

## 審査の結果の要旨

氏名 姜平

姜平提出の本論文は「Modeling of human stance postural control through musculoskeletal forward dynamics simulation (順動力学シミュレーションによる人間の立位姿勢制御モデリング)」と題し、全7章より構成される。

この論文では、人間が立位姿勢をとるときの制御方策についてのモデリング問題を扱っている。人間が立位姿勢を維持する制御機能は、人間が快適な生活を送るために最も重要かつ基本的な要件の1つである。これは人間の神経制御装置が多数の筋肉の協調により、身体を正確に維持することで実現している。この論文では、神経筋骨格順動力学シミュレーションを用いたモデル化を指向している。従来の当該問題に対するアプローチは、1~2自由度程度の単純な倒立振子モデルを用いた研究が主流であったが、それでは人間の拮抗筋の働きによる人間の複雑な制御メカニズムの解明が困難であると考え、本論文では、汎用シミュレータであるOpenSimを用いて70種類の筋を想定した120ms程度の時間遅れを伴う身体モデルを用いて、制御系の構築を目指した。

この研究の第一のポイントとして、人間の制御系が、外乱のない状態でどのように時間遅れを有する多数の筋の制御により立位姿勢を保持するかの問題を扱った。フィードフォワード制御とフィードバック制御からなるニューラルコントローラモデルを提案している。フィードフォワード制御は、立位姿勢で筋骨格モデルを維持するために常に賦活される各筋の活動度の項として定義される。またフィードバック制御は得られた感覚情報に基づいて筋活動度を決定する項として定義される。ここでは体性感覚情報のみを用いる場合を扱った。コントローラの変数は、筋骨格モデルを安定して維持するための最適化ベースの方法によって設計し、適切な設定により立位姿勢を保てることを示した。次にシミュレーションにより得られた結果の妥当性を検証した。実際の人間の筋活動度実験データと比較し、シミュレーションによって得られた解の中で特にフィードフォワードによる筋活動度和が小さい場合に、実際の人間とほぼ同等な活動度が得られたことを示した。これより提案した神経コントローラモデルが妥当であることを示した。

この研究の第二のポイントとして、複数の感覚情報入力が存在する場合の立位姿勢制御について検証した。通常の間人が立位姿勢を保持する際には、主に視覚情報、平衡感覚情報、体性感覚情報の三種類を扱うことがわかっている。ここでは、まずフィードフォワード項に加えて、三種類の感覚情報を融合してフィードバックする立位姿勢制御モデルの枠組みを作った。そのうえで、相異なる感覚情報が得られる4つの感覚入力条件（通常、視覚のみの阻害、視覚と平衡感覚の阻害、視覚と平衡感覚の阻害に加えて体性感覚の促進）時に人間が立位姿勢を保持できる制御パラメータの値を、エネルギー消費の最小化を評価関数とした最適化手法を用いて導出した。得られた結果は、阻害される感覚入力数が増えた際に、筋活動レベルが身体全体で上昇することを示していた。実際の間人における4種類の感覚入力条件に対する筋肉活性化の変化の実験データにおいても、感覚情報数の減少に伴い筋活動レベルが上昇するというデータが得られていることから、立位制御における提案感覚統合モデルの有効性を示している。感覚情報数が減少すると筋活動レベルが上昇する理由を最適化の観点から仮説的に明らかにすることができた。

この研究の第三のポイントとして、提案制御モデルが、外乱が存在する環境下においても立位姿勢を維持できるしくみの解明を目指した。上記と同様なフィードフォワード項と多感覚情報統合型フィードバック項を組み合わせた制御系を構成した。立位姿勢をとっている床面が、ある瞬間に後方に移動する外乱を想定し、その際の、立位姿勢を維持することを制約条件とし、消費エネルギー最小化を評価関数とした最適化問題を解いた。結果として、フィードバック制御系の変数を得た。ここで得られた結果は、通常の間人が、少ない外乱の際に取る戦略である ankle strategy（足首を用いた外乱適応戦略）と同様な方策をとっていることを示していた。このことは、提案した制御系が、外乱が存在する環境下でも実際の間人の立位姿勢保持のしくみをきちんと再現できていることを示している。これより提案制御モデルの妥当性を示すことができた。

これらを総合して、本論文では、神経筋骨格順動力学シミュレーションによる立位姿勢制御モデルを提案した。最適化計算により得られた制御パラメータを用いたモデルの挙動が、人間の姿勢行動のいくつかの顕著な特徴を再現できることを示した。これより提案モデルの妥当性を示した。この結果は、人間の姿勢制御機構解明に関するさらなる定量的調査の基礎となり得るものである。

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。