



融合身体を用いた運動における上下半身の 各動作合成比率が行動戦略に与える影響

大原侑祐 1), 後藤拓海 1), 櫻井翔 1), 広田光一 1), 野嶋琢也 1)

Yusuke OHARA, Takumi GOTO, Sho SAKURAI, Koichi HIROTA, and Takuya NOJIMA

1) 電気通信大学 大学院情報理工学研究科情報学専攻 (〒182-0035 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
{ohara_yusuke, goto.takumi, sho, hiroya}@vogue.is.uec.ac.jp, tnojima@nojilab.org)

概要: 複数人の動作データを合成した 1 体の VR 身体 (アバター等) を融合身体と呼ぶ。著者らは、前実験で融合身体を用いたボウリングの投球運動時の上下半身の各合成比率 (融合身体に反映される各ユーザの動作の割合) に基づくユーザの運動制御と身体認知の変化を確認した。加えて、ユーザ間の行動戦略の変化が示唆されたため、本研究では前実験と同様の実験環境を用いた投球運動において合成比率が行動戦略に及ぼす影響を詳細に調査する実験を行った。

キーワード: 融合身体, 行動, 身体認知, スポーツ

1. はじめに

融合身体とは、複数の人がバーチャルリアリティ (VR) 環境で同時に操作可能な身体 (アバター) である。融合身体の動作は、主に各ユーザの寄与率 (融合身体に反映される各ユーザの動作の大きさ) の基盤となる合成比率 (動作の反映割合) により決定される。合成比率は、全身一律ではなく、分割方法 (ユーザ自身もしくは合成した動作を適用する身体部位の分け方) に応じて調整できる。例えば、上半身と下半身[1], 右半身と左半身[2]にそれぞれ異なる合成比率を適用すれば、ユーザ間での部位ごとの動作分担も可能になる。

複数人が同時に操作可能という融合身体の特性をスポーツに活用できれば、スポーツにおけるゲームの展開や結果、さらに、競技のフォーマットやルール設計に介入できる可能性がある。これは、従来のスポーツの前提を覆し、スポーツの定義や価値を革新しうる。

一方、自身だけでなく他者の意図による動作が与えられる融合身体の制御方法は、自身の身体を制御する時と大きく異なる。そのため、合成比率やその適用部位の設計次第で、融合身体の運動のパフォーマンスや、身体所有感や行為主体感のようなユーザ自身の身体感覚は大きく変わる。実際、合成比率が着座状態でのリーチングタスクのパフォーマンスに影響するとの報告がある[3]。これは、スポーツの難しさや楽しさにも影響しうる。

著者らはこれまでに、融合身体を用いて実際の競技に近い全身運動 (ボウリングの投球) を行う時、運動を構成する連立動作を踏まえて適用した部位ごとの合成比率の違

いから身体性 (融合身体の操作を通じて得られる運動パフォーマンスとユーザの運動、身体所有感や行為主体感等の身体感覚、楽しさ等の心理) に生じる影響を調査した。当該調査では、合成比率による身体性の変化を確認した[4]。加えて、自身や融合相手の合成比率に基づき、ペア内で自身の行動プランの共有や相手への行動の要求を行い、ボールを狙った方向へ投球するための行動の選択している様子が観察できた。

当該調査を踏まえ、本研究では、融合身体を用いるユーザが会話により互いの行動意思の共有や相手の行動への要求が可能な状態で、融合身体の制御方法と対象の運動に要する動作の手順の 2 つの側面から、目標の運動を達成するためにどのような行動を選択するのかを行動戦略と定義する。そして、前実験と同様の実験環境、タスクを用いて実験を実施し、融合身体の制御方法を含めた行動戦略に合成比率が与える影響の調査に加えて、前実験で確認された身体性への影響の調査の強化を行う。行動戦略の変化の調査は、融合身体を用いたスポーツの戦略性だけでなく、ルール設計やプレイ方法のガイドラインの作成に大きく関わると考える。

2. 実験

本研究では、上記の目的を達成するため、前実験と同様にボウリングの投球をタスクとした実験を行った。アンケートによって、身体感覚と行動戦略の融合身体の動かし方について評価した。融合身体の制御方法に関するアンケートでは、融合身体に対する各被験者の関与意識の大き

さを比較し、評価した。

2.1 実験環境

2人の被験者が融合身体を用いてボウリングの投球を行うためのシステム環境を構築し、実験に用いた。本システムは、別個の2つの実験室に一式ずつ設置したモーションキャプチャカメラ（各部屋：OptiTrack Prime13×10台、NaturalPoint社）、ヘッドマウントディスプレイ（HMD；HTC VIVE pro eye）、VIVEコントローラ、PC（CPU: AMD Ryzen Thread Ripper 3960X、GPU: NVIDIA GeForce RTX3090、RAM: PC4-25600、128GB）から構成された（図1）。本システムでは、再帰性反射材を取りつけたボディースーツおよびHMDを着用した被験者の動作データをモーションキャプチャシステム（OptiTrack Motive）により計測し、各データを合成して融合身体となる1体のアバタに付加した。コントローラは被験者の利き手に所持してもらい、本環境での計測が難しい手指の細かい動作データの代替として、トリガの操作データに基づく動作合成と投球動作の実行を可能にするために利用した。また、実験用PCにBluetoothで接続した骨伝導イヤホン（OpenMove, Shokz）を通じて被験者間での音声会話が可能になるよう設定した。実験のVR環境には、融合身体の動きを視確可能にするため、レーン上に鏡を設置した。（図2）

2.2 実験方法

本実験では、2人1組の被験者のペアに、融合身体を用いてレーン上の1本のピンに向かって球を投げるタスクを行なってもらった。ボウリングの投球は、腕を振る上半身の動きとステップを踏む下半身の動きに大きく分けられる。そこで本実験では、融合身体の分割方法を上半身分割に決定した。融合身体の合成比率は、上半身、

下半身ともに2人の寄与率の合計が100%となる6条件（以下、合成比率条件）を設定し、各半身における合成比率の組合せに基づく寄与率の差の大小3条件（以下、寄与率条件）を編成した（表1）。全被験者が全合成比率条件を体験するため、タスクは計6試行を実施した。1試行につき投球は5回行なった。1回の投球ごとに、ピンは本来のボウリングでレーン上に配置される10本のピンの位置からランダムに出現させた。球の把持と解放の動作は、各ユーザが用いたコントローラのトリガの押し具合に上半身の合成比率に基づいて重み付けした値により決定された。投球時の球の動きは、融合身体となるアバタの腕の振りの速さと方向によって決定し、回転は与えなかった。タスク中、各ペアはHMDのヘッドフォンを通じた遠隔対話により、投球タイミングなどを自由に相談できた。

本タスクでは、各条件下の運動パフォーマンスの評価指標として球とピンの最短距離（以下、最短距離）および球を放したタイミングの球速を計測した。各タスク終了後は、身体感覚およびスポーツにまつわる心理的影響や融合身体や自身の身体に関する動作意図や実際の動作を評価するためのアンケートを実施した（表2）。行動戦略のうち融合身体の制御方法は、主にアンケート項目Q10、Q11を指標として調査を行った。全実験終了後はボウリングの経験や実験の感想を自由記述で回答させた。

本実験は、18組の被験者ペア（男性ペア13組、女性ペア2組、男女ペア2組、男性・未回答ペア1組、19～29歳、右利き）を対象に、被験者内計画で実施した。

表1：本実験で用いた合成比率の条件

	条件1	条件2	条件3
寄与率の差	大	→	
	1A (1B)	2A (2B)	3A (3B)
上半身	100:0 (0:100)	75:25 (25:75)	50:50 (50:50)
下半身	0:100 (100:0)	25:75 (75:25)	50:50 (50:50)

被験者A：被験者B

表2：タスク終了後アンケート

	質問内容	回答形式
Q1	身体所有感 アバタを自分の身体であると感じたか	7段階リッカート尺度 (1：全く～だった、 7：非常に～だった)
Q2	行為主体感 アバタは自分の思い通りに動かされたか	
Q3	難しさ 投球は難しかったか	
Q4	楽しさ タスクは楽しかったか	
Q5	自分の上半身の動きがどのくらい反映されていると感じたか (%)	0～100の整数で回答
Q6	自分の下半身の動きがどのくらい反映されていると感じたか (%)	
Q7	腕を振りかぶるときに、最も意識した部分はどこか	上半身、下半身、ピン、ボール など選択肢から選択
Q8	腕を振っているときに、最も意識した部分はどこか	
Q9	ボールのリリース時、最も意識した部分はどこか	
融合身体について		
Q10	上半身の動きを融合相手にどのくらい任せようと思いましたか	「全く任せようとしなかった」 「どちらでもない」 「完全に任せようとした」 から選択
Q11	下半身の動きを融合相手にどのくらい任せようと思いましたか	
Q12	上半身は思い通りの動きを成立させることができましたか	「成立させられた」 「成立させられなかった」 「成立させようとしなかった」 から選択
Q13	下半身は思い通りの動きを成立させることができましたか	
自身の身体について		
Q14	上半身は思い通りに動かすことができましたか	「動かせた」 「動かせなかった」 「動かそうとしなかった」 から選択
Q15	下半身は思い通りに動かすことができましたか	
Q16	会話内容について	自由記述

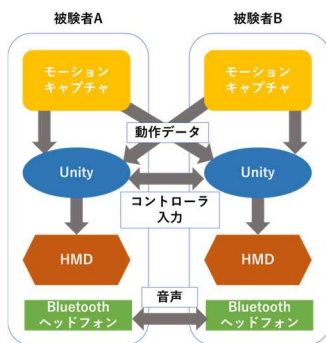


図1：システム構成

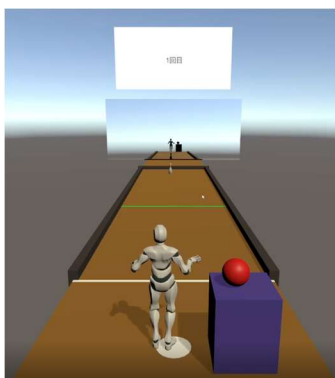


図2：本実験のVR環境

2.3 実験手順

まず各被験者に融合身体を用いず単独での投球を 5 回行ってもらい、単独投球時のアンケート（本稿では、内容を分量上割愛する）を回答させた。次に、各ペアに融合身体を用いて投球練習を行ってもらった。練習では、1 条件ごとに 5 回の投球を行い、全 6 条件をランダムな順番で行った。そして、10 分の休憩を挟んだ後、本番に移行した。本番では、練習と同じく 1 条件 5 回の投球を行い、全 6 条件をランダムな順番で行った、加えて、各条件の 5 回の投球後に、タスク終了後アンケートを回答した。最後に、すべての投球終了後、実験終了後アンケートを回答した。

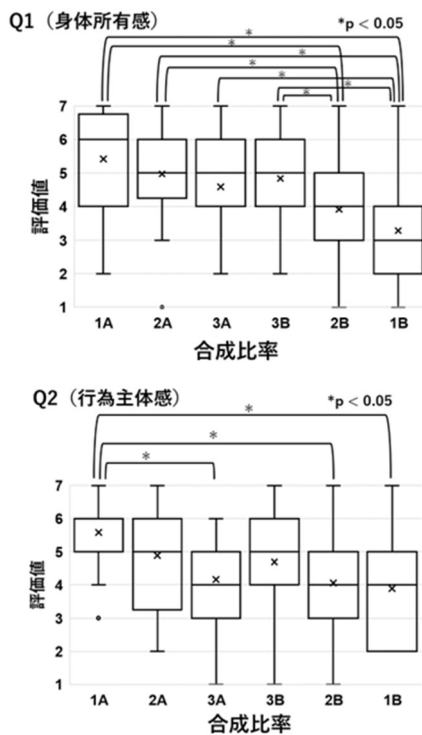


図 3 : Q1(上), Q2(下)のアンケート結果

3. 結果

本稿では、分量上、身体感覚と行動に関する結果のみを記載し、議論を行う。

アンケートについて、Q1, Q2 に対し合成比率を要因とするフリードマン検定およびウィルコクソンの符号付順位と検定による多重比較を行った。なお、2 回行った条件 3 のうち、一回目を 3A, 2 回目を 3B として扱う。結果、Q1, Q2 で合成比率の主効果が認められた (Q1 : $\chi^2=53.1$, $p < 3.26e-10$, Q2 : $\chi^2=32.1$, $p < 5.65e-06$)。また Q1 は条件 1A-2B ($p=0.0011$), 1A-1B ($p < 6.4e-05$), 2A-2B ($p=0.0048$), 2A-1B ($p=0.00054$), 3A-1B ($p=0.0034$), 3B-2B ($p=0.026$), 3B-1B ($p=0.0012$) のそれぞれで評価値に有意差が見られた。Q2 は条件 1A-3A ($p=0.00066$), 1A-2B ($p=0.0012$), 1A-1B ($p=0.00074$) でそれぞれ評価値に有意差が見られた。

(図 3) また、行動に関する項目 (Q10~15) のアンケート結果を図 4 にまとめた。Q10, 11 の回答においては個人の回答に加えて、「全く任せようとしなかった」を A, 「どちらでもない」を B, 「完全に任せようとした」を C としてペアごとの回答の組み合わせをまとめた。

4. 考察

4.1 身体感覚

身体所有感や行為主体感とともに合成比率の主効果が認められた。そのうち、身体所有感は下半身の寄与率の小さい条件 (1B, 2B) の評価値がその他の条件より有意に低かった。加えて、融合身体と自身の身体の上半身の動きに関するアンケート Q12~15 のうち、上半身の動きに関する Q12, 14 の結果で「成立させようとしなかった」、「動かそうとしなかった」という回答が条件 2B で増え、条件 1B では他の選択肢より回答数が上回る結果となった。これらの回答は上半身の寄与率の小さい条件で融合身体や自身の身体への意識が他の条件より小さいことを示唆しており、身体所有感の条件 2B, 1B がその他の条件より評価値

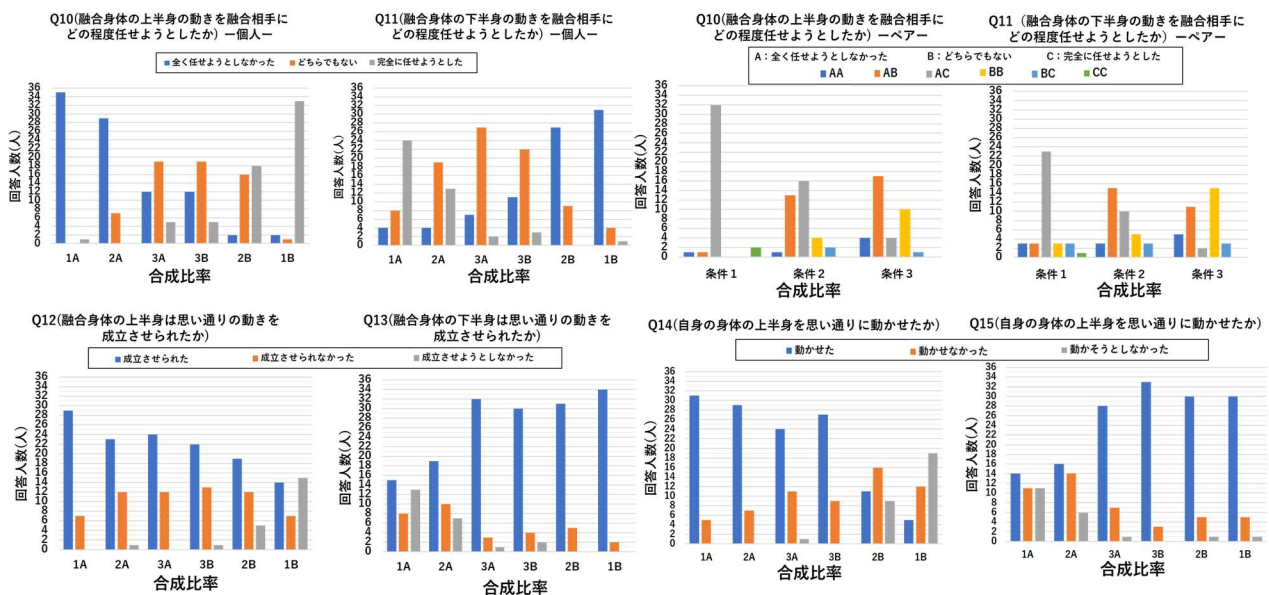


図 4 : Q10~Q15 のアンケート結果

が有意位に小さいという結果に類似している。行為主体感は、上半身の寄与率が100%である条件1Aが条件3A, 2B, 1Bより有意に大きい評価値となった。また、実験終了後の自由記述アンケートでも「上半身を自分で動かしたほうが投球を自分でやっている感じがして楽しい」といった上半身の寄与率の大きさが行為主体感に大きく影響した可能性を示す回答が得られた。

以上から、投球運動における身体感覚は融合身体の腕の動作を決定する上半身の寄与率に起因して変化すると推察される。また、身体所有感は上半身の寄与率に比例して変化するわけではない一方で、行為主体感は上半身の寄与率が大きく、かつ他者の寄与率が限りなく小さく自身の思い通りに動かすことができることで大きくなると考えられる。

4.2 行動戦略

行動戦略と合成比率の関係についてアンケート項目Q10, 11や実験の様子、会話内容などから考察する。

まず融合身体の制御方法についてである。アンケート項目Q10, 11のペアごとの個人回答の組み合わせの結果から、A「全く任せようとしなかった」とC「完全に任せようとした」という組み合わせの回答をしたACのペア数が、各部位の寄与率が完全に別れている条件1で多く、寄与率の差の小さい条件2, 3になるにつれて減っていることがわかる。それに伴い、条件2や3では、B「どちらでもない」を含むABやBBの組み合わせのペアが多くなっている。このことから、寄与率の大きい条件では融合身体の動きを一方に任せようとしたり、片方だけが一方の動きに合わせて様子を観察され、寄与率の差が小さい条件では、どちらかに行動を任せず融合身体を動かすという動作への関与に偏りが小さくなったと言える。実験の映像からも、条件1や2のように寄与率の差の大きい条件で投球時に上半身を一方だけが振っている様子や上半身の寄与率が小さい被験者が寄与率の大きい融合相手に合わせるという意味を伝える会話、そして条件3のように寄与率の小さい条件でお互いの動きが同じになるように相談、調整を行う様子を観察された。加えて、アンケートの各回答の選択理由として、A「全く任せようとしなかった」では「自分の思い通りに動くから」、B「どちらでもない」では「自分の動作に加えて、融合相手の動きが反映されていたから」、C「完全に任せようとした」では「自分の動きが反映されていないと感じた」という理由が多かった。さらに、実験中、全18組中17組が投球前にそれぞれの各部位の寄与率の大きさを確認し、推測した寄与率の大きさをもとに、融合身体の制御方法の相談を行っていた。以上の結果および被験者の行動は、合成比率が融合身体の制御方法を変化させる要因である強い可能性を示している。ペア間での明確な会話はなかったものの、上半身の寄与率の小さい被験者の腕の振りが条件3のような寄与率に差が小さい条件時の腕の振りより小さくなっている様子も確認できた。こうした行動の様子から、ある部位の動作に対する自身の寄与

率が小さいと感じた場合、寄与率の大きい相手の動作に合わせてやる意思が生じることが予想される。

投球の動作手順については、実験の映像から、全18組中17組がボールを持ってから投げるまでの一連の投球動作を実験を通して同じ手順で行っており、合成比率に基づいて変更する様子は確認されなかった。観察された投球動作は、主に2つである。1つ目は、実際のボウリングの投球のように投球前の初期位置である白い円から左右のみの位置の調整を行った後、ステップを踏んで投球を行う手順であり、全18組中11組がこの投球手順を踏んでいた。2つ目は、まず白い円から移動可能な白線まで移動し、立ち止まって投球を行う手順であり、7組が行っていた。2つ目の手順を選択する理由として、融合身体を動かすことに慣れていないために、全身運動を構成する動作を分解して1つずつ実行していくことを選択したと考えられる。これらのことから、本実験で対象とした投球運動においては、合成比率は対象の運動の手順を変化させる要因とはならなかったと考えられる。

5. まとめ

本研究では、融合身体の上下半身ごとに適用した合成比率が融合身体を用いてボウリングの投球タスクを行なうユーザの行動戦略に与える影響を調査した。その結果、ユーザは寄与率の差によって融合身体の制御方法を変化させている一方で、実験を通して投球方法の選択には変化させていないことが観察された。このことから、合成比率は融合身体の制御方法に影響を与え、対象の運動の方法に与える影響は小さいことが示唆された。

しかし、融合身体の合成比率や分割方法の設計、対象の運動を変えた場合、本実験と同様の影響が生じるとは限らない。今後は、多種多様な競技のルールや運動の特性、融合身体の動作設計からスポーツにおけるユーザの身体性や行動に生じる多角的な影響を継続的に調査する。

謝辞 本研究はJSPS 科研費番号JP19H05661の支援を受けて行われた。また、本研究は電気通信大学の倫理審査委員会の承認（倫理審査番 22082号）を受けて実施した。

参考文献

- [1] 藤澤ら, 共有身体における身体所有感覚と行為主体感. 第23回VRSJ大会論文集, 33E-5, 2018.
- [2] H. Harin, et al. 左右身体の統合による共有身体身体性. 第25回VRSJ大会論文集, 3C3-4, 2020.
- [3] T. Hagiwara, et. al. "Shared Body by Action Integration of Two Persons: Body Ownership, Sense of Agency and Task Performance," IEEE VR'19, pp.954-955, 2019.
- [4] 大原ら, 融合身体を用いた全身運動における上下半身ごとの動作合成比率が身体性に与える影響. 第27回VRSJ大会論文集, 1C3-5, 2022.