

学位論文題名

動作と反射からみた外力への予測的対応

学位論文内容の要旨

走運動等の主に脚部を用いる移動運動は、脚部の関節動作や脚部の力学的状態の変化に伴う着地中の力発揮の変化を説明する簡単なモデルである、質点(重心位置に身体質量が集中した点)–バネ(脚部)モデルに置き換えて考えることができる。このモデルでは着地前の脚部バネの固さ(脚スティフネス)変化によって、バネの圧縮により生ずる外力の大きさが変化する。一方で、人の脚スティフネスの調整は着地前と着地後に分けられ、着地前では、これから身体へ作用する外力の大きさに対応可能な着地動作の事前の形成が、着地後では、外力により伸長した筋を短縮させる筋の伸張反射応答が重要な方法であると考えられている。しかし、実際の走運動中でみられる踵着地から前足部着地への変化は、外力への対応と高い走速度を保持する、の2つの要因が考えられていて、着地動作の変化の要因が明確にされていない。さらに、外力作用のタイミング予測に伴う筋の伸張反射により発生する筋電図(EMG)応答(反射EMG応答)の発生時間を短縮することも重要であると考えられるが、反射EMG応答の振幅増加が明らかにされているのみである。そこで本論文では第1章(文献研究)において、1)走運動中の踵着地から前足部着地への変化に関する先行研究の現状と、2)筋の反射EMG応答に関する先行研究の現状を検討し、それらの研究の現時点での到達点を明らかにした。

1)の課題に関して、走運動中の踵着地から前足部着地への変化の要因が高速で走行するため、さらに障害物越え後に生ずる着地動作の変化の要因が、着地時に身体へ作用する外力の大きさへ対応するためという2つの考えが混在することを明らかにした。そして、2つの要因が混在するのは、実験で被験者が外力吸収能の高い靴を着用していたためであることを指摘した。その一方で、裸足走行では着地直後に外力が急激に発生し、その外力の減少を可能にする着地動作が事前に形成されることを明らかにし、裸足走行が着地動作の変化の要因を明確にする可能性を指摘した。2)の課題に関しては、外力作用前の筋の予備活動中の外力作用のタイミングの予測により主動筋や拮抗筋の反射EMG応答がさらに増強すること、そして上位中枢で行われる運動イメージ活動により反射EMG応答の発生時間が短縮されることが近年の反射応答の新たな知見であることを明らかにした。また反射EMG応答の解析では、反射EMG応答の発生の検出が求められ、検出では安静時のEMGと反射EMG応答を比較している。しかし、従来の安静時EMGの平均値と3倍の標準偏差(Mean+3SD)以上を基準とする検出では、僅かなEMG振幅変化を検出しないという問題があると明らかにした。以上の先行研究の検討結果から、これから身体に作用する外力の特徴の予測によって、1)走運動中の着地動作の変化が事前に形成されるかを実験的に検証することと、2)伸張反射EMG応答の発生時間が短縮されるかを実験的に検証することとして本論文の目的を整理し提示した。また2)に関してはその反射EMG応答の発生がより厳密に検出できる新方法を考案することも実験課題に提示した。そして続く3つの章で、その課題を実験的に検討した。

第2章では、走運動中の踵着地から前足部着地への変化が、外力の大きさに対応するために生ずるか、さらに着地前の外力の大きさ予測に基づき、その大きさに対応可能な着地動作が事前に形成されるかという仮説を検討することを目的とした。そこで実験では、従来の靴条件に加え、外力を増大させる裸足条件を設定し、各被験者(n = 9)はそれぞれの条件においてベルトの回転速度が可変なモーター可動式トレッドミル上で走運動を実施した。ベルトの回転速度は 2.0m/s から最高で 5.5m/s まで、1試技毎に 0.25m/s ずつ増加させた。最初に裸足条件の試技を行い、次に靴条件の試技を行った。各被験者の試技中の脚部動作は高速度カメラで撮影した。その運動学的データから下肢関節のトルクを算出した。また、着地時に身体に作用する外力の大きさを調べるために右腓骨外果上部に加速度計を装着し加速度変化を測定した。着地時に生ずる最大加速度とその発生時間から躍度を求めた。本研究ではそれを着地時の外力すなわち着地衝撃とした。その結果、着地動作の変化が生じた走速度(PTS)は靴条件より裸足条件が低かった。靴条件と裸足条件の PTS 前後の着地衝撃はほぼ同じ値であったが、裸足条件では前足部着地へ変化すると着地衝撃が減少した。また、着地動作の変化によって着地前に発揮される膝関節と股関節のトルクが変化することを明らかにした。これらの結果から着地衝撃を減ずるために着地動作の変化が生ずること、さらに着地動作の変化については、事前の着地衝撃の予測に基づいて着地前に形成される局面が存在することが示された。

第3章では、伸張反射 EMG 応答の発生時を、従来の Mean+3SD 法より厳密に検出する方法を考案し、その方法で検出された発生時間と従来の方法で検出された発生時間の比較を行った。実験では1名の被験者の肘関節に肘関節伸展方向への外力トルクを与え、上腕二頭筋で発生した反射 EMG 応答を測定した。反射 EMG 応答の発生時の検出では、まず離散ウェーブレット変換を用いて EMG に含まれるノイズを除去した。次に統計手法の1つであるスミルノフの棄却検定を用い、安静時の EMG 振幅と反射応答により生じた EMG 振幅を比較し、反射 EMG 応答の発生時を検出した。また従来の Mean+3SD 法による反射 EMG 応答の発生時の検出も行い、新検出方法で検出された時間との比較を行った。その結果、新検出方法では従来の Mean+3SD による反射 EMG 応答よりも短い時間で検出されることが確認され、また比較した 15 試技分の差の平均時間は約 10ms であった。この結果から棄却検定を土台とする検出方法は、従来の方法よりも反射 EMG 応答の振幅変化を感知する感度が高いことが示された。

第4章では、外力作用のタイミング予測が主動筋と拮抗筋の反射性共収縮活動の発生時間を短縮させるという仮説を検証することを目的とした。各被験者(n = 11)の前腕を電磁トルクモーターシステムに固定し、関節伸展方向への外力トルクを与え、上腕二頭筋 (Bb) と上腕三頭筋 (Tb) の反射 EMG 応答を引き起こした。外力トルク強度はトルクモーターの最大トルクの 50%(16Nm)と 55%(18.5Nm)とした。また肘関節の角度変化を測定した。試技では外力トルク作用前に音により外力作用を予告する試技(AN 条件)と不意に外力トルクを与える試技(UAN 条件)を設けた。反射 EMG 応答の検出は第3章で考案した新検出方法を用いた。その結果、Bb および Tb の反射 EMG 応答の発生時間は UAN 条件より AN 条件が有意に短かった。また、肘関節の伸展方向から屈曲方向へ切り替わる角度も UAN 条件より AN 条件が有意に小さかった。したがって、外力作用のタイミング予測は反射性の共収縮活動の発生時間を短縮させ、さらにその時間短縮によって関節スティフネスが素早く増加することが示された。

第5章の総括では、第2章から第4章までの結果をもとに動作と反射からみた外力への予測的対応を包括的に検討し、第6章では、本論文の結論を次のように導いた。1) 走運動中の着地動作の変化では、その着地前に外力を予測する局面があり、その外力への対応可能な予測的動作を形成する。2) 外力が作用するタイミングの予測に伴う伸張反射応答の発生時間の短縮は、共収縮活動の開始時間を早め、関節スティフネスを素早く増加させ、結果として関節姿勢の素早いリカバリーを可能にする。

学位論文審査の要旨

主 査 助 教 授 山 田 憲 政
副 査 教 授 水 野 眞 佐 夫
副 査 助 教 授 保 延 光 一
副 査 助 教 授 松 山 清 治 (札幌医科大学医学部)

学位論文題名

動作と反射からみた外力への予測的対応

本論文は、外力に対する身体の予測的な対応を、動作と反射の観点から研究したものであり、6つの章から構成されている。第1章は文献研究であり、外力に対する予測的な着地動作と外力を予測した時の反射応答に関する先行研究の到達点を明らかにすると同時に、それら研究の論理的な考察により次の2つの仮説を導出している。1) 人間の代表的な移動運動である走運動には踵着地と前足部着地の二つの着地方法があるが、その着地方法は外力(着地衝撃)の大きさを予測することによって変化する。2) 外力作用によって生じる伸張反射はその外力作用を予測することによって発生時間が短縮される。続く3つの章が本研究の中心を成すもので、上記の2つの仮説を実証するための実験研究で構成されている。

第2章における実験1では、着地時の衝撃力が異なる2条件(裸足条件と靴条件)を用い、走速度を段階的に速くする実験試技で着地動作の変化を検討した。この実験では、被験者の身体に衝撃力を検出するセンサーを取り付けることによって時々刻々の衝撃力の変化、そして高速度ビデオで動作を撮影することによって着地動作の変化を定量化した。そして詳細なデータ解析を経て次の3つの結果を得た。1) 衝撃力が大きな裸足条件では、それが小さな靴条件より踵着地から前足部着地への変化が明らかに低い速度で生じ、さらにこの着地動作が変化することによって身体に作用する衝撃力が減少する。2) 着地衝撃が小さな靴条件試技においても、走速度増加に伴い衝撃力が増加し裸足条件とほぼ同じ衝撃力の値になったところで着地動作が変化する。3) 着地動作が変化する速度での着地前の脚のスイング軌道は一步毎に異なる。これらの結果は、走運動における踵着地から前足部着地への変化が、衝撃力を予測することによって生じることを明確に示すものであり、第一の仮説を実証するものであると言える。

実験2(第3章)は、続く第4章で用いられる実験で反射応答時間を筋電位信号から厳密に検出する必要があるため、新たな検出方法を考案し、その信頼性を従来方法と比較することによって検証した。従来方法とは、筋電位信号をデジタルフィルタによりノイズを除去し、外力作用前の信号の平均値にその3倍の標準偏差を加えた基準値を設定し、その値から外れた時を

信号の立ち上がりとするものである。これに対して考案された新方法は、ウェーブレット変換を用いる多重解像度分析によって筋電位信号のノイズを除去後、外力作用前の筋電位信号から母集団を設定し、2000Hz でデジタル化された外力作用後の筋電位信号がこの母集団に属するか否かを刻一刻検定していき、外れた瞬間を立ち上がりにするという厳密な統計解析を時系列データ処理に応用した独自のものである。その結果、考案された新方法は従来方法より約 10ms 早く立ち上がりを検出し、この差は筋電位信号の約 1 振幅の時間に相当するものであった。この結果から、新方法は従来方法より筋電位信号の立ち上がりの検出感度に優れることが確認された。

第 4 章（実験 3）は、前腕部に外力が作用する際に、その外力が音の鳴った直後に作用する試技と不意に外力が作用する二つの試技を設定し、両者における反射応答を前述の新検出方法を用いて比較することによって、第二仮説である予測による反射応答の短縮を実証しようとしたものである。その結果、外力作用のタイミングが予測できる場合、主動筋の反射応答が短縮されることが明確に示された。さらに、引き続き生じる拮抗筋の反射応答も同様に短縮されることが示された。これらの結果は、第二仮説を実証するばかりでなく、外力予測に伴う主動筋と拮抗筋の共同収縮による関節の硬さ調整の発生時短縮を明らかにした初のデータと言える。これらの結果が生じたメカニズムは、先行研究を精査しながら、外力予測によって脊髄内の運動ニューロンの興奮性が閾値下において高まったためであると考察している。

第 5 章では上記の 3 つの研究結果を総合的に考察し、続く第 6 章で二つの仮説が実証できたことを持って本研究の結論としている。なお、第 2 章はスポーツ・バイオメカニクスの国際学会論文集 (ISB Congress Handbook)、第 3 章と第 4 章は神経科学の国際誌 (Neuroscience Letters) に掲載され、いずれも専門研究者による客観的な評価を受けている。

本研究は大きく 2 つの面から評価される。一つが外力に対する身体の予測的対応の新たな知見を提示した実験研究として、もう一つはその実験研究を支えるデータ解析方法の開発研究としてである。前者において特に、外力作用を予測することによって反射応答時間が短縮されることを実証したことは、筋の脊髄を介する単なる機械的な応答と考えられてきた伸張反射の認識を変えるものであり、今後の身体運動研究に大きく貢献すると言っても過言ではない功績である。さらに後者の新たに開発された信号の立ち上がり検出方法は、本研究において適用され新知見導出に役立った筋電位信号に対してだけでなく、時系列データ一般に用いることができる汎用性のあるものであり、今後の身体運動解析の精度向上に貢献すると言える。以上の内容から審査委員一同は、小池貴行の学位請求論文が博士論文に相当すると判断し、小池貴行を北海道大学博士（教育学）の学位を受ける資格があると認める。