



融合身体における二者間の相互作用 -呼吸特性の分析-

廣田和輝¹⁾, 森田磨里絵²⁾, 柴田史久¹⁾, 木村朝子¹⁾, 北川智利^{3,4)},

1) 立命館大学大学院 情報理工学研究科 (〒 567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150)

2) 立命館大学 情報理工学部 (〒 567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150))

3) 吉賀心理学研究所 (〒 699-5502 島根県鹿足郡吉賀町田野原 107)

4) 立命館大学 BKC 社系研究機構 (〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1 丁目 1-1)

概要: VR 空間で複数人が一つの仮想身体 (アバタ) を共同で操作することを融合身体という. 本研究では, 二者が融合し身体動作を行う際の呼吸特性について調査した. 実験では, VR 空間に表示されるターゲットにアバタの手で触れるリーチングタスクを, 一人でまたは他者と融合して実施し, その際の各参加者の呼吸波形を計測した. その結果, 二者間の呼吸波形は, 一人でアバタを操作するよりも融合して操作した時の方が類似することを示した.

キーワード: 融合身体, 共同行為, 呼吸

1. はじめに

近年, VR 技術の発達に伴い, 複数人が一つの仮想身体 (アバタ) を共同で操作する融合身体 [1] という技術が開発されている (図 1). 融合を実現する方法として, 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方法がある. この方法で他者と共同でアバタを操作すると, 一人でアバタを操作した場合よりも身体動作の学習効率が向上することが報告されている [2]. しかし, どのような要素が融合身体下での身体動作や学習の効率化を引き起こすのか, また, 他者と融合することが各個人の生理学的機能に対してどのような作用をもたらすのかについては未だ不明点が多い.

先行研究では, 二者が融合して動作を行った際に, 二者間の心拍波形が同期するかどうかについて調査が行われた [3]. 実験では, VR 空間においてアバタの左右で異なる軌道を描く 2 つのボールを, アバタの左右の手でそれぞれ追跡する課題を, 他者と融合する場合と自分一人で行う場合とで行われた. その結果, 他者と融合して動作タスクを行っても, 二者間の心拍波形は, 二者がそれぞれ独立に動作タスクを行ったとき以上に同期することは確認されなかった. 二者間の心拍波形が同期しなかった原因の一つとして, 心臓の拍動が自律神経により制御されていることが挙げられる. 自律神経系による支配を受ける活動を意識的に制御することは困難であるため, 他者と融合しても心拍は同期しなかった可能性が考えられる.

そこで本研究では, 呼吸に着目し, 融合身体が二者間の呼吸に及ぼす影響について検証を行うことを目的とする. 呼吸は, 自律神経の影響を受けながらも意識的に制御可能であるという特徴を持つ. このため, 心拍とは異なり, 融合身体を用いることで二者間の呼吸が同期する可能性が考えら

れる. 本研究では, 二者が融合して動作を行う条件と, 融合せずそれぞれが一人で動作を行う条件を設定し, 動作中の呼吸波形の測定・比較を行う.

2. 方法

2.1 参加者

立命館大学に所属する学生 36 名 (二人一組で参加したため 18 組) が実験に参加した (男性 19 名, 女性 17 名, 平均 21.19 歳). タスク前アンケートにて, VR 体験が「1 度もない」と回答したのは 5 名, 「過去に何度かある」と回答したのは 30 名, 「頻繁にある」と回答したのは 1 名であった.

2.2 実験環境

融合身体システムは, 各参加者に割り当てた 1 台のヘッドマウントディスプレイ (HMD, Meta Quest2) と 2 台のコントローラ, 1 台の呼吸計測装置, 1 台のコンピュータ (PC) から構成されていた. 各参加者に割り当てた PC を有線で接続し, 各参加者の持つコントローラの位置座標をスイッチングハブを通して PC 間で送受信することで, 二人の参加者のリアルタイムな融合を実現した.

本実験で使用したアバタの身長は約 175 cm, 腕の長さは

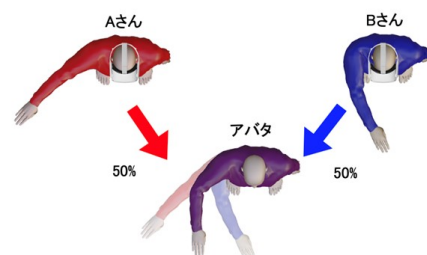


図 1: 融合身体のイメージ

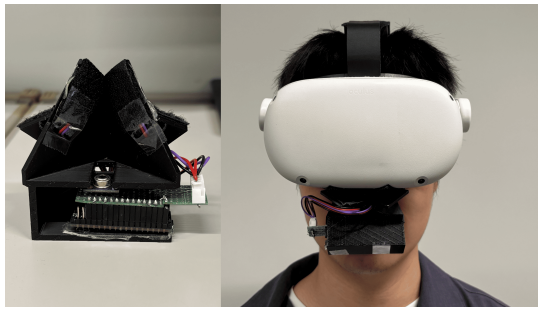


図 2: (左) 制作した呼吸計測デバイス。 (右) 呼吸計測デバイスを HMD に取り付けた様子。



図 3: 融合条件での実験の様子。 (左) 実空間で参加者がリーチングを行う様子。 (右) 各参加者が観察した VR 空間の様子。

約 70 cm であった。リーチングタスクに用いるターゲットは、1 辺の長さが 5 cm の赤色の立方体とした。また、ターゲットはアバタの肩の位置から水平方向に $\pm 70^\circ$ 、垂直方向に $\pm 45^\circ$ かつ、半径 35 cm から半径 65 cm の間に提示した。ターゲットは、この範囲内であらかじめ設定した 10 箇所の座標からランダムな順番で提示した。

2.3 呼吸計測デバイス

呼吸を測定する際には、呼吸バンドセンサをユーザに装着するのが一般的である。しかし、本研究では身体動作を伴うタスクを実施する関係上、身体動作による胸囲の変化が生じてしまうため、呼吸バンドセンサでは測定不能である。そこで、稲澤らが提案する HMD に取り付け可能な呼吸波形計測デバイスを用いて、動作中の呼吸を測定した。本デバイスは、鼻孔を通過する呼気の温度差（息を吐いた時の温かい空気と、息を吸うときに冷やされる周囲の空気の温度変化）を利用して呼吸波形を測定することができる。手を動かすなど比較的小さな動作の際には、呼吸バンドセンサの代替が十分可能であることが示されている [4]。

赤外線温度センサ（GY-906）、とそれを制御するマイクロコンピュータ（Arduino Micro）を用いて、呼吸波形計測デバイスを作成した。温度センサを Arduino Micro に接続し、それらを 3D プリントを用いて作成した筐体内側（鼻側）に配置した。温度のサンプリング周波数は 60 Hz として呼気の温度を測定した。作成したデバイスの計量は 48.0 g であり、全長は 70.0 mm であった。デバイスと HMD に面ファスナーを貼り、デバイスを HMD を鼻部に取り付けた。作成した呼吸計測デバイスを図 2 に示す。

2.4 実験条件

本実験ではアバタの操作方法として、ソロ条件と融合条件の二条件を設定した（図 3）。ソロ条件では、他者と融合することなく、参加者自身の動作のみをアバタに反映させた（融合割合 100%）。融合条件では、参加者自身の動作ともう一人の参加者の動作を平均した動作をアバタに反映させた（融合割合 50%）。

2.5 実験手順

参加者は、呼吸計測デバイスが取り付けられた HMD とコントローラを装着し、両手を机の上に置いた状態で実験に参加した。実験タスクの実施中は、各参加者は口に医療用テープを装着した。医療用テープは、鼻呼吸を促す目的で用いた。各試行では、参加者はソロ条件または融合条件のどちらか一つの条件で VR 空間内に提示されるターゲットにアバタの右手で触れるリーチングタスクを行った後、リーチングタスク中の行為主体感と身体所有感を測定した。

参加者には、VR 空間に出現したターゲットに、アバタの右手人差し指で触れる動作を繰り返すよう求めた。ターゲットはアバタの右手が触れると消滅し、3 秒後に再びランダムな位置に提示された。ターゲットが出現していない時は、参加者には手を VR 空間内に配置した机上の所定の位置に置いておくように指示した。リーチングタスクは、各試行で 2 分 30 秒間を行わせた。呼吸計測デバイスにて、リーチングタスク実施中の各参加者の呼吸波形を記録した。実際に測定した 30 秒間の呼吸波形を図 5 に示す。その後、リーチングタスク中の行為主体感および身体所有感に関する質問に回答させた。行為主体感は「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」、身体所有感は「どの程度あな

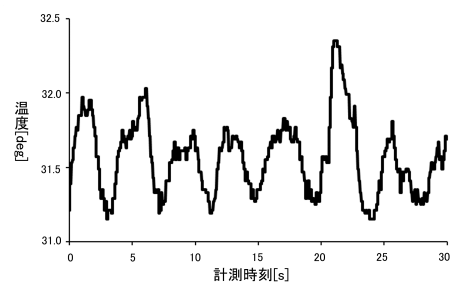


図 4: ある参加者の呼吸波形の実測値

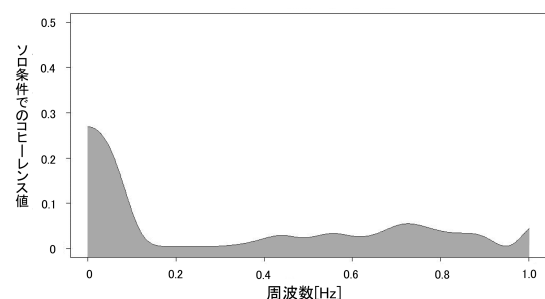


図 5: ある参加者のソロ条件でのコヒーレンス値の関数。分析では、各参加者の条件ごとにグレーで示す範囲の面積を求めた。

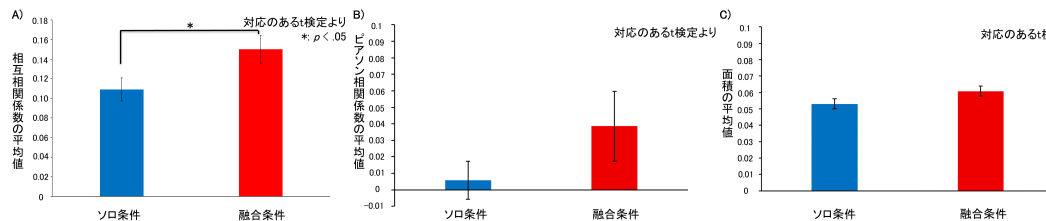


図 6: 呼吸波形に関する結果. A) 相互相関係数の平均値 B) ピアソン相関係数の平均値 C) コヒーレンス値に基づき求めた面積の平均値. エラーバーは標準誤差を表す.

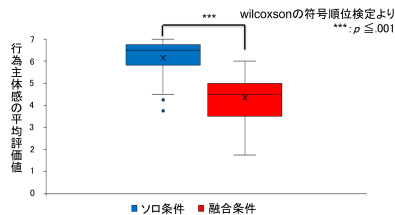


図 7: 行為主体感の平均値. エラーバーは標準誤差を表す.

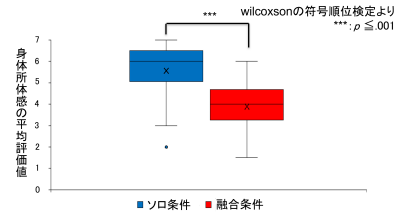


図 8: 身体所有感の平均値. エラーバーは標準誤差を表す.

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」という質問であった。各質問に対して「全くそうは思わない」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させた。参加者は、各条件を4試行ずつ、合計で8試行行った。各条件での試行は4試行続けて実施し、ソロ条件と融合条件のどちらを先に実施するかについてはカウンターバランスをとった。試行間では約2分間の休息を設けた。

3. 結果

リーチングタスク実施時に計測した各参加者の呼吸波形と、リーチングタスク実施後の行為主体感および身体所有感を分析した。得られた呼吸波形に対して、FIR フィルタ（移動平均フィルタ）を適用したうえでトレンド処理を行い、呼吸測定時のノイズと呼吸計測デバイス自体の発熱による温度上昇の影響を取り除いた。呼吸波形の振幅は、各実験参加者の呼気の温度やデバイスの装着位置等による影響を受ける。そのため、ノイズを除去した呼吸波形を、温度値の平均が0、標準偏差が1となるよう正規化した。

融合中の二者間の呼吸特性を調べるため、ソロ条件と融合条件の別に、一試行（2分30秒間）における二者の呼吸波形の相互相関係数とピアソン相関係数を求めるとともに、コヒーレンス解析を行った。相互相関係数は、値が高いほど各試行での二者の呼吸波形が類似していることを表す。ピアソン相関係数は、値が高いほど各試行での二者での呼吸の吸う吐くの切り替わるタイミングが類似していることを表す。コヒーレンス解析では、自発的な呼吸変化の特徴が反映されるとされている0~1.0 Hz帯を対象に、二者の呼吸波形の周波数毎の周波数分布の類似性（コヒーレンス値）を求めた。0.0017 Hz 間隔で求めたコヒーレンス値を積分し面積を求めた（図5）。面積が大きいほど、二者の呼吸波形

の周波数分布が類似していることを表す。

各条件における、相互相関係数の平均値、ピアソン相関係数の平均値、コヒーレンス値に基づく面積の平均値を図6に示す。相互相関係数に対して対応のあるt検定を行った結果、ソロ条件よりも融合条件の方が相互相関係数は有意に高かった（ $t(17) = 2.12, p < .05$ ）。このことは、融合身体を用いることで、融合する二者の呼吸波形が類似することを示している。ピアソン相関係数に対して対応のあるt検定を行ったところ、ソロ条件と融合条件の間では有意な差は確認できなかった（ $t(17) = -1.078, p = 0.3$ ）。このことは、融合身体を用いても呼気相と吸気相が切り替わるタイミングが二者で類似することはないことを示す。コヒーレンス値に基づき求めた面積に対して対応のあるt検定を行った結果、ソロ条件と融合条件の間では有意な差は確認できなかった（ $t(17) = -1.731, p = 0.101$ ）。このことは、融合した際の二者の呼吸波形の周波数分布は類似しない可能性を示している。

行為主体感と身体所有感の平均評価値を図7に示す。行為主体感について wilcoxon の符号順位検定を行った結果、ソロ条件の方が融合条件よりも平均評価値は有意に高かった（ $z = 5.32, p < .001, r = .89$ ）。身体所有感の平均評価値に対し wilcoxon の符号順位検定を行った結果、ソロ条件の方が融合条件よりも平均評価値は有意に高かった（ $z = 5.29, p < .001, r = .88$ ）。融合身体を用いると、タスク実施中の行為主体感と身体所有感がソロで実施するときよりも低下するという、先行研究 [1] の結果と同様の結果が確認された。先行研究と同様に、本研究においても、融合すると自身の意図通りにアバタが動かなかったため行為主体感と身体所有感が低下したと考えられる。

4. 考察

本研究では、融合身体が二者間の呼吸に及ぼす影響について検証した。実験では、二人の参加者に融合条件とソロ条件でリーチングタスクを行わせ、その際の呼吸波形を記録・分析した。

二者の呼吸に関して、それぞれの条件で相互相関係数を比較し分析した結果、ソロ条件と比較して融合条件の方が有意に相互相関係数が高いことが分かった。これは、融合身体を用いることで融合した二者の呼吸波形は類似することを示している。これは呼吸が心拍と比較して自律神経による影響が小さく、意識的に制御可能であることが要因である可能性と考えられる。

さらに、呼吸波形を構成する要素のうちどの要素が類似しているのかについて検討するため、二者の呼吸波形の位相および周波数分布の類似性を評価した。呼吸波形の位相に関して、各条件での二者の呼吸波形のピアソン相関係数を算出したところ、条件間でピアソン相関係数に有意な差は確認できなかった。この結果は、融合身体を用いても、呼気相と吸気相が切り替わるタイミングが二者で類似しないことを示していると考えられる。呼吸波形の周波数分布については、各条件で0~1.0 Hzの範囲での周波数毎のコヒーレンス値の関数を求めたうえでそれらの面積を算出した。その結果、各条件で有意な差は確認できなかった。この結果は、呼吸波形の周波数帯も他者との融合により類似しない可能性を示している。本実験では、融合身体を用いることで二者の呼吸波形が類似することが示された。しかし、類似した呼吸波形を構成する要素のうち、どの要素が類似するのかについて特定できなかった。本研究では、一試行（2分30秒間）全体の呼吸波形を対象に分析を行った。そのため、ターゲットに触れるために手を動かしている時だけでなく、次のターゲットが出現するまで手を机上に置いている時の呼吸も計測されている。タスク中に身体を動かしている間は呼吸特性が類似する一方で、手を動かしていない間は類似しない可能性も考えられる。ターゲットが出現してから触れるまでの時間とターゲットに触れてから次のターゲットが出現するまでの時間に分けるなどして同様の分析を行うことで、二者の呼吸のどの要素が類似するかについて詳しく検討する必要がある。また、本研究で行ったコヒーレンス解析では、自発的な呼吸変化の特徴が表れるとされる0から1.0 Hz帯を対象としてコヒーレンス値と面積を求めた。当該周波数帯は、ゆっくりとした呼吸に対応して表れる0~0.15 Hzの低周波数帯域、成人の安静時での周波数主成分である0.15~0.4 Hzの高周波数帯域、動作を行うことで生じる荒い呼吸に対応する0.4~1.0 Hzのより高い周波数帯域の三種類の周波数帯に分けることができる[5]。周波

数帯域ごとに二者の呼吸波の周波数分布を詳細に分析することによって、融合による呼吸波形の類似に関わる要素が明らかにできる可能性がある。

本実験の融合条件では、参加者は二人とも同じアバタの動作を観察しながら腕の動作を行っていた。一方で、ソロ条件では二人の参加者が別々に課題を実施していたため各参加者が観察していたアバタの動きは異なっていた。他者と融合せずとも、同じ動きをするアバタを観察することで呼吸波形が類似する可能性も考えられる。今後の研究では、融合身体下での呼吸の類似が生じる要因についても検討していく必要がある。

謝辞 呼吸波形デバイスの作成にあたり、東京大学大学院新領域創成科学研究科 伴祐樹特任准教授からご助言をいただきましたことに感謝申し上げます。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] 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*, 27(10), 4023-4038.
- [2] Kodama, D., Mizuho, T., Hatada, Y., Narumi, T., & Hirose, M. (2023). Effects of Collaborative Training Using Virtual Co-embodiment on Motor Skill Learning. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 29(5), 2304-2314.
- [3] Cedillo, R., Hapuarachchi, H., & Kitazaki, M. (2024). バーチャル共有身体での手位置追跡課題における心拍同期の研究. 第29回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 3D1-12
- [4] 稲澤 将太, 伴 祐樹 (2019). VR 体験中の人の覚醒度推定のための生体情報計測 Head Mounted Display の開発. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 24(4), 377-388. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(10), 4023-4038.
- [5] Penttilä, J., Helminen, A., Jartti, T., Kuusela, T., Huikuri, H.V., Tulppo, M.P., Scheinin, H., & Standertskjöld-Nordenstam, C.G. (2001). Time domain, geometrical and frequency domain analysis of cardiac vagal outflow: Effects of various respiratory patterns. *Clinical Physiology*, 21(3), 365-376.