

# ハンドトラッキングを用いた操作における運動手順の分離が運動主体感と身体所有感に与える影響

## Influence of separation of motion on Sense of Agency and Ownership in hand tracking operation

千葉 哲志<sup>†</sup>, 山崎 治<sup>‡</sup>

Tetsushi Chiba, Osamu Yamazaki

<sup>†</sup>千葉工業大学大学院, <sup>‡</sup>千葉工業大学

Graduate School of Chiba Institute of Technology, Chiba Institute of Technology

s1532100fs@s.chibakoudai.jp

### Abstract

In this research, we aimed to clarify how the separation of motion into "positioning" and "action" affects the sense of agency and ownership. In the experiment, participants performed the task of moving and shaping a one-handed avatar displayed in the VR space to a specified area and shape using a hand-tracking operation. As a result, we found that the separation of motion forms a sense of agency, but not a sense of ownership.

**Keywords** — Sense of Agency, Sense of Ownership, Virtual Reality

### 1. はじめに

近年、情報技術の発展はめざましく、多様化するアプリケーションのインタフェースデザインについて渡邊(2017)は、近年のセンサの発達によりジェスチャ操作が一般的になりつつあることを指摘した。その一方で、身体や知覚の特性の理解とそれをどのように設計に落とし込むかは課題が多く、分野を横断して知見を融合した設計論が求められるとしている。さらに齊藤(2019)は、ヒューマンコンピュータインタラクション(HCI)の分野においては、操作者が身体の運動によって操作対象を操作するようなインタフェースの有用性が示されており、その理由としてその対象を自己の身体と同一あるいは延長するものとして捉えていることが挙げられるとしている。

Gallagher(2000)は基本的な自己の認識について"narrative self"と"minimal self"の2つに分けて考察しており、"narrative self"を過去と未来で構成されるアイデンティティとしての自己、"minimal self"を経験から生じる即時的な自己としている。前段で述べた「対象を自己の身体と同一あるいは延長するものとして捉えている」という現象は"minimal self"に該当する。Gallagher(2000)はこの"minimal self"を構成する感覚として、「運動主体感(sense of agency)」と「身体所有感(sense of ownership)」という2つの概念からなると提唱している(これらは自己主体感/自己所有感とも呼ばれる)。こ

れら2つの概念は、「自分が」操作しているという感覚を生じさせる体験をデザインする上で重要な概念である。

Gallagher(2000)によれば、運動主体感とは、ある運動に対して「自分が引き起こした」と感じる感覚のことである。例えば、自分でサッカーボールを蹴って飛んでいくところを見た際に「自分が蹴ったことでボールが飛んでいる」と認知する感覚である。運動主体感は必ずしも自身が直接引き起こす運動である必要はなく、例えば手をパンと叩いた際に遠くにある風船が偶然割れたような場合に、あたかも「自分の拍手の衝撃によって風船が割れたのではないかと錯覚してしまうような場合であっても生じる。

一方で身体所有感とは、あるモノが「自分の体の一部のように感じられる」感覚のことである。身体所有感は、自分の身体は当然ながら、自分の身体以外のモノにも感じるができるということが知られている。例えば、テニスの選手はラケットを文字通り「手足のように」意のままに操ることができ、特別な意識をせずともあたかも腕の延長であるかのような感覚で扱い、ボールを打つことができる。

我々が身体所有感・運動主体感を感じる(拡張される)条件について、瀧見・坂本・小野(2017)は表1のようにまとめており、時間的なズレの有無や、対象物の形状条件のいずれの点においても、運動主体感のほうが容易に感じるとしている。

近年では、運動主体感や身体所有感を利用して人間の感覚を拡張する研究が行われており、VRやその他のトラッキング技術を用いた、現実世界の身体感覚とは異なる場合の「自己」の感覚についての検証がなされている。一例として小柳・大村(2017)の研究では、VR空間上での飛行体験においてヒト型のアバタではなく「鳥アバタ」を用いることで身体所有感の向上を図り、飛行体験に対する没入感を向上させることを明らかにしている。

表1 自己所有感と自己主体感が拡張されるために必要な条件 (瀧見他, 2017)

	視触覚刺激	操作対象の形状
自己所有感	同期している (誤差 0.3s 以内)	身体図式と矛盾 しない形状
自己主体感	運動結果の予測と 視覚フィードバック が一致している (同期している必要 はない)	形状に制限なし

近年では、運動主体感や身体所有感を利用して人間の感覚を拡張する研究が行われており、VR やその他のトラッキング技術を用いた、現実世界の身体感覚とは異なる場合の「自己」の感覚についての検証がなされている。一例として小柳・大村(2017)の研究では、VR 空間上での飛行体験においてヒト型のアバタではなく「鳥アバタ」を用いることで身体所有感の向上を図り、飛行体験に対する没入感を向上させることを明らかにしている。

多くのこのような研究では、現実の身体の運動をそのままアバタの運動に反映させることがほとんどであり、その状態での運動主体感・身体所有感を題材としている。VR などを始めとしたトラッキングを用いてアバタを運動させる場合、アバタの位置を自分の意図した位置に持っていき「ポジション」と、叩いたり掴んだりといった意図した行動を起こす「アクション」の2つの手順に分離できると考えられる。例えば物を掴む際には、対象物のところまで手を伸ばし(ポジション)、その後掴むというアクションを起こしている。これらは現実では特に意識されることなく行われている手順だが、VR 空間等の「仮想的な自分の身体」を操る際には顕著に意識されると考えられる。既存の研究はこの2つの手順が直感的に行われる状態でなされているが、この手順が直感的に行えず分離された状態で運動主体感・身体所有感が保持されるのかどうかは明らかになっていない。

そこで本研究では、「ポジション」と「アクション」の操作が分離された状態における運動主体感・身体所有感について、VR 空間上でハンドトラッキングを用いて、体の無い手首から先を模った手アバタのみを操作する課題を通して検証する。このような状態の具体例として、VR 空間上で右手のモデルが表示されているとき、リアル左手ポジションが反映されて VR 上の位

置が決定されているとする。このとき、手の開閉やそれに伴う VR オブジェクトの把持はリアル右手アクションによって操作される、といった状態である。

一見、これらの手順を分離することによって運動主体感・身体所有感は低下するようにも感じられるが、その一方で運動主体感の形成条件とされる運動結果の予測とフィードバックの一致、身体所有感の形成条件とされる運動の同期と身体図式との矛盾が小さく感じられる可能性があり、表1における条件に当てはまり、「ポジション」「アクション」の操作手順によらず運動主体感・身体所有感が保持される可能性が考えられる。

運動主体感や身体所有感の関係や、その形成要因について「操作手順の分離」という観点から検証・考察することで、VR のみならず今後様々な分野におけるインタフェース設計に役立てられると考えられる。

## 2. 目的

本研究では、運動主体感・身体所有感の形成に必要な要素について明らかにし、これらの感覚の形成にとって「ポジション」と「アクション」という運動手順の統合/分離が重要な要素であるかどうかについて検証する。さらに、可能であればこのような操作手順の分離を2次元の GUI アプリケーション操作に導入した場合について、VR 上で3次元的に操作する場合と比較し、その有効性や本条件での運動主体感・身体所有感の形成の差異について検証する。それら結果を踏まえ、今後の運動主体感・身体所有感を用いたインタフェース設計の指針を提案することを目的とする。

したがって本研究では、VR 空間において表示される片手の位置と表裏を決める「ポジション」と、握る・掴むなどを行う「アクション」の操作の手順について、それらが統合している通常感覚の操作方法を【統合条件】、一方の手を「ポジション」のみ、もう一方の手を「アクション」のみの操作に割り振った操作方法を【分離条件】として実験を行い、それらの条件設定が運動主体感や身体所有感に及ぼす影響を検証する。

## 3. 実験

### 3.1. 実験環境

Oculus VR 製 Oculus Quest のヘッドマウントディスプレイ(以下、HMD)を用いた。Oculus Quest は外部機器接続を必要としないスタンドアロン型 HMD であり、コントローラを必要とせず、ユーザの手指を認識して操作することが可能なハンドトラッキング機能を有して

いる。本研究では、このハンドトラッキング機能を用いた VR 空間上に表示される手アバタを操作するアプリを制作して実験に用いた。アプリの制作には Unity(バージョン:2019.1.8f1)を利用し、実験の各種機能(課題の提示・残り時間の表示)は C#で記述を行った。

実験用アプリでは以下の機能を実装した(図1)。

- ハンドトラッキング機能を利用して参加者の手の位置及び指の形状を認識し、VR空間内に「手アバタ」を表示する(図1中の手の影のモデル)。表示される手アバタは片手のみ(操作を行わない側の手アバタを透明とし、操作者から見えない状態)とした。
- 課題やインストラクションを提示するため、VR空間内にメッセージを表示する。メッセージの提示場所は HMD の動きに追従し、常に視界の中央に固定して表示された。
- 課題の提示タイミングを制御するとともに、反応時間を取得するため、タイマー機能を実装した。タイマーもメッセージとして表示を行った。

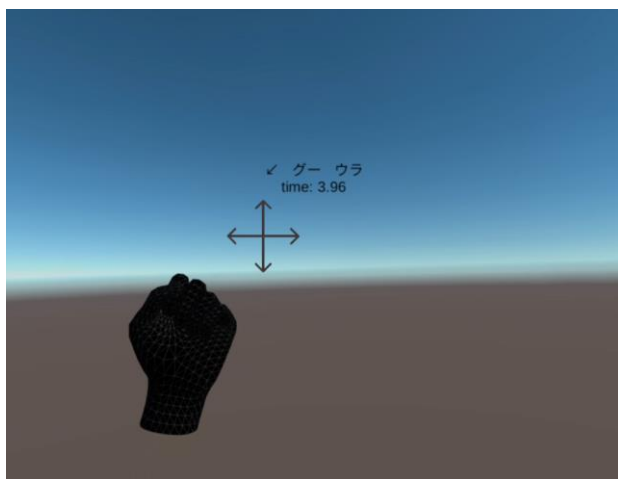


図1 実験風景

### 3.2. 参加者・実験計画

実験には情報科学を専攻する大学院生2名が参加した。実験計画は、ポジションとアクションの操作手順の統合/分離の2条件を設けた1要因2水準参加者内計画とした。

### 3.3. 課題

#### 3.3.1. 手アバタの操作課題

課題は、ハンドトラッキングによる操作で、VR空間上で表示される片手アバタを指定された領域に移動させつつ指定された手アバタの形をつくるものとした。

手アバタの移動の操作は「ポジションの操作」であり、画面に表示された十字のうち矢印で示された方向の領域に手を移動するものとした。移動先の領域は図2のように、画面の右上/左上/左下/右下の4領域から指定された。例えば、十字上の矢印が左下を指していた場合は、左下の領域に手を移動するものとした。この際、手首部分から手先までがその領域内に入っていればよいものとした。ただし、手の移動量を考慮し、十字はポジションを操作する側の手にやや寄った形で表示した(例えば、左手でポジションを操作する場合は左に寄った形で十字が表示される)。手アバタの形をつくる操作は「アクションの操作」であり、じゃんけんの手(グー/チョキ/パー)と手の向き(掌を自身側に向ける(表)/外側に向ける(裏))の組合せで指定された。

手アバタの操作は各試行5秒を制限時間として実行することとした。さらに、実験参加者の利き手を考慮し、【統合条件】では「利き手操作」と「非利き手操作」、【分離条件】は「利き手ポジション操作(非利き手アクション操作)」「非利き手ポジション操作(利き手アクション操作)」のそれぞれを課題として、4種類の課題を各10試行ずつ実施した。各試行で指定される内容は、移動の領域、じゃんけんの手、手の向きの3要素をランダムで組合せて提示した。ただし、領域については直前の試行と同じ領域になることはないようにした。

課題を行う際には頭をなるべく動かさず、特に分離条件における操作の際には、アクション側の手は脇を締めて肘を軽く曲げ、極力腕を動かさないように指示した。ただし、課題開始時のVR空間内の手アバタのスタンバイ位置や形については特に指示をしなかった。

各試行で、指定されたポジションおよびアクションが完了するまでの時間を反応時間として測定した。

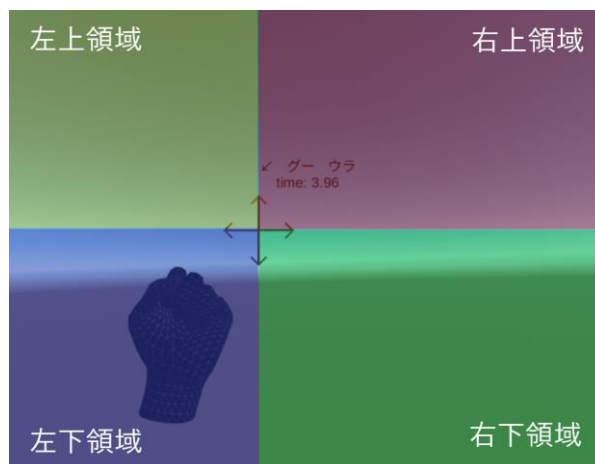


図2 課題中の領域の図示

### 3.3.2. アンケート

4 種類の課題終了後に運動主体感や身体所有感について問うためのアンケートを作成した。表 2 にアンケートの設問を示す。このアンケートは小柳他(2017)や宮路・舟橋・谷田(2019)が用いたアンケートの設問を参考に作成した。実験参加者が課題を通して手アバタに対しどのように感じたかといった運動主体感・身体所有感に関する主観的評価を、1:当てはまらない~5:当てはまる)の5段階評価で質問した(設問 6 を除く)。

表 2 運動主体感・身体所有感のアンケート

設問 1	表示された手を「自分が操作している」という感覚はありましたか?
設問 2	表示された手を「自分の身体の一部(延長)」のように感じられましたか?
設問 3	表示された手を直感的に操作できましたか
設問 4	操作に素早く慣れる事ができましたか?
設問 5	操作は難しく感じましたか?
設問 6	操作していた手は左右どちらの手のように感じましたか?
	(1:右手, 2:左手, 3:どちらにも感じた, 4:どちらにも感じなかった)

さらにすべての課題終了後に、利き手や実験全体の難度、感想についての質問をした。表 3 に全体アンケートの設問を示す。

表 3 全体アンケート

設問 1	利き手はどちらですか? (1:右手, 2:左手, 3:両手)
設問 2	課題を行うのに難しいと感じた順に番号を振ってください (右手(普通) / 右手で手の場所を動かし、左手で手指を動かす 左手(普通) / 左手で手の場所を動かし、右手で手指を動かす)
設問 3	ご意見・ご感想があればお書きください

### 3.4. 手続き

実験は 1 名ごとに行い、両手を広げて回しても手がぶつからない広い場所で椅子に座って行った。実験の

導入として、統合条件及び分離条件でのハンドトラッキングを説明・体験してもらい、参加者がその挙動や仕組みを十分に理解したことを確認した。その後、課題についての説明として課題の始め方や解答方法、手の動かし方・仕組みなどを説明し、参加者の理解に不足がないことを確認してから実験に移った。

実験では、①利き手課題(統合条件)、②非利き手課題(統合条件)、③利き手ポジション課題(分離条件)、④非利き手ポジション課題(分離条件)の4条件による課題を各 1 回ずつ行った。この際、統合条件と分離条件の順序効果を考慮して、課題を実施する順番は参加者ごとにランダムとした。

アプリを起動すると中央のタイマーが 30 秒からカウントダウンを開始し、残り時間が 0.00 秒になると、それ以降は 5 秒毎に課題が 10 問連続で提示された。この時タイマーはカウントアップし、タイマーが 5.00 秒を示すと同時に次の課題を提示するようにした。また、すべての課題が終了すると、「終了です」の表示とともにタイマーがストップするようにした。

課題中は、課題遂行の様子を Oculus の録画機能およびスマートフォン(Google Pixel3)で録画するとともに、各試行にかかった時間を計測した。1つの課題が終了するごとに HMD を外してもらい、実験参加者が感じた運動主体感・身体所有感について問うアンケートを実施した。実験終了後、実験全体の難度と感想を問う全体アンケートを実施した。

## 4. 結果

### 4.1. 達成時間

条件ごとの各試行の平均達成時間のグラフを示す。実験参加者全員の全条件・全試行において、達成できなかった試行は存在せず、統合条件も分離条件も共に 10 試行\*2(左右)=20 試行ずつであった。

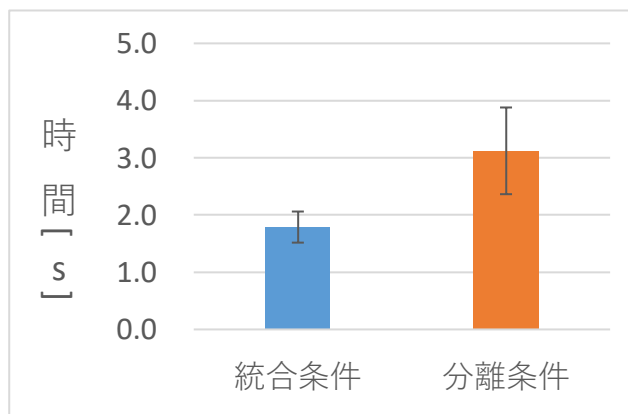


図 3 平均達成時間

表4 運動主体感・身体所有感のアンケート結果

	統合条件				分離条件			
	利き手課題		非利き手課題		利き手ポジション課題		非利き手ポジション課題	
	1人目	2人目	1人目	2人目	1人目	2人目	1人目	2人目
運動主体感	5	5	5	5	4	5	5	4
身体所有感	4	3	4	3	1	2	1	2
直感的操作	5	4	5	4	1	3	1	3
操作の慣れ	5	4	4	4	2	2	2	3
操作難易度	1	3	1	2	2	4	2	3
操作していた手	利き手	利き手	非利き手	非利き手	どちらにも感じた	どちらにも感じた	どちらにも感じた	どちらにも感じた

このデータに対しt検定を行ったところ、2条件の間に有意差があり( $t(49)=10.34, p<0.01, r=.89$ )、分離条件よりも統合条件が有意に早かった。

#### 4.2. アンケート結果

表4に運動主体感と身体所有感に関するアンケートの結果と、全参加者の設問1~5の条件ごとの回答結果の平均値のグラフを図4として示す。ポジティブな解答は黄色、ネガティブな解答は青でセルを塗りつぶしてハイライトした。また、表5に全体アンケートの結果を示す。

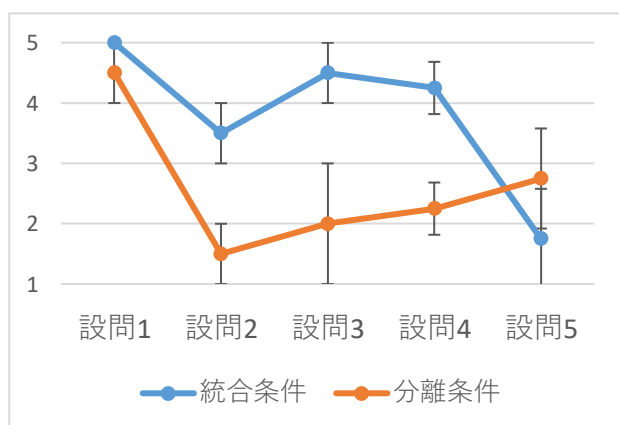


図4 アンケートの統合/分離間の結果のグラフ (設問1~5)

表5 全体アンケートの結果

	1人目	2人目
利き手	左手	右手
難しかった課題順	3 > 4 > 1 > 2	4 > 3 > 2 > 1
1:利き手課題(統合) 2:非利き手課題(統合)		
3:利き手ポジション課題(分離)		
4:非利き手ポジション課題(分離)		

設問1は、表示された手の操作時に運動主体感が形成されているかどうかを問うもので、統合条件での課題では参加者全員が最もポジティブな5を回答した。分離条件の課題に対する同質問においても、最低でも2番目にポジティブな4が解答された。2条件間での傾向の違いは見られなかった。

設問2は、表示された手の操作時に身体所有感が形成されているかについて問う質問であった。統合条件のほうが分離条件よりも身体所有感が形成されやすい傾向にあるという結果となった。

設問3は、統合/分離条件での操作の直感性(身体所有感の強さ)を問うものであった。統合条件のほうが分離条件よりも高い直感性を持つ傾向にあるといえる。この結果は設問2の身体所有感の形成と同様の傾向であった。

設問4は、身体所有感の生起の早さ・容易さについて問う設問である。操作の慣れについて統合条件のほうが分離条件よりも慣れやすい傾向にあるといえる。

設問5は、操作の条件設定が課題をどれほど困難に

していたかの指標とした。ほとんどの回答で3以下(容易)であったが、利き手ポジション課題(分離)の2人目の回答のみ4(やや難しい)と回答された。

設問6は、身体所有感の形成に視覚的要素とアクション操作とポジション操作のいずれが強く寄与しているのかを測ることを目的としていた。統合条件では見えている手アバタと一致した手と回答された。分離条件では全ての回答が「どちらにも感じた」というものであり、左右どちらかの手として感じたという回答はなかった。

全体アンケートにおいては、難しかった課題の順番を質問したが、参加者両者共に上位2つが分離条件、下位2つが統合条件であったと回答した。

### 4.3. 考察

今回のように、操作手順の分離を行った場合、運動主体感は統合条件と同程度に保たれるものの、身体所有感は統合条件よりも低下する結果となった。分離条件におけるアンケート中の、設問3での操作の直感性が低いとする回答や、設問6で「1つの手を両方の手で操作している感覚」とする回答をしていることから、統合条件よりも分離条件では身体所有感が低下してしまう事が考えられる。

また、分離条件においては利き手でポジションとアクションのどちらを操作するかによって運動主体感・身体所有感の形成の度合いに影響がある可能性も考えられる。表6は表4から分離条件だけを抜粋したものである。設問1について、1人目の参加者は利き手でポジション操作をするよりもアクション操作をしたときに運動主体感が高かったとする回答している。逆に、2人目の参加者は利き手でポジション操作をしたときに運動主体感が高かったとする回答をしている。さらに、設問4,5においても、1人目はどちらの課題でも慣れや難易度の体感が変わらなかったのに対し、2人目は非利き手でポジション操作にしたときのほうが、そうでないときよりもポジティブな回答をしている。加えて、全体アンケートの質問難しかった課題の順番について、1人目と2人目で両条件が逆の結果になっている。以上のことから、利き手による操作としてポジション操作が得意なのか、アクション操作が得意なのかが分かれる可能性が考えられる。

表6 身体所有感・運動主体感のアンケート結果(分離条件)

	1人目		2人目	
	利き手ポジション課題	非利き手ポジション課題	利き手ポジション課題	非利き手ポジション課題
運動主体感	4	5	5	4
身体所有感	1	1	2	2
直感的操作	1	1	3	3
操作の慣れ	2	2	2	3
操作難易度	2	2	4	3
操作していた手	どちらにも感じた	どちらにも感じた	どちらにも感じた	どちらにも感じた

また、運動の様子について、統合条件/分割条件の課題でどのような運動手順で操作しているのかを、録画したビデオ(手アバタの動作及び身体動作)で観察した。両条件の大半の場合、領域移動(ポジション)→じゃんけんの手(アクション)→裏表(ポジション)という順に行われていた。ただし、統合条件ではこれらの手続きがほぼ同時に行われており、指定領域に手を移動しながら手の形・表裏を作っていた。逆に分離条件では、この順番に沿って一つずつ動かしており、領域の移動を済ませてからじゃんけんの手を作り、その後に表裏の操作をしていた。この手順は、課題中に表示された指示を単に左から順に解釈し、操作に反映させていったと考えられ、3要素の提示順を変更することで全く異なる運動の順番になる可能性が考えられる。

また、身体動作の観察結果から、分離条件の課題において、ポジション操作につられてアクション側の手を移動させたり、逆にポジション側の手指を動かしてアクション側の手を止めてしまったりと、「動かしているはずなのに手アバタが動かない」という状態に瞬間混乱する様子が散見された。実験の前に説明と練習をし、頭では分離条件の動きの仕組みを理解していても、今回の課題のように時間に追われて操作する場合には、急ぐあまりその仕組みよりも普段の感覚を優先して運動しまっていると考えられる。逆に、分離条件における課題に対して円滑な身体動作が行われる程度まで慣れた場合には、身体所有感の浄化自体が変わる可能性も考えられる。

### 5. まとめと今後の展望

本研究は運動主体感・身体所有感の形成に必要な要素について明らかにし、「ポジション」と「アクション」

という運動手順の統合/分離がそれらの感覚の形成にとってどのような影響を与えるかについて明らかにすることが目的であった。実験では、VR空間上に表示される片手アバタをハンドトラッキング操作によって指定された領域に移動させつつ、指定された手アバタの形を作る課題を実施した。この手アバタの操作に関し、通常通りの操作を「統合条件」、左右の手にポジション操作とアクション操作をそれぞれ割り振ったものを「分離条件」として当該の課題を行った。

結果として、試行の達成時間について、統合条件のほうが分離条件よりも有意に早いことが明らかになった。また、分離条件においては、利き手による操作としてアクション操作とポジション操作のどちらを得意とするかが人によって異なる可能性があり、訓練のない内は運動をひとつずつしか行えない傾向にあると考えられる。以上より、運動手順が分離された場合、運動手順が統合された状態と同等の身体所有感は得られないことが明らかになった。

本研究で明らかにできなかった運動主体感・身体所有感と運動の関係を明らかにするためには、さらなる調査と検証を行い、運動手順の分離以外のアプローチでも検証方法を吟味する必要があると考えられる。

## 参考文献

- 小柳陽光, 大村 廉 (2017). 飛行体験における没入感向上のための鳥アバタへの身体所有感の生起可能性の検討 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 22(4) 513-522
- 齊藤寛人 (2019). 運動予測に基づく視覚的運動と自己運動との関連性の認知メカニズムについての分析 明治大学大学院先端数理科学研究科博士論文
- 瀧見彰太, 坂本大介, 小野哲雄 (2017). 身体像の投射を用いた「自己所有感」と「自己主体感」のゆらぎ 日本認知科学会第34回大会発表論文集 139-147
- 宮路大勇, 舟橋健司, 谷田公二 (2019). 遅延が道具における身体所有感に与える影響に関する調査 第24回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 5B-01 2019
- 渡邊恵太 (2017). 自己帰属感とインタフェースデザイン 基礎心理学研究 36(1) 117-118
- Gallagher, S. (2000). Philosophical conceptions of the self: Implications for cognitive science. Trends in Cognitive Sciences, 4, 14-21.