

論文の内容の要旨

論文題目 人間機械統合身体システムの構築機序の研究

氏 名 荒井 謙

本論文は付加的に供与される人工身体部位（余剰肢ロボティクス）と生得的身体が統合されたシステムを認知神経科学やロボティクスの知見に基づいて制作し，その装用学習実験から身体認知の変容を捉え，ヒトと機械が協調する身体システムを描写することを目的としている．

第一章では，導入として，人間と道具・技術の関係を多面的に論ずる．ヒトと機械の制御と情報通信を統一的に扱うサイバネティクスをはじめとして，道具の身体化や，それに伴う身体認知変容を説明する．また，フィードバック誤差学習モデルによる運動学習や，マルチモーダルな身体情報の多感覚統合処理により生起する身体的自己意識を論ずることで身体システムの概要を説明する．

第二章では，付加的な人工身体部位として機能し，人体との統合を図る余剰肢ロボティクスによる人間機械協調モデルについて説明する．モデル中では不明瞭となっている身体認知の変容を捉えることの必要性を述べ，問題提起および目的を説明する．また，次章以降に続く本研究で扱った三種類の余剰肢ロボティクスのアプローチについて概説する．

第三章では，VR環境下で動作する余剰肢ロボットアームの装用学習について述べる．本研究で開発したシステムは，一人称視点でアバタと余剰肢ロボットアームを視認ことができ，足先の動きに応じて余剰肢ロボットアームが動作する．また，VR空間において余剰肢ロボットアームでボールを触った際に足先に触覚刺激が返され，マルチモーダルな身体情報が提示される．ボールタッチ課題による装用学習を設けて身体化の促進を図り，それに伴う身体認知変容を調べた．結果，ボールタッチ課題の所要時間の解析結果から装用者が余剰肢ロボットアームの操作に適応することを示した．また，余剰肢ロボットシステムの装用学習後，余剰肢ロボットアームを身体化できた際の指標となる身体所有感，行為主体感，自己位置感覚，身体イメージの獲得に加えて，生得四肢より多く四肢を持つ感覚を指す「余剰肢感覚（Supernumerary Limbs Sensation）」を主観評価スコアより捉えた．クロスモーダル一致課題にて視覚・触覚フ

ードバックに対する応答時間を計測したところ、応答時間が余剰肢ロボットアームの装用前後に大きく変化したことからロボットアーム周辺の視覚と触覚の情報統合認知である自己近傍空間が生起した可能性を示した。加えて、装用学習前後におけるそれぞれの身体認知の変容の相関を調べたところ、自己近傍空間と余剰肢感覚との間に正の相関があることが明らかとなった。

第四章では、独立動作可能な人工余剰指の装用学習について述べる。本研究で使用した人工余剰指（第6指）は、通常では使用されない左前腕部の共収縮による筋電信号をトリガーに動作するため、生得手指の動作による影響を受けない。また、左手全体を黒い手袋で覆うことで視覚的な統一性を保持している。動作条件として、装用者の企図に応じて動作するSync条件（触覚刺激あり）と、ランダムに動作するAsync条件（触覚刺激なし）の2種類を用意し、それぞれの条件で音楽に合わせたタッピング課題を装用学習として課した。また、装用学習前後ではfMRI撮像により脳活動を計測し、認知神経科学の立場から身体認知を調べた。結果、Sync条件時に人工余剰指を身体化できた際の指標となる身体所有感、行為主体感、身体イメージの獲得を主観評価スコアより捉えた。fMRIを用いた脳活動変容解析では、Sync条件時に生得母指・示指・薬指・小指において第一次体性感覚野・運動野にてAsync条件と比較して脳活動が高くなる傾向を捉えた。また、主観評価スコアと脳活動変容での相関分析から人工余剰指への身体所有感と親指に関する脳活動変化、および、人工余剰指への行為主体感と薬指に関する脳活動変化において負の相関がみられた。これらより人工余剰指の身体化が一次感覚運動野における身体部位の原始的な表象に関わる脳活動を変容させる可能性を示唆した。

第五章では、超冗長自由度をもつタコ腕型VRアバタの装用学習について述べる。本研究で作成したタコ腕型VRアバタは生得上肢が持つ7自由度を遥かに超える31自由度を持ち、右腕の動作と連動する。ボックスタッチ課題による装用学習を設け、それに伴う身体認知変容を調べた。ここでは予備検証的な位置付けとして生得的身体とかけ離れた特徴に対する知覚・認知変容を調べることを主な目的とした。結果、タコ腕型VRアバタの装用学習後には位置感覚が学習前より広がる結果となり身体イメージの変容する傾向を捉えた。また、装用学習課題中に計測した生得身体の運動解析から、タコ腕型VRアバタの装用時には運動が縮小する傾向がみられ、身体図式が変容する傾向を捉えた。アバタを身体化できた際の指標となる身体認知については主観評価スコアとして高くなる傾向があったものの統制条件との差分がみられず限定的であった。しかし、プロテウス効果に伴う身体が柔らかくなったような感覚（Softer Body Sensation）を捉えた。

第六章では、全体考察として第三章から第五章にて得られた知見を横断的に用いて、身体認知および運動学習の観点から余剰肢ロボティクスの人間機械協調モデルの更新可能性を議論する。既存のモデルでは説明できない点を説明し、モデル更新の必要性を述べる。加えて、更新

された人間機械協調モデルの適用範囲と対照を，他の事例を交えて検討し，その応用展開として余剰肢ロボティクスに縛られない人間機械協調モデルの可能性についても考察する．

第七章では，本論文の結論を述べ，今後の展開についてまとめる．