



# プログラムと人間の運動の融合・タスクの自動化による 運動主体感, 身体所有感の変容

武智通<sup>1)</sup>, 中村文彦<sup>1)</sup>, 福岡正彬<sup>1)</sup>, Ganesh Gowrishankar<sup>2)</sup>, 家永直人<sup>1)</sup>, 杉本麻樹<sup>1)</sup>  
Tohru TAKECHI, Fumihiko NAKAMURA, Masaaki FUKUOKA,  
Ganesh GOWRISHANKAR, Naoto IENAGA and Maki SUGIMOTO

1) 慶應義塾大学 (〒 223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1)

2) LIRMM - Laboratoire d'Informatique de Robotique et de Microélectronique de Montpellier  
(Université Montpellier LIRMM UMR 5506 CC477 161 rue Ada 34095 Montpellier Cedex 5 - France)

**概要:** 本論文の目的は, プログラムが制御する運動と人間の運動を様々なレベルで融合, タスクを自動化したときの運動主体感, 身体所有感の変化について調査することである. ロボットアームを用いたピックアンドプレイスタスクにおいて, 人間の手に持ったトラッカーによるロボットの運動と, 目的の物体までの最短の経路を計算するプログラムによる運動の融合と, タスクの自動化という観点から, 人間が制御する割合を変化させた条件で運動主体感, 身体所有感を比較した. その結果, 人の制御割合が小さくなる, タスクの自動化レベルが上がるにつれて, 運動主体感, 身体所有感は減少した.

**キーワード:** 運動主体感, 身体所有感, ロボットアーム, 自動化

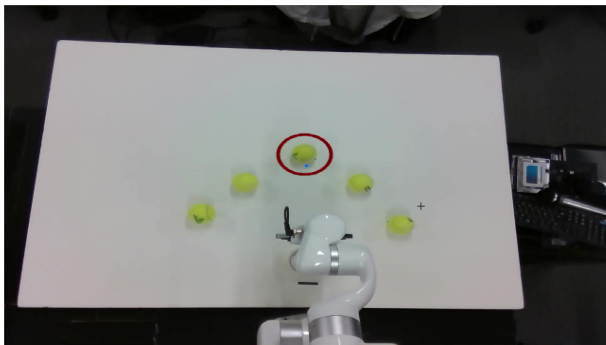


図 1: 実験参加者に提示した映像

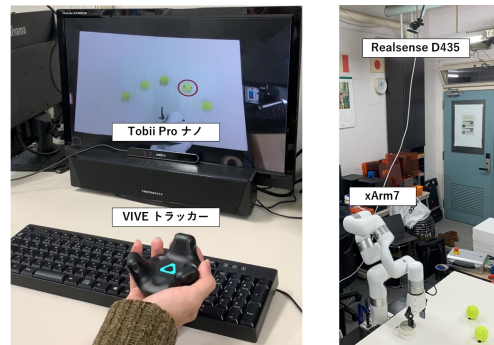


図 2: 実験環境

## 1. はじめに

自己身体に対する意識である身体認知は, 運動主体感と身体所有感の二つに分けられる. 「まさに自分が運動を引き起こしている」という感覚を運動主体感と呼び [1], 「その身体, またはその身体の一部は自己に帰属する」という感覚を身体所有感と呼ぶ [1]. 人と機械とのインタラクションという面では, 操作者が「機械を自分が操作している」, また, 「その機械は自分の体の一部である」と感じることで, 機械からのフィードバックを説明, 予測でき, その後の行動につなげることができる. 人と機械とのインタラクションでは, 運動主体感, 身体所有感をいかに感じさせるかが重要になる.

運動主体感や身体所有感についての研究は多々存在するが, 半自動化ロボットを用いてタスクを行った際の運動主体感, 身体所有感の研究は少なく, その際に人が制御する割合を変化させてタスクを行った際の運動主体感, 身体所有感の変化についての研究は存在しない.

そこで, 本研究では, プログラムと人の運動を融合, タスクの自動化を行った際に, 運動主体感, 身体所有感がどのように変化するかを調査することを目的とした. ロボットアームを用いたピックアンドプレイスタスクにおいて, 人の手に持ったトラッカーによるロボットの運動と, 目的の物体までの最短の経路を計算するプログラムによる運動の融合と, タスクの自動化という観点から, 制御割合を変化させた際の運動主体感, 身体所有感をアンケートによって解析した.

## 2. 関連研究

### 2.1 運動主体感と身体所有感の概要

運動主体感が生起する有力なモデルとして, 運動指令の遠心性コピーに基づいて予測された感覚的な結果と実際の感覚的な結果との比較により, 矛盾がなければ更なる処理はなされず運動主体感を感じるが, 矛盾が生じた場合, 外的な手がかりから行為主体を推論するモデル [2] がある.

表 1: 本研究の自動化レベル

レベル	定義
1	ロボットを動かすシステムを用いて、人が目的の物体の決定、移動を実行する。
2	目的とする物体への移動をシステムがアシストする。
3	目的とする物体への軌道はシステムが決定するが、ロボットは人が操作する。
4	目的とする物体への移動をシステムが実行する。目的とする物体の変更は任意のタイミングで可能である。
5	システムが目的の物体を決定し、表示した後、移動を実行する。

身体所有感は、能動的な運動時だけでなく、受動的な状態においても感じられ、視覚と体性感覚の時空間的整合性の認知が基盤にあるとされている。代表的な研究の例として、ラバーハンドイリュージョンがあげられる [3]。この研究では、実験参加者の手を見えないようにし、自然な位置にゴム製の手を置いたときに、本物の手とゴム製の手に同様の触覚を与え続けると、ゴム製の手を自分の手と認識する錯覚が生じることが発見された。

## 2.2 共有身体

Virtual Reality (VR) 空間内のアバターを複数人で共有する共有身体での身体認知の研究が存在する。2人の人が共有する共有身体を VR 空間内で作成し、そのアバターの動きは2人の行動の加重和とし、重みは 0:100, 25:75, 50:50, 75:25, 100:0 の5条件で、実験参加者に対しリーチングタスクを行った。ここで、リーチングの対象となる物体は一つであり、実験参加者二人の目的とする物体は同じであった。運動主体感、身体所有感は重みの増加に伴い、有意に増加した [4]。

## 3. 自動化レベル

人が何らかの目的を達成しようとする際の情報処理過程として知覚、認知、判断、操作の4ステップがあるが、判断と操作における人と機械の協力形態の可能性として、自動化割合を示す自動化レベルがある [5]。この自動化レベルを参考にし、本研究の自動化レベルを表1のように定めた。

## 4. 実装

### 4.1 環境

図2に示すような環境を設定した。ピックアンドプレイスされる物体はテニスボールであり、テーブルの上に5つ、それぞれがロボットアームの初期位置から30度ずつ離して並べた。

### 4.2 ロボットアームの操作

ロボットアームには xArm7 を用い、その操作には、VIVE トラッカーを用いた。本研究では、実験参加者がこのトラッカーを右手に持って動かすことで、ロボットアームを操作した。ロボットアームが真下の物体をつかむ動作と離す動作には、キーボードの E キーと D キーを用いた。

### 4.3 物体の位置の取得

物体をピックアンドプレイスするタスクを自動化するために、物体の位置を取得した。まず、輪郭検出をし、目的の物体の画像上の位置を求めた。物体の3次元位置は、RealSense D435(RGBD カメラ)により得られた深度画像と目的の物体の画像位置、カメラの内部パラメータから計算した。得られた3次元位置はカメラ座標系での位置であるため、事前にキャリブレーションをして求めたカメラ座標とロボット座標の関係を用いて座標変換を行い、ロボット座標系での物体の位置を計算した。

### 4.4 人の目的の物体の検知

物体をピックアンドプレイスするタスクを自動化するために、実験参加者の目的としている物体を検知する必要がある。実験参加者の目的とする物体の検知のために、Tobii Pro ナノで視線検出をした。Tobii Pro ナノはモニター付近に設置した。目的の物体の判断のために、時間の長さの閾値  $t_1$ ,  $t_2$  を定めた。本研究では、 $t_1$  を約 330 ミリ秒、 $t_2$  を約 1000 ミリ秒とした。目的の物体を検知した場合、図1のように物体の周りに赤い円を表示した。

(1)  $t_1$  (目標物体の設定): 画面に表示されたある物体を  $t_1$  よりも長い時間見続けると、その物体を目的の物体と判断する。

(2)  $t_2$  (目標物体の解除): 目的と設定された物体から  $t_2$  よりも長い時間目を離していると、目的の物体ではないと判断する。

### 4.5 運動の融合とタスクの自動化

#### 4.5.1 運動の融合

本研究では、ピックアンドプレイスタスクを行うが、ロボットアームの位置は、プログラムの計算した位置とトラッカーの位置の内分点で決定した。また、割合はプログラム実行時に定めた重みで決定した。プログラムの計算した位置は、目的の物体の位置まで最短の方向に、トラッカーの移動した長さ分だけ移動した位置である。これは自動化レベル 1, 2, 3 に対応する。

また、人の目的とする物体とプログラムの目的とする物体を共有している条件以外に、共有していない条件も設定した。目的を共有していない条件では、最初に人が目的とした物体のとなりの物体をプログラムの目的の物体とした。

#### 4.5.2 タスクの自動化

タスクの自動化では、自動化レベル 1, 3, 4, 5 に対応する5つの条件を設定した。各条件でのユーザーインターフェースは図3に示す。

(1) TrackerOnly: トラッカーとキーボードの E キー、D キーを用いて実験参加者がすべてを行う条件である。これ

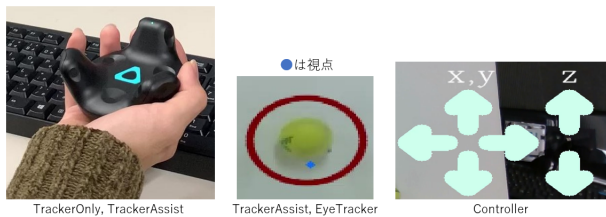


図 3: 各条件での入力のユーザーインターフェース

は自動化レベル 1 に該当する。

(2) Controller: 画面に表示される矢印を左クリックし続けることでロボットアームが移動し、キーボードの E キー、D キーの押下と合わせて実験参加者がすべてを行う条件である。これは自動化レベル 1 に該当する。

(3) TrackerAssist: トラッカーによるロボットの運動とプログラムによる運動の融合割合が 0:100 の条件である。実験参加者はキーボードの E キーと D キーを用いてピックアッププレイスを行う。これは自動化レベル 3 に該当する。

(4) EyeTracker: 目的の物体を検出している間、ロボットアームが目的の物体へ移動し、目的の物体の真上に移動すると自動でつかみ、ゴールの位置の真上まで移動すると自動で離す条件である。これは自動化レベル 4 に該当する。

(5) Auto: Enter キーを押すと、全自動でピックアッププレイスタスクを行う条件である。目的の物体はランダムに決定した。これは自動化レベル 5 に該当する。

## 5. 実験

### 5.1 実験 1

#### 5.1.1 実験条件

この実験では、目的を共有している条件、共有していない条件それぞれで、プログラムと人の運動の融合割合を変化させたときの運動主体感、身体所有感の変化を調査した。人とプログラムの運動の融合割合は 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100 の 5 条件とした。実験参加者は 9 名 (男性 8 名, 女性 1 名) であった。実験参加者は、ロボットアームの初期位置から同心円状に 30 度ずつ離して並べられた 5 つのボールの中からランダムにボールを選び、ピックアップするタスクを 3 回行い、運動主体感と身体所有感についてのアンケートに答えた。アンケートでは、運動主体感は 0% から 100%, 身体所有感は 7 段階のリッカート尺度で質問した。ロボットアームの初期位置の真下にプレイスするための場所を設けた。目的の位置で E キーを押下したあと、ロボットアームの初期位置への移動とプレイスは自動で行った。

#### 5.1.2 結果

運動主体感、身体所有感の結果は図 4 である。融合時の人が制御する割合の減少により、運動主体感、身体所有感の平均値は減少した。目的を共有している場合の運動主体感の結果について Tukey-Kramer 法による多重比較を行ったところ、融合時の人の制御割合が 100%と 0%, 75%と 0%, 50%と 0%に有意差が認められた。目的を共有している場合の身体所有感の結果について Steel-Dwass 法による多重比較を

行ったところ、融合時の人の制御割合が 100%と 0%, 75%と 0%, 50%と 0%に有意差が認められた。

目的を共有していない場合の運動主体感の結果について Tukey-Kramer 法による多重比較を行ったところ、融合時の人の制御割合が 100%と 0%, 100%と 25%, 100%と 50%, 75%と 0%, 75%と 25%, 75%と 50%に有意差が認められた。目的を共有していない場合の身体所有感の結果について Steel-Dwass 法による多重比較を行ったところ、融合時の人の制御割合が 100%と 0%, 100%と 25%, 100%と 50%, 75%と 0%, 75%と 25%に有意差が認められた。

## 5.2 実験 2

### 5.2.1 実験条件

この実験では、タスクの自動化割合を変化させたときの運動主体感、身体所有感の変化を調査した。条件は 4.5.2 章で述べた 5 条件とした。実験参加者は 9 名 (男性 8 名, 女性 1 名) であった。実験参加者は、実験 1 と同様の環境でピックアッププレイスタスクを 3 回行い、運動主体感、身体所有感についてのアンケートに答えた。ロボットアームの初期位置の真下には物体を置くための場所が設けてあり、実験参加者は条件 EyeTracker, Auto 以外、そこにボールを離れた。

### 5.2.2 結果

運動主体感、身体所有感の結果は図 5 である。運動主体感の結果について Tukey-Kramer 法による多重比較を行ったところ、TrackerOnly と Controller, TrackerAssist と EyeTracker 以外に有意差が認められた。身体所有感の結果について Steel-Dwass 法による多重比較を行ったところ、Controller と TrackerAssist と EyeTracker の任意の組以外すべてに有意差が認められた。

## 6. 考察

実験中の記録によると、目的を共有していない場合で融合時の人の割合が 75%の時、全ての実験参加者の全ての試行で、プログラムの目的のボールではなく、実験参加者の目的のボールへ xArm7 を移動させていた。しかし、目的を共有していない場合で融合時の人の割合が 50%以下の場合、81 試行中 78 試行で最終的にプログラムの目的のボールへ xArm7 を移動させていた。以上のことから、75%と 50%で有意差が生まれたと考えられる。目的を共有していない場合で融合時の人の割合が 75%であると、実験参加者の目的とする物体に到達するためには、プログラムの目的の物体と逆の方向に 10 度回転した軌道にしなければならない。少なくとも 10 度の軌道回転をさせられたとしても、実験参加者はそのことに気づけなかったといえる。

タスクの自動化では、Auto, EyeTracker, TrackerAssist, TrackerOnly を比べると、自動化レベルが下がるごとに運動主体感、身体所有感の平均値、中央値は大きくなっていった。EyeTracker と TrackerAssist の違いは、ロボットアームの運動を人が行うかどうか、つまり、運動指令の遠心性のコピーがあるかないかであるが、それだけでは、運動主体感の違いを生むとは言えなかったと考えられる。身体所有感の結果に

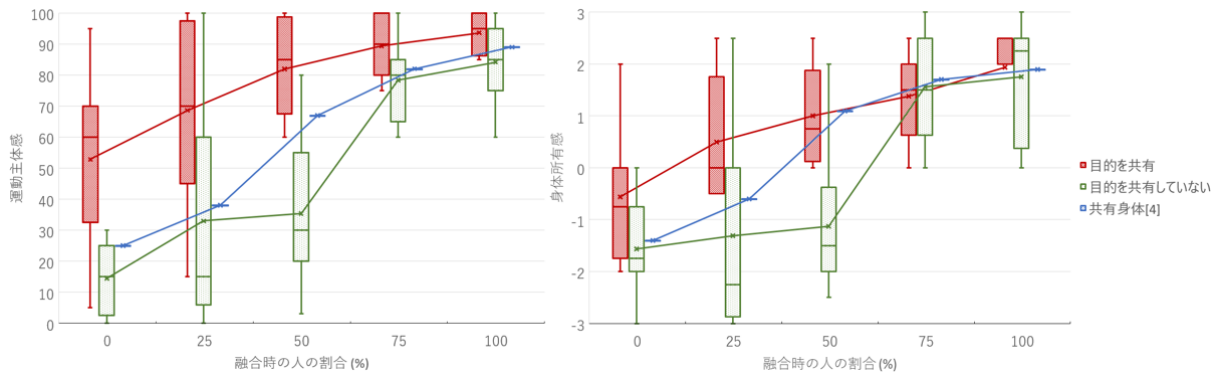


図 4: 実験 1 と共有身体 [4] の実験結果

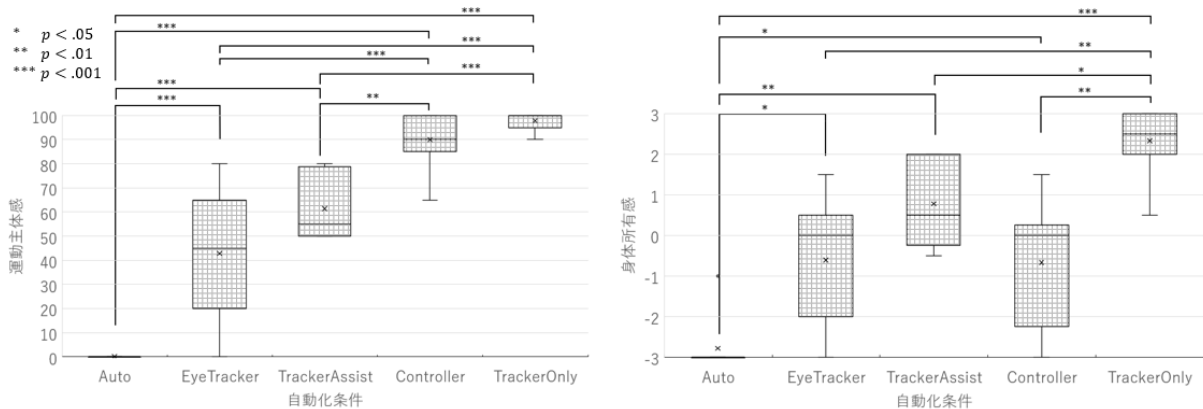


図 5: 実験 2 の実験結果

ついて、EyeTracker, TrackerAssist, Controller に有意差があるとは言えなかった。Controller については、自動化レベル 1 でありながら TrackerOnly とは有意差が生まれたことから、自分の体との時空間的整合性がある実装方法の方が身体所有感が生まれるといえる。

共有身体 [4] と実験 1 の結果の比較を行う。共有身体[4]の運動主体感の平均値と比べて、実験 1 での運動主体感の方が全ての割合において高かった。この理由として、実験 1 ではロボットアームを動かすか動かさないかの判断は実験参加者が行えたからだと考えられる。共有身体の場合、一人の実験参加者が手を動かしてなくても、もう一人の実験参加者が手を動かしていれば共有身体の手は動いてしまう。

## 7. 結論

本研究では、プログラムと人の運動の融合、タスクの自動化をした際の運動主体感と身体所有感をアンケートによって解析する実験を行った。運動の融合については、目的を共有している条件としていない条件のそれぞれで、人によるロボットアームの運動とプログラムによる運動の融合割合を変化させ、タスクの自動化については、自動化レベルを変化させ実験を行った。その結果、人の制御割合が小さくなる、タスクの自動化レベルが上がるにつれて、運動主体感、身体所有感は減少した。

本研究の制約として、ロボットアームを移動させる前の状態では、目的の物体をカメラで捉える必要があったため、カ

メラをロボットアームの上部に置かなければならなかった。一般に、カメラの位置を頭の位置に、動かす部位に連動するデバイスをその部位の場所に設置することで、そうでない場合よりも身体所有感は大きいとされる。

**謝辞** 本研究は、JST ERATO (JPMJER1701) の助成を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] Gallagher, S.: Philosophical Conceptions of the Self: Implications for Cognitive Science; Trends in cognitive sciences, 4, 14-21, (2000.02)
- [2] Synofzik, M., Vosgerau, G. and Newen, A.: Beyond the comparator model: A multifactorial two-step account of agency; Consciousness and cognition, 17, 219-39, (2008.04)
- [3] Botvinick, M. and Cohen, J.: Rubber hands 'feel' touch that eyes see; Nature, 391(6669), 756, (1998)
- [4] Hagiwara, T., Sugimoto, M., Inami, M. and Kitazaki, M.: Shared body by action integration of two persons: Body ownership, sense of agency and task performance; 26th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, VR 2019 - Proceedings, 954-955, (2019.03)
- [5] 稲垣敏之: 自動運転における人と機械の協調; IATSS Review, 40(2), 49, (2015)