

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 人間・環境学 )	氏名	木伏 紅緒
論文題目	<b>Muscle and kinematic coordination system in human walking</b> (ヒト歩行における筋および運動学的協調構造の解明)		
(論文内容の要旨)			
<p>冗長性を有するヒトの身体運動を簡略化するための戦略として、いくつかの筋をモジュール式にまとめて支配する筋シナジーという概念が提唱されてきた。さらに、骨格の動きを簡略化して解釈しようとする運動学シナジーという概念も提唱されている。しかし、それら存在は概念であり、実際に筋シナジーや運動学シナジーが身体運動にどのように貢献しているかは不明である。本論文は、歩行動作に焦点を当て、筋シナジーおよび運動学シナジーに基づく歩行動作の制御機構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、まず歩行動作に関する運動生理学、バイオメカニクス、運動制御学、神経生理学、心理学的先行研究をレビューし、研究の理論的枠組み・問題意識・研究目的を述べた(第1章)。次に、生理学実験に基づく5つの実験研究(第2～6章)を記述した。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)。なお、すべての実験は、京都大学大学院人間・環境学研究科人間情報研究・動物実験倫理委員会の承認を得ている。</p> <p>第1章では、研究の理論的枠組みを提示した。ヒトの歩行運動の柔軟さ、複雑さ、冗長さはどのような運動制御則によって達成されているか、という問題は歩行動作の研究分野の最大の問題である。本研究は、筋間協調および関節間協調の観点から歩行動作の制御則を明らかにすることである。</p> <p>第2章では、歩行動作の速度に依存した筋シナジーの変化を定量し、筋シナジーの空間的パターンを検討した。歩行動作において膝関節伸展筋群の重みの大きい筋シナジーが重要であることを示した。また、歩行動作の筋シナジーは4あるいは5個が最適であり、歩行速度間で筋シナジーの重み付けが非常に類似していることから、筋シナジーは歩行速度に対して固定的であることを示した。</p> <p>第3章では、歩行動作の筋シナジーの時間特性に着目し、筋シナジーの活動度の時間特性の観点から歩行動作の安定性を評価した。歩行動作の安定性を評価する手法として、本実験では最大リアプノフ指数を用いた。最大リアプノフ指数は正の値をとる場合、近傍点間距離が発散するため、局所安定性の観点では不安定であることを意味する。歩行動作の筋シナジー活動度の最大リアプノフ指数はすべての速度帯で正の値をとり、歩行速度の高速化に伴い増加した。この結果より、筋シナジーの時間特性の観点から、歩行速度の上昇に伴い歩行動作は不安定になることが運動制御の観点から示された。</p>			

第4章では、筋シナジーの応用研究として、高齢者の歩行動作の制御特徴を筋シナジーの空間的および時間的パターンを検討した。至適速度の歩行動作における筋シナジーの数は、若齢者に比べ高齢者が少ないことが示された。筋シナジーの重み付けパターンをSammon's mappingにより8次元の重み付けパターンを2次元平面に射影し、より詳細に若齢者と高齢者の筋シナジーの重み付けパターンを比較した。筋シナジーのパターンは若齢者と高齢者では類似していることから、若齢者と高齢者の筋シナジーの違いは、シナジーの数のみであることが示された。若齢者に存在する遊脚期の筋シナジーが高齢者において存在しないことは、高齢者の歩行動作が若齢者に比べ、脚が高く上がらない、所謂すり足歩行になっていることを示し、これが高齢者の転倒のしやすさにつながっていると考察した。

第5章では、歩行速度やストライド長やストライド時間といった歩行パラメータを意図的に変化させたときの運動学シナジーを検討した。運動学シナジーの空間的パターンは歩行パラメータの変化に応じて固定的であることを示し、さらに、局所安定性は高速度および著しくストライド長が短いときに低下することを示した。

第6章では、不安定歩行路への適応過程での運動学シナジーの変化を検討した。不安定歩行路は、幅50mmの弾性のある紐を歩く課題とし、この試行を240回行った。運動学シナジーは不安定歩行路への適応過程でも変化せず、そのパターンは通常の地面歩行時と類似していることを示した。すなわち、一見不安定に見える歩行であっても関節間協調は変化せず、歩行パラメータの変化が関節間協調の変化、ひいては歩行の不安定性を引き起こしていることが示された。

第7章では、総合的な考察を行い、研究のまとめと歩行動作における筋シナジーおよび運動学シナジーの機能的意義について記述した。筋シナジーや運動学シナジーの空間的パターンは様々な歩行出力の要求に対して構成が保存される一方、時間的活動パターンは柔軟に変化する。これにより、筋シナジーや運動学シナジーは固定的ではあるが外部環境の変化に応じて柔軟な歩行動作が達成されていることが示唆された。以上より、本博士論文を通して、筋シナジーおよび運動学シナジーに基づく制御機構は、柔軟な歩行動作を達成する上で必要不可欠な機構であると結論づけた。

(論文審査の結果の要旨)

本学位申請論文では、莫大な冗長自由度を有するヒトの歩行制御を簡略化するための戦略として、いくつかの筋をモジュール式にまとめて支配する筋シナジーと複数の関節を協調的に捉える運動学シナジーに着目し、これらシナジーの観点から歩行動作の運動制御則の解明を目的として生理学実験研究を主にまとめたものである。

筋シナジーに関する研究では、歩行の至適速度の存在を運動制御の観点から検討した。その結果、抽出された筋シナジーは歩行速度の上昇とともに増加した。すなわち筋シナジーの個数は歩行速度に依存し、至適歩行速度に特異的な筋シナジーが存在することではないことを見出した。また、抽出された筋シナジーに被験者全員に共通した固定的な筋シナジーが観察された。このことは、成人の歩行動作には個人差は小さく、歩行動作において成人は共通した固定的な筋シナジーが存在するという重要な知見を示した。この成果は、国際的に高く評価され、国際学術雑誌であるFrontiers in Human Neuroscience (第12巻、第4号、2018年発刊)に掲載された。さらにこの研究成果は、宇宙飛行士の地球帰還後の極めて不安定な歩行動作からの回復に関する研究として、今後すべての宇宙飛行士を対象としてNASA (アメリカ航空宇宙局) で実施され、国際的要請に基づく宇宙医学研究として注目を浴びている。さらに、力学系が示す軌道の不安定性を表す量であるリアプノフ指数を筋シナジーの活動度に適応し、歩行の不安定性を評価した。この研究成果は、International Society of Electrophysiology and Kinesiology学会にてInternational Travel Awardを受賞した。これら申請者の歩行動作の筋シナジーによる筋の協調構造に関する研究は、トレーニング科学、運動生理学の分野においても評価され、学術雑誌である日本トレーニング科学で特集として取り上げられている (印刷中、第31巻、第1号、2019年3月発刊予定)。転倒による高齢者の生活の質の低下が社会問題となっているが、申請者はこの社会問題に対して、高齢者の歩行動作の不安定性に関して筋シナジーの観点から研究を進めた。その結果、高齢者は若齢者に比べ筋シナジーの数が少ないこと、高齢者の筋シナジーの重み付けに極めて個人差が大きいことを示した。この研究成果は、高齢者の健康問題に関する研究分野に重要な貢献を与えた。すなわち、これまでは、高齢者の転倒予防には筋量や筋力を向上させることが重要との見解が一般的であったが、本研究結果により高齢者の転倒予防には、遊脚期に股関節伸展運動および膝関節屈曲運動を同時に起こす筋シナジーを構築する必要性が生じた。この研究結果は、日本バイオメカニクス学会奨励賞基礎研究部門を受賞した。さらに、学術雑誌である日本バイオメカニクスに特集として取り上げられた。

申請者は、筋シナジーに加え運動学シナジーの観点から歩行動作の不安定性について生理学実験を行った。不安定な歩行動作をシミュレートするために、歩行速度やストライド長やストライド時間といった歩行パラメータを意図的に変化させ、体幹部および下肢の各セグメントの仰角から運動学シナジーを抽出した。その結果、運動学シナジーから評価される関節間協調および時間協調は歩行速度よりもストライド長やストライド時間に影響を受けることを明らかにした。この研究結果は神経科学の分野で高い評価を受け、*Frontiers in Human Neuroscience*（第12巻、第485号、2018年発刊）に掲載された。さらに、運動学シナジーの時間協調のリアプノフ指数を算出し、力学系の観点から歩行動作の不安定性、ひいては転倒のしやすさを定量した。この研究成果は、*Experimental Brain Research*（第237巻、第1号、257-271頁、2019年発刊）に掲載された。

歩行動作の活動様式に関する研究は古くから行われているが、その多くは、単一筋の活動の仕方を検討した解析に留まっていた。申請者は、膨大な自由度を簡略化する筋間協調および関節間協調という新たな視点から歩行動作の制御則を定量することに挑戦した。ヒトの歩行動作の転倒のしやすい神経システムを定量するという本研究は、極めて独創性の高い研究と評価できる。

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30年12月26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：                      年                      月                      日以降