ファイバグレーティングを用いた三次元足部形状計測装置の開発

山崎信寿・佐藤拓史・田中大輔・中澤和夫・持丸正明

Development of 3D Measurement System of Foot Shape with Fiber Grating Sensors

Nobutoshi YAMAZAKI, Takuji SATO, Daisuke TANAKA, Kazuo NAKAZAWA* and Masaaki MOCHIMARU**

An optical measurement system was developed in order to obtain the individual foot shape and sizes for well-fitting shoe and shoe-last design. Three units of the Fiber Grating projector and CCD camera were used to measure the heel and instep part of a foot shape in a natural standing posture. Measurements were taken for both feet with the subjects having to face the other direction. The image capturing process for the shape measurement is completed within 100 ms, so that any error caused by body swaying is negligible. A new calibration method to minimize the error gaps between sensors was developed. Measurements for the shape of the foot resulted in a smooth surface represented by 9000 data points. In addition, foot outlines projected on the lateral and horizontal planes were obtained with two other CCD cameras, for measurements of foot size. Size accuracy is ± 1.0 mm and plane orientation accuracy is $\pm 1.5^\circ$. Such accuracy is sufficient for designing shoe-lasts, and for selecting correctly fitted shoes.

Key Words : 3D shape measurement, shoes, foot, shoe last, fiber grating

1. はじめに

靴の適合性向上には、靴製作の基本となる靴型形状を足の形状特徴に合わせる必要がある。従来、この適合修正は主として足寸法により行なわれていたが、最近の足型解析によれば、寸法情報のみでは把握できない骨格軸線の曲りや傾きが適合性の重要な要因であることが分かってきた¹⁾。これらの形状特徴は各部の水平および垂直断面形態に現れるために、器具類による直接計測が困難であり、石膏型の採取あるいは光切断法などの三次元計測手法により行なわれていた。しかしながらこれらの方法の多くは、被験者の身体動揺が無視できないほどの長時間の静止立位状態を要求するか^{2,3)}、不自然な立位姿勢を要求するものであった^{4,5)}。

足型の短時間・自然立位計測を行なうには、適切な形状センサの選定と反対足の干渉を防ぐセンサ配置が必要になる。このため本研究では、近距離で瞬時に数百点の三次元座標値を計測できるファイバグレーティング(以下FG)形状センサ⁶⁾を用い、これを被計測足の周囲に3台設置した三次元形状計測装置を開発した。

2. 計測システム

2.1 性能目標

足型の寸法および形状は、同一個人においても体重のかけ方

や日内変動などによって異なる。このため計測装置の計測精度は、靴のサイズおよび足型修正量の判別が可能であるレベルを目標とする。靴型は足長 5 mm、足囲 6 mm、足幅 2.4mm ごとに作成されているため、寸法計測精度は 1mm 程度とする。また、足アーチのつぶれに関する甲部や踵部傾斜角度の個体差は最大 15° 程度であるために、 1.5° 以内を形状計測精度の目標とする。データの取得時間は身体動揺周期を考慮して 1 秒以下とする。また、計測姿勢は両足に均等荷重をかけて直立した自然立位姿勢とする。

2.2 センサの選定と配置

前述の条件を満足するには、両足の間に設置できるような小型高速の形状センサを用いる必要がある。

非接触での三次元形態計測原理には、モアレ法、レーザスキャン法、パターン投影法などがある。モアレ法は計測精度が低く、大きな計測空間を必要とする⁷⁾。また、レーザスキャン法は時間がかかり、身体動揺の影響を避けることが困難である⁸⁾。これに対して格子パターンや多くのスポット光を投影するパターン投影法では短時間計測が可能である。

本研究で用いたFG形状センサは、FG(光ファイバをすだれ状に配列した位相型回折格子) 2つを直交させた格子で赤外レーザ光を回折させ、多数のスポット光を物体表面に投光するものである。このスポット光を投光器と一定の位置関係にあるCCDカメラで撮影し、各点ごとの回折次数を知れば、三角測量の原理によって各スポット光の三次元位置を計算することができる⁹⁾。1枚の画像から数百点の表面座標値を計算できるため、原理的にはビデオレートでの計測が可能である。

ただし、足型は三次元的に複雑な形状を有するため、全体形状を計測するには複数台のセンサを配置する必要がある。本研

* 慶應義塾大学理工学部 横浜市港北区日吉 3-14-1

** 通産省生命工学工業技術研究所 つくば市東 1-1

* Faculty of Science and Technology, Keio University, Yokohama

** National Institute of Bioscience and Human Technology, Tsukuba
(Received June 17, 1996)

(Revised November 21, 1997)

Fig 1. Arrangement of FG shape sensor

究では以下の5つを考慮してセンサ配置を決定した。1) 甲部、踵部の必要計測項目の採取, 2) 両足計測, 3) 6才女子の足長の平均値 -3σ (150mm) から成人男子の足長の平均値 $+3\sigma$ (290mm) の計測範囲, 4) 自然立位, 5) カメラ台数最小。

2.3 システムの構成

FG形状センサの配置をFig.1に, 計測器本体と処理システムの全体をFig.2に示す。

計測装置は全長1500mm, 幅440mm, 高さ790mmであり, 足台寸法は足長方向360mm, 幅方向280mmである。両足の計測は体の向きを変えて左右の足を踏みかえることによって行い, FG形状センサ1, 2によって踵部と甲部内側の形状を, FG形状センサ3によって甲部外側の計測を行う。足部表面でのFG形状センサ2, 3のスポット光間隔は5~7mm, FG形状センサ1の間隔は8~12mmである。視野角は 40° 程度で, 体表面と約350mm離して設定した本装置の場合, 視野の長さは120mm程度であった。また, 離散的なFG形状センサのデータを補い, より精度の高い寸法データを得るために, 外郭線撮影用の2台のCCDカメラを側方に配置した。

被験者が立つ足台には透明なガラス板を使用し, 鏡に反射させて側方から足底面外郭投影画像を計測できるようにすると共に, 照明を切り替えることで接地部形状(フットプリント)も得られるようにした。また, 左右の足台は照明パネルで仕切り, 足

側面外郭線の計測時にコントラストを高めると共に, 非計測足が視野に入らないようにした。これらのカメラと照明装置の位置は両足の踵間距離が150~250mmの範囲で自由に選択できるように設計した。また, 足台下に左右足への体重配分を計測する荷重センサを取り付けた。

処理システムは, 計算機(PC-9801FおよびADS社製Transputer TBP08)とFrame Memory (ADS社製TBP06)およびControl Box (自作)からなる。Control Boxはカメラと照明の切り換えおよびビデオ画像の収集開始信号を発生する。ビデオ画像は一時RAM上に蓄え, 全計測終了後に記録媒体(MOディスク)に転送する。

2.4 計測手順

計測に先立ち, キャリブレーションを行なう。外郭投影画像の実寸法への変換は, あらかじめ既知寸法の物体を計測することによって行った。各FG形状センサは装置取り付け前に既知の距離にある数枚の平行平板で個別にキャリブレーションを行う。次に, 形状センサを装置に取り付け, 複数台のセンサ座標系の統合処理を行う。統合処理は, 各形状センサで既知形状のVブロックを同時計測し, センサ座標間の相対位置関係を取得することで行う。この座標系統合技術は, マルチ形状センサ計測の基盤技術であり, 本研究の重要な成果のひとつであるため, 4.3節で詳述する。なお, キャリブレーションおよび統合処理はカメラ位置を変えない限り最初に一度行なえばよい。

実際の計測は以下のように行なう。被験者を裸足で足台の上に立たせ, 自然立位姿勢をとらせる。左右の荷重がほぼ均等になったことを装置のメータで確認後, データ収集を行う。2台の外郭投影用カメラとそれに対応した照明を順次切り替え, ビデオ画像を計算機に取り込む。さらに, 3台のFG形状センサのスポット光投光器を順次切り替え, ビデオ画像を計算機に取り込む。2台の外郭線投影カメラの計測時間は100ms以下, 3台のFG形状センサによる形状計測時間は200ms以下である。

3. 輪郭線画像からの寸法データの抽出

靴型修正のための基本寸法情報としては, 足の各部位での長さ, 幅, 高さ, 周囲長, 角度がある。本研究では, 底面画像から長径

Fig 2. Measurement system

Fig 3. Calculation process of size and form data

項目と幅径項目および足軸の屈曲角度を、側面画像から高径項目を算出した。なお、周長と甲部や踵部の傾斜角度は次節で詳述する足の三次元形状データから算出した。外郭線画像からの寸法特徴量の自動抽出手順を Fig.3 に示す。

画像はコントラストが明瞭であるため、2 値化処理で容易に輪郭線を得ることができる。得られた側面輪郭線の前後部分の最凸点としてつま先点(T)と踵点(P)を決定し、踵点からつま先点に向けた線分上で、第2 指足長の54%位置の甲部の点を楔状骨点(D)として甲高さを算出した (Fig.3(d))

また、底面輪郭線前端領域の極大点として第2 指先端点(2T)を、同じく後端領域の最凸点から踵点(P)を決定し、両点を結ぶ線分の踵点から60~80%の範囲内で、その線分に直交する最遠点として腓側中足点(MF)と脛側中足点(MT)を決定した。これらの特徴点に基づき、Fig.3(e)のように足幅(FB)、踵幅(HB)、足長第2 指(FL)の寸法項目を算出した。さらに、足軸の曲がり具合を示す屈曲角度を求めるために、画像処理手法の一つであるスケルトン処理を底面輪郭画像について行ない、その結果得られた軸線を3 等分して直線回帰し、2 直線の交叉角度を計算した (Fig.3(f))⁹⁾。

4. FG 形状センサによるスポット光画像の処理

Fig 4. Composition process of spot data

4.1 処理の概要

足の形状特徴としては、踵部の内側への倒れ込み角度と中足部の前額面内傾斜角が重要である⁹⁾。これらの形状特徴量は足のアーチ構造の特徴を表し、靴型の高適合化に大きく影響するものである。

FG形状センサで捉えた画像から足部の三次元形状を取得するまでの処理の流れを Fig.4 に示す。形状センサで捉えた画像中のスポット光輝度は、3 台のカメラおよび足の表面状態と異なるため、スポット光認識のしきい値を段階的に増加させる多段階しきい値処理によってスポット光を抽出した。計測画像は256 階調で記録されており、スポット光のしきい値の初期値は経験的にスポット光輝度値より低い50 とし、順次しきい値を輝度値5 ごと増加させ、スポット光を認識した。次にスポット光の光量重心位置を計算して全スポット光の三次元位置を各センサの座標系で取得した。さらに格子状のスポット光の次数(番地に相当)の判定ミスによる計測エラー点を除去した後(4.2 節参照)、3 つのセンサで捉えた部分形状を合成し(4.3 節参照)、足部形状を取得した。

4.2 計測エラー点の除去

スポット光の次数判定を誤った場合には、Fig.4(a) に示すようにセンサの光軸方向に大きな誤差を生じる。そこで、全ての計測点についてある点とその近傍点とのセンサからの距離差を算出した。このうち、差の最大値を3 等分して各点をグループ分けし、点数が最大のグループのみを正常な計測データとして用い、それ以外の点は計測エラー点として除去した。エラー処理を含むスポット光の3 次元位置の計算時間はカメラ1 台当たり約1 秒(データ点数約300 点)であった。

4.3 座標系の合成

取得した足の部分形状は、各FG形状センサ固有の座標系で記述されているため、それらを共通の絶対座標系に変換し、形状データを合成する必要がある。この変換行列は、既知形状物体(Vブロック:70H×160W×120D)を3 台のセンサで同時計測することで決定した。ただし、各形状センサから絶対座標系に変換する行列には必ず誤差があり、一般には合成した形状が不連続になる。このため、本研究では、既知形状から得られた変換行列を近似解として用い、複数のセンサで計測した同一平面の法

線方向誤差を最小にするように各変換行列の回転成分を補正し、さらに冗長な座標変換経路で得られた位置誤差を最小にするように並進成分を補正した。

1) センサ間の座標変換行列の算出

座標系の定義をFig.5に示す。j番目の形状センサ座標系はカメラ光軸を Z_{sj} 軸、CCD素子面に $X_{wsj}Y_{wsj}$ 軸を持つ座標系 M_{sj} で、絶対座標系はVブロック底面に原点を持ち、長手方向に Z_w 軸、幅方向に Y_w 軸、高さ方向に X_w 軸を持つ座標系 M_w である。m台のセンサで計測された形状データは、それぞれセンサ座標系 $M_{sj}(j=1\sim m)$ で記述され、変換行列 M_{sj-w} によって絶対座標系 M_w に変換される((1)式)。

$$M_w = M_{sj-w} \cdot M_{sj} \quad (1)$$

これらの変換行列を使って合成した形状データの不連続性を低減するためには、m個のセンサ座標系のうちの1つを基準センサ座標系 M_{s1} と定め、その他のセンサ座標系 $M_{sj}(j=2\sim m)$ と基準センサ座標系との座標系変換誤差を低減すればよい。

基準センサと他のセンサとの相対的な位置関係を考えるために、各センサ座標系から変換行列 M_{sj-w} によって絶対座標系に直接変換するのではなく、各センサ座標系を変換行列 M_{sj-s1} ($j=2\sim m$)によって基準センサ座標系 M_{s1} に変換した後((2)式)、 M_{s1-w} によって絶対座標系 M_w に変換することを考える((3)式)。この場合、センサ間の座標系変換誤差は、m-1個の変換行列 $M_{sj-s1}(j=2\sim m)$ に含まれていることになる。

$$M_{s1} = M_{sj-s1} \cdot M_{sj} \quad (2)$$

$$M_w = M_{s1-w} \cdot M_{s1} \quad (3)$$

ここで、各カメラにもっとも近いVブロックの頂点に頂点座標系 $M_{vj}(j=2\sim m)$ を考える。これは、頂点を原点とし、頂点を通り直交する稜線方向に X, Y, Z 軸をもつ座標系である。変換行列 $M_{sj-s1}(j=2\sim m)$ は、各センサ座標系 $M_{sj}(j=2\sim m)$ からVブロックの頂点座標系 $M_{vj}(j=2\sim m)$ への変換行列 $M_{sj-vj}(j=2\sim m)$ と、頂点座標系 $M_{vj}(j=2\sim m)$ から基準センサに対応した頂点座

標系 M_{v1} への変換行列 $M_{vj-v1}(j=2\sim m)$ 、頂点座標系 M_{v1} から基準センサ座標系 M_{s1} への変換行列 M_{v1-s1} との積として計算することができる((4)式)。

$$M_{sj-s1} = M_{sj-vj} \cdot M_{vj-v1} \cdot M_{v1-s1} \quad (4)$$

ここで、(4)式右辺の $M_{sj-vj}(j=1\sim m)$ は、Vブロックの1つの頂点で交叉する3つの平面を各形状センサで計測することによって得られる。計測した3つの平面のうち、スポット光点数の多い上位2つの平面から1つの峰線ベクトル u (単位ベクトル)を求め、次に3平面の内最もスポット光点数の多い平面の法線でベクトル u と直交する単位ベクトル v を計算し、さらにこの2本のベクトルの外積によって単位ベクトル w を求めた。頂点の座標 O_j は3つの平面の交点として計算した。計測したこれらのベクトルから、センサ座標系を頂点座標系に変換する行列を(5)式に従って求めることができる。

$$M_{sj-vj} = \begin{pmatrix} u_j & v_j & w_j & o_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \quad (5)$$

(4)式右辺の M_{vj-v1} は、頂点2, 3座標系から頂点1座標系への変換行列である。これはVブロック頂点の相対的な位置関係から理論的に求められる。Fig.5に示すように、頂点2座標系の稜線ベクトル $u=(1,0,0)^T$, $v=(0,1,0)^T$, $w=(0,0,1)^T$ は、頂点1座標系では、それぞれ $u=(0,1,0)^T$, $v=(-1,0,0)^T$, $w=(0,0,1)^T$ に変換され、頂点2座標系原点は、頂点1座標系原点を u 方向に $L1$ だけ並行移動した位置にある。したがって、頂点2座標系から頂点1座標系への変換は(6.a)式のように表される。同様に、頂点3座標系から頂点1座標系への変換は(6.b)式ようになる。なお、本研究で使用したVブロックでは、 $\sin\theta=3/5$, $\cos\theta=-4/5$ であった。

$$M_{v2-v1} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & L1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.a)$$

$$M_{v3-v1} = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta & L1/2 \\ 0 & 1 & 0 & L2 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta & L4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.b)$$

さらに(4)式右辺第3項の M_{v1-s1} は、基準センサで計測した頂点1の峰線ベクトル u, v, w と頂点位置ベクトル O_1 から(5)式の逆行列として求めることができる。以上より、Vブロックを計測すればセンサ間座標変換行列 $M_{sj-s1}(j=2\sim m)$ を得ることができる。これを(2)式に代入すれば、各センサ座標系で計測した座標を基準センサ座標系 M_{s1} に合成できる。一方、(3)式で用いる M_{s1-w} は、次式のように表すことができる。

$$M_{s1-w} = M_{s1-v1} \cdot M_{v1-w} \quad (7)$$

(7)式右辺の M_{v1-w} は、Vブロック上に規定された絶対座標系と頂点1座標系との相対位置関係から、下式のように表すこと

M_{s1}, M_{s2}, M_{s3} : FG sensor coordinate system
 M_{v1}, M_{v2}, M_{v3} : Vertex coordinate system
 M_w : Global coordinate system

Fig 5. Definition of coordinate system

ができる。

$$\mathbf{M}_{vl-w} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L2/2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

(3)式, (5)式, (7)式, (8)式によって, 基準センサ座標系で合成表示された座標データは, 絶対座標系に変換される。

2) 法線ベクトルによる方向修正

センサ間座標変換行列 $\mathbf{M}_{sj-sI}$ ($j=2 \sim m$)は(4)式によって決定され, さらに(4)式中の第1項および第3項は, 頂点を囲む3つの計測平面の峰線ベクトル $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}$ から(5)式によって決定される。しかしながら, 平面上のスポット光の偶然誤差がそのまま(5)式の行列 $\mathbf{M}_{sj-vj}$ ($j=2 \sim m$)に反映するため, これに基づく行列 $\mathbf{M}_{sj-sI}$ ($j=2 \sim m$)で合成した形状は不連続になる。ここでは, Vブロックの同一平面を複数台のセンサで計測していることを利用し, その平面の法線ベクトルが一致するように座標変換行列 $\mathbf{M}_{sj-sI}$ ($j=2 \sim m$)の補正を行った。

三次元同次座標変換行列は, 通常4行4列で記述され, このうち3行3列の9成分が回転変換成分であり, これは直交する3軸の単位ベクトルの成分に相当する。ただし, 3つの単位ベクトル $\mathbf{u}_j, \mathbf{v}_j, \mathbf{w}_j$ の直交条件を加えると, (9.b)式のように独立成分は5成分となる。変換行列修正用に同一平面をR回計測して得られたR個の変換行列による3つの単位ベクトルの先端のばらつきの大きさを(9.a)式に従って評価し, 最もばらつきの小さい単位ベクトルの3成分と, 次点のベクトルのばらつきの小さい任意の2成分を独立成分として扱った。本手法では $R=4$ として, R回の計測で得られた稜線ベクトル成分の平均 $\mathbf{u}_{jk}^{avg}, \mathbf{v}_{jk}^{avg}, \mathbf{w}_{jk}^{avg}$ (j : FGセンサ番号, k : 単位ベクトルの成分)を算出し, (9.c)式の $\mathbf{u}_j, \mathbf{v}_j$ の5成分とし, (9.b)式のように近似行列 $\tilde{\mathbf{M}}_{sj-sI}$ を作成した。

$$\sum_{i=1}^R \left(\sqrt{\sum_{k=1}^3 (u_{jk}^{avg} - u_{jk}^i)^2} \right) < \sum_{i=1}^R \left(\sqrt{\sum_{k=1}^3 (v_{jk}^{avg} - v_{jk}^i)^2} \right) < \sum_{i=1}^R \left(\sqrt{\sum_{k=1}^3 (w_{jk}^{avg} - w_{jk}^i)^2} \right) \quad (9.a)$$

の時,

$$\tilde{\mathbf{M}}_{sj-sI} = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{u}}_j & \tilde{\mathbf{u}}_j \times \tilde{\mathbf{v}}_j \times \tilde{\mathbf{u}}_j & \tilde{\mathbf{u}}_j \times \tilde{\mathbf{v}}_j & \mathbf{o}_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9.b)$$

但し,

$$\tilde{\mathbf{u}}_j = \begin{pmatrix} u_{j1}^{avg} \\ u_{j2}^{avg} \\ u_{j3}^{avg} \end{pmatrix} \quad \tilde{\mathbf{v}}_j = \begin{pmatrix} v_{j1}^{avg} \\ v_{j2}^{avg} \\ a \end{pmatrix} \quad (9.c)$$

(ベクトル成分 a は他の2成分と直線上にない任意の成分)

さらに, 同一平面をセンサ j で計測した法線ベクトル $\mathbf{n}_j$ と基準

センサで計測した法線ベクトル $\mathbf{n}_I$ とのずれを(10)式で表し, $\tilde{\mathbf{M}}_{sj-sI}$ を初期値として法線のずれ Q_1 が最小になるように, 最小自乗法で $\mathbf{u}_j, \mathbf{v}_j$ の5成分の最適化を行った。

$$Q_1 = \sum_{j=1}^m (\tilde{\mathbf{M}}_{sj-sI} \cdot \mathbf{n}_j - \mathbf{n}_I) \quad (10)$$

最適化されたベクトル $\mathbf{u}_j, \mathbf{v}_j$ から(9.b)式と同様に変換行列を作成することにより変換行列 $\mathbf{M}_{sj-sI}$ ($j=2 \sim m$)の回転行列成分(3×3)を補正した変換行列 $\mathbf{M}'_{sj-sI}$ ($j=2 \sim m$)が求まる。

3) 変換経路による原点修正

(9.b)式によって回転成分を補正した後, さらに(9.b)式の原点位置ベクトル $\mathbf{O}_j$ を補正する。ここでは, 形状センサ j で検出した頂点座標を, 変換行列 $\mathbf{M}'_{sj-sI}$ で, 基準センサ座標系 $\mathbf{M}_{sI}$ に直接変換した結果と, それとは異なる冗長経路 $\mathbf{M}_{sj-sk} \cdot \mathbf{M}_{sk-sI}$ で基準センサ座標系 $\mathbf{M}_{sI}$ に変換した結果との誤差の2乗和を最小にするように, 各変換行列の並進成分 $\mathbf{O}_j$ を補正した。本システムでは3つのセンサを用いたので, FG形状センサ2で検出した頂点座標 $\mathbf{P}_2$ を形状センサ1座標系に変換する際に, $\mathbf{M}_{s2-sI}$ で変換した結果 $\mathbf{P}_I$ と $\mathbf{M}_{s2-s3} \cdot \mathbf{M}_{s3-sI}$ で変換した結果 $\mathbf{P}'_I$ との誤差の2乗和 Q_2 ((11.c)式)を最小化するように, 最小自乗法を用いて $\mathbf{M}_{s2-sI}, \mathbf{M}_{s3-sI}$ の2つの変換行列の並進成分6個 $\mathbf{O}_{1x}, \mathbf{O}_{1y}, \mathbf{O}_{1z}, \mathbf{O}_{2x}, \mathbf{O}_{2y}, \mathbf{O}_{2z}$ を補正した。

$$\mathbf{P}_I = \mathbf{P}_2 \cdot \mathbf{M}_{s2-sI} \quad (11.a)$$

$$\mathbf{P}'_I = \mathbf{P}_2 \cdot \mathbf{M}_{s2-s3} \cdot \mathbf{M}_{s3-sI} \quad (11.b)$$

$$Q_2 = (\mathbf{P}_{Ix} - \mathbf{P}'_{Ix})^2 + (\mathbf{P}_{Iy} - \mathbf{P}'_{Iy})^2 + (\mathbf{P}_{Iz} - \mathbf{P}'_{Iz})^2 \quad (11.c)$$

以上の方法によって変換行列 $\mathbf{M}'_{sj-sI}$ ($j=2 \sim m$)の並進成分を補正し, 実際の絶対座標系合成には回転成分及び並進成分を補正した変換行列 $\mathbf{M}''_{sj-sI}$ を使用した。

4.4 形状補間

FG形状センサで取得した多点データ(3台のFG形状センサ合計で約1200点)は足表面の離散データであるために, 周長や角度計算には補間によるデータ点の整列化が必要になる。ここでは踵点と第2指先端を結ぶ直線上の2%刻みで, この軸に直交する断面形状を, Fig.6に示すように計算断面の前後近傍にある計測点を結ぶ内分点として補間した。なお, 足底面部の形状は

Fig 6. Calculation process of cross sectional data

Fig.7 Example of measured foot shape

未計測であるが、接地部分の個体差は比較的小さいことから標準的な石膏足型データ¹⁰⁾の足底面部分を切りだし、各断面位置での幅径と高径に一致するように拡大縮小して組み合わせた。さらに、甲部と底部の接合部を3次のBスプラインで平滑化した。形状補間後の足部全体形状計測例をFig.7に示す。最終データ点数は足長250mmの場合、約9000点となる。

4.5 形状角度と周長の計算

Fig.8の定義に従い、甲部傾斜角度については足長の52～64%断面の甲部外側接線角度を、踵部傾斜角度については足長の10～24%断面のスケルトンを求め、高さ10～40mmの範囲の回帰式の傾き角度を計算した¹¹⁾。また、周長は中足点などの特徴点を通る断面¹⁾を新たに計算し、その周の長さを数値積分により求めた。

5. 計測装置の評価

本計測装置の開発目的は、実際の足の形状特徴量を簡便に精度よく計測することにある。このため、形状特徴量の算出の基本となる形状と寸法の計測精度および立位条件について検討を行った。

5.1 三次元計測精度

(1)FG形状センサの単体精度: FG形状センサ光軸に直交し、距離値が既知(最短距離300mm)の検定平面を3～4mm間隔で18面設定し、そのときのFG形状センサから検定平面までの距離を算出した。その結果、誤差の平均は1.0mm以内で、標準偏差は最大で1.2mmであった。

また、計測平面の傾き角度に対する精度を検証するために、各FG形状センサで立方体を複数回計測し、隣接平面の法線のなす角を算出した。その結果、法線間のなす角度と真値との差は $\pm 1^\circ$ 以下であった。ただし、平面に対するスポット光の入射角が 70° 以上になる場合は、誤差が $\pm 4^\circ$ 程度まで増大した。これ

Fig.8. Definition of foot angle

Fig.9 Effect of the developed composition method of coordinate systems

は、スポット光の入射角が大きい平面では、CCDカメラへの反射光量が少なくなり、ノイズの影響が大きくなるためと考えられる。本計測装置におけるカメラ配置では入射角の影響は無視できる。

(2)絶対座標系合成精度: 3台のFG形状センサで同一の平面を同一条件下で5回計測し、その平面の絶対座標系での法線ベクトルの方向のばらつきを比較した。その結果、標準偏差は 1.5° であった。また本研究による座標系の合成手法を用いない場合には、Fig.9のようにカメラ間で著しく食い違いが生じ、本手法が有効であることがわかった。

(3)赤外線の影響: FG形状センサで使用している赤外線レーザの波長は830nmで、皮膚内部まで浸透する傾向を持っている。この影響を検証するために、足に白色光沢性のラッカースプレーを噴霧し、レーザ光の反射状態を向上させて計測した。この結果、スプレーを噴霧しない時は深さ方向に平均0.6mm浸透することが分かった。これは、前述したセンサ単体の距離計測誤差以下であり、無視できる値である。

以上より、本計測装置は足型の形状特徴量を十分な精度で計測できると考えられる。

5.2 寸法計測精度

身体計測では体重負荷状態などによる足型自体の寸法再現性と装置の計測精度が複合誤差として現れるため、他の計測手法との誤差の比較は意味を持たない場合が多い。そこで、本装置で同一被験者を複数回計測し、計測結果として得られる特徴量の再現性を評価した。その結果、足長の標準偏差は0.35mm、足幅は1.1mm、踵幅は0.45mmであった。したがって、本装置による寸法項目の再現性は1mm程度で、実用上十分な精度を有する。また、成人のスケルトン屈曲角度の標準偏差は 3.8° であり¹²⁾、本計測装置での同一個人の角度の再現性は 0.26° 程度であることから、角度も十分な精度を持つと考えられる。なお、寸法項目の中では足幅のばらつきが大きい。これは以下の理由による。足幅算出用の特徴点である腓側中足点および脛側中足点は、底面外郭投影線図の内側および外側最凸点として抽出している。この部分は下面から投光した場合でも輝度勾配が緩やかで、照明条件と2値化のしきい値によって最凸点がばらつきやすい。したがって、計測足部分を完全に遮光すれば、安定した照明条件下で足幅のばらつきも小さくなるが、その分、計測が煩雑になる。ここでは、現状の精度で実用上十分と判断し、あえて計測の簡便性を重視した。

5.3 計測姿勢の妥当性

左右足の荷重状態によってスケルトン屈曲角度は約 5° 程度変化することが確かめられている¹⁾。本計測装置では計測時に荷重センサによって荷重状態を確認したため、左右荷重不均等による計測誤差は無視できる。一方、底面寸法項目算出用の特徴点は、底面輪郭線の最凸点として認識するため、計測時の足の長手方向の回転の影響を受けやすい。そこで、踵部を中心に爪先部を外転または内転させることによって足軸方向を変化させ、その影響を検証した。その結果、寸法計測誤差は足長で $\pm 1\text{ mm}$ 以内、足幅 $\pm 1\text{ mm}$ 以内、踵幅約 1 mm 、スケルトン屈曲角度 1° 以内であり、この影響も無視できることがわかった。

さらに画像取得時間の影響を調べるために、1名の被験者について、1秒毎に3枚の底面外郭線投影画像を計測して比較した結果、寸法・角度共に変化量は計測精度以下であることがわかった。実際の画像取得時間は1秒以下であり、本装置では各画像のインターバルは無視できる。

6. おわりに

小型なFG形状センサを用いることにより、靴型修正に必要な足の三次元形状データを、自然立位で短時間に高精度で計測できる装置を開発した。本装置は靴型設計の基本データを与えるばかりでなく、注文靴生産や整形外科的足部異常の記録¹³⁾など多方面に応用する事ができる。このため、今後はさらに装置の小型化と処理の高速化を行う予定である。

参考文献

- 1) 山崎信寿: 足型形状の分析と靴型設計, 靴の医学, **8**, 127/132, (1994)
- 2) 上杉清昭, 猪股雅一: イメージエンコードを用いた3次元曲面形状計測, 電気学会, **1**/10, (1990)
- 3) 河内まき子, 山崎信寿: ベクトル角度法による足型輪郭形状の変異の分析, 人類学雑誌, **98**-1, 91/105, (1990)
- 4) M. Kouchi: Analysis of foot shape variation based on the medial axis of the foot outline, *ERGONOMICS*, **38**-9, 1911/1920, (1995)
- 5) 吉澤徹, 鈴木賢策: 格子パターン投影による三次元形状の自動計測, 精密工学会誌, **53**-3, 66/70, (1987)
- 6) 中澤和夫, 中島真人, 小林寛: ファイバーグレーディングを用いた3次元形状計測システムの開発, 電子通信学会論文誌D, **69**-12, 1929/1935, (1986)
- 7) 寺田春水: モアレ等高線法による人体の立体計測, 医用電子と生体工学, **11**-6, 387/394, (1973)
- 8) 吉見隆, 植芝俊夫, 大島正毅: 複数光源レンジファインダシステム, 日本ロボット学会誌, **9**-7, 803/812, (1991)
- 9) M. Mochimaru and M. Kouchi: Automatic calculation of the medial axis of foot outline and its flexion angles, *ERGONOMICS*, **40**-4, 450/464, (1997)
- 10) 河内まき子, 山崎信寿: 足と靴型のアロメトリー, 人類学雑誌, **100**-1, 101/118, (1992)
- 11) 山崎信寿: 足型形状の3次元特徴分類, 靴の医学, **7**, 3/6, (1993)
- 12) 日本皮革産業連合会: 靴適合性向上研究分科会研究事業報告書, (1994)
- 13) 井口傑, 橋本健史, 宇佐見則夫, 星野達, 平石英一, 山崎信寿, 六馬信之: レザー変位計による足部変形の記録, 靴の医学, **4**, 65/66, (1990)

「著者紹介」

山崎信寿(正会員)

1976年, 慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程修了(工学博士)。同年同大学機械工学科助手。94年教授。現在に至る。身体運動の解析と生活用品の人間工学的快適化研究に従事。日本機械学会, 日本人間工学会などの会員。

佐藤拓史

1994年, 慶應義塾大学大学院理工学研究科生体医学専攻修士課程修了。同年, 東レ株式会社入社, 現在に至る。形態の計測に関する研究に従事。日本人間工学会の会員。

田中大輔

1997年, 慶應義塾大学大学院理工学研究科生体医学専攻修士課程修了。同年, 富士通株式会社入社, 現在に至る。形態の計測に関する研究に従事。日本人間工学会の会員。

中澤和夫(正会員)

1989年, 慶應義塾大学大学院(電気工学)修了。現在, 慶應義塾大学専任講師。ロボットの知的制御のためのセンサ情報処理と行動の発現機構の研究に従事。日本ロボット学会, 日本機械学会, 情報処理学会, IEEE等会員。工学博士。

持丸正明(正会員)

1993年, 慶應義塾大学大学院博士課程修了(工学博士)。同年通産省工業技術院生命工学工業技術研究所入所, 現在に至る。画像情報を利用した身体運動, 形態の計測に関する研究に従事。バイオメカニズム学会, 日本人間工学会などの会員。