

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 平島雅也

論文題目: Control of intersegmental dynamics in fast upper-limb multi-joint movements

(高速上肢多関節動作におけるセグメント間ダイナミクスの制御)

ヒトの動作は通常複数の関節の運動が複合した多関節動作として行われる。多関節動作には、単関節動作には生じない制御上の問題点が存在する。すなわち、多関節動作の生成には、筋収縮力や重力だけではなく、隣り合う身体セグメントの相互作用によって生み出される相互作用トルク (interaction torque) が関節角度変化に影響を及ぼすことである。上肢による到達運動などを用いた運動制御研究では、これまで相互作用トルクは主にセグメント間の相互作用によって受動的に生じる負荷と捉えられ、神経系によるその補償メカニズムが主に議論されてきた。

しかし、大きな末端速度が生み出される投球・打球などのスポーツ動作においては、相互作用トルクが、負荷ではなく、補助として作用すれば、大きな角速度を生み出す際に有利となると考えられる。従って、相互作用トルクの制御メカニズムを解明することは、随意運動制御研究の発展および運動指導法の発展に大きく貢献すると考えられる。しかしながら、スポーツバイオメカニクスの分野では、投球・打球動作中の各関節の角度、角速度、筋トルク、関節間力などを調べた研究は多数存在するものの、相互作用トルクが関節角度変化に与える影響について検討した研究は少ない。

本論文は、以上の観点から、相互作用トルクの分析法を投球・打球動作へ応用し、補助的な相互作用トルクの生成及び利用に焦点を当てることによってその制御メカニズムを追究した申請者の研究を、第1章に先行研究のレビュー、第2章から8章に研究結果を、第9章に総括論議を加えてまとめたものである。

第2章の研究では、まず上肢のみを用いた2次元投球動作を3種類の球速で行わせた結果、肘関節では、相互作用トルクが動作と同方向に補助的に働き、それを増加させることによってリリース時の肘関節角速度を増加させて球速を増加させるが、手関節では、相互作用トルクは常に動作と逆方向に働き、筋トルクと互いに打ち消し合うことによって、リリース時の手関節の角速度を球速によらず一定に保つことが明らかとなった。

第3章では、コンピュータシミュレーションを用いて、2次元投球動作の筋活動パターンをどのように操作しても、手関節における相互作用トルクは常に動作と逆方向に作用し、手関節に大きな角速度を与えるのは困難であることを証明した。2章・3章の結果から、2次元投球動作においては、肘関節と肩関節は球速の調節に関与し、手関節は球速調節ではなく正確な指制御の基盤を作るという役割分化が存在することが確認された。

第4章～8章は、2次元投球動作におけるこれらの知見を、全身を用いた自然な3次元投球動作に拡張して検討したものである。従来の相互作用トルク算出法は2次元動作に限定されたものであり、全身を用いた3次元での投球動作中の相互作用トルクを算出することができなかったため、第4章では、まず3次元動作の相互作用トルク算出法を独自に開発した。

第5章の実験では、その3次元動作の相互作用トルク算出法を熟練者の全身投球動作へ適用した結果、肘関節伸展・肩関節内旋に加えて、手関節においても、球速の増加と共にこの補助的相互作用トルクを増加させることによって、リリース時の手関節屈曲の角速度を増加させ、球速を増加させることができるということが明らかとなった。すなわち、熟練投球者は「補助的相互作用トルクを増加させることによって、各関節の角速度を増加させる」という方略を採用していることが明らかとなった。

また、第6章では、手にラケットを握ることによって腕全体の運動学的及び動力学的特性を変化させ、第5章で得られた知見が当てはまるかどうかを熟練者のバドミントンスマッシュ動作を用いて検討した。その結果、手関節屈曲と肩関節内旋、肘関節伸展においては、全身投球動作と同じく、補助的相互作用トルクが球速を決めるという結果が得られた。

第7章では、比較のために、バドミントン未熟練者のスマッシュ動作を分析し、未熟練者は、肘関節においては補助的相互作用トルクを作り出すことができるが、手関節屈曲と肩関節内旋では、熟練者のように補助的相互作用トルクを作り出すことができず、筋トルクを増加させるという生体への負担度の大きい代替方略によってインパクト時の角速度を増加させていることが明らかとなった。

第8章では、バドミントン打球動作を近位セグメントから遠位セグメントへの力学的エネルギー伝達の観点から分析し、この近位遠位エネルギー連鎖は、熟練者と未熟練者で差がなく、熟練度を反映するものではないこと、熟練者のラケットの速度はインパクト時まで増加し続けるのに対し、エネルギーは、インパクトよりも前にピークに達してしまい、インパクトでは減少することなどから、エネルギー分析は、インパクト時の大きなラケット速度生成のメカニズムを十分に説明することができないことを明らかにした。

第9章では、上記の研究結果を総括し、3次元全身投球・打球動作に熟練するためには、手関節及び肩関節の相互作用トルクを動作方向に貢献させることができない日常動作的上肢運動の動力学的環境を脱却し、自ら補助的相互作用トルクを生成し利用できるような動作方略を習得することが必要であると結論している。

これらの成果はすべて申請者のオリジナルな発見であり、その一部はすでに2編の国際学術誌に公表されているなど、学術業績として極めて有意義であると認められる。よって、本審査委員会は、本論文は博士(学術)の学位を授与するにふさわしいものと認定する。