

内合22-87

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

歩行中のヒト足部に着目した力学モデル解析と
その応用に関する研究

Study of the Dynamic Model Analysis of the Human Foot Complex during Gait
and its Applications

申請者

高嶋 孝倫

Takamichi Takashima

生命理工学専攻 バイロボティクス研究

2003年3月

重力に抗して立ち上がった人類は自由になった手で文明を築き、直立二足歩行を獲得した。二足歩行は本質的に不安定な運動であるが、ヒトは倒れることなく動歩行を実現している。このためには筋・骨格系の運動と神経系の連動が不可欠であり、様々なサブシステムが存在する。これらについて運動学的研究は多く行われているものの、路面と接する足部についてはあまりメカニズムが解明されていない。しかし、この部分の究明は①酷使される現代人の足部変形に対する装具療法に寄与し、②スポーツシューズなど履き物の開発の基礎となり、③足を切断した障害者の義足開発等の目的において、極めて有益であると考えられる。また、歩容安定のサブシステムとして足部が持つ役割を明確にすることは、次世代ロボットとして有望視されている二足歩行ロボットの歩容安定化にも有用な知見を提供可能であり、歩行中の足部の挙動の解明が望まれる。

本論文は、歩行中におけるヒト足部をモデル化し、運動学的、運動力学的視点から足部の挙動を定量化するものである。そのためにパラメータとしてヒト足部の特徴であるアーチ構造のモーメント、および粘弾性特性に着目した結果を導いている。足部力学モデルを構築するため、必要条件を次のように整理している。①歩行中の形態変化に対応するもの。②必要最小限の関節を有するもの。③将来的に病的変形に対応可能なもの。しかし、足部のアーチ構造が複合関節である点と、必要最小限の関節でモデルを提案したいという意図の間に矛盾が生じる。そこで、力学モデルを構築するための第1段階として、先行研究がない歩行中の足部形状変化を詳細に捉えようとする意図から、X線ビデオ撮影による足部の骨位置変化の計測を行っている。これにより、足には多くの関節があるが、大きな動きを認めるのは楔舟関節部であることを確認し、まず力学モデルの基礎デザインが示されている。次に足部のアーチ構造は周囲の関節の影響を受けることから距骨下関節、中足指節関節（以下、MP関節）を含む3次元モデルを提案している。距骨下関節部の挙動は関節構造の複雑さから諸説があるが、本論文で示した挙動は計測装置による外乱がなく、しかも可動域における信憑性も高い。さらにアーチ部の運動とモーメント値より、粘弾性特性を同定し、これによって歩行時のアーチ構造の存在意義を考察している。これらの実験を通じて得られたヒトの足に関する有益な知見と考察によって、障害者、あるいは高齢者に還元し得る技術を提案している。それは、①高齢切断者を対象とした義足歩行の安定化を実現する義足足部のデザインと、②足底装具評価法への本モデル解析の応用である。

本論文は以下に示す全7章から成り、各章の要約を示す。

第1章では、ヒト足部の研究をテーマとした背景について、歩行の起源にまで立ち回りアーチの存在意義に関する諸説を整理した上で、研究の意義を唱えている。また、過去の研究動向を鑑みたうえで、本研究の新規性を示している。

第2章では、足部形状変化を足内部に存在する28個の骨位置変化に立ち回り、Videofluoroscopyを応用して実測している。矢状面より観察可能な骨（踵骨、距骨、舟状骨、内側楔状骨、第1、第5中足骨）を撮像の校正空間に座標化し、骨相互間における

角度変化を算出している。座標化手法はテンプレートを用いた独自のものであり、これによって算出された小関節の矢状面角度変化を結果として示している。結果は踵骨-第1中足骨間に集約されるアーチ構造の角度変化は踵接地時から徐々にアーチ低下方向へ変化し、踏み切り期において最大約8度の変化を認めている。アーチ内に存在する関節として距踵関節、距舟関節、楔舟関節、足根中足関節があり、これらの挙動を導き、最大変化を示す部位が楔舟関節であることを確認している。この結果は次章より展開するモデル提案の基盤となるが、X線ビデオは被爆のリスクや計測の煩雑さがあり、一般的な手法とは成り得ないため、別の簡便な手法が望まれることを述べている。

第3章では、前章の解析結果を受け、矢状面における足部を2リンク1関節モデルが第1近似と考え、最も単純化された足部モデルを提案している。このモデルから、本研究の問題領域である足部のアーチにおける角度変化、およびモーメントを導出している。足アーチのモーメント解析は他の歩行解析では例がなく、固有名称がないため、これを本論文では「アーチモーメント」と称している。導出に必要なパラメータは被験者の歩行計測によって実測し、光学画像計測装置を使用している。これは足部の皮膚上にマーカーを貼り付け、その位置をトラッキングする一般的計測手法であるが、本来の足部変形である骨の位置変化と同等であるかは疑問の余地があった。これに関し、第2章で行ったVideofluoroscopyを用いて整合性が高いことを検証している。

第4章では、距腿関節、距骨下関節、MP関節を含む3次元モデルとし、各関節運動とアーチの挙動との連動性を確認している。距骨下関節は軸位に個人差があり運動の定量化は容易ではない。過去にも何例か研究があるが、本論文で示された計測手法は光学画像計測による皮膚上マーカーが示す角度とX線により確認された骨自体の角度変化との整合性が検証されており、計測値の信憑性は高い。しかも、生体に対して非侵襲であり、外乱がなく、可動域における信憑性も高いことから、ここでも足部解析における光学画像計測手法の有効性が示されている。従来より、距骨下関節とアーチ構造の強度変化には相関があることが定性的に示されているが、本論文では、アーチモーメントとの間には相関が認められないという新しい結果を示している。MP関節は足底腱膜を介してアーチ形状変化に寄与していることを定量的に確認している。

第5章では、歩行中足部のstiffness定量化手法を提案している。静的な実験方法は存在するが、筋要素を含むため、歩行中に変化する粘弾性特性を同定する手法は過去に見あたらず、新規性に富む試みである。結果は歩行の力学的特徴より4相に分割して弾性係数、粘性係数を示し、①立脚相後半の足部がスプリング様の構造であること、②立脚初期における足部は衝撃緩衝効果を認めることを定量的に示している。

第6章では、以上に示したモデル解析の結果を受け、応用例として①足底装具の評価への応用、②安定化歩行を再現するための義足足部の設計試作を提案している。①に関しては従来からある足底圧分布計測では検出不可能であった足の変形に関与する力学的な均衡をモーメント値によって評価する試みである。これによって従来のアーチサポート形状は立脚中期までの効果は認めるものの、最大モーメントが発生する立脚後期に

は効果がないことを示し、改良の必要性を提案している。②では老人の切断者の増加を背景に義足歩行の安定化が求められており、そのために外側に倒れないよう体重心を内側へ移動させる義足足部構造の設計コンセプトを提案しており、これは過去に例がない。具体的には、足部変形は内側と外側で異なり、内側が柔軟である実測データに基づき、義足足部のキールを内外側に分割し、それらに弾性比を持たせる構造を示している。さらに、企業（今仙技術研究所）の協力を得てプロトタイプを製作し、義足歩行に及ぼす効果を足底床反力作用点軌跡、体重心軌跡の定量化による検証を行っている。高齢者の義足歩行は不安定要素を多く含み、最悪の結果である転倒、さらには骨折といった事故から、最後は「寝たきり」という社会問題にまで発展する。このように、転倒防止はリハビリテーション分野において現在、強く求められており、本論文で提案している新規開発の義足足部の貢献度は極めて高い。

第7章では、本論文で得られた成果を整理し、研究目的が達成されたことを示すと共に総括を行っている。また、今後の課題と展望として、より簡便な計測装置の開発やモデル解析結果を応用した老人用転倒防止靴などを提案している。

以上要するに、本論文は、複雑構造体であるヒト足部を、機能限定した力学モデルの構築によって、歩行時におけるパラメータ同定を行い、構造変化に伴う力学的挙動を示したものである。二足歩行を行うヒトの足部は路面とのインターフェースとしてのサブシステムであり、本論文で複雑な変形が確認され、定量化された足部の挙動は、従来の研究には全くない新規性を有しているといえる。さらに、この結果を受け、新しい設計指針による義足足部の提案と試作・評価および足底装具の評価手法を示した本研究の義肢装具研究分野における貢献は極めて大きい。この他にも本研究の成果は、病的変形を生じた足部のモデル解析、新しいスポーツシューズの開発、機械を用いた身体機能の補助、二足歩行ロボットの機械的コンプライアンスを有する足部構造の開発などへ結びつき、将来の様々な応用が期待される。本論文で示された歩行中のヒト足部のモデル解析とその応用例は、人間工学、リハビリテーション工学、バイオメカニクスのみならず、ロボット工学、機械工学など、多くの工学分野に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2003年3月

(主査)	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	高西淳夫
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	内山明彦
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	梅津光生
		医学博士（東京女子医科大学）	
	早稲田大学教授	博士(工学)（早稲田大学）	藤江正克
	早稲田大学助教授	博士(工学)（早稲田大学）	藤本浩志