

論文審査の結果の要旨

論文題目：「立位姿勢制御の発達：多関節運動協調に基づく検討」

論文提出者氏名 山本暁生

本論文はヒトの立位姿勢の発達過程について、主にバイオメカニクスの解析を用い下肢三関節の運動協調性が年齢と共にいかに変化するのか、その推移の詳細を明らかにするとともに、背後の神経機序に迫ることを目的とするものである。

論文は、研究小史、研究 1、研究 2、研究 3、および総合考察の計五章から構成される。第一章の「研究小史と目的」では、これまでの静的立位姿勢制御に関する研究およびその発達に関連する研究の概要がまとめられた。そこから本論文全体の目的が導かれ、論文全体の構成と共に提示された。第二章では、ヒトの立位姿勢を、足関節を回転軸とした倒立振り子モデル（単関節モデル、SIP モデル）ではなく、膝および股関節を含む多関節モデルで近似することの妥当性が検証された。静止立位中の下肢三関節それぞれの運動を精密に測定したデータを基に、単関節、二関節および三関節それぞれのモデルから身体重心の加速度を推定し、実測値と比較した。その結果、三関節モデルを用いた推定値が実測値に最も近似することが明らかとなり、ヒトの立位姿勢制御機構を正確に捉えるためには三関節を含む多関節モデルの精度が最も高いことが示された。

第三章では、ヒトの立位姿勢が本質的には多関節運動の協調によって維持されているものの、大局的には足関節を回転軸とする倒立振り子的に振る舞うことで、制御が単純化されており、しかもこの制御の単純化は発達の過程で獲得されるとの仮説が検証された。この仮説を検証するために、①小児の立位姿勢がどの程度、SIP モデルに当てはまるか、②SIP モデルのように振る舞うことで姿勢動揺が小さくなるか、の問を設定し、実測データを基に検討した。3 - 11 歳の小児 60 名と健常成人 15 名の静止立位姿勢について、次の変量を測定した。すなわち、身体各部の前後方向の位置と並進速度を測定し、理想的な SIP 的姿勢動揺を仮定した時の数値と実測値との差（逸脱量）を年齢ごとに比較した。そして足圧中心（center of pressure, COP）動揺と逸脱量との関係を調べた。その結果、3 - 8 歳は成人よりも逸脱量が大きく、年齢が上がるとともに逸脱量は減少した。さらに、逸脱量と COP の SD（姿勢動揺の大きさの指標の一つ）との間には有意な正の相関関係が認められた。以上の結果は、小児は立位姿勢制御の発達にともない、SIP のように振る舞うことで姿勢動揺を減少させていくことを示唆している。

第四章では小児が SIP モデルから大きく逸脱した姿勢動揺となるのは、下肢関節間の力学的相互作用を活用した運動制御が未熟であるため、との仮説を検証した。研究 2 (第三章) で得られた測定データから、下肢三関節のトルクと角加速度の関係を Induced Acceleration

Analysis(IAA)という手法を用いて定量化した。各関節に角加速度を引き起こす、関節トルク、重力トルクおよび速度依存トルクの合計量は 3-11 歳と成人間で概ね同程度の大きさであった。続いて、各関節のトルクが関節間の相互作用を考慮した協調的な出力となっているかを次の方法で定量的に検証した。まず、各関節のトルク合計量が引き起こす角加速度成分について角加速度の大きさに影響を与えない部分集合を仮定した。次に角加速度成分について、その部分集合に平行な成分（角加速度に影響しない）と部分集合に直行する成分（角加速度に影響する）を算出した。両成分の比の自然対数から協調指数を足関節、膝関節、股関節それぞれについて算出した。その結果、小児は全年齢で成人よりも全関節の協調指数が低かった。これらの結果から、3-11 歳の小児は関節間の力学的な相互作用を活用したトルク制御能力が未発達であり、効率的な関節の運動制御ができないこと、相互作用を活用したトルク制御は 12 歳以降に獲得されることが示唆された。

以上の研究結果は、第 5 章の総合論議において、包括的な先行研究の結果と照合、論議がなされ、次の結論を導くに至った。すなわち、人間の二足直立姿勢は少なくとも下肢三関節のすべての運動が身体重心の動揺に影響するため、本質的には多関節の協調によって達成されており、中枢神経系は身体の発達過程において、関節間の力学的相互作用を活用した関節トルク制御能力を獲得することで、この協調運動を実現する。そして、この協調運動は見かけ上、SIP のような振る舞いであるが、それは制御を単純化して身体動揺を少なくするために採用された運動制御上の方略であることが強く示唆される。

審査会においては、まず本研究が小児を扱っていることから、要求された課題が実際に行われたかどうか、データの再現性、信頼性をいかに担保しているのか、が問われた。また、年齢群をつくって、複数の年齢をひとまとめの群として結果を比較したことの妥当性、成長速度に差がある男女をまとめたことの是非などが議論された。その他、静止立位中の下肢三関節の動きが微小になることを「凍結」と表現するなど、いくつかの表現に不適切と思われる点があったため修正することとされた。

以上、審査会ではいくつかの修正を要する点が指摘されたが、本質的結果の信頼性が高く、その価値が損なわれるものではないことから、結果の解釈にかかわる数箇所の修正が為されれば博士（学術）の学位に十分値することが全会一致で承認された。本論文の結果の一部は、既に主要な国際誌に原著論文として掲載されている。この事実は関連する学会からもその学術的価値が認められたことの証左であって、本論文の学術的意義をゆるぎないものとしている。

以上を総合的に審議した結果、本審査委員会は本論文が博士（学術）の学位を授与するにふさわしいと認定するものである。