



身体融合時の動的な寄与率制御による行為主体感向上

児玉大樹¹⁾, 瑞穂嵩人¹⁾, 畑田裕二¹⁾, 鳴海拓志¹⁾, 廣瀬通孝¹⁾

1) 東京大学 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, d.kodama,takato,hatada,narumi,hirose,@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: 身体スキルの定着には強い行為主体感を伴う練習が必要とされる。二者の動作の加重平均をアバタに反映させる融合身体は、教師の視点から動作を理解しつつ行為主体感を得られる学習方法として注目されている。本研究では、融合時の寄与率が低いユーザでも強い行為主体感を得ることを目指し、寄与率の動的制御を提案する。実験の結果、寄与率の高い状態から徐々に下げる動的制御を行った場合、最初から寄与率が低い場合より高い行為主体感が得られた。

キーワード: 行為主体感, 身体共有, 身体スキル

1. はじめに

近年、自ら主体的に動いているという感覚である行為主体感を失うことなく、教師の正しい動作を一人称視点から学習する新たな手法として融合身体を活用した身体運動学習 [1] が注目されている。融合身体とは、VR 空間で複数のエージェントの動作が一つのアバタに反映されるシステムのことである [2]。本研究では、融合身体の中でも特に、学習者と教師の動作の加重平均をアバタに反映する手法である加重平均型融合身体を扱い、以下ではこれを単に融合身体と呼ぶ。また、融合身体において、ユーザの動作がアバタに反映された割合をユーザの寄与率と呼ぶこととする。融合身体を用いることで、身体の動きが自身ではなく他者によって引き起こされていても、ユーザはその動きを自身が制御できていると感じやすくなる [2]。融合身体を用いて、他者である教師が引き起こした動作に強い行為主体感を生起させることができれば、身体図式の更新が起り、身体運動学習の効率を高められることが期待される。強い行為主体感を生起させるためには学習者の寄与率を高めればよい [2] が、それと引き換えに教師の寄与率は減少するため、教師から学習者への正しい運動意図の伝達が困難になってしまう可能性がある。先行研究では、学習者と教師の寄与率が 50% ずつに設定された融合身体を用いて身体運動スキルを伝達する試みが行われたが、この条件では学習効率は向上していない。伊東らは、その原因として寄与率 50% では行為主体感が弱かった可能性を指摘している [1]。

そこで本研究では、寄与率の低い状態でも強い行為主体感を生起させることを目的とする。一般に、行為主体感は結果の予測と実際の感覚フィードバックを比較し整合性が取れた際に生じると考えられている [3]。これを拡張した The two-step account of agency モデル [4] では、行為主体感は信念や文脈も考慮した事後的推論の影響も受けると説明されている。そこで本研究では信念や文脈の影響に着目し、ユーザの寄与率が高い状態から徐々に寄与率を下げる動的制御を行うことで、寄与率が高い時間帯があったという信念や文脈を生じさせ、その後の行為主体感が向上するか検証した。

2. 関連研究

2.1 融合身体

融合身体とは、複数のエージェントの動作が一つのアバタに反映されるシステムのことである [2]。Fribourg ら [2] は、融合身体においてユーザの寄与率が高い時や、運動の予測可能性が高い時に自身がアバタの動きを制御できているとより強く感じることを示した。

伊東らは融合身体を用いた身体スキル伝達の効率化に関する研究を行った [1]。伊東らは音楽ゲームを模した課題を制作し、参加者に学習を行わせた後の上達度をスキル伝達度として比較実験を行った。融合条件として教師と学習者の動きが 50% ずつ反映される融合身体を用いたが、教師動作を三人称視点および一人称視点から模倣することで学習した条件との間に有意な差は見られず、その原因の一つとして融合条件において行為主体感が弱かった可能性を挙げている。この指摘を考慮すると、融合身体を用いた身体スキル伝達の効率化のためには、学習者の行為主体感を向上させる必要がある。融合身体におけるユーザの寄与率や運動の予測可能性を操作することで学習者の行為主体感を向上させることができれば、身体スキルの効率的な伝達につながると期待できる。

2.2 行為主体感

行為主体感とは、「行為を引き起こしているのは自分だ」という感覚のことである [3]。行為主体感のメカニズムを説明するものとして広く支持されている The comparator model では、行為主体感は次のように生起するとされる [3]。新しい運動命令が生成されると、脳内で運動後に与えられる知覚に関する予測が作られる。運動後、実際にフィードバックとして返ってきた知覚と脳内での知覚予測が比較される。知覚とその予測が一致した場合には、運動の原因は自分自身にあると認識され、行為主体感が生起する。

しかし、反例も少なくないことが指摘されている [4]。そこで、The comparator model の拡張モデルとして、The two-step account of agency model [4] が提唱された。このモデルでは、行為主体感が生起する仕組みは Feeling of Agency と

Judgment of Agency の二段階に分類される。まず、Feeling of Agency では結果の予測と実際の知覚フィードバックが比較される。この時に情報間に整合性があれば行為主体感が生起する。不一致がある場合、信念や文脈などを考慮した事後的推論の処理がなされ、外在的手掛かりと矛盾が生じなかった際に Judgment of Agency としての行為主体感が生起される。本実験ではこの Judgment of Agency に着目し、ユーザに自身の寄与率が高かったという信念や文脈を与えることで行為主体感の向上を図る。

3. 実験

実験参加者は導入タスク、メインタスクを連続して行い、アンケートを用いてメインタスクにおける行為主体感および身体所有感を評価した。導入タスクにおける融合身体への寄与率を高くすることで寄与率が高い時間帯があったという信念や文脈を生じさせ、その信念や文脈がメインタスクにおける行為主体感および身体所有感を向上させるか検証を行った。

3.1 実験参加者

実験は24名(右利き男性24名, 20-25歳, 平均年齢22.7歳)の大学生・大学院生を対象に行った。参加者のVR空間に没入する経験に関して、数回程度である者が17名, 日常的にVR体験をしており十分な経験がある者が7名であった。

3.2 融合身体構成法

Fribourgら[2]の融合身体構成法とは異なり, 本研究ではタスクを完遂した際の動きを記録したログを準備し, そのログと融合した。これは, 実験試行間での融合相手の振る舞いを統制するためである。しかし, 参加者には融合相手が眼前の実験実施者であると伝えられ, 実験実施者は実験試行中はHMDを被り融合相手であるかのように装った。これは, 共同作業の相手が人だと思えるか機械的な軌跡だと思えるかの違いが行為主体感に影響を与える可能性を考慮したためである[5]。

以下, 具体的な融合身体の計算方法をVR環境内の絶対座標系で説明する。計算方法に関しては伊東らの融合身体[1]を参考にした。参加者の手の位置ベクトルを x_{real} , 融合相手となる実験実施者の動作ログにおける手の位置ベクトルを x_{tra} , 参加者の寄与率を ω ($0 \leq \omega \leq 1$) と置くと, 融合身体アバタの手の位置ベクトル x_{fusion} は

$$x_{fusion} = \omega x_{real} + (1 - \omega)x_{tra} \quad (0 \leq \omega \leq 1) \quad (1)$$

と計算できる。同様にして, 参加者の手の姿勢を表すクォータニオンを q_{real} , 融合相手である実験実施者の動作軌跡における手の姿勢を表すクォータニオンを q_{tra} とすると, 融合身体アバタの右手の姿勢を表すクォータニオン q_{fusion} は

$$q_{fusion} = \omega q_{real} + (1 - \omega)q_{tra} \quad (0 \leq \omega \leq 1) \quad (2)$$

と計算できる。

3.3 実験タスク

本実験では棒をコースフレームや動く障害物に当たらないようにスタート地点からゴール地点まで持ち運ぶライ

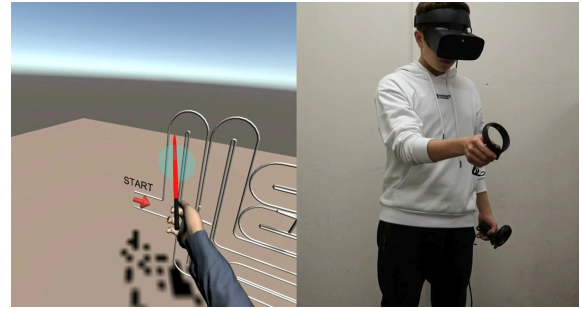


図1: イライラ棒タスクの様子。参加者は棒をコースフレームや動く障害物にぶつからないようにゴールまで動かす。

ラ棒タスクを使用した。イライラ棒タスクを行っている様子を図1に示す。コースは2種類用意され, 一つは導入タスクに, もう一つはメインタスクに使用された。導入タスクにおけるゴール位置とメインタスクにおけるスタート位置は同じで, 参加者は連続して二つのタスクを行うことができた。

3.4 実験条件

本研究では, 導入タスクにおける寄与率の制御方法(2条件; Static, Dynamic) × メインタスクの寄与率(4条件; 0%, 25%, 50%, 75%)の計8条件に。融合しない状態でタスクを行った Static100条件を加えた全9条件を用いて参加者内配置で実験を行った。導入タスクでの寄与率の制御方法に関して,

- Static 条件
参加者の寄与率は常にメインタスクでの寄与率と同じで, 動的制御を行わなかった。
- Dynamic 条件
参加者は自身の寄与率が100%で導入タスクを始め, 導入タスク終了時にメインタスクでの寄与率になるよう線形減少する動的制御を行った

の2条件を設定した。メインタスクではどの条件においても寄与率は一定であり, 導入タスクにおける寄与率の動的制御の影響がメインタスクでの行為主体感に表れるか検証した。メインタスクにおける参加者の寄与率に関して, Fribourgら[2]の実験をもとに0%, 25%, 50%, 75%の4条件を設定した。

図2に, メインタスクにおける参加者の寄与率が25%である条件のうち, 動的制御を行わない Static25条件と動的制御を行う Dynamic25条件における寄与率変化の概略図を例として示す。アンケートはメインタスクについて回答させたため, Static25条件と Dynamic25条件において参加者は寄与率が25%である同じ体験に関して行為主体感および身体所有感を評価したことになる。

3.5 実験手順

実験参加者は研究内容や個人情報保護に関する説明を受け, 実験参加同意書への署名を行った。次に, 実験参加者は融合身体と実験タスクに関する説明を受けた。次に, Static100条件を練習として二回行った後, 行為主体感と身体所有感

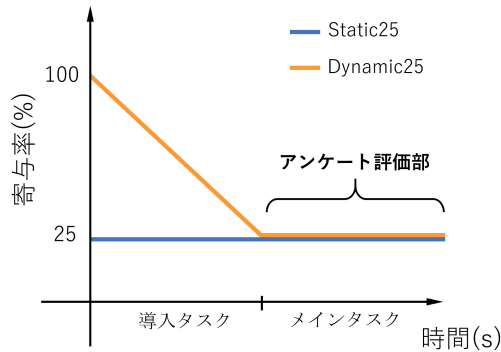


図 2: Static25 条件, Dynamic25 条件における参加者の寄与率の制御方法.

に関するアンケートに回答した。その後、実験条件 8 条件をラテン方格法を用いて条件間でカウンタバランスを取りながら行い、各試行後にはアンケートに回答した。

3.6 評価方法

メインタスクにおける行為主体感と身体所有感を 7 段階リッカート尺度 (1:全くそう思わない~7:とてもそう思う) を用いて評価を行った。アンケート内容は Fribourg ら [2] の実験で用いられた質問紙を著者が和訳したものをを用いた。アンケートには 7 段階のうち 7 が最も強い行為主体感 (身体所有感) を示す項目と、1 が最も強い行為主体感 (身体所有感) を示す対照項目があった。対照項目の回答は反転 (=8 - 回答値) し、7 が最も高い評価となるように処理したのち、平均値を使用した。質問内容を表 3.6 に示す。Q1-Q7 は行為主体感に関する質問、Q8-Q11 は身体所有感に関する質問となっている。対照項目は数字に下線が引かれている。

3.7 実験仮説

Fribourg ら [2] によると、参加者の寄与率が高くなるとユーザはアバタの動きを制御できているとより強く感じる。この時に行為主体感も強くなると考え、

仮説 1: 参加者の寄与率が高くなる条件において、行為主体感も強くなる

という仮説を立てた。また、The two-step account of agency モデルに従い、参加者の寄与率が高い状態から徐々に寄与率を下げる動的制御を行うことで、寄与率が高い時間帯があったという信念や文脈が生じ、その後の行為主体感が向上するのではないかと考えられる。これに従い

仮説 2: Dynamic 条件の方が、Static 条件よりも行為主体感が強くなる

という仮説を立てた。

4. 結果

図 3 に行為主体感のアンケート結果を、図 4 に身体所有感のアンケート結果を示す。リッカート尺度は順序尺度であるため、それぞれのデータに整列ランク変換 (Aligned Rank Transform) を適用したのちに、2 要因参加者内分散分析を行った。なお、有意水準は $p < 0.05$ および $p < 0.01$ とした。

表 1: 行為主体感および身体所有感に関するアンケート内容

Q	質問内容
1	アバタの手は、まるで自分の意思に従うかのように、思い通りに動いた
2	自分がアバタの動きをコントロールしているように感じた
3	アバタが自分の意思をコントロールしているように感じた
4	アバタが自分の動きをコントロールしているように感じた
5	アバタが意思を持っているように感じた
6	自分が見ている動きは自分によって引き起こされたものだと感じた
7	自分の手を見ているように感じた
8	自分がアバタの動きをコントロールしているように感じた
9	アバタの手が自分の手のように感じた
10	現実の自分の手がなくなったように感じた
11	アバタの腕が他の誰かの身体から生えているように感じた

行為主体感に関して、メインタスクにおける寄与率の主効果が有意であり、($F(3, 69) = 96.1, p < .01, \eta_p^2 = 0.80$)、制御方法による主効果も有意であった ($F(1, 23) = 5.40, p < .05, \eta_p^2 = 0.19$)。寄与率と制御方法の交互作用は有意でなかった ($F(3, 69) = 1.63, p = 0.19, \eta_p^2 = 0.07$)。寄与率による主効果が有意であったため、Holm 法による多重比較を行った。結果、すべての条件間で有意差 ($p < .01$) が見られた。

身体所有感に関して、メインタスクにおける寄与率による主効果が有意であったが ($F(1, 68) = 31.3, p < .01, \eta_p^2 = 0.58$)、制御方法による主効果は有意でなかった ($F(1, 23) = 3.76, p = 0.06, \eta_p^2 = 0.14$)。寄与率と制御方法の交互作用は有意でなかった ($F(1, 69) = 2.39, p = 0.08, \eta_p^2 = 0.09$)。寄与率による主効果が有意であったため、Holm 法による多重比較を行った。結果、すべての条件間で有意差 ($p < .05$) が見られた。

5. 考察

参加者の寄与率が高くなると行為主体感も有意に強くなり、仮説 1 を支持する結果であった。Farrer らにより、自身の実際の動きとその視覚的フィードバックがどの差が少ないほど行為主体感が向上することが報告されている [6]。よって、参加者の寄与率が高い条件において融合身体アバタの手の動きの視覚的フィードバックと参加者の実際の手の動きとの差が少なくなったことで行為主体感が強くなったと考えられる。また、Static 条件より Dynamic 条件の方が行為

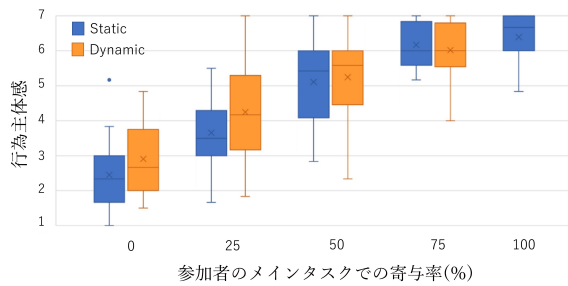


図 3: 行為主体感の箱ひげ図。縦軸に行為主体感, 横軸に参加者の寄与率 (%) を示す。

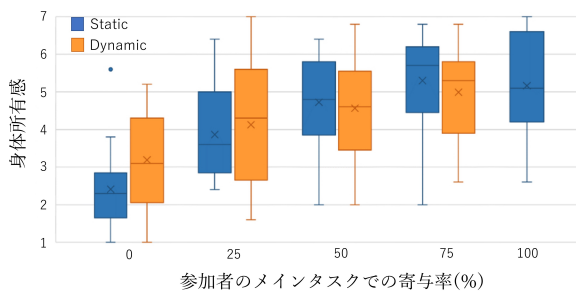


図 4: 身体所有感の箱ひげ図。縦軸に身体所有感, 横軸に参加者の寄与率 (%) を示す。

主体感が有意に高くなり, 仮説 2 を支持する結果となった。この理由として, 導入タスクで寄与率が高い状態を経験したことが重要であったのか, それとも導入タスクで寄与率が高い状態を経験しさらにそこから連続的に寄与率が変化したことも重要であったのかは明らかにすることができない。検証のためには, 例えば, 融合割合を連続的に変化させる線形制御条件に加えて, 融合割合をステップ状に変化させるステップ条件での行為主体感も合わせて検討する実験が考えられる。本研究では線形制御を用いたが, さらなる行為主体感向上のための他の動的制御手法として非線形制御を用いることも考えられる。例えば, ウェーバー・フェヒナーの法則により, 人間の感覚強度は刺激強度の大きさの対数に比例していることがわかっているため, 指数関数的に融合割合を変化させた際の行為主体感を計測することも考えられる。様々な非線形関数を用いた寄与率の動的制御を行い, 行為主体感の向上要因を詳細に特定し, 行為主体感のさらなる向上を図ることを今後の展望としたい。

身体所有感に関しても, ユーザの寄与率が高くなると有意に強くなった。これは, 行為主体感と同様に, ユーザの寄与率が高い条件ではユーザの実際の動きとその視覚的フィードバックがどの程度一致したことで身体所有感が向上したと考えられる。ただし, 身体所有感に関して Static 条件と Dynamic 条件での有意差は見られなかった。身体所有感においては, 行為主体感ほど自身の行為とその結果のフィードバックが一致することが重要ではない [7]。Dynamic 条件において, 導入タスクで参加者の動作が融合身体アバタに

反映される割合が高かったが, それによるメインタスクの身体所有感への影響は小さく, その結果として Static 条件と Dynamic 条件間で有意差が見られなかったと考えられる。

6. おわりに

本研究では, ユーザの寄与率が低い状態でも強い行為主体感を生起させることを目的として, 融合身体における寄与率を動的に制御した。具体的には, 学習者の寄与率が高い状態から徐々に寄与率を下げる動的制御を行うことで, 寄与率が高い時間帯があったという信念や文脈がその後の行為主体感を向上させると仮説を立て実験を行った。実験では, メインタスクの寄与率を一定にした上で, 導入タスクでの寄与率がメインタスクに等しく一定な Static 条件と, 100% から線形減少してメインタスクと等しくなる Dynamic 条件を比較した。メインタスクの寄与率として 0%, 25%, 50%, 75% の 4 条件が使用され, 参加者は寄与率が両条件で等しいメインタスクの行為主体感をアンケート評価した。24 名の参加者内比較を行った結果, Dynamic 条件で Static 条件と比べて強い行為主体感が見られた。今後は行為主体感の向上要因を詳細に特定し, 行為主体感のさらなる向上を図るとともに, 融合身体を用いたスキル伝達の実現を目指したい。

謝辞 本研究の一部は科研費 基盤研究 (S)(19H05661) の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] 伊東亮太, 小川奈美, 鳴海拓志, 廣瀬通孝. 融合身体を用いたスキル伝達に関する基礎調査. 第 25 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 1-4, 2020.
- [2] R. Fribourg et al. Virtual co-embodiment: evaluation of the sense of agency while sharing the control of a virtual body among two individuals.
- [3] N. Braun et al. The senses of agency and ownership: A review. *Frontiers in Psychology*, Vol. 9, p. 535, 2018.
- [4] M. Synofzik, G. Vosgerau, and A. Newen. Beyond the comparator model: a multifactorial two-step account of agency. *Consciousness and Cognition*, Vol. 17, No. 1, pp. 219-239, 2008.
- [5] O. Grynspan et al. The sense of agency in human-human vs human-robot joint action. *Consciousness and Cognition*, Vol. 75, p. 102820, 2019.
- [6] C. Farrer, M. Bouchereau, M. Jeannerod, and N. Franck. Effect of distorted visual feedback on the sense of agency. *Behavioural neurology*, Vol. 19, No. 1, 2, pp. 53-57, 2008.
- [7] M. Tsakiris, G. Prabhu, and P. Haggard. Having a body versus moving your body: How agency structures body-ownership. *Consciousness and Cognition*, Vol. 15, No. 2, pp. 423-432, 2006.