

## 論文の内容の要旨

論文題目「関節トルクのモデル化による身体運動の巧みさの定量的評価方法の提案とその検証」

学位申請者 長尾 秀行

キーワード：トルクモデル，巡回型最小二乗法，伸張反射，筋電図，インピーダンス

身体運動に関する研究は、今日まで多くの研究が行われている。しかし、身体運動については明らかになっていない問題も数多く存在し、それらは、人間らしい巧みな運動をロボットにおいて実現するためにも重要な課題といえる。また、体育・スポーツ科学分野においても、身体運動における巧みさは、大きな研究課題である。しかしながら、この分野においては、「強さ」や「早さ」に着目した研究は数多く見受けられるが、それと比較して、「巧みさ」に着目した研究は数が少なく、その評価手法が確立されていないのが現状である。そこで、本研究は Bernstein の考えに基づき、身体運動における関節インピーダンスの運動局面に対応した調節を、身体運動の巧みさと考え、それを定量的に評価することを目的とした。その方法として、上位中枢神経により感度が調節される伸張反射活動によって変化する関節のインピーダンスを考慮し、関節トルクをモデル化したトルクモデルと、巡回型最小二乗法による計算手法を提案する。本研究では、提案する手法を用いることによって、身体運動における関節のインピーダンス調節を定量的に評価し、熟練者と未熟練者の違いを明確化できることを示している。さらに、提案する手法を用いた分析結果を筋電図分析と比較することによって、トルクモデルの妥当性を検討した。本論文は全 5 章で構成されている。

第 1 章では、生理学の研究者であり、身体運動の研究の基礎を築いた Bernstein が述べた理論的考察を基礎として検討を加え、本研究の目的である「巧みさ」の定量化に向け、身体運動の巧みさを具体的に定義している。その過程で、身体運動における巧みさを考える際に、伸張反射などによる関節のインピーダンスの調節を考慮することの重要性を述べる。さらに、制御工学的手法および運動生理学的手法を用いた身体運動に関する先行研究について、それぞれの長所と短所を明らかにし、本研究で用いるトルクモデルに基づく分析手法(制御工学的および運動生理学の)の有用性を示す。以上を踏まえ、本研究の目的および本研究で扱う具体的な身体運動について述べる。

第 2 章は、本研究で用いた実験装置および実験方法について説明する。具体的には、モーションキャプチャによる身体運動の記録、運動時に地面に作用する 3 分力を記録するフォースプレート、筋活動を記録する表面筋電図について説明する。また、身体運動の巧みさを検討するための試技として採用した、ウェイトトレーニングの一つであるパワークリーン動作の説明と、それを採用した根拠について述べる。さらに、身体運動における巧みさを検討するために、試技を行った 20 名の被験者の身体的特徴と、試技であるパワークリーンの挙上重量について整理し、さらに、被験者を熟練者 10 名と未熟練者 10 名の 2 群に分ける方法について説明する。

第 3 章は、パワークリーンの熟練者と未熟練者の違いを、運動学的分析、動力的分析さらに筋電図による運動生理学的分析により以下の 3 点を明らかにしている。1) 運動学的分析より、熟練者は挙上動作時に反動動作を行うウェイトリフティング選手の特徴的動作が確認された。2) 動力的

分析では、下肢関節における伸展関節トルクおよびその変化率で定義されるトルクの立ち上がり速度について群間で比較検討し、熟練者の方が未熟練者よりもそれらの最大値が統計学的に有意に大きな値を示した。3) 筋電図の分析結果から、パワークリーン動作時の下肢伸展筋の筋活動度には、群間に有意差が認められないものの、伸筋と屈筋の筋活動度より推定した関節の剛性は、運動学的分析によって確認された熟練者の特徴的な動作時において、熟練者の方が未熟練者よりも有意に大きな値を示した。また、従来型の分析では、本研究の目的である身体運動の巧みさの分析には至らないことを示すとともに、本研究における被験者の選定と熟練者および未熟練者への群分けが妥当であることを示す。1), 2), 3) より、熟練者はパワークリーン時に反動動作を行うことで、下肢筋群において伸張-短縮サイクル運動が発生し、それにともない下肢関節回りの筋群の共収縮によって関節の剛性が増大し、エネルギーの高効率伝達が可能となり、大きな下肢関節トルクおよびトルクの立ち上がり速度を発生させることができたと考えられる。これら熟練者のパワークリーン時における特徴から、被験者の熟練者および未熟練者への群分けが妥当であることが示された。

第4章は、先の第3章の分析では明らかすることができなかった身体運動における巧みさを検討するために、新たな手法による更なる分析を行う。関節トルクをモデル化したトルクモデルおよび巡回型最小二乗法を用いて、パワークリーン動作時における身体運動の巧みさを分析する方法について述べるとともに、分析結果ならびにその妥当性の検証を行っている。トルクモデルは、本研究で定義した身体運動における巧みさである、運動局面に対応した関節のインピーダンス調節を数値化するためのモデルである。その特徴は、関節のインピーダンスに影響する伸張反射等の機能を考慮して構成されており、それを数値化するインピーダンス係数を設けていることである。さらに、関節運動による圧力中心点の変位および身体の鉛直軸方向へ変位に対するフィードバックゲインを示す係数を有している。各係数の計算手法としては、動力学解析で求めた関節トルクと、トルクモデルをフィッティングさせることで、モデル内の各係数を算出する。そのフィッティングには巡回型最小二乗法を用いる。このフィッティング法は、時系列的に係数の算出が可能であり、現時刻における係数算出に過去の係数が影響する。身体運動は明らかに過去の状態の影響を受けるため、本手法は身体運動の巧みさの定量化方法として有用であることを示した。トルクモデルを用いた分析の結果、反動動作による伸張-短縮サイクル運動の発生時期において、熟練者は膝関節におけるインピーダンス係数が増大することを示した。また、その積分値は熟練者の方が未熟練者よりも統計学的に有意に大きな値となることを示した。さらに、相互相関関数によって、関節の柔らかさを示すインピーダンス係数の変化と、筋電図より推定した関節の剛性の関係性を検討した結果、一方が増大するともう一方が減少することが明らかとなり、モデルによる分析結果が運動生理学データと整合性があることと、熟練者と未熟練者の巧みさの違いを定量的に分析できることが示された。また、他の係数についても先行研究と一致することを説明した。これらの分析結果から、本研究で提案した身体運動の巧みさの定量化法が有用であることを導いている。

第5章は結論であり、本研究の成果の総括および今後の課題について述べる。