

論文の内容の要旨

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

Development of standing postural control: Investigation based on
multi-joint movement coordination

氏名 山本 暁生

ヒトは生後約 1 年をかけて独立した二足立位を獲得するが、その姿勢は不安定であり大きな姿勢動揺が認められる (Chen et al., 2008)。先行研究から立位獲得後に 10 年以上をかけて姿勢動揺は減少することは明らかにされているが (Riach and Hayes, 1987; Wolff et al., 1998)、静止立位における制御機構の発達過程については殆ど明らかにされていない。この背景として多くの立位姿勢制御の発達研究が足圧中心 (COP) を身体重心 (COM) の代用として扱い、姿勢動揺の大小関係に偏った議論が展開されてきたことがある。更に、COP は足関節トルクを反映する指標であるため、その他の関節に生じるトルクや運動を殆ど扱ってこなかった。

多くの静止立位制御の発達研究では複数のセグメントで構成される身体を単純化して、足関節のまわりを単一の剛体が回転すると仮定した単関節モデルを用いている。COP は足関節トルクと比例するため単関節モデルでは COM を制御する変数となるが、近年、静止立位姿勢の制御に膝関節や股関節の運動も貢献することを示唆する研究により単純化に対する見直しが提起されている (Günther et al., 2009; Pinter et al., 2008)。立位姿勢制御の発達をより正確に捉えるためには、立位保持を本来の多関節運動として捉えて関節間の運動協調性を検討する必要がある。

多関節運動では単関節運動に比べて身体の状態を推定する過程や適切な運動指令を作成する制御の過程がより複雑になる。例えば COM の運動を推定するためには、各関節まわりの運動の情報を複雑な過程を経て統合して推定しなければならない。また、目標とする動

作のために取り得る関節角度、トルク、筋活動等の組み合わせは無数にあるため解が一つに定まらない（自由度問題）（Bernstein, 1967）。更に多関節運動では、ある関節に生じたトルクは関節間の相互作用によって身体にある全関節へ同時に角加速度を生じるため（Zajac et al., 2002）、全身の運動情報を基に個々のトルクを決める協調的なトルク制御が必要になる。発達過程で小児は、これらの問題への対処を身に付けて立位制御能力を向上させていると推測される。

従って本研究では次の三つの研究を通じて立位姿勢制御の発達を検討する。1) 立位姿勢保持を多関節動作と捉える妥当性、2) 多関節運動に生じる状態推定や制御の問題を軽減する立位姿勢の運動学的な発達変化、3) 2) で示された方略を獲得するために発達過程で身に付ける関節間の協調的なトルク制御能力の発達、である。三つの研究の概要は以下の通りである。

研究 1（第二章）

静止立位の保持を多関節運動と捉えることの妥当性を矢状面上の COM 加速度の実測値とモデルによる推定値の比較から検証した。健常成人男性 8 名が 30 秒間の静止立位の保持課題を行った。動作解析装置により取得した足関節、膝関節、股関節の角加速度を四つのバイオメカニカルなモデルに代入して COM 加速度の推定値を計算した。用いたバイオメカニクスモデルは、足関節のみを含む単関節モデル、足関節と膝関節及び足関節と股関節を含む二つの二関節モデル、足関節、膝関節、股関節の全てを含む三関節モデルである。COM 加速度の実測値は床反力計の水平せん断力から足部を除いた質量を除いて取得した。三関節のキネマティクスを検討すると膝関節と股関節には足関節よりも大きな角加速度が生じていた。次に、COM 加速度の推定値と実測値の振幅について回帰分析を行うと、単関節モデルと二関節モデルは COM 加速度を実測値より 2 倍以上も過大に推定していたが、下肢三関節全てを含む三関節モデルの推定値は実際の COM 加速度とよく一致していた。実測値と推定値の残差の実効値は三関節モデルがその他のモデルの残差よりも有意に小さくなっていた ($p < 0.05$)。上記の結果は、静止立位の保持には下肢三関節全ての運動が COM の運動に影響しており、立位姿勢の制御機構をより正確に捉えるためには下肢三関節を含む多関節モデルに基づく検討が必要であることを示している。

研究 2（第三章）

研究 2 では立位保持を多関節運動と捉えて全身の運動学的な特徴と姿勢動揺の発達変化を検討した。成人の立位姿勢は、多関節が力学的な相互作用を考慮した協調的なトルクを生成することで、全身の関節角の変動を小さく抑えた真っ直ぐな棒 (SIP) のように振舞う。また、SIP のように振舞うと運動制御における推定や制御の問題が単純となる利点がある。立位時の姿勢動揺が成人よりも大きな幼児・学童は成人のように SIP のようには振る舞うことができない可能性がある。そして、成人は多関節の協調により SIP のような立位姿勢

を達成して効果的に姿勢動揺を小さくしていると仮説を立てた。従って、研究 2 では、1) 小児の立位姿勢は、成人と比べて SIP からの逸脱が大きい、また、2) 立位姿勢が SIP に近づくほど姿勢動揺は小さくなる、との仮説を運動学的な解析から検証した。3-11 歳の小児 60 名と健常成人 15 名が 30 秒間の静止立位の保持を行った。静止立位における頭、肩、腰の前後方向の位置と並進変位を測定し、理想的な SIP から推定した位置と並進変位からの逸脱量（相対位置、相対変位）を算出した。また、COP の標準偏差（SD）から姿勢動揺の大きさを定量化し、逸脱量との関係を検討した。実験の結果、3-8 歳は成人よりも SIP からの逸脱量が大きく（ $p < 0.05$ ）、年齢が上がるにつれて逸脱量は減少していた。更に、逸脱量と COP の SD の間には有意な正の相関が検出された（ $r = 0.64$ to 0.75 , $p < 0.001$ ）。以上の結果は、発達にともない全身の関節角の変動が減少し真っ直ぐな立位姿勢に近づくことを示している。そして、立位姿勢が真っ直ぐになることで効果的に姿勢動揺を減らしている可能性が示唆された。

研究 3（第四章）

研究 3 では、小児が成人のような真っ直ぐな立位姿勢を取れない背景を多関節のトルクの協調性に着目し力学的な分析を行った。研究 2 で得られた小児と成人の静止立位のデータを用いて下肢三関節へ角加速度を生じるトルク誤差（関節トルク、重力トルク、速度依存トルクの合計）を induced acceleration analysis（IAA）（Zajac et al., 2002）により定量化した。分析の結果、3-11 歳の足関節、膝関節、股関節のトルク誤差は成人のそれらとおおよそ同程度の大きさであった（3-5 歳の足関節のみ成人より大きく $p < 0.05$ 。その他は $p > 0.05$ ）。続いて小児が相互作用を活用して各関節に生じる角加速度を減らしているかトルク間の協調性を定量化した。まず、足関節、膝関節、股関節のトルク誤差が誘発する角加速度成分について、それらの合計である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。次にその部分集合への平行方向（角加速度へ影響を与えない）と直交方向（角加速度へ影響を与える）への正射影の長さの二乗を算出してそれぞれ平行成分と直交成分とした。続いて、直交成分に対する平行成分の大きさの比を取り、値が大きいほど相互作用を活用した協調的なトルク制御が行われていることを示す協調指数を算出した。角加速度の大きさに影響を与える直交成分は 3-11 歳全ての年齢で成人よりも大きく、年齢とともに減少していた（全ての関節で $p < 0.05$ ）。また、協調指数も 3-11 歳の全ての関節で成人よりも低い値を示した（ $p < 0.05$ ）。この結果は、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の生成能力が未発達であり、多関節運動において目標とする動作を効率的に達成する運動制御が未熟であることを示している。また、相互作用を活用したトルクの制御能力は 12 歳以降に獲得されることが示唆された。

総合考察（第五章）

研究 1 より、静止立位において下肢三関節は全てに大きな運動が認められた。そして、

静止立位の制御をより正確に調べるためには多関節運動として立位姿勢保持を捉える必要があることを示した。多関節運動では、COM の位置や速度の推定に加えて立位を保持するために必要な各関節のトルクを決める制御も難しくなる。しかし、身体が SIP の様に振る舞えば、運動制御における推定や制御は単純化し得る。研究 2 から、成人は小児よりも SIP からの逸脱が有意に小さく、真っ直ぐな立位姿勢を保持していた。また小児は発達とともに SIP からの逸脱が減少しており、姿勢動揺も小さくなっていた。研究 3 では、小児が成人と比べて真っ直ぐな立位姿勢を取れない背景として関節間の相互作用を活用して全身の関節の角加速度を効果的に小さく抑える協調的なトルク制御能力が未熟であることを示した。これらの結果からヒトの立位姿勢制御の発達過程では、トルク間の協調性が向上することにより全身の関節角の変動が小さく抑えられて、真っ直ぐな立位姿勢を達成していることが明らかになった。また、立位姿勢が SIP に近づくことは、状態推定や制御過程の複雑さを軽減して姿勢動揺を効果的に減らすことへ貢献している可能性が示唆された。