

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 24 年 5 月 10 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21500578

研究課題名（和文） 人体－シューズ連成系の順動力学的分析によるスポーツシューズの機能抽出

研究課題名（英文） Extraction of Functional Role of Sports Shoes Based on Dynamics analysis of a Shoes-Human Coupling System

研究代表者

小池 関也（KOIKE SEKIYA）

筑波大学・体育系・准教授

研究者番号：50272670

研究成果の概要（和文）：

まず、シューズのモデル化において、非線形粘弾性トラス要素からなるソールの有限要素モデルとシューズ衝突装置の動力学シミュレーション結果と衝突実験における測定値とが合うようにして、シューズ粘弾性特性を同定している。そして、矢状面における全身の運動方程式と、上記同定によって得たソールの粘弾性方程式とを連成させた分析から、地面反力へのシューズソール各部位の弾性力および粘性力の貢献、ならびに、シューズソール各部位の弾性および粘性のそれぞれに起因するトルクによる身体推進および身体支持に対する貢献を求めることによって、シューズ各部機能の定量化を実現している。

研究成果の概要（英文）：

This study has established a methodology to quantify the functional role of compressive characteristics of shoe sole by combining a finite-truss-element shoe sole model and the equation of whole-body motion. The equation of the shoe sole deformation was developed by modeling shoe sole as a construction of truss elements that have nonlinear spring and damper. The properties of the spring and damper were identified from impact test by using an impact device containing an accelerometer and an arm with impactor. The equation of whole-body motion was derived by modeling the human body as a system of 15-rigid linked segments. Dynamic contributions of the support leg joint torques, which were caused by the elastic and viscous forces on the shoe sole, to the generation of whole-body CG's acceleration were calculated under constant running speed condition. The results for a fore/mid foot striker indicate that 1) the ankle joint torque caused by the elastic property of the forepart of shoes sole contributes to the acceleration of whole-body CG, and 2) the knee joint torque caused by the viscous property of shoe sole shows negative contribution to the body support but shows positive contribution to the propulsion.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2009 年度	3,000,000	900,000	3900,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総 計	4,000,000	1,200,000	5,200,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・スポーツ科学

キーワード：動力学的分析，シューズ，人体，用具と人体の連成，機能抽出

1. 研究開始当初の背景

人間の特性を考慮に入れたシューズ研究は、その殆どが、シューズ特性の変更による、足部あるいは下腿のキネマティクスの変量の変化を定量化したものである。このため、実際には、構造物としてのシューズ特性と、スポーツパフォーマンスとを統一的に取り扱うことはされて来っていない。また、運動学的な知見には、多関節体である人体のダイナミクスが考慮されていないため、力学的には異なる解釈を生み易く、動力学的な客観性の薄い知見となる問題点がある。

2. 研究の目的

人体とシューズとの相互作用のメカニズムを力学的に明らかにするために、人体全身とシューズとの連成モデルを導出し、このモデルを順動力学的に分析することによって、シューズの機械的特性が、スポーツ動作に必要なスポーツシューズの各機能（推進、支持、など）に対して、どのように貢献しているのかを定量化可能とする。

3. 研究の方法

・シューズ特性のモデル化

図 3-1 に示すように、ばね、およびダンパを有するトラス要素により構成される立方体のトラス構造を構築する。

・シューズ同定システムの構築

図 3-2 に示す回転アームとシューズ接触部

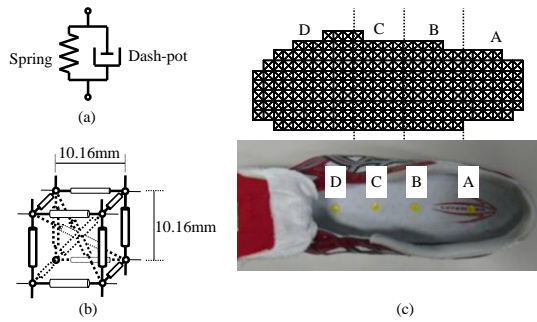


図 3-1. シューズのモデル化 (a) トラス要素, (b) 立体トラスモデル, (c) ソールモデル

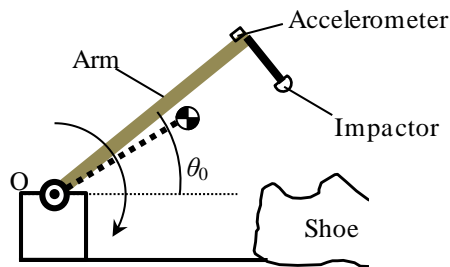


図 3-2. ソール特性同定用衝突試験装置

からなる衝突実験装置を作製して、シューズソールとの衝突実験を行う。実験試技は、図 3-1(c) に示すシューズの後部から前部にかけての四か所に対して、アーム傾斜角度が 30° , 45° , 60° となる高さからアームをそれぞれ落下させ、その際の衝突部上部に設けた加速度計（小野測器社製）の信号をサンプリング周波数 10kHz にて得る。なお、シューズソールモデルは、衝突部位に応じて 4 つの領域に分割する。

剛性 k および粘性係数 c は、ヘルツの接触式を参考にしつつ、非線形性を考慮可能とするため、以下のような一次式とする。

$$k = k_0 + k_1 u_{i,e} \quad \dots(1)$$

$$c = c_0 + c_1 u_{i,e} \quad \dots(2)$$

ここで、 $u_{i,e}$ は各要素の変位を示している。

落下実験における応答と有限要素モデルによる落下シミュレーションの応答が一致するように各パラメータを試行錯誤的に同定する。図 3-3 には、同定したパラメータによる結果を示す。この結果から、衝突アームの初期角度によらず、同定されたパラメータによってソールの特性を良く表していることが見て取れる。

・シューズ機能の抽出式

F_P を節点力ベクトル、 U_{SH} を節点変位ベクトル、 K_{SH} および C_{SH} をそれぞれ剛性行列、および粘性行列とすると、ソールモデルにおける全ての節点についての粘弾性方程式は、

$$F_P = K_{SH} U_{SH} + C_{SH} \dot{U}_{SH} \quad \dots(3)$$

$$K_{SH} = R^T \bar{K}_{SH} R \quad C_{SH} = R^T \bar{C}_{SH} R$$

と表すことができる。これにより時間領域におけるシューズの圧縮変形特性の定量化が可能となる。

本研究では、人体を計 15 の剛体セグメントによってモデル化する。すなわち、左右各上肢は上腕・前腕・手の 3 セグメント、左右各下肢は大腿・下腿・足の 3 セグメント、そして頭部・体幹では、頭部・上胴・下胴の 3 セグメントを構成要素とする。

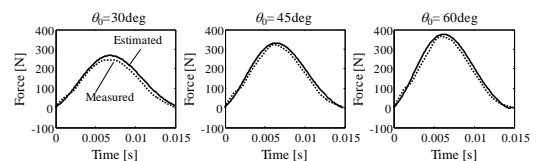


図 3-3. ソール特性の同定結果

各セグメントの並進および回転の運動方程式を、全てのセグメントについてまとめると、

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{P}\mathbf{F} + \mathbf{Q}\mathbf{N} + \mathbf{H} + \mathbf{G} \quad \dots(4)$$

と表すことができる。ここで、 \mathbf{M} は慣性行列、 \mathbf{V} は各セグメントの重心速度ならびに角速度ベクトルからなる一般化速度ベクトル、 \mathbf{P} および \mathbf{Q} は各関節に加わる関節作用力 \mathbf{F} および関節作用モーメント \mathbf{N} に対する係数行列、 \mathbf{G} は重力加速度項を示すベクトルであり、 \mathbf{H} は各セグメントのジャイロモーメント項を表すベクトルである。

次に、隣り合うセグメントが関節により連結するための拘束条件式を二階微分することによって得た加速度拘束式を各隣接セグメントについてまとめると、

$$\mathbf{C}\dot{\mathbf{V}} + \dot{\mathbf{C}}\mathbf{V} = \dot{\boldsymbol{\eta}} \quad \dots(5)$$

となる。

各セグメントの運動方程式(4)、およびセグメント間の加速度拘束式(5)を連立させ、関節作用力 \mathbf{F} を消去することにより、系の運動方程式を

$$\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{A}_N \mathbf{N} + \mathbf{A}_V + \mathbf{A}_G \mathbf{G} \quad \dots(6)$$

として求める。

ここで、全身の解剖学的な関節軸まわりの発揮トルク \mathbf{T} と関節作用モーメント \mathbf{N} との関係は、各関節軸を表す単位ベクトルにより構成される \mathbf{K} を用いて、

$$\mathbf{T} = \mathbf{K}\mathbf{N} \quad \dots(7)$$

と表す。式(6)は解剖学的な関節軸まわりの発揮トルクベクトル \mathbf{T} を用いて、

$$\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{A}_T \mathbf{T} + \mathbf{A}_V + \mathbf{A}_G \mathbf{G} \quad \dots(8)$$

と変形できる。式(8)を身体重心への変換行列である \mathbf{S} を用いて、身体重心加速度を求める式に変換すると、

$$\mathbf{a}_{\text{cg,body}} = \mathbf{S}\dot{\mathbf{V}} \quad \dots(9)$$

となる。

フォースプレートから得られた地面反力を足底圧分布の荷重値比に応じて分配することにより、足圧計の各センサ部位における作用力ベクトルからなる節点力ベクトル \mathbf{F}_P を得る。支持脚関節トルク $\mathbf{T}_{\text{Sup,Leg}}$ および節点力ベクトル \mathbf{F}_P の静力学的関係式は、

$$\mathbf{T}_{\text{Sup,Leg}} = \mathbf{J}_P^T \mathbf{F}_P \quad \dots(10)$$

と表すことができる。ここで、 \mathbf{J}_P は支持脚の各関節からソールモデルの各節点に向かうベクトルにより構成されるヤコビ行列である。

シューズソールモデルの粘弾性方程式(3)、全身の運動方程式(8)、身体重心加速度への変換式(9)、および支持脚関節トルクとソール節点力ベクトルとの静力学的関係式(10)を連立することにより、シューズー人体連成系における動力学関係式

$$\bar{\mathbf{a}}_{\text{cg,body}} = \mathbf{S}\mathbf{A}_{T,\text{Sup,Leg}}\mathbf{J}_P^T (\mathbf{K}_{\text{SH}}\mathbf{U}_{\text{SH}} + \mathbf{C}_{\text{SH}}\dot{\mathbf{U}}_{\text{SH}}) \quad \dots(11)$$

を求めることができる。

・走動作実験

定速走行(5m/s)において、被験者の身体代表点に貼付した反射マーカの三次元座標を三次元自動動作分析装置(Vicon Motion System 社製, VICON-MX, 250Hz)を用いて測定した。その際、スタートから約20mの位置に埋設したフォースプレート(Kistler 社製, 1000Hz)にて地面反力を計測し、さらに足底圧分布測定システム(Tekscan 社製, F-Scan mobile, 500Hz)を用いて足底部の垂直圧力分布(足底圧分布)を測定した。

4. 研究成果

・シューズ機能の定量化について

(1). シューズのモデル化において、ソールの粘弾性特性の同定については、回転アームとシューズ接触部からなる衝突実験装置を作製して、シューズソールとの衝突実験を行い、その際、衝突部上部に設けた加速度計の情報と、接触部の換算質量からシューズとの衝突力を推定可能とした。そして、粘弾性トラス要素からなるソールの有限要素モデルとシューズ衝突装置の動力学シミュレーション結果が実験における測定値と合うようにすることによって、シューズ粘弾性特性の同定を実現した。

(2). 矢状面における全身の運動方程式と、上記同定法によって得たソールの粘弾性方程式とを連成して分析することによって、地面反力へのシューズソール各部位の弾性力および粘性力の貢献、ならびに、シューズソール各部位の弾性および粘性のそれぞれに起因するトルクによる身体推進および身体支持に対する貢献を求めることによって、シューズ各部機能の定量化を実現した。

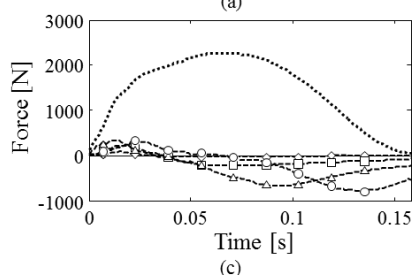
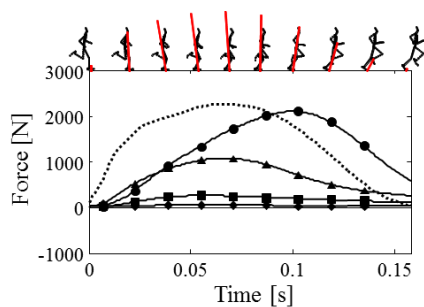
(3). ソール作用力の構成要素の分離結果、および身体の推進・支持に対するシューズ特性に起因する関節トルクの役割を図4-1および図4-2に例示する。分析の結果、たとえば、前中足部接地タイプの被験者において、地面反力の鉛直成分には、接地直後を除けばシューズ前部の弾性力が大きく正に貢献すること、また、地面反力の水平成分には、接地時中盤に弾性力が負に粘性力が正に貢献することがわかった。さらに、関節トルクによる貢献を定量化した結果、身体の支持には、シューズの弾性力に起因する足関節および膝関節トルクが大きく正に貢献するのに対して、粘性力に起因する膝関節トルクは負に貢献すること、また、身体の推進については、

弾性力に起因する膝関節トルクが大きく負に貢献するのに対して、粘性力に起因する膝関節トルクが正に貢献することなどを明らかにした。

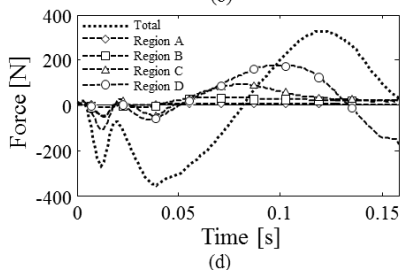
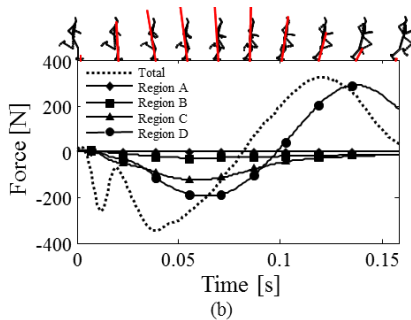
「その他」

・任意の受動的関節軸自由度に対応可能な、身体運動の動力学的分析手法の提案

(1). 各セグメント単体の運動方程式、セグメント間の連結方程式、ならびに、受動的関節軸の幾何学的条件式を連立することにより導出した系の運動方程式を用いて、各種状態量に対する関節トルク項、関節外力項、運



鉛直方向成分：(a)弾性，(c)粘性

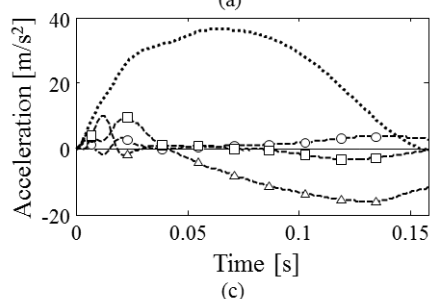
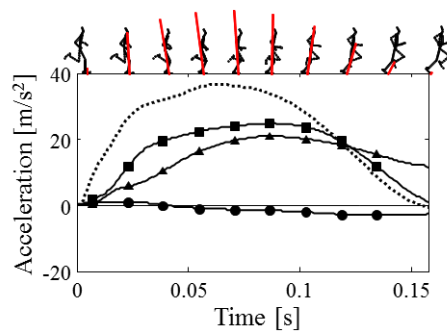


水平前後方向成分：(b)弾性，(d)粘性
図 4-1. ソール作用力の構成(例)

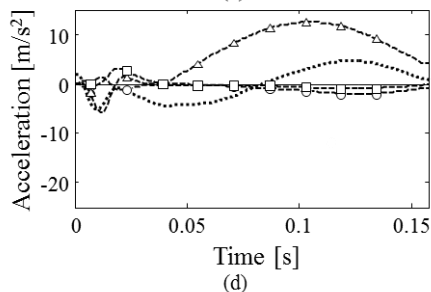
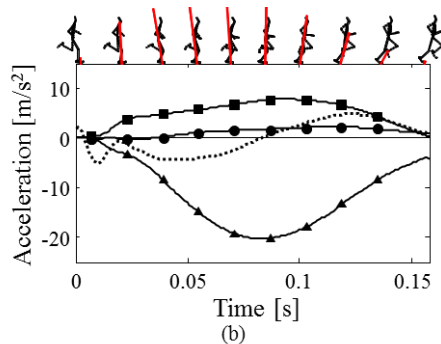
動依存項、および重力項の貢献を容易に定量化可能な手法の定式化を行った。

(2). 受動的関節自由度を有する系に対して、関節拘束力ベクトルならびに拘束トルクに対する各項の貢献をも定量化可能とした。

上記の手法は、切り返し動作および曲線走などの 3 次元的な動作において、シューズ機能を抽出するのに不可欠となる。



推進の加速度：(a)弾性，(c)粘性



支持の加速度：(b)弾性，(d)粘性

図 4-2. 身体の推進および支持 (例)

図中のマーカー、丸：股関節，三角：膝関節，四角：足関節，印なし：合計値

・足部 MP 関節の動力学的機能の定量化

- (1). 考案した分析手法を、全身に拡張・適用するとともに、足底圧情報を利用して MP 関節トルクを推定することにより、MP 関節を含む支持脚関節トルクの身体重心加速度に対する動力学的な貢献を定量化可能とした。
- (2). MP 関節の底背屈軸トルクは、身体重心加速度の獲得に大きく貢献する足関節の底背屈軸トルクとは逆の貢献を示した。このことは、MP 関節の底屈トルクを大きくすることによって、前足部の接地圧を高め、足関節の底屈トルクを大きくすることによって、身体重心加速度を獲得するようにしている結果であると考えられる。
- (3). 走速度の増大は、被験者とした前中足部接地タイプのランナーにおいて、身体重心加速度鉛直成分の獲得メカニズムを変化させ、高速において、足関節の底背屈軸トルクの貢献がより大きくなることがわかった。

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 3 件)

- ① 小池 関也, 翁晋平: シューズー人体連成モデルを利用したシューズの機能抽出. シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011 講演論文集, 283-288, 2011. 査読無
- ② 小池 関也, 石川達也, 阿江通良: 走動作における身体関節機能の定量化 (足部 MP 関節を含む支持脚関節の機能). 日本機械学会シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2010 講演論文集, 200-205, 2010. 査読無
- ③ 小池 関也, 石川達也: 受動的関節自由度を考慮した身体動作の順動力学的分析手法の定式化. 日本機械学会ジョイントシンポジウム 2009 講演論文集, 349-354, 2009. 査読無

〔学会発表〕(計 6 件)

- ① 小池 関也, 翁晋平: シューズー人体連成モデルを利用したシューズの機能抽出. シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011, 京都大学, 京都府, 2011. 10. 31.
- ② 翁晋平, 小池 関也: 身体ーシューズ連成系の動力学的分析のためのシューズ特性のモデル化. 日本体育学会第 62 回大会, 鹿屋体育大学, 鹿児島県, 2011. 9. 25.
- ③ 小池 関也, 石川達也, 阿江通良: 走動作における身体関節機能の定量化 (足部 MP 関節を含む支持脚関節の機能). シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2010, 東京工業大学, 東京都, 2010. 11. 4.
- ④ 小池 関也, 阿江通良: 人体ーシューズ連成系の順動力学的分析におけるシューズソールの簡易モデル化. 日本体育学会第 61 回大会, 中京大学, 愛知県, 2010. 9. 9
- ⑤ 小池 関也, 石川達也, 阿江通良: 走動作における足部 MP 関節トルクの順動力学的貢献. 第 21 回日本バイオメカニクス学会大会, 国士舘大学, 東京都, 2010. 8. 31.
- ⑥ 小池 関也, 石川達也: 受動的関節自由度を考慮した身体動作の順動力学的分析手法の定式化. 日本機械学会ジョイントシンポジウム 2009, 福岡工業大学, 福岡県, 2009. 12. 4.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小池 関也 (KOIKE SEKIYA)
筑波大学・体育系・准教授
研究者番号: 50272670