

審査の結果の要旨

氏名 安琪

安琪氏の博士論文は「**Modeling and Constructive Understanding of Human Standing-up Motion Using Muscle Synergy**」と題し、全6章より構成される。本論文では筋シナジーと呼ばれる筋肉の協同発揮を用いて、解析的アプローチと構成論的アプローチからヒトの起立動作の生成メカニズムを解明し、起立動作の運動域を拡張するためのシステムの提案を行っている。

第1章では、本論文の背景である高齢社会が、社会保障制度や高齢者自身に与える問題点に関して概観した。その上でヒトの起立動作が座位から立位へと姿勢を変換し、空間における移動運動を導くという点で日常動作の起点となる重要な動作であることが確認されている。そして本論文の目的である起立動作の生成メカニズム解明の意義について述べている。

第2章では、先行研究において運動機能の改善に必要な要素が確認され、単一の筋の強化だけでは不十分で複数の筋肉の協調が必要であることが確認された。また本論文で用いた筋シナジーモデルについて、筋シナジーを生成する神経機構と生み出される適応的な運動について説明がなされた。その筋シナジーを用いた起立動作のメカニズム解明のためには、ヒトの運動から要素を同定する解析的アプローチによる必要条件の抽出と、実際にヒトの運動を作り上げることでメカニズムを理解する構成論的アプローチによる十分条件の確認という両アプローチが必要不可欠であることが述べられている。

第3章では、異なる環境に対するヒトの起立動作の適応性を調べるため、解析的アプローチから、座面高と運動速度を変更した際の起立動作において、不変的な構造と適応的に変化する構造の同定を行った。健常若年者7名において実験を行い、上体と下肢から計測された12筋の活動を、協調して発揮する筋のまとめ（筋シナジーの空間パターン）とその重み付け係数の時系列変化（筋シナジーの時間パターン）に分解した。その結果、全ての条件において4つの

筋シナジーを用いて起立動作が生成されることが明らかにされた。筋シナジーの空間パターンを比較すると、条件が異なるにも関わらず非常に高い類似性が認められ、共通する構造であることが示された。また時間パターンに関しては、各シナジーが先行研究で報告された起立動作の 4 つのフェーズ（上体の前屈・臀部の離床・全身の伸展・姿勢の制御）に対応していた。しかし、異なる座面高に関しては時間パターンの振幅を調整しており、座面高が低くなるにつれて振幅の上昇が認められた。一方で異なる運動速度の変化に対しては主に時間パターンの継続時間を調整しており、運動速度が遅くなるにつれて継続時間の上昇がみられる。これらの点からヒトの起立動作において筋シナジーの空間パターンが共通の構造として保存され、時間パターンを適応的に変化させることで多様な運動を生成していることが示されている。

第 4 章では、構成論的アプローチからヒトの神経筋骨格モデルを構築し、筋シナジーがヒトの起立動作を生成するかの検証を行い、各筋シナジーが運動に与える影響の調査がなされている。神経筋骨格モデルは神経系、筋モデル、骨格モデルから構成され、筋活動から運動時の身体姿勢を計算することができる。構築した神経筋骨格モデルを利用した順動力学シミュレーションを用いて数値計算を行い、実際に 4 つの筋シナジーの空間パターンに対して時間パターンを調整することで、個別の筋活動を制御することなく、ヒトの起立動作が生成されることが解明された。同様のモデルを用いて、各筋シナジーの振幅を減少させた際に身体軌道が受ける影響の評価を行い、各筋シナジーは上体の前屈、重心の前方移動、全身の伸展、重心の後方移動を担っていることが確認された。次に筋シナジー間でどのような協調構造があるかを調べるために、筋シナジーの開始時間をそれぞれ変化させた際に起立動作がどのように変化するかを算出した。その結果異なる筋シナジーの開始時間の組み合わせによって、先行研究において報告された **Stabilization, Hybrid, Momentum Transfer** の 3 つの戦略が生成され、特に **Stabilization** では必要な筋活動が低下することが示された。

第 5 章では、起立動作において運動域の拡張をするシステムの提案を行った。運動能力の改善には、自己効力感と呼ばれる自身が目標を達成できるという感覚が重要である。最小化可知差異（JND）というヒトが気づかない変化量に着目し、若年者と高齢者において腰関節の JND の計測を行った。計測された JND を用いて起立開始時の上体の前屈を誘導するように気づかれない範囲内で動作域を徐々に拡張するシステムを構築し、第 4 章で示された **Stabilization** の戦略を達成しうることが示された。

第 6 章では、本論文の成果が総括されている。また今後の研究の方向性として、特に神経機構との対応関係の調査、本論文において提案された筋シナジーモデルを用いたトレーニングシステムへの応用が述べられている。

以上本論文では、日常動作の起点となる重要なヒト起立動作において、ヒトがいかに全身の筋を制御しているか従来明らかにされてこなかった問題に対して、解析的・構成論的アプローチから、起立動作を生成するために 4 つの筋シナジーが必要でそれらを巧みに協調することで運動を達成していることを解明した点において、博士論文として十分なオリジナリティとコントリビューションがあると判断する。

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。