

# 融合身体を用いた他者とのアバタ操作における 身体所有感の測定手法の検討 — クロスモーダル効果の活用可能性 —

平井 陽香<sup>1</sup> 李 天添<sup>1</sup> 森田 磨里絵<sup>1</sup> 中島 亮一<sup>2</sup> 柴田 史久<sup>1</sup> 木村 朝子<sup>1</sup> 北川 智利<sup>3,4</sup>

**概要：**VR空間において複数人が1つの仮想身体（アバタ）を同時に操作すると（融合身体）、アバタに自身の動作だけでなく他者の動作も反映されるため、身体所有感は単独操作時とは異なる様相を呈することが示されてきた。先行研究ではアンケートによる主観評価が主に用いられてきたが、質問文の解釈や回答者の態度の影響を受けやすいという課題がある。そこで、より潜在的かつ客観的に身体所有感を捉える指標を用いることで、融合身体における身体所有感の詳細な検討が可能になると考えられる。そこで本研究では、身体所有感と視覚-触覚の相互作用（クロスモーダル効果）の關係に着目し、クロスモーダル効果が融合身体における身体所有感の評価指標として有効かを検討した。実験では、参加者ペアが1つのアバタを操作してタスクを行った。その際、自身の動きがアバタに反映される割合（融合割合）を操作した。その後、各参加者の左右の手に触覚刺激、アバタの左右の手に視覚刺激を提示し、触覚刺激に対する反応時間を測定した。その結果、融合身体システムでも視覚刺激と触覚刺激の提示位置が異なる場合に視覚刺激の妨害によって反応が遅くなるクロスモーダル効果が生じた。さらに、融合割合の増加に応じてクロスモーダル効果が強まった。よって、クロスモーダル効果が融合身体における身体所有感の指標として活用できる可能性がある。

## 1. はじめに

近年、VR空間内のアバタの身体を他者と共有し、協調して操作する「融合身体」と呼ばれる技術が開発されている。融合身体における「融合」の方法は様々考えられるが、本研究においては、自己の身体位置と他者の身体位置を加重平均した位置にアバタの身体を表示することと定義する（図1）。本技術の特徴として、他者との融合により共同行為（joint action）やwe-modeが成立している可能性が挙げられる[1]。Sebanzら[2]は、共同行為を複数の個人が空間的・時間的に行動を調整しながら環境に変化をもたらすあらゆる社会的インタラクションと定義している。共同行為の成立には、相互の行動調節や、他者の意図・行為を予測することが重要である。また、共同行為中は、

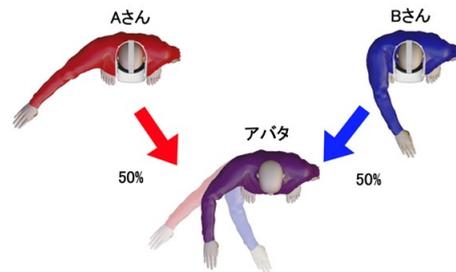


図1: 融合身体イメージ

we-modeと呼ばれる認知状態が成立していると考えられている。we-modeは、共同行為に関与する者同士が自身の役割を「私個人」ではなく「我々」として捉え、集団の一員として行動することで成立し、we-modeの成立時には相手の状態推量までもが可能になると報告されている[3]。共同行為やwe-modeの成立は、個々人が単独でタスクに取り組む場合に比べて高いタスク成績を引き出すことが示されている[4]。

融合身体では1体のVRアバタの動きを複数人で制御するという性質上、一人称視点の身体でありながら他者の介在を許す。そのため、アバタを自身の身体であると感じ

<sup>1</sup> 立命館大学大学院 情報理工学研究所  
Graduate School of Information Science and Engineering,  
Ritsumeikan University  
<sup>2</sup> 京都大学大学院 情報学研究所  
Graduate School of Informatics, Kyoto University  
<sup>3</sup> 吉賀心理学研究所  
Yoshika Institute of Psychology  
<sup>4</sup> 立命館大学 BKC 社系研究機構  
BKC Research Organization of Social Sciences, Ritsumeikan  
University

る身体所有感や、行為を主導しているのが自身であると感じる行為主体感は、単独での操作時とは異なる様相を呈すると考えられる。これまでの融合身体研究では、他者と融合して身体動作を行ったあと、アンケート調査によって融合中の身体所有感および行為主体感の評価を求める方法が採用されてきた。アンケート調査は実施が容易である一方、参加者による質問の解釈や回答への態度等による影響を受けやすいため、得られたデータの解釈には慎重さが求められる。このような背景から、融合身体における主観的な感覚をより客観的かつ定量的に評価できる手法が求められる。そのような手法を確立し、従来とは違った角度から評価することができれば、融合身体における身体所有感や行為主体感についてより深く理解できるようになるかもしれない。そこで本研究では、視覚と触覚の相互作用（クロスモーダル効果）と身体所有感との関係に注目し、クロスモーダル効果が融合身体における身体所有感を定量的に評価するための客観指標として有効かを検討する。

## 2. 関連研究

### 2.1 融合身体下での身体動作の変容と主観的な感覚の評価

融合身体を用いた際の各個人の動作特徴を明らかにするため、Hagiwara ら [5] は、VR 空間に表示される標的にアバタの手で触れるリーチングタスクを、参加者ペアが融合して1体のアバタを操作する条件と、参加者が他者とは融合せずに単独でアバタを操作する条件とで行った。参加者個人の実身体の手運動軌跡から、手の運動軌跡の直進性と躍度（加速度変化率）[6]、1回のリーチングにかかる時間（反応時間）を算出した。実験の結果、個人の実身体の手運動軌跡は、他者と融合してアバタを操作した時の方が、直進性が高く、躍度が低く、反応時間も短縮された。この結果は、他者と融合して運動することによって自身の手の動きがより直線的かつ滑らかになり、効率的な運動が可能となることを示している。その一方、身体所有感と行為主体感の主観評価は、他者と融合してアバタを操作した時のほうが、参加者が単独で操作したときよりも低かった。

Hagiwara ら [5] の結果を受け、中村ら [7] は、他者と融合することで自身の身体動作の変容が生じる要因について調査を行った。中村らは、融合身体下で起きる身体動作の効率化がリアルタイムな他者との動作調節によって生じると考えた。そこで、リアルタイムに参加者ペアが融合する条件（リアルタイム条件）と、事前に記録された他者の動作と1人の参加者の動作を融合する条件（プレレコーディング条件）、融合せずに単独でアバタを操作する条件（ソロ条件）で Hagiwara らと同様のリーチングタスクを実施し、参加者の実身体の手運動軌跡の直進性、躍度、1回のリーチングにかかる時間を比較した。その結果、参加者の手の運動軌跡は、リアルタイム条件のとき最も直進性が高く、反応時間も短くなった。主観指標については、身体所有感、

行為主体感ともにリアルタイム条件のときに最も低くなった。このことから、リアルタイムに自己の動作と他者の動作を融合することで、行為主体感や身体所有感は低下するが、アバタに反映された他者の動作情報に基づき自己の動作を二者が互いに調節することで効率的な運動が可能となることが示唆された。

### 2.2 VR アバタとクロスモーダル効果

複数の感覚情報が同時に提示される時、その提示位置が一致するか否かによって反応速度は変化するとされる。例えば視覚刺激と触覚刺激の提示位置が異なる場合、触覚刺激の位置の弁別が視覚刺激に妨害され、触覚刺激の位置弁別にかかる時間が遅くなる現象が確認されている。この現象はクロスモーダル効果と呼ばれ、複数の感覚情報が統合されることで生じると考えられている。この効果は、感覚刺激が身体近傍空間（peripersonal space）内に提示された際に特に強く生じる。さらにクロスモーダル効果は、自己の身体近傍空間に限らず、外部の対象であっても「自分の身体である」と感じられている場合には、その対象の近傍空間に刺激が提示されることで同様に生じるとされている。このことから、クロスモーダル効果は対象がどの程度「自分の身体」として知覚されているか、すなわち身体所有感の程度を反映する指標として身体認知研究において活用されている [8]。例えば、ラバーハンド錯覚 [9] では、自身の手とは異なる位置に置かれたゴム製の手に対して視覚刺激を提示し、自己身体の手に対しても触覚刺激を同時に与えることで、ゴム製の手に身体所有感が生じ、その手をあたかも自分の手であるかのように感じるようになる。同様に、鏡像やイラストといった自己身体ではない対象に対しても、その近傍空間で提示された複数の感覚刺激によりクロスモーダル効果が生じることが報告されている [8], [10]。

Mine ら [11] は、VR 空間内でのアバタの手と自身の動作との協応関係を操作したときに、触覚刺激の検出における視覚刺激の妨害効果としてのクロスモーダル効果が生じるかを検証した。実験では、参加者の実身体の右手親指と小指に触覚刺激を提示すると同時に、VR アバタの右手親指と小指の近傍に視覚刺激を提示した。参加者は、視覚刺激を無視して触覚刺激に対して反応するように指示された。実験の結果、アバタの手が参加者の手と同じ軌道上を動くとき、触覚刺激と視覚刺激の提示位置が異なる場合の触覚刺激に対する反応時間が遅延した。一方、アバタの手が参加者の手の動きを鏡映反転させた軌道上を動くときには、触覚刺激と視覚刺激の提示位置が異なる場合でも触覚刺激に対する反応時間が遅延しなかった。この結果は、アバタの手の動きと参加者自身の手の動きに協応関係がある場合、VR アバタの近傍空間に提示された視覚刺激と実身体に提示された触覚刺激の組み合わせによりクロスモーダル効果が生じることを示している。

### 3. 研究目的

融合身体では1体のVRアバタを複数人で同時に操作するという特性上、アバタは一人称視点で提示されるにもかかわらず、他者の動作が介在する。このような状況では、アバタを自身の身体として感じる「身体所有感」や自らの意志で動かしているという「行為主体感」が単独操作時とは異なる様相を示す可能性がある。

先行研究では、これらの感覚の調査のためにアンケートが用いられてきた。アンケートは実施が容易な一方、質問文の表現や語彙によって参加者が受け取る意味や解釈が変化する可能性や、参加者のありのままの体験ではなく、期待されている回答がなされてしまう可能性がある。得られたデータが、参加者の実際の体験や感覚をありのままに反映しているかの判断には注意が必要であり、必ずしも安定した指標とは言えない。そこで、融合身体における主観的な感覚を客観的かつ定量的に評価する手法の検討が求められる。

本研究では、融合身体研究において主観的に評価されてきた身体所有感・行為主体感のうち、特に身体所有感について、より客観的な測定手法の検討を行う。身体所有感は、身体近傍 (peripersonal space) における視覚や触覚の感覚統合と関連しているとされる。このため、身体近傍における感覚統合の状態を捉えることで、身体所有感の変化も間接的に把握できると考えられる。そこで着目するのがクロスモーダル効果である。クロスモーダル効果 (視覚と触覚の相互作用) の強弱は身体近傍での感覚統合の程度と対応がある。つまり、クロスモーダル効果の強弱を測定することで、融合身体下における身体所有感に関する客観的の指標が得られる可能性がある。

以上から、クロスモーダル効果が融合身体における身体所有感の客観的な評価指標として有効かを検討する。実験は Mine ら [11] に倣い、視覚刺激 (妨害) と同時に提示される触覚刺激に対する反応時間を測定し、視覚刺激と触覚刺激の提示位置が一致する場合と一致しない場合の反応時間差をクロスモーダル効果の指標と定義して、評価を行う。

## 4. 実験

### 4.1 実験概要

本実験ではリーチングタスクおよび反応時間測定タスクの2種類のタスクを採用した。各試行では、特定の融合割合でリーチングタスク実施した後に、融合を解除して反応時間測定タスクを行うことを3回繰り返し、その後身体所有感と行為主体感に関するアンケートに回答した。反応時間測定タスクでは、触覚刺激に対する反応時間を測定した。その際、アバタの指先に提示される視覚刺激と、参加者自身の指先に提示される触覚刺激の提示位置が一致する場合と一致しない場合があり、本研究ではそれらの反応時

間を比較した。参加者は着座姿勢で、頭部にヘッドマウントディスプレイ (HMD)、両耳にイヤホン、両手首にコントローラを装着した (図 2a)。参加者は実験を通して両手の中指と親指で振動子を取り付けたスポンジを持っていた (図 2b)。本実験で使用したアバタの身長は約 175 cm、腕の長さは約 70cm であった。実験に先立ち、参加者にはタスク前アンケートと日本語版フランダース利き手テスト [12] に回答させた。

本研究は「立命館大学における人を対象とする研究倫理審査」の承認 (承認番号: 衣笠-人-2024-16) を受け実施された。すべての参加者から実験参加に対する同意を取った。

### 4.2 実験参加者

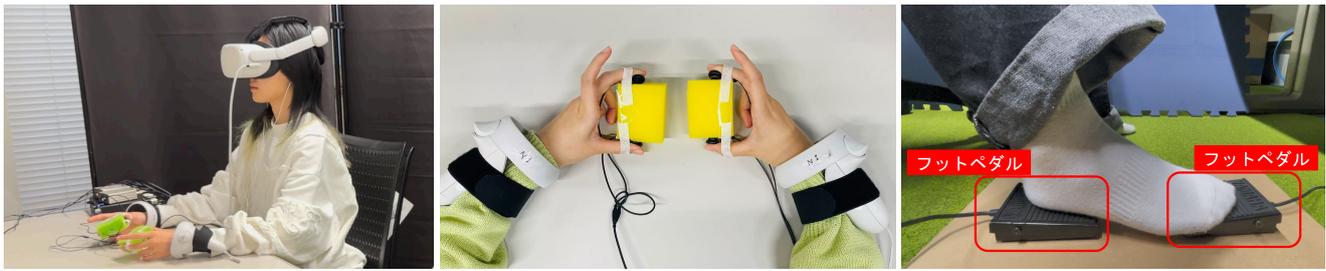
参加者は、立命館大学に所属している大学生及び大学院生 30 名 (2 人 1 組で参加したため 15 組) であった (男性 19 名、女性 11 名、平均年齢は 20.8 歳)。日本語版フランダース利き手テストの結果、右利きは 23 名、両利きは 0 名、左利きは 7 名であった。タスク前アンケートにて、VR 経験が「一度もない」と回答したのは 7 名、「過去に何度かある」と回答したのは 19 名、「頻繁にある」と回答したのは 4 名であった。

### 4.3 システム構成

本実験では、自己と他者の動作をリアルタイムに融合したアバタを操作可能な「融合身体システム」、視覚・触覚刺激を提示する「刺激提示ユニット」、フットスイッチからの反応入力を受け付ける「反応時間測定ユニット」から成るシステムを構築した。融合身体システムはリーチングタスクのため、刺激提示ユニットと反応時間測定ユニットは反応時間測定タスクのために用いた。

融合身体システムでは、リアルタイムで自己と他者の2人の動作を融合したアバタを操作するため、2台のPCを使用した。スイッチングハブとUnityのアセットの1つであるMirrorを用いることで、コントローラの位置データをPC間で送受信し、リアルタイムでの同期処理を実装した。使用した2台のPCは、GALLERIA XA7C-R37 (OS: Windows 10, CPU: Intel Core i7 3.8 GHz, RAM: 32 GB, GPU: NVIDIA GeForce RTX 3070) と、GALLERIA XF (OS: Windows 10, CPU: Intel Core i7 3.7 GHz, RAM: 32 GB, GPU: NVIDIA GeForce RTX 2070) であった。VR空間における実験環境はHMDであるMeta Quest 2とTouchコントローラを用いて実装した。HMDの制御や仮想物体の描画、物理演算に関しては、リアルタイム3D開発プラットフォームであるUnity (Ver.2020.3.2f1) を使用した。

刺激提示ユニットでは、視覚刺激をVRアバタの左右の手の親指および中指に提示し、触覚刺激を実体の親指および中指に提示した。視覚刺激は上述のVR空間における



(a) リーチングタスク時の基本姿勢

(b) 反応時間測定タスク時の手の基本姿勢

(c) 反応時間測定タスク時の足の基本姿勢

図 2: 実験タスク中の基本姿勢

実験環境で提示した。触覚刺激の提示には、骨伝導イヤホン（ゴールデンダンス株式会社，SOUNDBONEGD-SB）を用いた。スポンジ（7cm × 5.5cm × 3cm）の上下にイヤピースを固定した触覚刺激提示装置を2つ作成し，参加者にはイヤピースが両手の親指と中指の腹に当たるようにスポンジを持たせ固定した。PCと骨伝導イヤホンの間にオーディオインタフェース（Roland Rubix24）とアンプ（Audio-Technica AT-HA2）を接続し，振動の出力位置と振動の強さを制御した。

反応時間測定ユニットでは，触覚刺激に対する応答入力のために，参加者の右足のつま先側およびかかと側に1つずつフットスイッチ（YAMAHA FC5）を設置した（図2c）。

#### 4.4 融合条件

参加者ペアにおける各個人の動作が，共有しているアバタの動作にどの程度反映されるかを示す融合割合を5段階（10%，30%，50%，70%，90%）で操作した。その際，参加者ペアの反映率の合計が常に100%になるよう設定した。つまり，例えば参加者Aの動作が10%反映される場合，参加者Bの動作が90%反映された。

#### 4.5 実験タスク

##### 4.5.1 リーチングタスク

リーチングタスクでは，参加者にはペアで1体のアバタを操作させ，アバタの左右の手で標的に触れさせた。標的はHagiwaraら[5]を参考に，1辺が5cmの立方体とした。標的の水平方向と奥行き方向の提示範囲はアバタの両眼中央を基準とし，水平方向に±50°，奥行き方向に半径50～68cmとした。垂直方向の提示範囲はアバタの肩の高さを基準とし垂直方向に±40°とした。この範囲内に，右手用・左手用それぞれ10箇所ずつ，計20箇所の標的位置をあらかじめ定め，いずれか1箇所ずつランダムで標的が提示されるようにした。標的はアバタの右手又は左手人差し指で触ることで消滅した。標的が消滅してから3秒後，先行の標的とは異なる位置に再び標的を提示し，参加者には現れる標的に触る動作を繰り返させた。標的を触る手の左

右は，標的の色で参加者に区別させた。青色の標的であれば左手で触らせ，赤色の標的であれば右手で触らせた。標的が表示されてない間は，左手を指定された机上の青いパネルに，右手を指定された机上の赤いパネルに置くよう指示した。リーチングの速度については，事前にリーチングの動画を見せた上で，1回のリーチングに1秒程度かけるよう指示した。20回又は10回標的に触れた時点でタスクは終了し，その後，反応時間測定タスクへ移行した。反応時間測定タスクへ円滑に移行するため，リーチングタスク中も，参加者は振動子付きスポンジを両手に固定していた。

##### 4.5.2 反応時間測定タスク

反応時間測定タスクでは，各参加者の実身体の左右の手に触覚刺激，アバタの左右の手に視覚刺激を同時に提示し，触覚刺激に対する反応時間を測定した。反応時間測定タスクは，実験条件にかかわらず，全て融合していない状態で実施した。タスク中，参加者は視覚刺激を無視し，触覚刺激に可能な限り素早く反応することが求められた。

触覚刺激には200Hzの正弦波を用い，50msのバースト振動と50msの無音間隔を3回繰り返し提示した。振動は，両手の親指と中指の計4箇所の中の1箇所から提示された。振動の強度は，実験開始前に参加者ごとに振動を十分に感じられる強さに調整した。触覚刺激を提示してから，3秒間のみ参加者からの反応（フットスイッチへの入力）を受け付け，3秒以内に反応が得られなかった場合は次の触覚刺激の提示に移行した。振動子から発せられる聴覚の手がかりを隠すため，両耳のイヤホンからホワイトノイズを課題実施中連続的に提示した。視覚刺激は，VR空間上のアバタの両手親指と中指の指先の計4箇所の中の1箇所に提示した。1辺が1.5cmの白色立方体を50ms間隔で3回点滅させ提示した。

触覚刺激と視覚刺激の提示箇所の組み合わせは16パターン（4触覚刺激 × 4視覚刺激）である。各融合条件で，この16パターンを3回ずつ繰り返して提示し計48回の反応を得た。各反応時間測定タスクでは，48回の視覚刺激の提示のうちの8つを提示した。視覚刺激の提示順序はランダム化した。参加者が触覚刺激が提示されるまでの時間を予測することを避けるため，触覚刺激と視覚刺激のオン

セットまでの時間を、各視触覚刺激提示ごとに 1000 ms, 1100 ms, 1200 ms, 1300 ms, 1400 ms の中からランダムに変化させた。また、視覚刺激の提示タイミングは、触覚刺激の提示開始時刻よりも 37.8 ms 早く設定した。この時間遅延は、ヒトの視覚情報処理にかかる時間と、視触覚刺激のシステム上の提示タイミングを考慮している。視覚情報は触覚情報に比べて中枢神経系での処理に時間を要することから、既存研究 [13] では、視覚刺激を触覚刺激よりも 30 ms 先行して提示している。さらに、本実験で使用したシステムにて触覚刺激に対する視覚刺激の提示遅延を測定したところ、HMD への視覚刺激の提示には平均して 7.8 ms の遅延が生じていることを確認した。これらを踏まえ、視覚刺激を触覚刺激よりも 37.8 ms 先行して提示した。

タスク中、参加者は向かい合わせに配置された 2 つのフットペダルを右足のつま先と踵で常時踏み込んだ状態を維持し、触覚刺激が提示された位置をつま先またはかかとを持ち上げることで答えた。刺激提示部位に応じた反応として、右手・左手のいずれにおいても、中指への触覚刺激を感じた場合はつま先を上げ、親指への触覚刺激を感じた場合はかかとを上げるよう指示した。

#### 4.5.3 アンケートによる主観評価

参加者に身体所有感（どの程度あなたの見たアバタの身体があなた自身の身体のように感じましたか）と行為主体感（どの程度アバタの手を制御しているように感じましたか）のアンケートに回答させた。各評価項目について、「全くそう思わない」を「1」、「非常にそう思う」を「7」として、7段階のリッカート尺度で評価を行わせた。これらのアンケート文は VR 空間で表示され、参加者はコントローラを用いて回答した。

#### 4.6 実験手順・試行回数

1 試行では、1 つの融合割合条件でリーチングタスクを行った後に融合せずに反応時間測定タスクを行うことを 3 回繰り返したあと、身体所有感と行為主体感のアンケートに回答させた。各試行でのリーチングタスクにおけるターゲットの出現個数は繰り返し 3 回のうち、1 回目のリーチングタスクでは 20 個、2,3 回目のリーチングタスクでは 10 個とした。リーチングタスク中に生じる融合の効果が反応時間測定タスク中に弱くなることを想定し、リーチングタスクと反応時間測定タスクを交互に実施した。各融合条件を 2 試行ずつ計 10 試行行った。各融合条件での 2 試行は連続で実施した。

実験の手順は以下の (1)~(12) で行った。

- (1) 参加者を指定の位置にある椅子に座らせる
- (2) 参加者に事前説明を行い、実験参加に同意した場合のみ同意書への署名を求める
- (3) 参加者にタスク前アンケートとフランダース利き手テストに回答させる

- (4) 参加者にタスクの内容を説明する
- (5) 参加者に練習を行わせる
- (6) 融合割合を決定する
- (7) 融合状態でリーチングを 20 回行わせる
- (8) 触覚刺激への応答を 8 回行わせる
- (9) 融合状態でリーチングを 10 回行わせる
- (10) 触覚刺激への応答を 8 回行わせる
- (11) (9)~(10) をもう一度繰り返す
- (12) 参加者に行為主体感、身体所有感に関する質問に回答させる
- (13) (7)~(12) を同じ融合割合で繰り返す
- (14) 2 分間休憩させる
- (15) (6)~(14) を他の融合割合についても繰り返す
- (16) 参加者に、VR 空間やアバタの見た目や実験の感想を自由回答で尋ねる。その際、自身の動作がどれほどアバタに反映されていたかの予想を回答させる。

## 5. 結果

### 5.1 分析方法

参加者 30 名のうち、機材トラブルにより反応時間の取得が取得できなかった 4 名 (2 組) のデータと、触覚刺激の提示位置の判断の正答率が 60 % 未満であった 4 名のデータを除外し 22 名のデータを分析の対象とした。22 名の参加者データのうち、触覚刺激の提示位置を誤答した反応と、触覚刺激の提示前にフットペダルによる入力が行われた反応を除外し、反応時間を算出した。触覚刺激の提示からフットペダルによる入力を得られるまでの時間を反応時間 (RT) とした。

視覚刺激と触覚刺激の提示位置の組み合わせを (1) 提示側の一致性 (同側: 同じ側の手に提示された vs. 対側: 反対側の手に提示された)、および (2) 上下位置の一致性 (上下一致: 手の左右に拘わらず同じ指 (中指と中指、親指と親指) に提示された vs. 上下不一致: 手の左右に拘わらず異なる指 (中指と親指) に提示された) に基づき以下の 4 つに分類した。各参加者の融合条件ごとに、4 つの分類での反応時間の平均を算出した。

- **同側・上下一致:** 視触覚刺激が同じ側の手に提示され、かつ上下位置が一致する
- **同側・上下不一致:** 同じ側の手に提示されるが、上下位置が異なる
- **対側・上下一致:** 左右異なる手に提示されるが、上下位置は一致する
- **対側・上下不一致:** 左右異なる手に提示され、上下位置も異なる

先行研究から、アバタの手に対して身体所有感を有している場合は、触覚刺激の位置弁別時に視覚刺激による妨害を強く受けると考えられる。したがって、同側・上下不一致および対側・上下不一致における反応時間は、同側・

上下一致および対側・上下一致における反応時間よりも長くなることが予測される [11]. さらに, 視覚刺激の妨害効果は触覚刺激と視覚刺激の提示位置の距離が近いほど増大する, すなわち身体的な一致度が高いほうが強い妨害が生じることが知られていることから, 同側・上下不一致における反応時間は対側・上下不一致よりも長くなることが予測される [13]. 本研究では, 同側・対側における上下不一致と上下一致の反応時間の差をクロスモーダル効果 (cross-modal congruency effect; CCE) として定義し, 視覚刺激の位置関係 (同側・対側) について分析を行った (図 3). アバタの手に対して身体所有感を有している場合は, 同側の手における上下不一致と一致の差 ( $CCE_{同側} = RT_{同側 \cdot 上下不一致} - RT_{同側 \cdot 上下一致}$ ) のほうが, 対側の手における上下一致と不一致の差 ( $CCE_{対側} = RT_{対側 \cdot 上下不一致} - RT_{対側 \cdot 上下一致}$ ) よりも大きくなり, この差が融合割合が高くなるにつれて大きくなると考えられる.

### 5.1.1 反応時間の結果

反応時間の差 (CCE) について, 視覚刺激の位置関係 (同側・対側) と融合割合 (5) の 2 要因の分散分析を行った. その結果, 視覚刺激の位置関係の主効果と, 視覚刺激の位置関係と融合割合の交互作用が有意であった (視覚刺激の位置関係の主効果:  $F(1, 21) = 66.96, p < .001$ , 交互作用:  $F(4, 84) = 3.21, p < .05$ ). 融合割合の主効果は有意ではなかった ( $F(4, 84) = 1.43, n.s.$ ). 交互作用が有意であったため, 単純主効果検定を行ったところ, 融合割合 30% 以外の融合割合においては, 同側における反応時間の差 ( $CCE_{同側}$ ) が対側における反応時間の差 ( $CCE_{対側}$ ) よりも有意に長かった ( $ps < .005$ ). また, 同側における反応時間の差 ( $CCE_{同側}$ ) においてのみ, 融合割合の単純主効果が有意であったため ( $F(4, 84) = 2.59, p < .05$ ), Holm 法による多重比較を行った. その結果, 融合割合が 30% と 90% との間で有意差が認められ ( $t(21) = 3.30, p < .05$ ), 融合割合が 90% のときのほうが 30% のときよりも同側における反応時間の差 ( $CCE_{同側}$ ) が有意に長くなった.

### 5.1.2 主観指標

身体所有感および行為主体感の平均評価値を図 4 に示す. 横軸は融合割合を示す. 身体所有感に関して, Kruskal-Wallis 検定を行ったところ, 条件間に有意差が認められたため ( $p < .01$ ), Holm 法によるペアワイズ比較を実施した. その結果, 融合割合 10% よりも, 50%, 70%, 90% の方が評価が有意に高くなっていた ( $ps < .01$ ). 融合割合 30% よりも, 50% の方が評価が有意に高く ( $p < .05$ ), 70%, 90% の評価はさらに高かった ( $ps < .01$ ). また, 融合割合 50% よりも 70%, 90% の方が評価が有意に高くなっていた ( $ps < .05$ ).

行為主体感に関して, Kruskal-Wallis 検定を行ったところ, 条件間に有意差が認められたため ( $p < .01$ ), Holm 法によるペアワイズ比較を実施した. その結果, 融合割合 10%

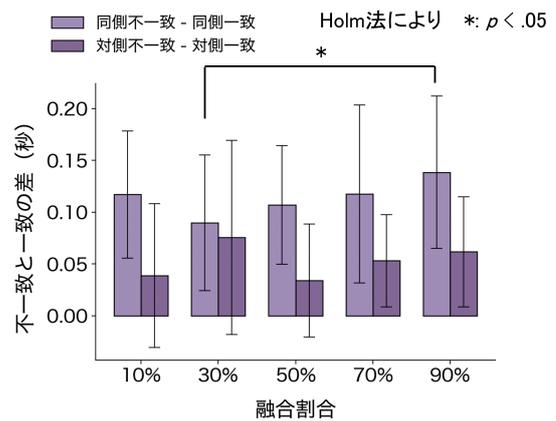


図 3: 各融合割合におけるクロスモーダル効果の度合い. 薄紫色のバーが同側におけるクロスモーダル効果 ( $CCE_{同側} = RT_{同側 \cdot 上下不一致} - RT_{同側 \cdot 上下一致}$ ) を, 濃紫色のバーが対側におけるクロスモーダル効果 ( $- RT_{同側 \cdot 上下一致}, CCE_{対側} = RT_{対側 \cdot 上下不一致} - RT_{対側 \cdot 上下一致}$ ) を表す.

よりも, 30%, 50%, 70%, 90% の方が評価が有意に高くなっていた ( $ps < .01$ ). 融合割合 30% よりも, 70%, 90% の方が評価が有意に高くなっていた ( $ps < .01$ ). また, 融合割合 50% よりも 70% の方が評価が有意に高く ( $p < .05$ ), 90% の評価はさらに高かった ( $p < .01$ ).

## 6. 考察

本研究では, 融合身体における身体所有感について, 主観評価に加えて, より客観的かつ定量的に捉える手法の検討を行った. これまでの研究では, 身体所有感は主にアンケートによって評価されてきたが, 質問文の解釈の違いや参加者の回答態度などの影響を受けやすく, 必ずしも安定的な結果が得られるとは限らない. そこで, より多角的に身体所有感を捉える試みとして, 本研究では身体近傍空間における視覚-触覚の感覚統合に着目し, クロスモーダル効果を身体所有感の客観的な評価手法として活用できる可能性について検討した.

### 6.1 クロスモーダル効果

クロスモーダル効果の強弱は身体所有感の高低と対応関係にあると考えられており, クロスモーダル効果が強いほど, 身体所有感が高い状態にあると解釈される. 本研究では, 同側・対側における上下不一致と上下一致の反応時間の差 ( $CCE_{同側}, CCE_{対側}$ ) をクロスモーダル効果の指標として, 融合割合がクロスモーダル効果に及ぼす影響について分析を行った. その結果, 刺激位置の上下が一致しない不一致条件は, 一致条件よりも反応時間が有意に長くなった. このことから, 融合身体システムにおいてもクロスモーダル効果が生じることが確認された. さらに, 刺激の提示側が同側である場合において, 融合割合 30% の場合と比較して融合割合 90% の場合の方がクロスモーダル効果が

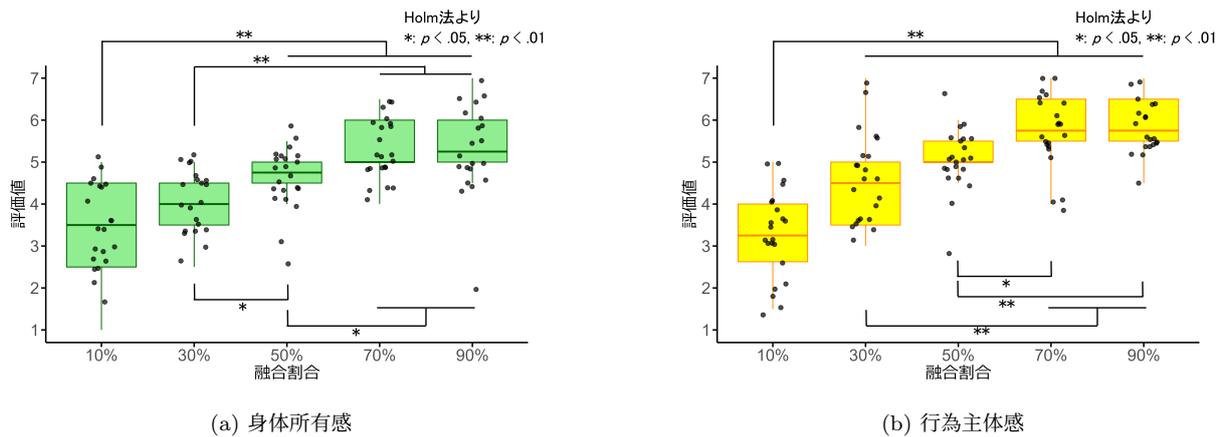


図 4: 主観評価

有意に強まった。他の融合条件の組み合わせでは有意差を確認できなかったものの、融合割合の増加に応じてクロスモーダル効果も強まる傾向が見られた。このことから、融合身体システムにおいても、クロスモーダル効果の強さが身体所有感を客観的に評価できる指標として活用できる可能性が示唆された。

## 6.2 主観評価とクロスモーダル効果の比較

身体所有感のアンケート評価においては、融合割合の増加に伴って評価値が上昇する傾向が見られた。これは融合割合が高まるにつれて、アバタを自己の身体として主観的に感じる度合いが強まることを示している。また、行為主体感においても身体所有感と同様の傾向が認められた。このことから融合割合の増加が、アバタの手を自ら制御しているという感覚を強めることが考えられる。

一方で、クロスモーダル効果に基づく客観指標（反応時間差）を見ると、主観評価と一致しないパターンが見られた。特に融合割合 10%においては、主観的な評価が最も低いにもかかわらず、クロスモーダル効果は比較的強く現れており、主観・客観の間に乖離が生じていることがわかる。これは、身体所有感や行為主体感といった感覚が一つの評価手法では十分に捉えきれない多面的な性質を持つことを示唆している。例えば、ある一定以下の融合割合の条件では、本人の主観としては「あまり自分が操作している感じがしない」と思っているにもかかわらず、潜在的な感覚ではアバタの動作に対する自身の寄与率が過剰に評価している可能性が考えられる。そのため、複数の手法を組み合わせることで、融合身体における身体所有感や行為主体感をより深く理解できるようになるかもしれない。特に融合割合が低い場合に見られる主観と客観の乖離には、自己感覚の複雑さや揺らぎが表れている可能性が考えられるため、今後検討を行う必要がある。

## 7. 研究の限界と今後の展望

本研究では、両手の親指と中指に対して視触覚刺激の提示パターンを 16 通り設定した。これは単に刺激の上下位置の一致・不一致のみを比較するのではなく、刺激の提示側（同側／対側）も比較することで、提示側による影響も検討するためであった。同側条件と対側条件を比較する目的は、視触覚刺激の提示位置（中指と親指）と、フットペダルによる反応（つま先とかかと）との空間的一致が、単純な反応速度の差に影響を与えている可能性を排除することであった。

もし同側条件において対側条件よりもクロスモーダル効果が顕著に強まる場合、その反応時間の差は単なる空間的一致によるものではなく、対象が身体化したことによる影響を反映していると解釈できる。クロスモーダル効果に関する先行研究においても、同側条件におけるクロスモーダル効果のほうが強く生じることが報告されている [13]。これは、視触覚刺激が同一側の手に提示されることによって両感覚の空間的近接性が高まり、多感覚統合がより強く生じるためとされている。このような感覚統合は身体近傍空間 (peripersonal space) においてより顕著に生じるため、同側において対側よりもより強いクロスモーダル効果 (cross-modal congruency effect) が生じることは、対象が身体化していると考えられている。本研究では、同側・対側におけるクロスモーダル効果 ( $CCE_{同側}$ ,  $CCE_{対側}$ ) を比較したところ、同側条件においてより強いクロスモーダル効果を確認できた。これは、単なる視触覚刺激の空間的一致による反応時間差ではなく、対象（融合した VR アバタ）の身体化に起因するクロスモーダル効果を捉えることができたという点で重要な成果であろう。

一方で、融合割合を 5 条件設定し、かつ上記のような提示パターンを網羅的に組み合わせさせた結果、各参加者あたり 1 条件 1 パターンにつき 3 試行分しかデータを取得できな

かった。また、実験全体の所要時間は約3時間に及び、これ以上の試行数を設けることは参加者への負担の観点から困難であった。これらの要因により、データの分散が大きくなり、同側条件において、融合割合30%と90%の比較以外で有意差が得られなかった可能性がある。

今後は、刺激提示パターン数の削減や条件の絞り込みといった工夫により、試行数を増加させ、統計的検出力を高める必要がある。今回、同側条件では有意差が確認された一方、対側条件では有意差が確認できなかったことから、今後は同側条件に焦点を絞ることで、より効率的かつ精度の高いデータ収集が可能になると考えられる。

## 8. おわりに

本研究では、複数人が1体のアバタを共有して操作する融合身体において、身体所有感の客観指標としてのクロスモーダル効果の活用可能性を検討した。融合身体では自身の操作するアバタに他者の動作も反映されることから、身体所有感は単独操作時とは異なる様相を呈すると考えられる。先行研究では身体所有感を主観的なアンケート結果によって評価していたが、主観評価は様々な要因によって変動するため、必ずしも安定した指標とは言えない。そこで、本研究ではより客観的かつ潜在的な身体所有感の指標として、視覚刺激と触覚刺激の交互作用であるクロスモーダル効果に着目した。

実験では、融合割合を操作しつつ参加者ペアにリーチングタスクを行わせた後に、触覚刺激を提示し、その反応時間を計測した。その際、触覚刺激への反応を妨害する視覚刺激も提示した。結果、視覚刺激と触覚刺激の提示位置が一致しない場合に反応時間が長くなるクロスモーダル効果が確認され、融合身体システムにおいてもこの効果が生じることが明らかとなった。さらに、融合割合が高まるにつれてクロスモーダル効果が増大する傾向が示され、特に同側における融合割合90%の条件では、30%の条件と比較して有意な差が確認された。

以上から、クロスモーダル効果は融合身体における身体所有感の変化を捉える有効な評価指標となり得ることが示唆された。

**謝辞** 本研究は、科研費・基盤研究(A)24H00706と若手研究24K21069の助成を受け実施された。

## 参考文献

- [1] 伊東亮太, 小川奈美, 鳴海拓志, 廣瀬通孝: 融合身体を用いた身体スキル伝達に関する基礎調査, 日本バーチャルリアリティ学会第25回大会論文集, Vol. 25, pp. 3C3-7 (2020).
- [2] Sebanz, N., Bekkering, H. and Knoblich, G.: Joint action: bodies and minds moving together, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 10, No. 2, pp. 70-76 (2006).
- [3] Gallotti, M. and Frith, C. D.: Social Cognition in the We-Mode, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 17, No. 4,

- pp. 160-165 (2013).
- [4] Wahn, B., Karlinsky, A., Schmitz, L. and König, P.: Let's move it together: A review of group benefits in joint object control, *Frontiers in Psychology*, Vol. 9, p. 918 (2018).
- [5] Hagiwara, T., Ganesh, G., Sugimoto, M., Inami, M. and Kitazaki, M.: Individuals Prioritize the Reach Straightness and Hand Jerk of a Shared Avatar over Their Own, *iScience*, Vol. 23, No. 12, p. 101732 (2020).
- [6] Tamar, F. and Neville, H.: The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model, *The Journal of Neuroscience*, Vol. 5, No. 7, pp. 1688-1703 (1985).
- [7] 中村哲朗, 森田磨里絵, 郷原皓彦, 松室美紀, 柴田史久, 木村朝子, 北川智利: 融合身体における二者間の相互作用-リアルタイムでの融合と事前記録との融合-, 第27回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 3C1-2 (2022).
- [8] Maravita, A., Spence, C., Sergent, C. and Driver, J.: Seeing your own touched hands in a mirror modulates cross-modal interactions, *Psychological Science*, Vol. 13, No. 4, pp. 350-355 (2002).
- [9] Botvinick, M. and Cohen, J.: Rubber hands 'feel' touch that eyes see, *Nature*, Vol. 391, No. 6669, pp. 756-756 (1998).
- [10] Igarashi, Y., Kitagawa, N. and Ichihara, S.: Vision of a pictorial hand modulates visual-tactile interactions, *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, Vol. 4, No. 2, pp. 182-192 (2004).
- [11] Mine, D. and Narumi, T.: The left-right reversed visual feedback of the hand affects multisensory interaction within peripersonal space, *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol. 86, pp. 285-294 (2024).
- [12] 大久保街亜, 鈴木 玄, R., N. M. E.: 日本語版 FLANDERS 利き手テスト—信頼性と妥当性の検討—, 心理学研究, Vol. 85, No. 5, pp. 474-481 (2014).
- [13] Spence, C., Pavani, F. and Driver, J.: Spatial constraints on visual-tactile cross-modal distractor congruency effects, *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, Vol. 4, No. 2, pp. 148-169 (2004).