of Female Participants and Authors in Virtual Reality Research. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *26*(5), 1945-1954.
- Petkova, V. I., & Ehrsson, H. H. (2008). If I were you: perceptual illusion of body swapping. *PLoS One*, *3*(12), e3832.

- Polcar, J., & Horejsi, P. (2015). Knowledge acquisition and cyber sickness: A comparison of vr devices in virtual tours. *MM Science Journal*, 2015(02), 613-616.
- Quinto-Pozos, D. (2011). Teaching American Sign Language to Hearing Adult Learners. *Annual Review of Applied Linguistics*, 31, 137-158.
- Ragan, E. D., Bowman, D. A., Kopper, R., Stinson, C., Scerbo, S., & McMahan, R. P. (2015). Effects of Field of View and Visual Complexity on Virtual Reality Training Effectiveness for a Visual Scanning Task. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 21(7), 794-807.
- Rohde, M., Di Luca, M., & Ernst, M. O. (2011). The Rubber Hand Illusion: feeling of ownership and proprioceptive drift do not go hand in hand. *PLoS One*, 6(6), e21659.
- Rosenberg, R. S., Baughman, S. L., & Bailenson, J. N. (2013). Virtual superheroes: using superpowers in virtual reality to encourage prosocial behavior. *PLoS One*, 8(1), e55003.
- Roth, D., & Latoschik, M. E. (2020). Construction of the Virtual Embodiment Questionnaire (VEQ). *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 26(12), 3546-3556.
- Rothbaum, B. O., Hodges, L., Smith, S., Lee, J. H., & Price, L. (2000). A controlled study of virtual reality exposure therapy for the fear of flying. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 68(6), 1020-1026.
- Sanchez-Vives, M. V., Spanlang, B., Frisoli, A., Bergamasco, M., & Slater, M. (2010). Virtual hand illusion induced by visuomotor correlations. *PLoS One*, 5(4), e10381.
- Saraiji, M. Y., Sasaki, T., Matsumura, R., Minamizawa, K., & Inami, M. (2018). Fusion: full body surrogacy for collaborative communication. *ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies*, 1-2.
- Sato, A., & Yasuda, A. (2005). Illusion of sense of self-agency: discrepancy between the predicted and actual sensory consequences of actions modulates the sense of self-agency, but not the sense of self-ownership. *Cognition*, 94(3), 241-255.
- Schulze, S., Pence, T., Irvine, N., & Guinn, C. (2019). The Effects of Embodiment in Virtual Reality on Implicit Gender Bias. *Virtual, Augmented and Mixed Reality. Multimodal Interaction*, 361-374.
- Schwind, V., Knierim, P., Tasci, C., Franczak, P., Haas, N., & Henze, N. (2017). "These are not my hands!" : Effect of Gender on the Perception of Avatar Hands in Virtual Reality. *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1577-1582.

- Slater, M., Perez-Marcos, D., Ehrsson, H. H., & Sanchez-Vives, M. V. (2008). Towards a digital body: the virtual arm illusion. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2, 6.
- Spanlang, B., Normand, J.-M., Borland, D., Kilteni, K., Giannopoulos, E., Pomés, A., González-Franco, M., Perez-Marcos, D., Arroyo-Palacios, J., Muncunill, X. N., & Slater, M. (2014). How to Build an Embodiment Lab: Achieving Body Representation Illusions in Virtual Reality. *Frontiers in Robotics and AI*, 1. <https://doi.org/10.3389/frobt.2014.00009>
- Sportillo, D., Avveduto, G., Tecchia, F., & Carrozzino, M. (2015). Training in VR: A Preliminary Study on Learning Assembly/Disassembly Sequences. *Augmented and Virtual Reality*, 332-343.
- Stanney, K., Fidopiastis, C., & Foster, L. (2020). Virtual Reality Is Sexist: But It Does Not Have to Be. *Frontiers in Robotics and AI*, 7. <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00004>
- Synofzik, M., Vosgerau, G., & Newen, A. (2008). Beyond the comparator model: a multifactorial two-step account of agency. *Consciousness and Cognition*, 17(1), 219-239.
- Tajadura-Jiménez, A., Banakou, D., Bianchi-Berthouze, N., & Slater, M. (2017). Embodiment in a Child-Like Talking Virtual Body Influences Object Size Perception, Self-Identification, and Subsequent Real Speaking. *Scientific Reports*, 7(1), 9637.
- Takada, K., Kawaguchi, M., Uehara, A., Nakanishi, Y., Armstrong, M., Verhulst, A., Minamizawa, K., & Kasahara, S. (2022). Parallel Ping-Pong: Exploring Parallel Embodiment through Multiple Bodies by a Single User. *Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2022*, 121-130.
- Takita, H., Hatada, Y., Narumi, T., & Hirose, M. (2023). Effects of Virtual Co-embodiment on Declarative Memory-Based Motor Skill Learning. *ACM Symposium on Applied Perception 2023*, 1-10.
- Tanaka, Y., Katagiri, T., Yukawa, H., Nishimura, T., Tanada, R., Ogura, I., Hagiwara, T., & Minamizawa, K. (2022). Sensorimotor Control Sharing With Vibrotactile Feedback for Body Integration Through Avatar Robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(4), 9509-9516.
- Trapp, E. P., & Kausler, D. H. (1959). A Revision of Hull's Table of Associative Values for 320 Selected Nonsense-Syllables. *The American Journal of Psychology*, 72(3), 423-428.
- Tsakiris, M., Hesse, M. D., Boy, C., Haggard, P., & Fink, G. R. (2007). Neural signatures of body ownership: a sensory network for bodily self-consciousness. *Cerebral Cortex*, 17(10), 2235-2244.

- Vallar, G., & Ronchi, R. (2009). Somatoparaphrenia: a body delusion. A review of the neuropsychological literature. *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Experimentation Cerebrale*, 192(3), 533-551.
- van Baaren, R. B., Holland, R. W., Kawakami, K., & van Knippenberg, A. (2004). Mimicry and prosocial behavior. *Psychological Science*, 15(1), 71-74.
- Verhulst, A., Namikawa, Y., & Kasahara, S. (2022). Parallel Adaptation: Switching between Two Virtual Bodies with Different Perspectives Enables Dual Motor Adaptation. *2022 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 169-177.
- Wen, W., Yamashita, A., & Asama, H. (2015). The sense of agency during continuous action: Performance is more important than action-feedback association. *PLoS One*, 10(4), e0125226.
- Wen, W., Yamashita, A., & Asama, H. (2017). The influence of performance on action-effect integration in sense of agency. *Consciousness and Cognition*, 53, 89-98.
- Wobbrock, J. O., Findlater, L., Gergle, D., & Higgins, J. J. (2011). The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 143-146.
- Yang, U., & Kim, G. J. (2002). Implementation and Evaluation of “Just Follow Me” : An Immersive, VR-Based, Motion-Training System. *Presence*, 11(3), 304-323.
- Yun, K., Watanabe, K., & Shimojo, S. (2012). Interpersonal body and neural synchronization as a marker of implicit social interaction. *Scientific Reports*, 2, 959.
- Zou, X., Chen, Y., Xiao, Y., Zhou, Q., & Zhang, X. (2023). Better Controlled, Better Maintained: Sense of Agency Facilitates Working Memory. *Consciousness and Cognition*, 110, 103501.
- 中川航太郎, 井上康之, Harin, H., 杉本麻樹, 稲見昌彦, & 北崎充晃. (2022). 伸長する腕に対する身体性の獲得: 伸長実装法による違い. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 27(4), 341-351.
- 北崎充晃. (2016). サイバー空間と実空間をつなぐ We-mode の可能性. 心理学評論, 59(3), 312-323.
- 大久保街亜, 鈴木玄., & Nicholls, M. E. R. (2014). 日本語版 Flanders 利き手テスト. 心理学研究, November, 44-51.
- 福岡正彬, Verhulst, A., 中村文彦, 滝澤瞭., 正井克俊, 北崎充晃, & 杉本麻樹. (2020). FaceDrive: 顔表情による装着型ロボットアーム操作手法の提案. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 25(4), 451-461.

- 萩原隆義, 湯川光., 西村匠生, 棚田亮平, 田中由浩, & 南澤孝太. (2022). ロボットアバターを通じた身体融合に基づく身体的協調. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 27(4), 435-446.
- 近藤亮太, 上田祥代, 杉本麻樹, 南澤孝太, 稲見昌彦, & 北崎充晃. (2019). 見えない長い腕: 四肢先端の視覚運動同期による四肢伸張透明身体への所有感生成と行動変容. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 24(4), 351-360.

# 論文リスト

## 査読付学術論文

1. Katsumata, Y., Inoue, Y., Toriumi, S., Hapuarachchi, H., and Kitazaki, M. Shared Avatar for Hand Movement Imitation: Subjective and Behavioral Analyses. *IEEE Access*, **11**, 96710-96717. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3312179, (2023)
2. 勝俣安伸, 鳥海智志, 井上康之, Harin Hapuarachchi, 北崎充晃. 共有・結合した手による指リーチングにおける身体性と課題成績. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, **29**(1), 27-37. 採択済み印刷中 (2024)

## 査読付国際会議論文

1. Katsumata, Y., Ishimoto, H., Inoue, Y. and Kitazaki, M. Sign Language Learning System with Concurrent Shared Avatar Hand in a Virtual Environment: Psychological Evaluation, ICAT-EGVE (The International Conference on Artificial Reality and Telexistence, and The Eurographics Symposium on Virtual Environments), pp27-28, DOI: 10.2312/egve.20221300 (2022)