

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏 名 上西 康平

ヒトは日常生活の中で頻繁に立位姿勢を取る。そのため、疾患や怪我等のために立位姿勢の実現に制限がかかれば、日常生活を送る上で大きな不利益を被ることとなる。ヒトの立位姿勢のメカニズムを理解することは、そうした不利益を軽減するうえで欠かせない。また、そのためには「立位を維持するために必要な抗重力筋の持続的活動」である筋緊張の調節機構を理解する必要がある。

ヒトの立位姿勢制御研究において重要な概念として、姿勢制御戦略がある。外乱が小さいうちはankleまわりの動きでバランスを取り、外乱が大きくなるとhipまわりの動きも動員する。さらに外乱が大きくなると足を踏み出して立位姿勢を維持する。この姿勢制御戦略は筋機能が低下する、感覚情報を適切に取得できなくなる等の、身体の変化に影響を受けるとされるが、どの身体変化がどのように姿勢制御戦略に影響を及ぼしているかは明らかでない。筋緊張は、脊椎動物において最古の下行路である網様体脊髄路によって調節されており、身体の安定性に寄与することが知られているが、筋緊張が姿勢制御戦略に及ぼす影響についても、やはり明らかにはなっていない。

これらの影響を実験的に調べるのは、様々な身体変化が同時に影響するため難しい。そこで身体と神経系のモデルを立て、身体変化をモデルのパラメータ変更として表現し、シミュレーションを行うことが有効となる。しかし、身体変化と姿勢制御戦略に関する

シミュレーションは、トルク駆動のモデルを用いて行われていたのみであり、そのフレームワークでは筋緊張を扱うことができなかった。筋骨格モデルを用いれば筋緊張を扱うことができるが、身体変化を扱った立位姿勢制御シミュレーションは行われていなかった。

本研究の目的は、筋緊張が姿勢制御戦略に及ぼす影響を明らかにすることである。従来の知見より、以下の仮説を立てる：筋緊張が小さいとき、身体は不安定になり、姿勢を維持する能力の高いhip strategyが選択されやすくなる。本研究ではシミュレーションと実験を通し、この仮説を検証する。

第2章では、筋緊張調節機能を持つ神経系コントローラモデルを用いて外力下で筋骨格モデルの立位を維持できるかどうか、外力下で外力に対する反応を再現できるかどうかを確認した。筋緊張と姿勢制御戦略の関係を調べるシミュレーションのためには、筋緊張を扱える神経系コントローラモデルが必要である。筋緊張調節機能を持つ神経系コントローラモデルは過去に提案されていたが、静止立位シミュレーションにのみ使われており、姿勢制御戦略があらわれるような外力下での性能は不明であった。そのため、筋骨格モデルを神経系コントローラモデルで制御し、外力下で立位姿勢を維持させるシミュレーションを行った。12方向への床面の移動をタスクとした。矢状面のみを考慮していた先行研究の関節自由度7自由度の筋骨格モデルに、8自由度の関節自由度を追加し、矢状面外の動作も可能な筋骨格モデルを作成した。神経系コントローラモデルの制御パラメータ調節により、外力下での筋骨格モデルの姿勢の維持に成功した。筋骨格モデルの評価のため、各方向の床面移動に対する筋の反応の大きさ、後方への床面移動時のankleのスティフネスに注目した。6つの筋の反応を観察したが、床面移動に対する筋の反応の大きさは、6つのうち5つの筋で先行研究の結果と一致した。また、ankleのスティフネスは、関節のスティフネスのみでは立位姿勢を維持できないという先行研究の知見と一致した。ふたつの評価指標で、神経系コントローラモデルが外力下でも使用可能であることが示された。

第3章では、身体変化が姿勢制御戦略に及ぼす影響を調べるためのシミュレーションを行った。前章で外力下で使用できることを確認した神経系コントローラモデルと、筋骨格モデルのパラメータを変更しながらシミュレーションを行い、各パラメータの影響を確認した。身体の変化として、筋緊張低下に加え、先行研究で扱われた筋機能低下、感覚ノイズ増加をモデルのパラメータ変化として表現した。姿勢制御戦略の差異を表現する評価指標として、腰部が最も屈曲した時の関節角度であるpeak hip angleに注目した。パラメータ変化とpeak hip angleとの関係は分散分析、重回帰分析によって解析された。シミュレーションを通して、筋機能低下と筋緊張低下が、peak hip angleの増加につなが

るという結果を得た。また筋緊張が一定以上であれば、筋力低下の度合いに関わらず、peak hip angleは小さく保たれることが確認された。姿勢制御戦略を考える際に、筋緊張を考慮することが重要であることが示された。はじめに立てた仮説を支持する結果が得られた。

第4章では、筋緊張が姿勢制御戦略に及ぼす影響を調べるため、ヒトを対象とした実験を行った。前章のシミュレーションでは、変化させた筋緊張の範囲を実際のヒトの筋緊張と比較した際の大小が不明であった。ヒトを対象とした実験で実際の筋緊張を観察すると同時に、筋緊張と姿勢制御戦略の関係を調べる。姿勢制御戦略が観察されやすいタスクとして、床面の前後方向の移動を採用した。被験者は9名の若年者（18-30歳）である。被験者はスライドテーブルの上に立ち、閉眼して腕を胸の前で組んだ。前後2種類、加速度3種類の床面移動に対し、姿勢を維持した。筋緊張の指標として外乱印加直前の表面筋電位のRMS平均、姿勢制御戦略の指標としてpeak hip angleを計算した。指標間で直線による回帰分析を行ったところ、いずれの床面移動でも、筋緊張と姿勢制御戦略の間に相関は見られなかった。また観察された筋緊張は、第3章のシミュレーションで扱われたものより小さい可能性が示された。第3章のシミュレーション結果のうち、筋緊張の小さい側で再度重回帰分析を行うと、筋緊張と姿勢制御戦略の指標間に相関は確認されないという結果となった。これは実験結果を説明しうるものである。

今回の実験で観察された筋緊張の範囲では、筋緊張と姿勢制御戦略の相関は見られないという点で、シミュレーション結果と実験結果が一致した。また、仮説はシミュレーション結果によって支持された。今回実験では筋緊張を直接操作しておらず、筋緊張は平常時に取りうる範囲を出ていないことが考えられるため、より筋緊張を上昇させられる実験系を組むことで、シミュレーション結果についてのさらなる検証が可能となる。

第5章では、結果をまとめ、今後の展望を述べた。本研究で明らかとなったことおよび課題について記述した。