

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年10月21日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22700568

研究課題名（和文）多関節動力学モデルに基づくヒト静的立位姿勢制御に関する検討

研究課題名（英文）Examinations on postural control in human quiet standing:
based on multi-joint dynamic model

研究代表者

笹川 俊（SASAGAWA SHUN）

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：90551565

研究成果の概要（和文）：

本研究は、ヒト静的立位時における身体セグメント間の力学的相互作用について検討することを目的とした。この目的を達成するため、足関節および股関節トルクが両関節まわりに生成する角加速度を、“induced acceleration analysis”と呼ばれる方法を用いて定量した。結果、それぞれの関節まわりの運動は、当該関節のトルクおよび隣り合う関節のトルクの双方により、同程度加速されていることが明らかとなった。本研究の結果は、静的立位時における足-股関節間には、顕著な慣性カップリングが存在することを示すものである。こうした状況下において姿勢の安定性を保証するためには、高次のニューラル処理（小脳を含む）が必要であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this study was to investigate dynamic interaction between body segments during human quiet standing. To achieve this end, we quantified the mutual contributions of the ankle and hip joint torques, respectively, to the ankle and hip angular accelerations by using a technique often called “induced acceleration analysis”. We found that angular motion of each joint was accelerated equally both by a direct effect from its own torque and by an indirect, remote effect from the adjacent joint torque. Our present result indicates that there is significant inertial coupling between the ankle and hip joint during quiet standing. To ensure stability of the posture under such condition, interference from higher-level neural processing (involving the cerebellum) may be required.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学 リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：姿勢制御 多関節モデル バイオメカニクス

1. 研究開始当初の背景

超高齢化社会を迎えた我が国では、転倒・骨折による「寝たきり」や、転倒恐怖による「引きこもり」が社会問題化して久しい。高齢者や障害者の転倒予防策を講じることは、QOLの維持・増進、医療費削減などの観点から急務であるが、そのためにはまず、姿勢制御の原理を科学的に解明し、理解することが求められる。

ヒト静的立位姿勢の制御メカニズムについて検討した先行研究は数多く存在するが、その大半は立位時の身体を、足関節を唯一の回転中心とした倒立単振り子として近似したものである。一方、近年の我々の研究成果

(Sasagawa et al. 2009 *Neurosci Lett*) は、静的立位時の身体が、足関節と股関節とを回転中心とする二重倒立振り子に近い振る舞いをすることを示している。さらに、足関節と股関節以外の関節 (e.g., 膝関節) が、静的立位姿勢の制御に対して貢献していることを示唆する研究結果も幾つか報告されており (e.g., Hsu et al. 2007 *J Neurophysiol*; Pinter et al. 2008 *J Neurophysiol*)、こうした一連の研究報告を鑑みるに、静的立位姿勢の制御は、一種の多関節動作であると考えることが妥当であろう。

多関節動作の遂行にあたっては、単関節動作の遂行時には生じない制御上の冗長性が問題となる。単関節動作では、ある関節まわりのトルクは、その関節まわりの角加速度と「一対一」の比例関係にある。一方、多関節動作では、関節トルクと関節角加速度とは「一対多」の関係にあり、ある関節まわりのトルクは、当該関節のみならず、その他の関節周りにも角加速度を生じさせる (慣性カップリングが生じる) (Zajac and Gordon 1989 *Exerc Sport Sci Rev*)。

従来の姿勢研究は、静的立位時の身体を倒立単振り子として簡略化して扱うことにより、上記関節間における力学的相互作用を看過してきた。これに対し、本研究では、静的立位姿勢の制御という運動課題を、多関節動作特有の制御上の冗長性を考慮した、より洗練されたモデルを用いて検討することにより、姿勢制御の原理について、新たな知見を提供する。

2. 研究の目的

本研究では、これまで主に単関節モデルを用いて分析されてきた静的立位姿勢制御という運動課題を、多関節動力学モデルを用いて、より多面的に分析・評価することを通じて、直立姿勢制御の根本的な原理を追求することを目的とした。特に、静的立位時における足-股関節間に存在する力学的相互作用の

程度を定量し、相互作用が姿勢制御に及ぼす影響について考察することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 被験者

被験者は健康な成人男性8名とした。被験者には、文書および口頭による実験内容および実験に伴うリスクに関する説明を十分におこなった上で、実験参加の同意を得た。なお、本実験は、事前に東京大学大学院総合文化研究科・教養学部「ヒトを対象とした実験研究に関する倫理委員会」の承認を得て実施した。

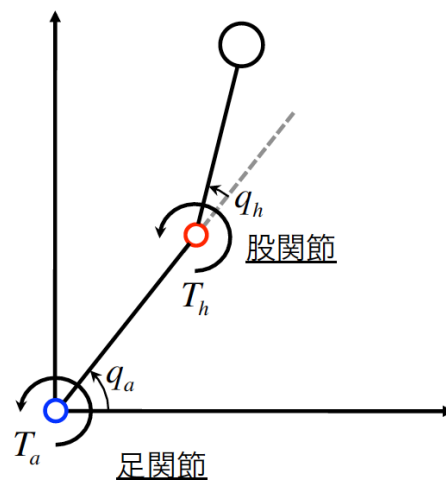
(2) 実験プロトコルおよび測定項目

被験者は、フォースプレート (Type 9281B, Kistler, Switzerland) 上で、60秒間の静的立位姿勢を保持した (開眼および閉眼条件を5試行ずつ)。その際、被験者の背部 (頭部、胸部、腰部にベルクロで固定) および両膝裏 (大腿下部から下腿上部にかけて包帯で固定) に木製の副木を固定することにより、脊柱および膝関節まわりの運動を制限した。

被験者の肩峰、大転子、および足関節外踝 (全て右側のみ) に直径11mmの反射マーカを貼付し、それらの位置座標を3次元モーションキャプチャ装置 (OptiTrack V100:R2, Natural Point, USA) を用いて測定した (サンプリング周波数: 100 Hz)。

(3) データ解析

取得したマーカの座標データは、1.5 Hzの遮断周波数で平滑化し、各瞬間の座標データから、矢状面上における体幹・下肢のセグメント長、および足・股関節角度を算出した (図を参照)。



図：ヒト立位姿勢の二重倒立振り子モデル。図

中の T_a および T_h は、それぞれ足関節および股関節における筋トルクを、 q_a および q_h は、それぞれ足関節および股関節角度を示す。

両関節角度の時系列を順次時間微分することにより、関節角速度、関節角加速度を求めた。

ラグランジュ法により、二重倒立振子の運動方程式を算出した。

$$I(q)\ddot{q} = T + V(q, \dot{q}) + G(q) \quad (\text{式 1})$$

式 1 の左辺は二重倒立振子モデルの慣性行列および角加速度ベクトル、右辺第 1 項は筋トルクベクトル、第 2 項は角速度依存トルクベクトル、第 3 項は重力トルクベクトルを表す。

式 1 の両辺に左から慣性行列の逆行列を掛けることにより、両関節における各トルク成分（筋トルク、角速度依存トルク、重力トルク）が各関節に生じさせる角加速度を定量することが可能となる (Zajac et al. 2002 *Gait Posture*)。この計算手法は、一般に “induced acceleration analysis” と呼ばれる。

本研究では、各測定パラメータに視覚条件間で統計的な有意差がなかったため、開眼条件 5 試行および閉眼条件 5 試行を合わせた、全 10 試行の平均値を各被験者の代表値とした。

4. 研究成果

足関節および股関節における筋トルクの絶対値平均は、それぞれ約 29 Nm および約 6 Nm であった（全被験者の平均値）。静的立位時における両関節は、準静的状態にあるため、両関節における重力トルクの絶対値平均は、対応する関節における筋トルクの絶対値平均と同等の大きさであった。

足関節および股関節における筋トルクが、足関節まわりに生じさせる角加速度の絶対値平均は、それぞれ約 90 deg/s² および約 46 deg/s² であった。一方、足関節および股関節における筋トルクが股関節まわりに生じさせる角加速度の絶対値平均は、それぞれ約 216 deg/s² および約 147 deg/s² であった。上記筋トルクおよび重力トルクの絶対値平均に関する結果同様、両関節における重力トルクが、各関節まわりに生じさせる関節角加速度の絶対値平均は、対応する筋トルクが生じさせる関節角加速度それと同等の大きさであった。

両関節におけるトルクが各関節まわりに生じさせる正味の角加速度は、筋トルク、重力トルク、角速度依存トルクが生じさせる角加速度の総和である。足関節および股関節トルクが足関節まわりに生じさせる正味の角加速度の実効値は、ともに約 3 deg/s² であり、両者の間に統計的な有意差は認められなかった ($P > 0.05$)。一方、足関節および股関節トルクが股関節まわりに生じさせる正味

の角加速度の実効値は、約 8 deg/s² および約 9 deg/s² であり、やはり両者の間に統計的な有意差は認められなかった ($P > 0.05$)。

以上の結果は、静的立位時の足-股関節間には、慣性カップリングを介した顕著な力学的相互作用が存在することを示すものであり、こうした相互作用の存在下では、伸張反射などの局所フィードバック・メカニズム

（ある関節を、同名関節の運動状態に関する情報のみを用いて制御すること）に依存した制御は、立位姿勢の安定性を保証し得ない

(Kuo 2005 *J Neural Eng*)。姿勢の安定化を実現するためには、視覚系、前庭系、固有感覚系など、あらゆる感覚系からのフィードバック情報を中枢神経系が統合し、全セグメントの運動状態を推定するとともに、その状態推定に基づいて、個々の関節への運動出力を決定する必要がある。こうした運動制御を達成するためには、小脳や脳幹などを含む、上位中枢の関与が必要不可欠であると考えられる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 1 件）

ヒト静的立位における股関節運動の生成メカニズム、笹川 俊、中澤 公孝、第 66 回日本体力医学会大会 下関（2011）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笹川 俊 (SASAGAWA SHUN)

東京大学大学院 総合文化研究科 助教

研究者番号：90551565

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

緒方 徹 (OGATA TORU)

国立障害者リハビリテーションセンター

研究所 運動機能障害研究部 部長

研究者番号：00392192

小幡 博基 (OBATA HIROKI)

東京大学大学院 総合文化研究科 助教
研究者番号：70455377