

## 審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 荒井 謙

本論文は「人間機械統合身体システムの構築機序の研究」と題し、身体機能拡張技術により変容する身体認知を捉え、機械が生得身体へ統合されたひとつの身体システムとして構築される機序を明示しようとするものである。人間-機械の統合を図る余剰肢ロボティクスを取り上げ、システム制御や設計方針について身体的自己意識や身体化などの身体認知の観点から捉え直し、その身体システムの構築について論じている。

本論文は以下のように全7章から構成されている。

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捉え、運動学習や身体認知などを紹介すると共に人間-機械の統合を図る余剰肢ロボティクスの概説とその課題について述べている。本章の最後には、研究の目的と論文構成について明示している。

第二章では、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の変容を整理し、人間機械統合身体システムを定義している。

第三章では、生得身体部位の動作と連動する VR 余剰肢ロボットアームの装用学習実験について述べている。装用学習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ている。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)」を報告している。また、クロスモーダル一致課題では視覚・触覚フィ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報告している。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と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、生得身体から独立した動作をする人工余剰指の装用学習実験に

について述べている。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種類の動作条件を用意し、それぞれの条件で装用学習課題を課している。また、装用学習前後で fMRI 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報告している。脳活動変容解析では、Sync 条件時に生得母指・示指・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ことを報告している。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において負の相関がみられ、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論じている。

第五章では、超冗長自由度（31 自由度）をもつタコ腕型 VR アバタの装用学習実験について述べている。装用学習後、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ことを報告している。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ている。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となったことを報告している。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）を捉えていた。

第六章では、第三章から第五章にて得られた知見を横断的に用いて、人間機械統合身体システムにおける身体認知および運動学習・制御への考察を論じている。余剰肢ロボティクスの制御戦略である人間機械協調モデルを元に余剰肢ロボティクスの設計論についても検討していた。また、感覚・知覚・運動それぞれの点から考察した結果から、人間機械統合身体システムの構築機序を提案している。加えて、道具の身体化との相違点について考察している。

第七章では、本論文の結論を整理し、学術的な貢献を提示した上で今後の展開についてまとめている。

本研究は工学、認知神経科学、ロボティクスを横断し、人間・機械が統合された身体システムの構築に関する知見を提示している。ロボティクスに偏重した検討から、分野を横断した学際的なアプローチでの検討への切り替えをもたらしている。研究を通じて認知神経科学をはじめとした学術領域に関する多くの知見を提供しており、学術的にも大きな貢献であると判断される。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。