

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 村井 昭彦

本論文は、人間の身体運動の情報処理メカニズムをモデル化しようとするもので、骨格系の全身運動と筋張力、筋張力と筋活動、筋の固有受容器、脊髄神経の筋支配、脊髄反射のニューラルネットワークなどの力学モデルを構築し、これらの系のパラメータを人間の計測された運動パターンデータに基づいて同定することによって、人間の脊髄反射を含む神経筋骨格系の数理モデルを開発した研究の成果をまとめたものである。

人間の行動における身体の果たす役割については、バイオメカニクス、スポーツ科学、医療、人工知能、あるいはロボティクスにおいて、さまざま観点から注目され研究がなされてきた。医療、リハビリテーション、スポーツ科学、人間工学などでは人間の運動のシミュレーションモデルが必要とされているが、動的な動作においては神経系がつくる反射モデルを含めることでさらに精緻化を図ることができる。人工知能やロボティクスでは、ロボットによる人間の身体感覚の理解と、それに基づいて人間とロボットのインタラクションを成立させる知能情報処理系の構築が求められている。

本研究では、人体のバイオメカニカルな筋骨格系の解析から一歩進めて、末梢神経系とくに脊髄神経束のネットワーク構造を解剖学的な知見から得て、これを全身の筋骨格モデルと統合することで、神経筋骨格系のモデルを構成するところから研究を始めている。中枢神経系からもたらせられる遠心性信号、脊髄内の神経叢のシナプス結合によって作られるフィードバック構造、さらに神経系信号の筋への伝搬遅延などの、解剖学や生理学の知見としては全身の動作との対応が知られていない問題について、仮説を立てながら解析を行う方法を確立しようとしている。この解析法によって全身の脊髄レベルの反射モデルを含むような神経筋骨格モデルにもとづく人体の動作解析が可能になる。また中枢神経系の情報処理の問題に全身の身体動作から接近する研究への道筋をつけることができるという特徴を持っている。

第1章は、「Introduction」であり、人間の筋骨格モデル、運動器の解剖学的要素、神経生理学的な行動制御系のモデルについての先行研究を紹介し、人間の神経筋骨格系モデルの構築や脊髄反射の信号とそれ以外の脊髄下行路をたどる信号の分離の問題など、本論文で扱う問題について記述している。

第2章は「Neuromusculoskeletal System of Human Whole-body」として筋骨格系の力学モデル、筋と筋の固有受容器のモデル、脊髄反射の神経系モデルについて本論文で前提とする知識について解説している。

第3章は「Musculoskeletal Model」と題して、論文掲出者らが約1000本のワイヤで全身の骨格筋をモデル化した筋骨格系の数理モデルとその計算アルゴリズムについて論じている。また、文献から得られた筋のHill-Stroveモデルや筋の固有受容器である筋紡錘・ゴルジ腱器官のモデルについても解説している。さらに、筋骨格モデルの簡略化と計算アルゴリズムの開発によって、モーションキャプチャ情報から実時間において筋張力を推定するアプリケーションを提案し、その実装した結果について報告している。

第4章は「Network Model of Spinal Nerve and Muscle」と題して、本論文の中心的な成果について述べている。骨格筋へ向かう脊髄神経の遠心性情報、筋の固有受容体から脊髄神経によって脊髄へ戻ってくる求心性情報を第3章で開発した筋骨格モデルを用いて計算する。これを入力・出力信号として与え、脊髄の中の神経叢におけるシナプス結合をモデル化した数学的ニューラルネットワークに学習させる。このときに神経および神経筋接続部における信号伝搬遅れを、生理学的な文献で知られる遅れ時間、より短い遅れ時間、より長い遅れ時間で比較したところ、文献で知られる遅れ時間に近い値で学習したニューラルネットワークの信号再現性が極大になることが確認された。

第5章は「Hypothetic Model of Voluntary Signal from Central Nerve System」であり、一連の全身運動から計算した筋活動情報の独立成分分析によって得られた各独立成分と、筋活動情報から逆算した各脊髄神経の遠心性信号の相関を計算したところ、特異的に高い相関が現れるものが数多くみられた。人間の全身運動が神経筋骨格系の解剖学的特徴を反映したものであること、脊髄上下行路の伝達資源の

有界性と伝達中のノイズの混入リスクを考えると統計的に独立な成分で随意信号をコーディングしている可能性があること、などが特異的な相関を説明する仮説として考えられている。

第6章は「Hypothetic Algorithm for Decoupling of Voluntary and Involuntary Signal」と題して、人間の神経筋骨格系において運動パターンを生成する神経情報を、脊髓反射が担う不随意的信号と、ここで随意信号とよぶ脊髓下行路をたどるそれ以外の信号に分割する方法について考察を行っている。最後に、筋に到達する運動指令信号を、随意信号と脊髓反射による不随意信号に分割することに関連してHoffmann反射を利用する方法を提案し、実験データを用いた計算をおこない考察を述べている。

第7章は「Conclusion」であり、本研究の結論を述べている。

以上を要するに、本論文は人間の神経筋骨格系の力学モデルを構築することによって、人間の身体運動の情報処理機構を解明する方法論を提案し、アルゴリズムとソフトウェアの開発ならびにそれらを用いた実験によってその有効性を示したものであり、知能機械情報学に貢献するところが大きい。よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。