

審査の結果の要旨

氏名 上西 康平

上西 康平提出の本論文は「筋骨格シミュレーションを用いた筋緊張と姿勢制御戦略の関係の解明 (Elucidation of relationship between tonus and postural control strategy by musculoskeletal simulation)」と題し、全5章より構成される。

本論文は、モデルを用いたシミュレーションと実験を通して、筋緊張と姿勢制御戦略の関係を調べたものである。筋緊張は、本論文では「立位を維持するために必要な抗重力筋の持続的活動」と定義しており、重力下でヒトが立位姿勢を維持するために不可欠なものである。姿勢制御戦略は、身体に与えられる外力が小さいうちは足関節 (ankle strategy)、大きくなると腰関節 (hip strategy) の動きを中心に姿勢を保とうと戦略を変えるものであり、外力に対する立位時のヒトの反応を考えるうえで欠かせないものである。姿勢制御戦略は、筋機能が低下するなどの身体の変化に影響を受けるとされるが、筋緊張の影響は明らかにされておらず、また同時に起こる各身体変化の影響を実験的に調べることは難しい。

本論文では、筋骨格モデルと神経系コントローラモデルを用いた順動力学シミュレーションを行い、これらの関係を調べた。筋緊張を扱うためには、多数の筋を持つ身体モデルが必要である。本論文では70種類の筋を想定した筋骨格モデルを用いているが、そのようなモデルの立位姿勢を、生理学的に妥当な神経系コントローラモデルを用いて、外力下で維持した研究はこれまでにない。そのため、本論文でははじめに筋緊張調節機能を持つ神経系コントローラモデルで筋骨格モデルの立位姿勢を維持でき、外力が与えられた際のヒトの反応を再現できるかどうかを検証した。そのうえで、筋緊張をはじめとした身体の変化に関するパラメータを変えながら姿勢制御戦略を対象としたシミュレーションを行い、そしてヒトを対象とした実験結果を参考にシミュレーション結果を再検討した。

この研究の第一のポイントとして、筋緊張調節機能を持つ神経系コントローラモデルが、外力が与えられた際のヒトの反応を再現できるかどうかを検証した。床面の前後・左右・斜め方向への水平移動により、外力を生成した。筋緊張調節機能を持つ神経系コントローラモデルの制御パラメータを、安定した立位姿勢を維持するための最適化ベースの方法で設計し、いずれの方向の床面移動に対しても立位姿勢を保つことができることを示した。さらに実際のヒトの実験で計算された床面移動に対する筋の反応の大きさと比較し、シミュレーションによって得られた筋の反応の大きさがよく一致することを示した。また、シミュレーション中の筋緊張により調節される関節のステイフネスが、実際にヒトが取りうる範囲に収まっていることを示した。これにより、筋緊張調節機能を持つ神経系コントローラモデルを、姿勢制御戦略を対象としたシミュレーションで用いることができることを示した。

この研究の第二のポイントとして、筋機能、感覚ノイズ、筋緊張の条件が変わった際の、姿勢制御戦略への影響をシミュレーションにより検証した。筋機能と感覚ノイズは、姿勢制御戦略への影響が主張されているものである。これらの影響と比較し、筋緊張の影響が重要なものであるかどうかを確認する。筋骨格モデルと神経系コントローラモデルのパラメータを変更することで、これらの身体変化を表現した。神経系コントローラモデルの制御パラメータを、安定した立位姿勢を維持するための最適化ベースの方法で設計し、いずれの条件でも立位姿勢を保ちうることを示した。また、パラメータ変更による姿勢制御戦略の変化が確認された。分散分析と重回帰分析によりパラメータ変更の影響を解析し、筋機能と筋緊張の低下が姿勢制御戦略を **hip strategy** に近づけることを示した。これにより、姿勢制御戦略を考えるうえで筋緊張が重要であることを示した。

この研究の第三のポイントとして、ヒトを対象とした実験で筋緊張の指標を計算し、シミュレーション結果の再解析に用いた。健常若年者 9 名において実験を行った。スライドテーブルの上に被験者を立たせ、前後に加速度を変えながら水平移動させることで、**ankle/hip strategy** の観察と、筋緊張の上昇を狙った。結果として、スライドテーブル移動に対する筋緊張の上昇と、異なる加速度に対する姿勢制御戦略の変化が確認された。単回帰分析を用いて、筋緊張と姿勢制御戦略との関係を解析したところ、関係は確認されなかった。さらにこの実験で観察された筋緊張の範囲でシミュレーション結果を再解析すると、筋緊張と姿勢制御戦略との関係は確認されず、実験結果とシミュレーション結果

に一致が見られた。これらの結果から、筋緊張を直接操作せず、平常時に筋緊張が取りうる値の範囲では、筋緊張と姿勢制御戦略との間には相関がないことが示された。また、シミュレーション結果から、より筋緊張の大きい範囲では、筋緊張が大きくなるに伴い姿勢制御戦略が **ankle strategy** に近づくことが示唆されている。

本論文では、筋骨格モデルと神経系コントローラモデルを用いて、異なる姿勢制御戦略を再現できることを示した。またシミュレーション結果が実験結果と筋緊張の小さい側において一致することを示した。これより、これらのモデルが、外力に対するヒトの立位姿勢制御シミュレーションを行う上での基礎となりうることがわかった。

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。