

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560151

研究課題名(和文)点群データによる曲面形状の類似度評価と靴型活用への応用

研究課題名(英文)Similarity measures of surfaces of shoe lasts represented by point cloud

研究代表者

福井 幸男 (Fukui, Yukio)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：80311596

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：個人に適合する靴を製作するためには、個人に対応する靴型を使うことになる。靴型形状の設計手法によって足形状から靴型形状が決定されたときに、それに近い靴型を既存の靴型ストックから選択して再利用できればコストが小さくなる。そこで、靴型形状同士を比較して類似度を測る手法が必要になる。一般的な曲面形状とは異なり、靴型の曲面形状はその設計手法から、特徴を表現するいくつかの重要な断面形状があることがわかるので、3Dスキャナーにより点群データとして入手した靴型形状の特定の断面での2次元形状同士を比較することで靴型の機能的な形状を比較することができる手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：In order to manufacture a pair of shoes fitted to individuals, it is necessary to prepare shoe lasts for them. If the manufacturer could find a suitable last among the last stock instead of making one and reuse it, the manufacturing cost and time will reduce remarkably. Therefore I proposed similarity measures of curved surfaces of shoe lasts. The surfaces of shoe lasts are, unlike those of general objects, have some important cross-sectional shapes which are determined by the design process of it from human foot. I utilized these cross-sectional shapes to develop the similarity measures by comparing the corresponding shapes between the two last shapes of point cloud obtained by a 3D scanner.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：形状モデリング 形状類似度 形状比較

### 1. 研究開始当初の背景

生活の質の向上に伴い、身体装着製品の身体への高い適合性への要求が強くなるなかで、コストを抑えることが求められている。そのなかで、体重を支える靴に対する適合性は特に重要で、不適な靴の長期にわたって使用することにより、外反母趾その他の病的な身体状態になりやすく健康にも悪影響を及ぼす可能性が出てくる。これを避けるために個人に適合するオーダーメイドの靴を注文する場合、新たに金型を各個人向けに作るとなると、時間もコストも高くなる。

一方、近年の急速な情報化技術の進歩によって、身体形状を非接触で三次元計測する計測装置(3D スキャナ)の高速化、高精度化、低価格化が進んできた。特に、足形状測定用の3Dスキャナはデパートの靴売り場など店頭で設置されるところも見られるようになってきている。

これらの社会状況と技術環境の下で、個人の足形状を測定したデータに基づいて、個人適合する革靴製品を提供するためのシステム開発が強く望まれている。足形状から、それに適した靴型を設計する技法は、既に確立されており、その一例として「かがみ式」と呼ばれる靴型設計手法がある。コストを抑えるために、個人対応の靴型を毎回設計、製作するのを避けて、既に多くの靴型のストックがある場合、そのストックのなかから、必要な個人にあう靴型を見つけることができれば、製造コストと時間は大幅に短縮されることが期待できる。

### 2. 研究の目的

上に述べた背景のもとで、本研究では、個人対応可能な適合性の高い革靴製品を製造する工程のうち、特に靴型に着目して、設計仕様に合う靴型がストックの中にあるかどうかを見つけるための手法、特に靴型同士の形状比較を定量的に行う手法の開発を目指すことを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、かがみ式靴型製法に準じ、靴型形状を表す点群データから、靴型の特徴を抽出して形状比較を行うこととする。靴型の特徴としては、原型となる足の形状から取り出した靴型の設計情報であり、靴型の特徴的な位置・傾きにおける断面形状の周囲長、幅、高さ等である。

本研究の目標は、靴型ストックの中から個人の足に合う靴型があれば選択するシステムを構築するものであり、その全体の流れを図1にフローチャートで示す。まず既存の靴型と足を3Dスキャンで測定し、3次元の靴型点群・足形状点群として出力する。足形状点群からは、足の解剖学的特徴に起因する特徴断面を求め、その断面形状の曲線長を靴型特徴量の要素として取り出す。靴型点群からは原型となっている足の寸法を逆算し、同様

に断面形状を求める。図2に示すものが特徴断面の1つ(J面)であり、得られた断面形状の点群が図3の靴型特徴断面点群である。実際には、甲部と底部で分割し、それぞれ曲線長を求めたものを靴型特徴量の要素とする。つまり特徴断面点群と特徴量は、足の各特徴部位における横断面でどのように靴型の輪郭を設計すべきか表現したものであり、本研究ではこれらを靴型から抽出・比較することにした。赤枠で囲まれた部分が本研究で報告する範囲である。

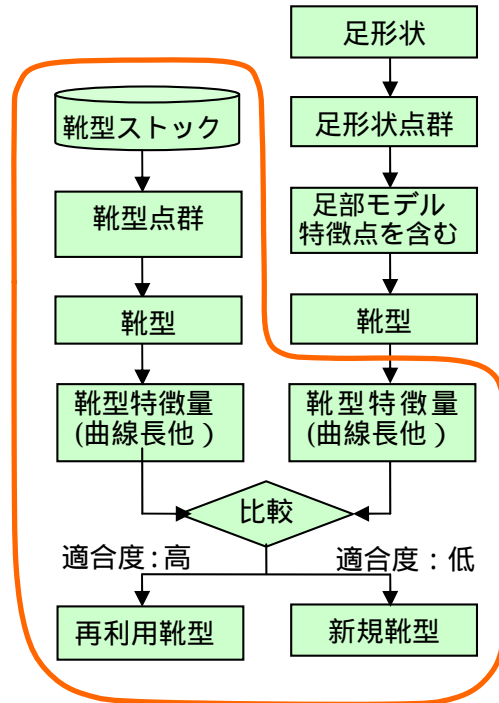


図1 処理の流れ  
赤線枠内が本報告の範囲を示す

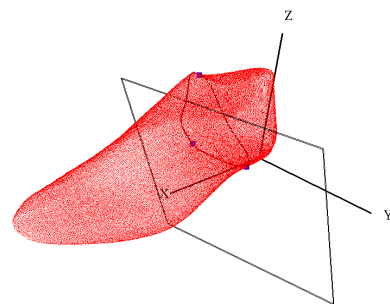


図2 靴型の特徴断面(J面の斜視図)

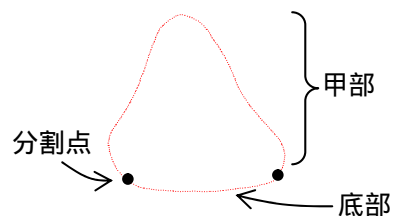


図3 靴型の特徴断面(J面の正面図)

特徴量を用いる利点は、まず他の手法に比べ計測値の指標が多く、形状を詳細に把握できることが挙げられる。またその指標は数値表現化しやすく、計算機上で扱いやすい。そして最大の理由は、この靴型特徴量という設計情報が、かがみ式靴型製法を形成してきた職人の長年の経験に基づき得られた指標だという点である。しかし通常靴型特徴量は足形状の測定値を入力として得られる靴型の設計情報であり、完成した靴型からは、靴型特徴量はおろか、抽出に必要な測定値も既に失われているため、靴型特徴量の比較にはまずその復元が必須となる。

### (1) 靴型からの靴型特徴量の抽出

#### 前処理

抽出すべき情報は、靴型の基準面及び特徴断面形状の点群とその曲線長である。基準面とは爪先から踵までを通る鉛直縦断面であり(図4参照)、特徴断面の位置は主にこの基準面上で決定される平面でこの基準面と交わるいくつかの面で構成される。従って、以降の処理の前提となるので、基準面の抽出は重要である。

ところが、3D スキャンの計測器から得られる靴型点群はあくまで計測器内の座標系に依存しており、靴型の設置の仕方により向きも位置も変化する。従ってその正規化を行い、基準面を統一の定義で揃える必要がある。靴型は計測器内に垂直面では正しく接地されているので、水平面での基準面の設定手法について検討すれば良い。あらかじめ入手済みの靴型点群サンプルとその基準面のデータを用い精度実験を行ったところ、水平面に点群を投影したときの主成分分析による第1主成分方向が基準面の向きとして良いとの結果を得た。そこで、前処理として靴型の踵の最後部を原点上に移動させ、水平面への投影における第1主成分方向を座標軸(XZ軸)と一致するように回転させる。

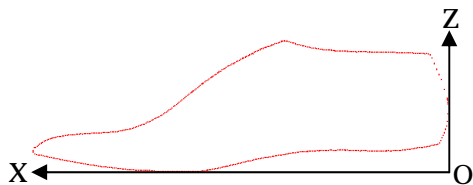


図4 靴型の基準面における断面形状

#### 特徴断面位置の抽出

特徴断面の位置は、図5に示すように基準面上に取る甲部基本点と、底部基本点及び断面の角度によって決定される。まずは図5の基準面においてA点・B点・AVB点を求め、断面点群を分割する。これらの点は、近傍で近似直線を作り、その傾きの変化によって特定する。基本点は甲部も底部も、ある1点からの曲線距離の比によって定められており、

甲部ではつま先のNOB点、底部では踏み付け重心点(OO点)をスタート地点として他の基本点に展開していく。ただし、基本点の内単独で計算できるのは重心点だけで、靴型の親指側・小指側それぞれの側面の最突出点から求められるが、他の基本点への曲線距離の比率は原型となる足の測定値が必要であり、靴型形状から割り出さなければならない。実際には比率計算の定義式に必要な測定値を別個に靴型から求めるか、あるいは既知の測定値を含む定義式を複数連立させ、未知の値を方程式の解として求める。必要な値を得たら、定義式に従い図6に示すような基本点を順次求める。

特徴断面も基本点も数は多くあるが、基本点は各特徴断面の名に甲部ならB、底部ならOを付けて区別している。例としてJ面の甲部基本点はJBと表現している。これらは基準面上における各特徴断面に含まれており、これに先述した断面の角度を考慮して特徴断面を求める。

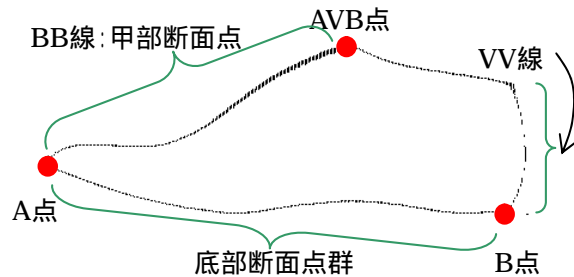


図5 基準面の分割位置

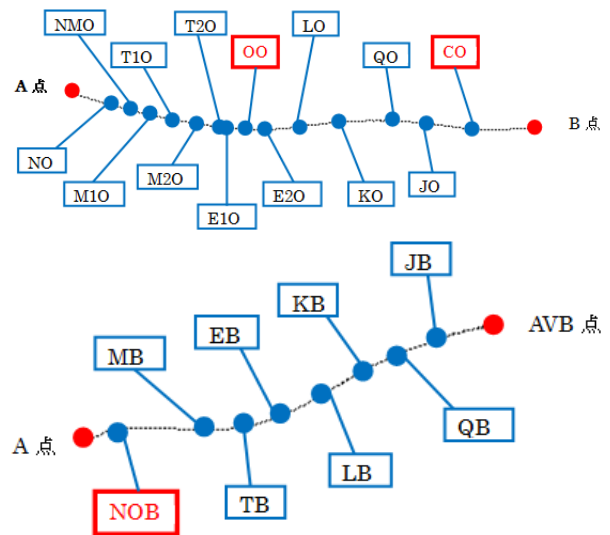


図6 甲部基本点(上)と底部基本点(下)  
図中のアルファベットは、かがみ式の表記に準ずる。甲部はNOB点、底部はOO点を中心とする。底部のM10、M20からM、T10、T20からT、E10、E20からEの特徴断面を作る。

#### 靴型特徴量の算出

特徴断面は、M1やT2といった底部基本点のみ通る面が7つ、EやQといった底部と甲

部両方の基本点を通る面が 8 つ定義される。これらを用い図 2 のような特徴断面を形成し、図 3、図 5、図 6 のように底部と甲部に分割し、特徴断面点群を取得する。それぞれを曲線化したときの曲線長を靴型特徴量の要素とした。

(2) 靴型特徴量の比較と非類似度の算出

靴型形状の比較に関しては、靴型特徴量の比較を中心に、特徴断面点群を利用した手法も候補として検討した。かがみ式靴型設計における最重要情報は特徴断面における輪郭線の曲線長であるが、この値のみで靴型の比較が十分可能なのかを検証するため、曲線長だけでなくその形状点群にも注目した比較手法を検討した。

靴型特徴量抽出の前処理段階で、基準面を座標軸に合わせる座標変換を行っているため、2 つの靴型から取得した同じ特徴断面 (J 面同士、M 面同士など) は取得したそのままの座標で形状比較が可能とする。また、本来特徴断面の輪郭曲線長は図 6 に示したとおり多数存在するが、今回は全てを比較対象とはせず、特に重要な 7 面 (M・T・E・L・K・Q・J) に注目した (図 7 参照)。断面形状は甲部と底部に分割するため、抽出の対象は 7 面×2 となり、1 つの靴型からは 14 の靴型特徴量とする曲線長を得ることができる。以下に、本研究で適用した靴型特徴量の比較手法を述べる。

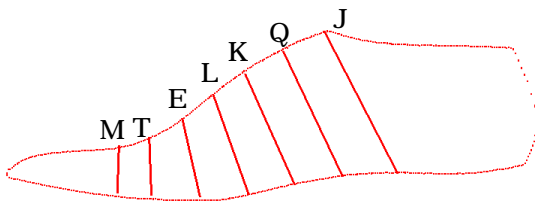


図 7 形状特徴量に導入した特徴断面群  
図中のアルファベットはかがみ式の表記に準ずる

比較手法 1：曲線長ベクトルによる比較

14 の特徴断面における輪郭曲線長を 14 次元のベクトルとして 1 つにまとめたものを特徴量ベクトルとして定義する (図 8)。後述する他 2 法に対し、1 つの靴型に 1 つの表現が与えられるため、最も比較計算が簡単という利点がある。比較では、2 つの特徴量ベクトルのユークリッド距離を非類似度とする (値が高いほど類似性が低い)。

比較手法 2：ずれ面積による比較

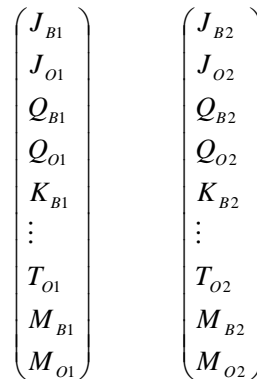
比較する 2 つの靴型の同じ特徴断面で得られた特徴断面点群を重ね合わせる。それぞれ点群を数十の等間隔な点群へ間引き、その点群を結ぶ三角形群を作る。近似的に点群間のずれ面積を三角形分割して算出し (図 9)、全断面におけるその総和を非類似度とする。

比較手法 3：Adamek の形状類似度算出手法を利用して比較

Adamek らの研究では、曲線図形の歪みや非類似度が定式化されている。そこでは移動や回転などの前処理が必要であるが、先述の通り本研究では、前処理は既に済んでいる。Adamek らの非類似度 (Dissimilarity) は次の式で定義される。

$$D(A, B) = c \cdot |d| \cdot \sigma / cir_{\min}^2 \quad (1)$$

(1) 式で、A と B は比較対象の図形であり、左辺の  $D(A, B)$  は非類似度を示す。c は任意の定数であり、右辺の d は曲線間の平均距離である。cir<sub>min</sub> は 2 つの図形の輪郭線の内、短い方の周囲長であり、σ は曲線間の距離の標準偏差を指している。曲線の平均距離は、間引いた点群間での同順の点同士の平均距離としている。



靴型 1 比較 靴型 2

図 8 靴型特徴量ベクトルの表現  
各要素は特徴断面における甲部、または底部の輪郭曲線長である

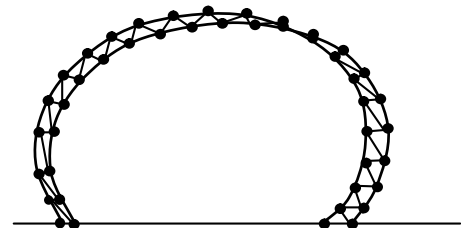
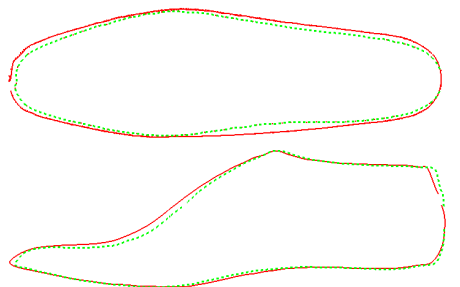


図 9 三角形近似によるずれ面積比較  
2 つの靴型の同一特徴断面を重ね合わせたときの甲部輪郭線の相対位置関係を示す。

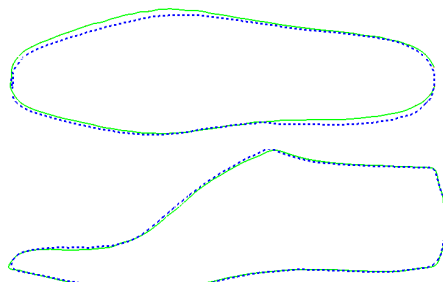
(3) 検証実験と結果の考察

形状比較のために提案した 3 種類の手法を、実際の靴型データを使って検証実験を行った。株式会社アイウェアラボラトリーの足形計測装置 INFOOT によってスキャンされた靴型データを用いた。手元にある靴型点群データの内、全長の近い 3 つの靴型データ A、B、C を使って 3 通りの比較実験を行った。図 10 は A と B、B と C、C と A、それぞれの組み合

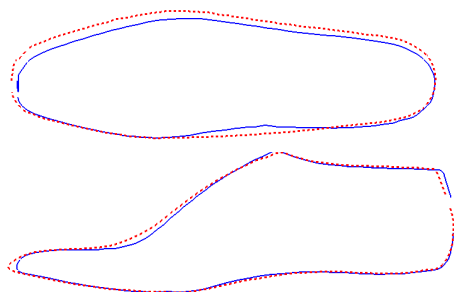
わせにおける上面・側面から見た輪郭の投影図の比較である。わずかの違いではあるが、全長も幅もAがやや大きく、土踏まずの輪郭が特徴的である。これに対し、BとCの組み合わせでは若干Cの幅が小さく見えるが、側面図ではほぼ一致しており、見かけの類似度が高い印象がある。提案手法に従い、特徴断面を抽出して比較した例が図11である。AとBの特徴断面の位置は、靴型全長の差に比べてかなり大きなずれを生じた。これは(1)節でも述べたように特徴断面の位置が基本点を軸に形成されることを考えると、底部の中心00点の取り方、すなわち靴型上面図における親指側・小指側の最突出点の位置の影響を大きく受けていると考えられる。突出部周辺の輪郭は丸く、前処理段階で基準面方向を揃えても、僅かな方向の違いで最突出点が変わる。ここは本研究における課題の1つで、純粋な靴型の形状の差以上に、靴型の方角のずれに影響を受けやすいという不安定な動作をすることがわかった。図12は特徴断面点群を各断面で重ね合わせた比較例で、図10から予測できた通り靴型Aの横幅がやや大きいことをここでも確認することができた。



(a) 靴型Aと靴型Bの比較



(b) 靴型Bと靴型Cの比較



(c) 靴型Cと靴型Aの比較

図10 靴型輪郭の比較(平面図と側面図)

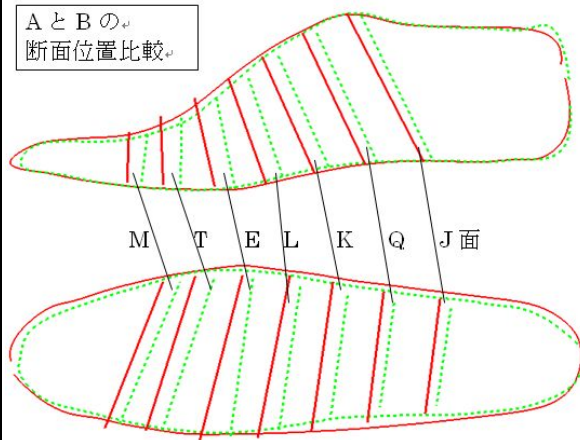


図11 靴型A(実線)と靴型B(点線)の特徴断面のずれ

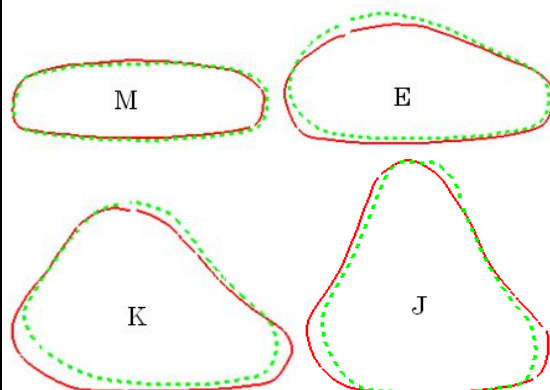


図12 靴型A(実線)と靴型B(点線)の特徴断面点群の比較

(2)節で述べた3つの比較手法を適用し、類似度(正確には非類似度)を算出してまとめたものが表1である。いずれの手法でもBとCの組み合わせが最も数値が小さく非類似度が低く(類似度が高く)、AとBの組み合わせで最も非類似度が高いとの結果を得た。また[9]を参考にボール断面長(EB・E0)に3倍、足首前の断面長(JB・J0)に2倍の重み付けをした結果が表2であるが、ここでは、CとAの組み合わせが最も類似してなくて、BとCの組み合わせが最も類似していることになった。重み付けによっては順位が変わることになり、どのような重み付けを行うのが適切であるか、どの手法が最もフィット感との対応がとれるのか、あるいは、複数の手法の組み合わせにどのような重み付けで行うのが最適な手法となるのか等は、今後さらに多くの靴型データを用いて検証実験を繰り返す必要がある。

#### 4. 研究成果

個人の足に適合する靴を迅速に製作するために、既に保存している靴型のストックを再利用することを想定し、靴型からその原型となっている足の特性ともいえる靴型特徴量を抽出し比較する手法を提案した。靴型は

一定の設計手法に従って製作されるが、その目的を達成したあとは設計時の詳細なデータは保存されていない場合が多い。したがって、3D スキャナで取得された靴型形状から設計手法に基づいて設計パラメータを抽出し特徴量ベクトルにまとめることで、靴型の特性を記述できる手法を提案した。また、靴型同士の特性の差を求めることで定量的に比較する手法を提案した。これらの手法を用いることで、特定の足の 3D データから得られた靴型設計情報と比較することで、特定の足形状に適合する靴型により近い靴型を直ちに見つけることができ、保存された多くの靴型を再利用する手段を複数提案できた。今後は、靴型設計の専門家の意見と多くの靴型データを元に、提案した複数手法の最適な重み付け組み合わせを統計的に調査していく必要がある。

## 5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計2件)

野澤和正、高橋瑛逸、福井幸男、三谷純、金森由博：靴型形状特徴量の抽出と類似度の算出、情報処理学会グラフィックスと CAD 研究会、平成 23 年 11 月 17 日、筑波大学、つくば市

Kazumasa Nozawa, Yoitsu Takahashi, Yukio Fukui, Jun Mitani, and Yoshihiro Kanamori: Development of similarity measures by extracting design features of a shoe last, Applied Human Factors and Ergonomics International Conference (AHFE2012), in San Fransisco, U.S.A., July 25th, 2012

## 6 . 研究組織

(1)研究代表者

福井 幸男 ( FUKUI YUKIO )

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：80311596