

審査の結果の要旨

氏名 中山 学之

本論文は、Computational Model of the Brain Motor Control Embodying Soft Interaction with Environment (環境との柔らかい相互作用を実現する脳の計算モデルに関する研究)と題し、脳における知能行動制御と脳の計算論の知見にもとづいて、次世代ロボットの主要な目標である、人間と共生する能力を実現するためのロボット制御の基礎理論を確立することを目的としている。具体的には、環境に対する最小限の知識で環境と柔らかくかつスムーズに接触することを可能にするために、人間の小脳中間部と脳幹、脊髄、筋骨格系の神経結線構造を忠実に模擬した制御のアルゴリズムとアーキテクチャを提案し、その制御の有効性とアルゴリズムの収束性を理論的に証明している。

第一章はIntroductionで、本論文の背景を述べ、知能行動制御に関する脳科学の最近の知見を概観し、それらの知見が、それにもとづいてロボットの行動制御の具体的な方式を構築することが可能となるレベルに達したことを示している。

第二章は第一章に続いて小脳や中脳と脊椎筋骨系における脳の結線の解剖学的な構造に関する知見と、脳各部位の損傷患者に関する臨床医学的な知見の現状を詳しく述べ、その結線の制御論的な役割とその位置付けを考察した。

第三章では第二章で述べた解剖学的な小脳、中脳の結線構造にもとづいて外部環境との柔らかい接触を実現するための小脳中間部の計算理論を提案している。特に環境との接触に関してその力学モデルを人間の四肢のもつ限られたセンシング能力を反映して構築し、川人らのフィードバック誤差学習を拡張した環境のスティフネスを推定するアルゴリズムを導出している。さらに中脳から脊椎に至るフィードフォワードパスを、障害物に遭遇したときに予定軌道を迅速に変更するためのものであると解釈し、それを通して撃力を有効に緩和することの出来る適応制御のアルゴリズムを確立した。このアルゴリズムの生理学的な基礎についても明らかにした。

第四章では第三章で確立した理論を双腕の協調動作に適用し、効き腕が位置制御、効き腕でない方が力制御を行うマスター・スレーブ方式に対応する制御方式を提案し、それによって対象物に働く力を通した両腕の制御系の相互干渉をうまく処理出来ることを示した。具体的なタスクのシミュレーションを通して制御系が良好な性能をもつことを示している。

第五章はアクチュエータの制御構造を考察している。筋肉の屈伸モデルと脊椎系における神経接続回路に関する生理学的な知見にもとづき、まず筋肉の伸張反射を実現する制御系を提案している。次いで運動ニューロンと筋紡錘の計算モデルを構築し、これまでこの分野での課題であった角加速度のサンプリングおくれによる不安定性の問題を解決する適

応制御アルゴリズムを提案している。さらにすでに述べた運動制御のモデルを統合したアーキテクチャとアルゴリズムの総体の構造を述べ、その安定性を証明している。

以上述べたことより、本論文は生物原理にもとづく次世代ロボット制御の基礎理論に多大な貢献をなした。まずこれまでの小脳外側部に限られていた脳の運動制御の理論を小脳中間部に拡張し、さらに筋骨格系のダイナミクスと結びつけることにより、現状でのもっとも包括的な脳の運動制御の計算論を確立し、脳の生理学的な知見に制御論的な意味づけを与えた。次に四肢と環境の相互作用の力学を構築し、それを脳の計算理論にもとづく適応制御と結びつけることによって環境と柔らかい接触を実現する生物原理のロボット構築への可能性を開いた。さらにロボットの適応制御において懸案であった角加速度フィードバックのサンプルおくれによる不安定現象の問題を、操作トルクのフィードフォワードの付加によって解決し、機械系の適応制御理論に新しい知見をもたらした。

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。