

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 人間・環境学 )	氏名	田辺 弘子
論文題目	Postural control mechanism of human bipedal standing (ヒトの二足静止立位の制御メカニズム)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文では、ヒトの日常生活の基盤である立位制御のメカニズムを明らかにすべく、「立位制御ストラテジーのトレーニングによる可塑性」「立位の安定性・ロバスト性」「立位制御に対する個々の筋活動の機能」の解明を目的とする研究であり、全7章から構成されている。</p> <p>本論文では、まずヒトの立位制御に関する運動制御学、神経生理学、バイオメカニクス学的先行研究をレビューし、研究の理論枠組み・問題意識・研究目的を述べた(第1章)。次に、実際に行った5つの研究を記述した(第2～6章)。その後、得られた結果、ならびにこれまでの知見を踏まえ、総合的な考察を展開し、最後に結論を述べた(第7章)。</p> <p>第1章では、研究の理論枠組みを提示した。ヒトの二足立位の安定性はどのような運動制御によって達成されているか、という問題は、運動制御、神経生理、バイオメカニクスの研究の中で重要な問題の一つである。本研究の目的は、運動制御、神経生理、バイオメカニクスの観点からヒトの二足立位の制御メカニズムを明らかにすることである。</p> <p>第2章では、つま先立位課題中に足関節、膝関節、股関節の角変位をバレエダンサーとノンダンサーで比較検討した。その結果、バレエダンサー特有の足関節と膝関節の同位相の協調運動、すなわち関節協調運動が抽出された。この結果より、バレエダンサーの優れた立位バランスの安定化機能は、同相の関節協調パターンが重要であること、そして、こうした関節協調パターンは美しさと立位安定性を目的としたトレーニングにより獲得された可能性が示唆された。</p> <p>第3章では、バレエダンサー特有の同位相の関節協調運動に及ぼす筋活動の影響について検討した。つま先立位課題中に足関節、膝関節、股関節まわりの筋から表面筋電図を導出し、その結果、複数筋の活動の高周波帯域までコヒーレントであった。この結果より、バレエダンサー特有の関節協調運動は、筋間のカップリングに関連することが示唆された。</p> <p>第4章では、バレエの基本的な立位ポジションにおいて、下肢筋群から表面筋電図を導出し、足関節、膝関節、股関節まわりの筋のカップリングを検討した。その結果、第3章と同様、バレエダンサーにおいて関節協調運動が認められた。さらに、バレエダンサーの関節協調運動に極めて大きな個人差が観察された。第2章から第4章までの実験的検証から、バレエダンサー特有の関節協調運動は立位の安定性を反映し、そ</p>			

れは関節粘弾性と中枢の制御ストラテジーに依存するという仮説が得られた。

第5章では、この仮説を検証するためにシミュレーションによる構成論的解明を行った。従来、中枢の制御は連続的に行われていると考えられていたが、本研究では、冗長自由度簡略化の観点から中枢が間欠制御を行っているものとしてシミュレーション変数を含めた。その結果、関節粘弾性・間欠制御ストラテジーの変化により関節協調運動パターンが変化し、関節粘弾性係数や中枢の制御ストラテジーが変化すると立位のロバスト性に大きく差が生じることが明らかとなった。これにより、バランストレーニングによって個々の関節粘弾性に応じて立位ロバスト性が大きくなる関節制御ストラテジーを学習し、結果として関節協調運動パターンが変化する可能性を理論的に導いた。

第6章では、第5章のシミュレーションによる結果を生理学実験で検証することを目的とした。その際、シミュレーションで着目した間欠制御について実験的に抽出する必要があった。第6章では、表面筋電図活動の適切なフィルター処理により間欠的筋活動のみを抽出する試みを行い、間欠的筋活動と静止立位時の姿勢動揺との時空間的関連性を検討した。その結果、間欠的筋活動は位相空間内の状態点の位置によりトリガーされ、解剖学的至適方位に基づく関節トルクの出力に関連した。この結果により、間欠的筋活動がフィードバック制御に重要な要因であることが明らかになった。

第7章では、総合的な考察を行い、研究のまとめと今後の展望を記述した。本研究では、立位制御ストラテジーのトレーニングによる可塑性についてバレエダンサーを対象として検討した。その結果、立位の安定のためのストラテジーとして各関節まわりの筋のカップリングが重要であることを示唆した。また、立位の安定性には、各関節の関節粘弾性と間欠的筋活動が重要であり、これら要因は、冗長自由度の簡略化にも寄与することが示唆された。今後の研究課題として、動的な身体活動時の運動制御則を関節協調運動、関節粘弾性や間欠制御の観点から検討する必要性を指摘した。

(論文審査の結果の要旨)

本学位申請論文では、ヒトの立位制御のメカニズムを明らかにすることを目指し、立位制御ストラテジーのトレーニングによる可塑性、立位の安定性・ロバスト性、立位制御に対する個々の筋活動および関節粘弾性を検討した実験研究およびシミュレーション研究をまとめたものである。ヒトの二足立位は重心が高く、支持面が狭いため、間断のない制御が必要であり、未だヒトの柔軟な立位制御則は未解明である。これまで、ヒトの立位制御に関する研究は、力学的および神経科学的実験からアプローチされてきた。本論文は、実験研究のみならず数理モデルを用いてヒトの二足立位制御メカニズムに関して新たな知見を見出した。

実験研究では、まず、立位制御ストラテジーのトレーニングによる可塑性を明らかにするために、立位安定性の優れたバレエダンサーの立位制御を検討した。従来の立位に関する研究は、足関節を回転中心とした1リンクの倒立振子に近似して解釈してきた。本研究では、足関節、膝関節、股関節を回転中心とした4リンクの倒立振子に近似して測定および解析を行っている。その結果、バレエダンサーの立位はノンダンサーと異なる関節動揺を示した。すなわち、ノンダンサーは足関節角変位と膝関節角変位は逆位相を示すのに対し、バレエダンサーの両関節角変位は同位相を示すというバレエダンサー特有の関節協調運動を見出した。この成果は、国際学術雑誌であるJournal of Electromyography and Kinesiology (第22巻、6号、975-982頁、2012年発行)に掲載された。さらに、バレエダンサー特有の同位相の関節協調運動に及ぼす筋活動の影響について検討した。立位課題中に足関節、膝関節、股関節まわりの筋から表面筋電図を導出した。その結果、各関節まわりの筋活動が高い周波数帯域までコヒーレントであることを示し、バレエダンサー特有の関節協調運動は、筋間のカップリングに由来することを見出した。この成果は、国際学術雑誌であるHuman Movement Science (第34巻、41-56頁、2014年発行)に掲載された。これら研究により、立位バランスの安定化機能は、同位相の関節協調パターンが重要であること、そして、こうした関節協調パターンは美しさと立位安定性を目的としたトレーニングにより獲得された可能性が示唆された。静止立位およびつま先立位時の安定性に関する実験研究に加え、バレエの基本的な立位ポジションにおいて、下肢筋群から表面筋電図を導出し、足関節、膝関節、股関節まわりの筋のカップリングを検討した。その結果、難しい運動課題においても、バレエダンサーの関節協調運動が認められた。さらに、バレエダンサーの関節協調運動に極めて大きな個人差が観察された。この複雑な立位課題における関節協調運動の個人差は、バレエの学習過程に起因することを見出した。この成果は、国際学術雑誌であるMotor Controlに掲載される予定であ

る（2015年10月25日アクセプト、現在印刷中）。これら実験的検証から、立位の安定性には、関節の粘弾性および中枢による独特の制御ストラテジーに依存することが想定された。

そこで申請者は、シミュレーションによる構成論的解明を行った。従来、中枢の制御は連続的に行われていると考えられていたが、申請者は、連続的な制御では遅延時間が長くなること、中枢神経系の計算量が膨大になることから、中枢神経系は連続的な制御ではなく、間欠的な制御を行っているという仮説を立てた。シミュレーションによる研究では、中枢神経系の連続制御あるいは間欠制御に加え、足関節・膝関節・股関節の粘性係数および弾性係数を変化させた。その結果、各関節の粘弾性に加え中枢神経系による間欠制御が立位安定性に極めて重要であることを見出した。この成果は、バイオメカニクスの学術分野において高く評価され、日本バイオメカニクス学会奨励賞を受賞した。申請者は、立位安定性に重要である間欠制御について実験的に検証を行った。シミュレーション研究で着目した間欠制御について実験的に抽出することに成功し、この解析方法を用い、静止立位中の下肢筋群の間欠的筋活動を抽出した。その結果、間欠的筋活動は位相空間内の状態点の位置によりトリガーされ、解剖学的に沿った方向の関節トルクの出力に関連した。この結果により、間欠的筋活動がフィードバック制御に重要な要因であることを実験的に明らかにした。

従来、ヒトの二足立位制御に関する研究は、足関節を回転中心とする1リンクの倒立振子で近似した単純なモデルであった。申請者は、よりヒトの動きを再現するために、足関節、膝関節、股関節を回転中心とした4リンクの倒立振子モデルの実験およびシミュレーションに挑戦した。ヒトの立位制御を多リンクで検討するという本研究は、極めて独創性の高い研究である。

以上の通り、本学位申請論文の研究成果は国際学術雑誌に掲載されており、その独創性と学術的価値は高く評価される。したがって、本学位申請論文は、共生人間学専攻 認知・行動科学講座に相応しい内容を備えており、博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成28年1月15日、論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 2016 年 4 月 1 日以降