

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007 年度 ～ 2008 年度  
 課題番号：19700195  
 研究課題名 (和文) 足底皮膚変形計測による歩行時の足底触覚刺激情報処理モデリングに関する研究  
 研究課題名 (英文) A study of plantar skin deformation measurement during a walk for tactile sensitivity information process modeling  
 研究代表者  
 竹村 裕 (TAKEMURA HIROSHI)  
 東京理科大学・理工学部・助教  
 研究者番号：60408713

研究成果の概要：本研究では、一般的に普及した歩行解析の方法で計測できない足底の触覚刺激や皮膚変形に着目し、足底の皮膚変形が計測可能な装置を開発し、冷却前後の歩行を計測することにより、実験的に足底触覚刺激が歩行に及ぼす影響を確認した。さらに、過去の知見や医療用断面撮像写真より、皮膚・骨・腱などを考慮した足の 3 次元有限要素モデルの開発を行った。皮膚の大変形と接触解析を含めるため、有限変形理論に基づく弾性有限要素法を応用した計算コードを開発し、足底の変形シミュレーションを可能にした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,800,000	0	1,800,000
2008 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	450,000	3,750,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：デジタルヒューマンモデル、足底触覚情報処理、歩行解析、足底局所滑り現象

## 1. 研究開始当初の背景

健康維持に重要であると指摘されている歩行動作は下記に挙げるような特徴がある。

1) 中高年・高齢者の健康維持に歩くことが奨励されている。2) 転倒という重大な危険と背中合わせであり、寝たきりの大きな要因である。3) 比較的単純な反射運動に見えるが、実際は非常に複雑な運動であり、未解明な部分が多い。これまでの歩行動作解析の研究は、歩行全体の関節軌道や筋肉の働き、トルク、力の関係など中心に力学的な観点で数多く行なわれてきた。その主たる研究成果に二足歩行ロボットの開発がある。ロボットは

人のように二本の足で歩いたり走ったりすることが出来るようになった。しかし、その動きは人のそれとは未だかけ離れており、歩行運動の複雑さを顕著に表している。そもそも歩行は、単に力学的な運動だけでなく、全身の筋・骨格系と神経系や肺、心臓などの循環器系との協調的動作であり、視覚、触覚などの感覚器系も深く関与している。従来のように力学的視点だけでは歩行や転倒のメカニズムに対して新たな知見を得ることは困難である。人間は物体をつかむ時には物体の摩擦係数の違いを知覚し、安定化する力制御を行っていると考えられている。弾性を有す

る皮膚と物体との接触面で局所的に生じる局所滑り現象がこの安定化する力制御に大きく起因しているとされ、盛んに研究が行われている。弾性体である皮膚の変形を計測したり、指先触覚の具体的なメカニズム検証したりすることで、局所滑りとの関係を実験的解析的に見出そうとしている。把持などの掌に関する現象だけでなく、足底触覚と歩行時の力制御においても同様なメカニズムで摩擦係数を知覚し力制御しているとしたら、皮膚変形とバランス制御力の間には明確な相関があると考えられる。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、従来研究では得られなかった情報である、足底の局所的な滑りや足底の推進方向の力分布など、歩行時の足底皮膚変形や触覚刺激に着目し、以下の二点を主な目的とした。1) 足底触覚刺激が歩行運動に及ぼす影響を探るため、歩行中の足底触覚刺激の量の変化に伴う歩行運動への影響を調べる。2) 足底の皮膚変形と触覚受容体の応答を計算可能とするために、皮・骨・腱などを考慮した足の3次元FEMモデルを開発し、計算コードを開発する。

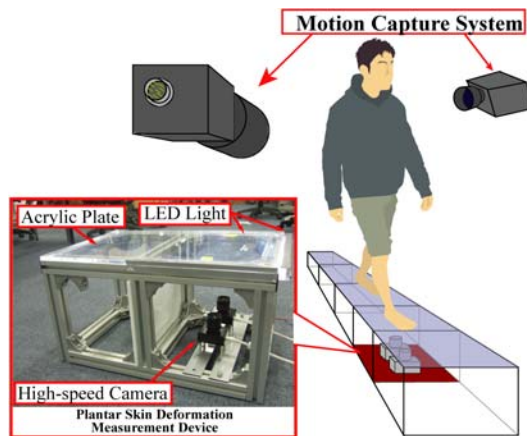


Fig.1 Measurement System

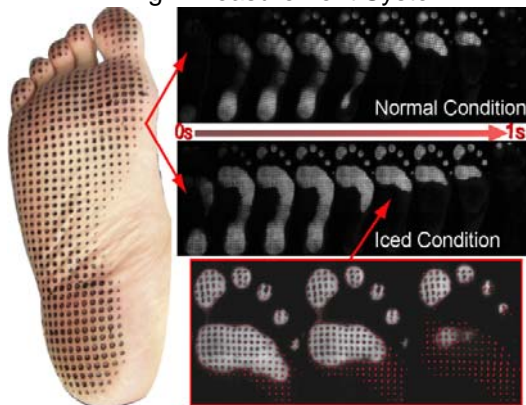


Fig. 2 Plantar Skin Deformation Measurement



Fig. 3 MRI Imaging Instrument

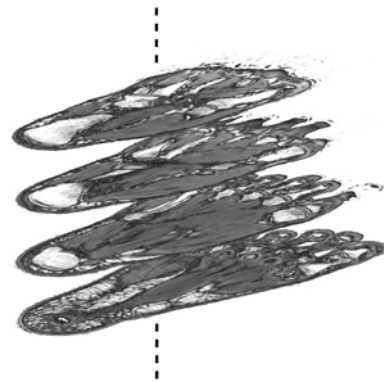


Fig. 4 MRI Imaging Sequence

## 3. 研究の方法

### (1) 足底皮膚変形計測装置と冷却方法

歩行中の皮膚変形を計測するために、複数の高速カメラ、アクリルプレート、LED照明、アルミフレームからなる足底皮膚変形計測装置を開発した (Fig.1)。開発した装置による足底皮膚変形と3次元位置計測装置による歩行パターンを計測し、足底触覚情報量の変化が歩容制御に寄与する事実を足底冷却前後における歩行時の足底皮膚変形計測によって検証した。被験者の足底の冷却には、氷と水を入れた容器とビニールシートを用いた。被験者に患部を10分~20分の間浸し、患部を15℃以下まで冷却し、冷却部位の神経伝達速度の遅延と、足底触覚情報量の低減を図った。さらに、定常歩行時だけでなく、特に滑りやすいとされる歩行開始2歩目を制御する歩行開始1歩目における歩行での足底皮膚変形計測により、足底皮膚で行われる歩容制御機能について考察する。Fig.2のように足底皮膚にドットパターンを描画することで画像処理技術を駆使することにより足底皮膚計測を可能とした。

(2) 足のFEMモデル開発と計算コード開発  
MRI (Magnetic Resonance Imaging) 利用し

て足の情報を非侵襲計測により画像化し、計測画像を基に3次元復元を行う。撮像にはキッコーマン総合病院の協力を得て、磁場強度1.0TのMRI装置(PHILIPS社製GYROSCAN NT)を使用した。幾つかのシーケンスを実施し、FFE(Fast Field Echo)シーケンスによる撮像を採択し、TRを25msec、TEを4.1、FOVを340、解像度を512×512、スライス間隔を1mmに設定した。以上の設定で1回の撮像には約10分を要した。撮像中に足が動くため画質が劣化するために、被験者の足を自然な状態で固定し撮像を行った。Fig.3に撮像の様子を示す。

MRI装置により撮像した連続した2次元断面画像(Fig.4)を基に3次元復元を行った。コンピュータ画像処理技術を応用して3次元復元を実施した。各部位のセグメンテーションに関しては、今回はMRI装置の磁場強度の関係で自動では満足いくセグメンテーションが行えず、手動での切り出しを実施した。切り出した画像データを基に3次元表面CADモデルを作成した。更に、計算コスト低減のためモデルのスムージング、ポリゴンの削減を行った。作成した皮下組織の表面CADモデルと足関節の26の骨に加え、脛骨と腓骨の足関節付近の表面CADモデルの一例をFig.5, Fig.6に示す。作成した3次元表面CADモデルから有限要素解析が可能な有限要素モデルを作成した。メッシュの作成にはプリ・ポストプロセサ用ソフトウェアであるGiDを利用した。作成した皮下組織と足の有限要素モデルの一例をFig.7,8に示す。この例では、接点数は合計で23939、要素数は123453である。皮下組織と骨のメッシュを別々に示したが実際の解析には統合して計算を実施した。

足底の変形は、大きな変形を伴うため、その数値解析においては幾何学的非線形性を考慮する必要がある。そこで本研究では、有限変形理論に基づく弾性有限要素法を用いて足底の変形解析を行った。有限変形理論における座標系の記述は、Updated Lagrange法を用いた。有限変形理論に基づく弾性問題の基礎式は次式のような増分形式で表される。

$$\int_V (\dot{S}_{ji} + \sigma_{mj} v_{i,m}) \delta v_{i,j} dV = \int_{S_i} \dot{f}_i \delta v_i dS \quad (1)$$

ここで、 $\dot{u}$ は変位速度ベクトル、 $\dot{f}$ は荷重速度ベクトル、 $\dot{S}_{ji}$ は2nd Piola-Kirchhoffの応力速度テンソル、 $\sigma_{ij}$ はCauchy応力テンソル、 $v_i$ と $v_{i,m}$ はそれぞれ変位速度と変位速度勾配である。式(1)は次式のような行列形式で書くことができる。

$$\int_V B^T (D - F) B u dV + \int_V E^T Q E u dV = \int_{S_i} N^T f dS \quad (2)$$

ここで、 $B$ は変位-ひずみ行列、 $D$ は弾性定数テンソル、 $E$ は変位-変形勾配テンソル、 $Q$ は

応力行列、 $N$ は要素の形状関数である。式(2)の左辺第1項が初期変位マトリックス、第2



Fig. 5 3D Soft tissues CAD Model



Fig. 6 3D bone structure CAD Model



Fig. 7 Soft Tissues 3D Mesh



Fig. 8 Bone Structure 3D Mesh Model

項が幾何剛性マトリックスである。本研究では、4面体1次要素(定ひずみ要素)を用い

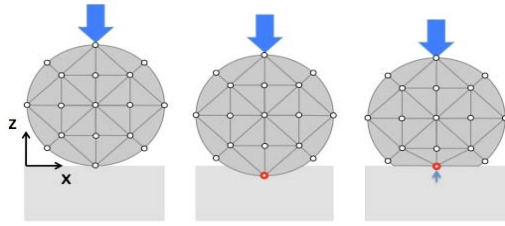


Fig. 9 Contact of a Node with the Flat Surface of a Rigid Body

て有限要素モデルを作成し、式(2)を計算することにより得られる剛性方程式の解法として、対角スケール前処理付き共役勾配法を用いた。

足底の変形は、 $z$ 座標が負の領域に仮定された半無限の剛体表面上に、 $z$ 座標が正の方向から足底を押し付けることで与えた。足底の移動と変形により、 $z$ 座標負の領域に入った節点を、剛体表面と接触した節点と判定した。接触と判定された節点は、剛体表面である  $z=0$  に引き戻し、剛体表面垂直方向 ( $z$ 方向)の変位を拘束した。簡単のため、拘束された節点の  $x$ - $y$ 平面内での移動は自由とし、摩擦なしを仮定した (Fig. 9)。

#### 4. 研究成果

##### (1) 足底皮膚変形計測

定常歩行時の足底皮膚変形計測：定常歩行時の歩行パターン計測により、冷却前後で身体動揺の変化は微小であったが、冷却後は踵着床時に足底接触面と床面の成す角が減少し、爪先部が早期に接触するように変化した。そのため冷却後は踵着床時の足底接触面積が増加した。爪先離床時の足底接触面積推移は冷却前後でほぼ等しい挙動を見せたが、足底皮膚変形計測を行った結果、冷却後の爪先離床時には足底皮膚変形量の明確な増加が確認された (Fig. 10)。足底接触面積量の増加、足底皮膚変形量の増加は共に足底皮膚からの触覚入力情報量の増加に繋がる。冷却後における鈍くなった足底触覚を補うために作用した変化であると考えられ、足底触覚が歩容制御にとって重要な要素であることが示唆された。

歩行開始1歩目の足底皮膚変形計測：歩行開始1歩目における足底接触面積計測によって、踵着床時に冷却後は冷却前よりも早く足底接触面積が増加するという、定常歩行時と同様の結果を得ることが出来た。爪先離床時には定常歩行時よりも大きい接触面積を必要とした。知覚神経終末の分布が多い爪先部を利用してこの期間に定常歩行時よりも多くの触覚情報量を得ていると言える。歩行開始1歩目の足底皮膚変形計測では、踵着床時において冷却後よりも冷却前の方が足底皮膚変形量は大きくなった (Fig. 11)。冷却後には足底皮膚変形は踵部ではあまり発生せず、定常歩行と同様に爪先部で大きく発生して

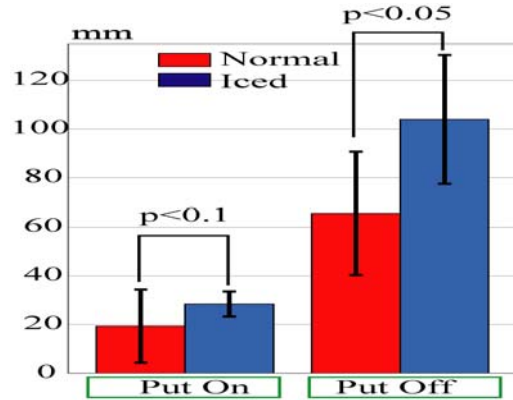


Fig.10 Total Slip Distance with Walking

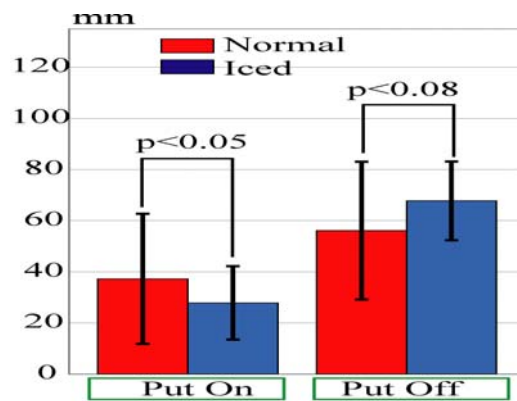


Fig. 11 Total Slip Distance with First Step

いることが確認できた。冷却後の歩行開始1歩目は、床面と平坦に足を着床させるように変化したことから、足底に前進方向の力が働かず皮膚変形も小さくなる。歩行開始1歩目と定常歩行の比較により、冷却前の踵着床時・冷却後の爪先離床時において有意差が見られた。これらは共に、歩行開始1歩目から定常歩行の状態へと移り変わる際に、歩容制御のために足底皮膚変形量を調節したフィードバック結果を表すと考えられる。足底と床面の着床は床面状態の確認作業を兼ねるため、未知の状態から初めて情報を得ることができる歩行開始1歩目の着床は特に重要である。情報を得た定常歩行時には皮膚変形量が少ない状態で歩行可能となる。また、冷却前の爪先離床時には歩行開始1歩目と定常歩行時とで有意差が見られなかったことから、床面についての情報は主に踵着床時に収集されるとも言える。冷却後においては、踵着床時には有意差が見られず、爪先離床時に有意差が見られ、冷却前とは正反対の結果となった。歩行開始1歩目よりも定常歩行の方が離床時の皮膚変形が大きくなることから、触覚が鈍くなった状態で速度も上昇した歩容を安定させるために最適な皮膚変形量を、歩行開始1歩目から定常歩行にかけて調節しているという知見を得た。

## (2) 足底の変形シミュレーション

MRI 画像より構築した有限要素モデルと前節の計算手法を基に開発したソフトウェアを用い数値解析を行った。拘束条件は足首切断面を下方向に 10mm の変位拘束を付加した。各部位の材料定数は文献を参考に皮下組織はヤング率を 1.15MPa, ポアソン比を 0.49 に, 骨はヤング率を 10GPa, ポアソン比を 0.34 に設定した。数値解析結果の一例として, 変位分布と応力分布を Fig. 12, 13 にそれぞれ示す。距骨から舟状骨, 内側楔状骨, 中足骨にかけてよく変位し, 縦アーチが小さくなっているのが見て取れる。また, 踵部あるいは, 中止骨辺りに応力が集中していることも見て取れる。この結果は足裏を押し付けた場合とよく一致していることが定性的に確認でき, 足の変形が数値解析的に計算可能になることを示した。しかし, 今回は軟骨, 腱等のモデル化を行っていないので, 脛骨と腓骨を下方に押し込んだ力が骨と骨との間をうまく伝わらず, 足裏の圧力分布が実験的計測結果とは定量的に一致していないことも確認された。今後の予定として, 皮膚の三層化(真皮, 表皮, 皮下組織), 軟骨と腱のモデル化を行い, より生体機能を模擬したモデルの構築を目指し, 足関節のメカニズム・足底触覚情報処理の解明を目指す。

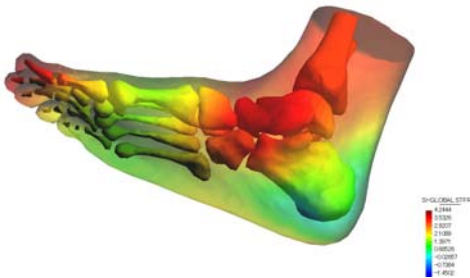


Fig. 12 Nodal Displacement

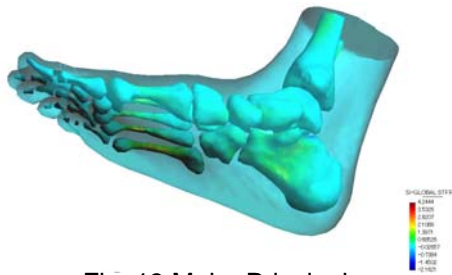


Fig. 13 Major Principal

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- ① Masahiro Ueda, Kentaro Sekiguchi, Hiroshi Takemura, Hiroshi Mizoguchi, "Plantar 3-Axis Distributed Forces Sensor Based on Measurement of Silicone Rubber Deformation for Walking Analysis", Proceedings of The 7th Annual IEEE Conference on SENSORS, pp. 945-948, 2008. (査読有)
- ② Kentaro Sekiguchi, Masahiro Ueda, Hiroshi Takemura, and Hiroshi Mizoguchi, "Development and Calibration of 6-axis Force Sensor for Simultaneous Measuring of Plantar Deformation", Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp.3138-3142, 2008. (査読有)
- ③ Masahiro Ueda, Harutaka Uno, Hiroshi Takemura, Hiroshi Mizoguchi, "Development of Optical 3-axis Distributed Forces Sensor for Walking Analysis", Proceedings of The 6th Annual IEEE Conference on SENSORS, pp. 403-406, 2007. (査読有)
- ④ Harutaka Uno, Hiroshi Takemura, and Hiroshi Mizoguchi, "An Effect on Walk and Plantar Contact Area from Ice Immersion Approach", Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 1524-1529, 2007. (査読有)
- ⑤ Masahiro Ueda, Harutaka Uno, Hiroshi Takemura, and Hiroshi Mizoguchi, "Development of 3-axis Distributed Forces Sensor for Walking Analysis", Proceedings of SICE Annual Conference 2007, pp.720-723, 2007. (査読有)

〔学会発表〕(計 9 件)

- ① 植田 真裕, 関口 健太郎, 竹村 裕, 溝口 博, "シリコーンゴム変形計測に基づく足裏 3 軸力分布計測センサの開発", 計測自動制御学会(SICE)システムインテグレーション部門講演会, December 5-7, 2008. (長良川国際会議場, 岐阜県岐阜市)
- ② 関口 健太郎, 植田 真裕, 竹村 裕, 溝口 博, "足裏変形同時計測を目指した 6 軸力センサの製作と校正", 計測自動制御学会(SICE)システムインテグレーション部門講演会, December 5-7, 2008. (長良川国際会議場, 岐阜県岐阜市)
- ③ 植田 真裕, 関口 健太郎, 竹村 裕, 溝口 博, "歩行解析のための足裏 3 軸力分布計測センサ", 第 3 回計算科学フロンティアフォーラム, ポスター発表, September 9, 2008. (東京ガーデンパレ

- ス, 東京都文京区)
- ④ 関口健太郎, 植田 真裕, 竹村 裕, 溝口 博, “足裏変形計測との同期を目指した6軸力センサの開発”, 第3回計算科学フロンティアフォーラム, ポスター発表, September 9, 2008. (東京ガーデンパレス, 東京都文京区)
  - ⑤ 植田 真裕, 関口 健太郎, 竹村 裕, 溝口 博, “歩行時の足裏3軸力分布計測のためのシリコンゴムを用いたセンサの開発”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会, June 5-7, 2008. (ビッグハット, 長野県長野市)
  - ⑥ 関口 健太郎, 植田 真裕, 竹村 裕, 溝口 博, “床反力と足裏変形同時計測のための6軸力センサの開発”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会, June 5-7, 2008. (ビッグハット, 長野県長野市)
  - ⑦ 宇野晴貴, 竹村 裕, 溝口 博, “歩行と足底接触面積の関係に足底冷却が与える影響”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会, May 10-12, 2007. (秋田拠点センターALVE)
  - ⑧ 植田真裕, 宇野晴貴, 竹村 裕, 溝口博, “歩行解析のための3軸分布触覚センサの設計・開発”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会, May 10-12, 2007. (秋田拠点センターALVE)
  - ⑨ 宇野晴貴, 竹村裕, 溝口博, “足底冷却による触覚刺激減少が与える歩行への影響”, 第2回 計算科学フロンティアフォーラム「これからの計算科学, 5年・10年後」, ポスター発表, February 27, 2007. (東京ガーデンパレス)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

竹村 裕 (TAKEMURA HIROSHI)  
東京理科大学・理工学部・教授  
研究者番号: 60408713