

# A Study on Body Perception and Motor Control of an Extended Body Synchronized with the User's Body

October 2023

Kuniharu Sakurada

# 主 論 文 要 旨

No.1

報告番号	甲 乙 第	号	氏 名	櫻田 国治
主 論 文 題 名 : A Study on Body Perception and Motor Control of an Extended Body Synchronized with the User's Body (ユーザ身体と同期する拡張身体の身体認知と運動制御の検証)				
(内容の要旨) ユーザがウェアラブルロボットアームに代表される拡張身体を制御する際、拡張身体を身体に統合（身体化）することで直感的かつ効率的な制御を実現できる。この身体化は、ユーザの運動にも影響を与えるため、身体化プロセスにおけるユーザの運動制御と拡張身体に対する身体知覚の検証が求められている。本論文では、バーチャル空間で実装したウェアラブルロボットアームを用いて拡張身体の身体化プロセスを検証した。この検証により、ユーザが拡張身体をどの様に身体に統合し、運動モデルを更新するか明らかにした。身体化した拡張身体を制御する時のユーザの運動と拡張身体に対する知覚を知ることによって、ユーザが拡張身体を自身の身体のように制御できる設計への応用が期待できる。  はじめに、本論文における研究の背景と目標を述べ、拡張身体に関連する研究を概観する。これを踏まえて、拡張身体に関する基礎知識をもとに、ユーザが拡張身体を自身の身体に統合する要件について検討する。  次に、研究の第一部では、拡張身体が参照する座標系（参照系）がユーザの運動制御に与える影響を検証した。実験にあたって、従来のロボットアームの代表的な参照系：空間系（空間固定型）、胴体系（胴体運動参照型）、頭部系（頭部運動参照型）、にそれぞれ従うバーチャルウェアラブルロボットアーム（以下アーム）を実装した。そして、各参照系がユーザの運動制御と主観的な身体化感覚に影響するか検証した。実験では、ユーザおよびアームの運動解析と主観評価によって各参照系の影響を比較した結果、実験参加者が胴体系のアームを自身の身体のように制御したことが示された。分析の結果、アーム制御に対する身体知覚の帰属（知覚帰属）の影響について検証の必要性が示唆された。  研究の第二部では、アーム制御に対する知覚帰属の影響を検証するために、ユーザの手・足の平均座標に同期するアームを VR 空間に実装した。また、生得的な身体とアームの視覚的な類似性が知覚帰属に影響すると仮定して、視覚的類似性の異なるエンドエ				

フェクタ：ヒューマノイド外観，マニピュレータ外観，をそれぞれ実装した．実験においては，運動課題による手・足の固有受容感覚と主観的な身体化感覚の帰属，ユーザの誤差補正，をそれぞれ計測した．実験の結果，手・足の固有受容感覚の帰属と主観的な身体化感覚の帰属が異なることが明らかとなった．また，マニピュレータ外観が知覚帰属における被験者間バイアスを引き起こしたため，視覚的類似性が知覚帰属の説明変数である可能性が示唆された．一方，ユーザの誤差補正に変化はなかったため，知覚帰属とユーザの運動モデル変化に要する時間が異なることが示唆された．これらの結果は，ユーザと拡張身体間のマッピング関係とユーザの運動制御の関係性の理解に貢献する．

結論として，本論文は，ユーザが拡張身体をどの様に身体に統合して運動モデルを更新しているか理解をすることで，拡張身体の身体化および設計の開発に貢献するものである．

# Thesis Abstract

No. 1

Registration Number	<input checked="" type="checkbox"/> “KOU” <input type="checkbox"/> “OTSU” No. _____ *Office use only	Name	Kuniharu Sakurada
Thesis Title A Study on Body Perception and Motor Control of an Extended Body Synchronized with the User's Body			
Thesis Summary  <p>When manipulating an extended body represented by wearable robotic limbs, integrating the extended body into the user's body (embodiment) enables intuitive and efficient manipulation. This embodiment affects the user's motions, so it is necessary to investigate the user's motor control and perception of the extended body during the embodiment process. In this paper, we investigated the embodiment process of the extended body using virtual wearable robotic limbs. Through this investigation, we clarified how users integrate the extended body into their bodies and update their motor models.</p> <p>In the beginning, we present the background and goal of the study in this paper and provide an overview of related studies on extended bodies. Based on this, we discuss the requirements for users to integrate the extended body into their own body, considering the foundational knowledge of extended bodies.</p> <p>In the first part of the study, we investigated the effect of the reference frame that the extended body refers to on the user's motor control. For the experiment, we implemented virtual wearable robotic limbs following three typical reference frames: Space frame (spatially fixed type), Torso frame (torso motion referred type), and Head frame (head motion referred type). We investigated whether each reference frame affects the user's motor control and subjective sense of embodiment through motion analysis as well as subjective evaluations. The results of the experiment showed that the participants manipulated the robotic limbs as their bodies in the Torso frame condition. The analysis results also suggested the need to investigate how the attribution of perception for the robotic limbs affects manipulation.</p> <p>In the second part of the study, to investigate the effect of perceptual attribution of the extended body on robotic limb manipulation, we implemented a robotic limb in a VR space that synchronized with the average coordinates of the user's hand and foot. Additionally, hypothesizing that visual similarity between the innate body and the robotic limb affects perceptual attribution, we implemented different end-effectors with visual similarities: humanoid appearance and manipulator appearance. In the experiment, we measured the user's proprioception and subjective sense of embodiment attributed to the hand and foot through motor tasks, as well as the user's error correction. The results of the experiment revealed a difference between the attribution of proprioception and the subjective sense of embodiment for the hand and foot. Furthermore, the manipulator appearance induced inter-subject biases in perceptual attribution, suggesting that visual similarity would be an explanatory variable for perceptual attribution. On the other hand, there was no change in the user's error correction, indicating a difference in the learning time required for perceptual attribution and user's motor model changes. These results contribute to the understanding of the mapping between the user and the extended body and the user's motor control for the extended body.</p>			

Thesis Abstract

No. 2

In conclusion, this paper contributes to the embodiment and design development of extended bodies by understanding how users integrate them into their bodies and update their motor models.