

靴型形状特徴量の抽出と類似度の算出

野澤和正^{†1} 高橋瑛逸^{†2}
福井幸男^{†1} 三谷 純^{†1}
金森由博^{†1}

本稿では、個人に適合する靴型を既存の靴型ストックから選択して再利用するために、まず靴型の特性を調べる必要があることから、靴型の特徴量を抽出する手法を提案する。2D スキャナで測定された靴型形状から、靴型設計手法に則り靴型特徴量を抽出し、それらの特徴量ベクトルとして、2つの靴型の形状特徴を比較する手法を開発した。また、一対の靴型形状を比較し、形状特徴の差を数量化して類似度を算出する手法を開発した。これらの比較手法を実際の靴型形状に適用し、直観的な比較と一致する結果を得た。

Extraction of design features from a shoe-last shape and construction of similarity measure using them

Kazumasa Nozawa,[†] Yoitsu Takahashi[†]
Yukio Fukui,[†] Jun Mitani[†]
and Yoshihiro Kanamori[†]

This paper proposes a step to reuse a shoe-last of unknown property for manufacturing a shoe fitting to the individual person. For this purpose we developed a method to extract the design feature from a shoe-last shape and dissimilarity measures between two shoe-last shapes taking. Through numerical experiments we found the measures are fairly good compared with human visual inspection.

^{†1} 筑波大学

^{†2} 楽天 rakuten Inc.

1. はじめに

近年生活の質が向上するにつれて、身体装着製品の高適合性への要望は健康志向意識の高まりと共に強くなっている。特に全体重を支える靴に対して適合性は重要で、不適合な靴の長期にわたる使用は、身体にも障害をひき起こす可能性が考えられる。そこで個人に適合するオーダーメイドの靴を注文する場合は、特定の足に適合する金型の設計から始めることになり、この設計工程を自動化しようとする試みがあるが[1]、まだ研究段階である。実用化されたとしても、新たに金型を各個人向けに作る場合は時間もかかりコストも高くなる。一方、既存の靴型の様々なバリエーションの中から、最も適合性の高い靴型を選択することで靴を製作する場合は、コストも安くなると考えられる。しかしながら、この場合はどの靴型が適合するのかの対応付けが現状では困難である。そもそも、類似した靴型の形状比較の一般的な手法が確立されていない。靴型形状の比較は単なる形状比較の問題ではなく、適合性を靴型に反映させた設計情報を基準に形状比較を行う必要がある。そこで、本稿ではかがみ式設計方式[10]による設計情報に基づく靴型形状の比較手法を新たに提案する。

2. 関連研究

身体への適合性を考慮する形状比較に関しては、J. Niu らは形状分析と比較のための手法について、基本的に3種類に分類している[2]。一方から他の形状へ変形させたときの変形量を知る方法、2つの形状を重ね合わせて調べる方法、2つの形状間の直線距離を求める方法である。しかしこれらは身体の解剖学的特徴点を基準としているが、曲率などの形状特徴が正しく保たれないことや、解剖学的特徴点を見つけることが困難な場合があり、本研究で応用することが困難である。

個別の足形状に適合する靴型に関する研究として、Mochimaru らは様々な靴型のタイプ分けを行うために、標準靴型を Free Form Deformation (FFD) 手法[3]で変形させて分類することで形の変化を数値化した[4]。この手法を応用して足形状の解剖学的特徴点を求めるために、既知の解剖学的特徴点を含む足形状を目的の足形状に一致させるように変形させることで逆に解剖学的特徴点を求める研究も行われた[5][6]。FFD 手法による変形は有効でも形状比較の定量化に直接に適用するのは困難である。

一方、靴型単体の設計に関して、Luximon らは従来の職人による加工工程をコンピュータ化するために CAD ソフト上で靴型設計ができるソフトウェアを開発した[7]。このソフトウェアは靴型設計のみであり形状比較に関しては、機能は記述されていない。形状比較に関して Adamek らは、平面図形同士の比較をするために輪郭線に注目し、大まかに重なるように輪郭線同士を重ね合わせて輪郭線間の平均距離を求めて指

標化した[8]. これは輪郭線上に点群を生成し相互に近い点群間の距離を求めて、それらの平均距離や標準偏差を求めて曲線間の「距離」を表現することで、非類似度 (Dissimilarity Measure) の指標を定義して、形状比較をしている. 非類似度の指標の構成方法が本研究に参考になると思われる. また, R. Grimmer らは足の 3 次元形状の比較と分類を行った[9]. 足形状を 3D スキャナで取り込み, その点群で構成される足形状の部分毎の体積の差の総和で類似度の基本的な尺度としている. 2mm 間隔の 3 次元格子に空間を分割し, さらに座標軸に沿った複数の 2 次元投影面に投影したときの形状で囲まれた格子の重なり具合の総和で調べている. また, 別の手法は足の形状特徴をとらえて比較することも行っている. 足長, 足幅, 周囲長, 踵幅等 19 項目の 1 次元の寸法値を 4 段階の重みづけ対象に区分して 19 次元ベクトルを構成し, そのユークリッド距離を比較することで類似度を提案している. 本研究では, 上記の Adamek らの非類似度の指標の考え方を取り入れ, また Grimmer らの第 2 の足形状の特徴的な寸法を重みづけして特徴量ベクトルを構成する考え方を取り入れることにした. しかしながら, 足形状と異なり靴型形状は特徴量が形態上明確でないために, 特徴量を抽出することから始めなければならず設計上の逆問題となる. これに関する文献は調査した範囲では見当たらない.

3. 提案手法

本研究では, かがみ式靴型製法[10]に準じ, 靴型点群から靴型特徴量を抽出して形状比較を行う. 靴型特徴量とは, 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, 靴型の横断面形状の曲線長を指す. 詳細は後述する.

研究の最終的な目標は, 靴型ストックの中から個人の足に合う型を選択するシステムを構築するものであり, その作業工程を図 1 にチャートで示す. 赤枠で囲まれた部分が本研究で扱うところである. まず靴型と足を 3D スキャンで測定し, 3 次元の靴型点群・足点群として出力する. 足点群からは, 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抽出・比較する.

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作っ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. この逆問題の解決は, 比較の項目と並び本研究の重要問題である.

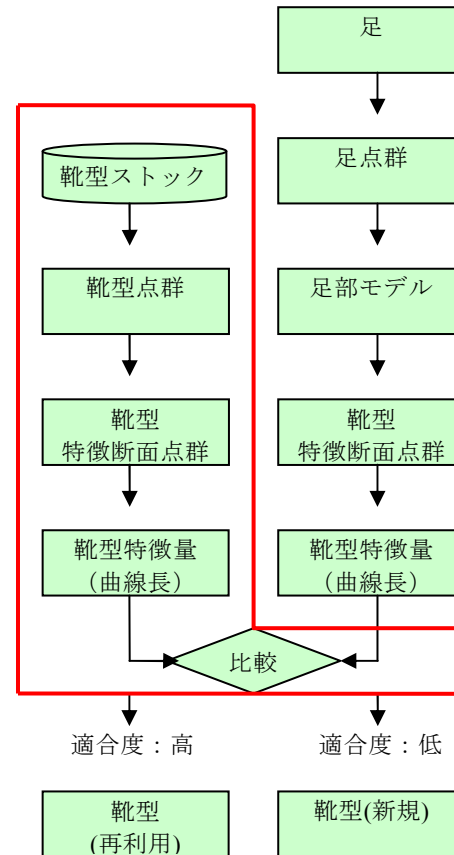


図 1: 靴型選択システム全体のチャート

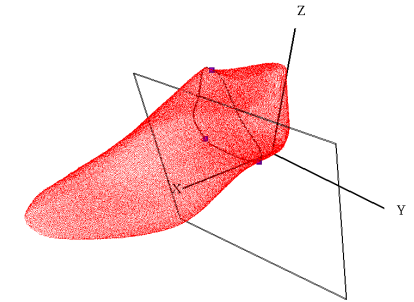


図 1: 靴型特徴断面 (J 面)

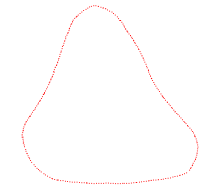


図 2: 靴型特徴断面点群 (J 面)

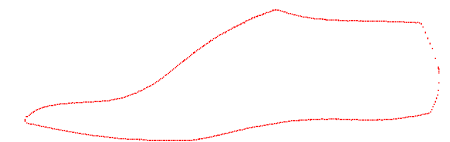


図 4: 靴型の基準面

3.1 靴型特徴量の抽出

3.1.1 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縦断面であり(図4)、特徴断面の位置は主にこの基準面上に決定される。従って基準面の取得は重要である。

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。

靴型は機器内に垂直面では正しく接地されている前提で、水平面での基準面の設定手法について検討し、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。

3.1.2 断面位置の取得

特徴断面の位置は、基準面上に取る甲部基本点と底部基本点(図6)及び断面の角度によって決定される。

まずは図5のように基準面において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OO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々あるが、基本点は各特徴断面の名に甲部ならB、底部なら0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の通過位置を示しており、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。

3.1.3 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

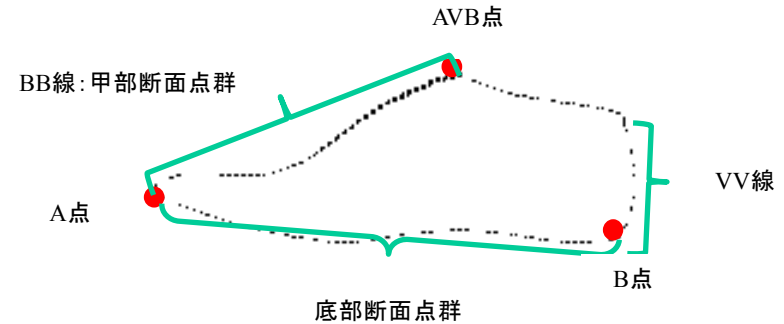


図5：基準面の分割位置

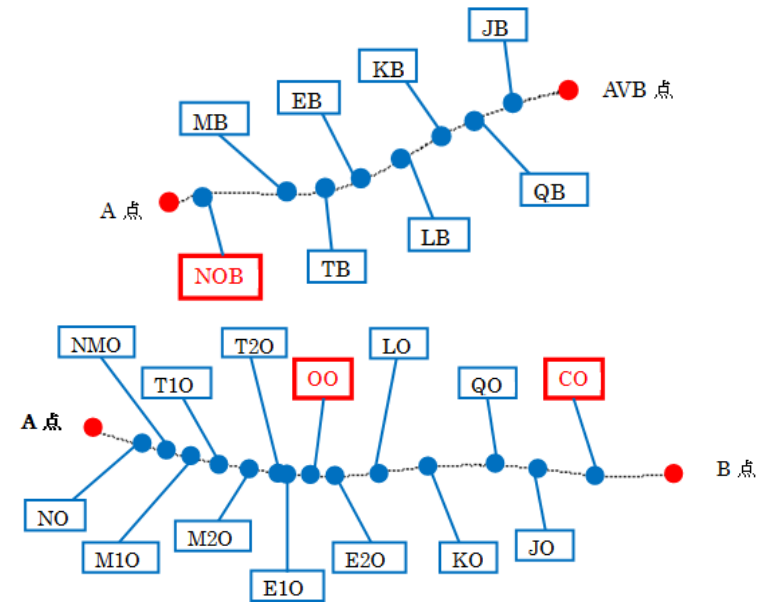


図6上：甲部基本点 下：底部基本点

図中のアルファベット表記は、かがみ式の表記に準ずる。甲部はNOB点、底部はOO点が中心となる底部では、M1O,M2OからM、T1O,T2OからT、E1O,E2OからEの特徴断面を作る

形成し、図3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が靴型特徴量である。

3.2 特徴量の比較と非類似度の算出

靴型形状の比較は、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靴型特徴量、すなわち曲線長であるが、この値のみで靴型の比較が十分可能なかを検証するため、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模索した。

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、本来靴型特徴量は図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せず、特に重要な7面(M・T・E・L・K・Q・J)に注目する(図7)。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。

- 比較手法1：特徴量ベクトルによる比較

14の靴型特徴量を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)。具体的には、ベクトル間の同成分の差の二乗を取り、その総和の平方根を非類似度とする。

- 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へ間引き、その点を結ぶ三角形を作る。近似的に特徴断面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の論文[8]において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既に済んでいる。

非類似度(Dissimilarity)は

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

AとBは比較対象の図形であり、左辺のD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_{min}は2つの図形の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。

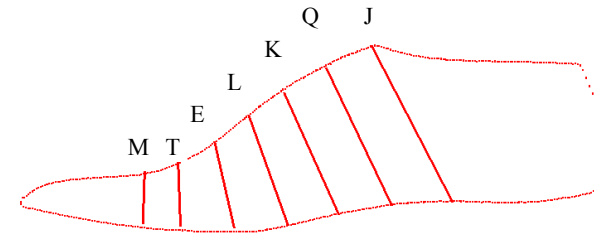


図7：今回注目する特徴断面群

図中のアルファベット表記は、かがみ式の表記に準ずる。

$$\begin{pmatrix} J_{B1} \\ J_{O1} \\ Q_{B1} \\ Q_{O1} \\ K_{B1} \\ \vdots \\ T_{O1} \\ M_{B1} \\ M_{O1} \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} J_{B2} \\ J_{O2} \\ Q_{B2} \\ Q_{O2} \\ K_{B2} \\ \vdots \\ T_{O2} \\ M_{B2} \\ M_{O2} \end{pmatrix}$$

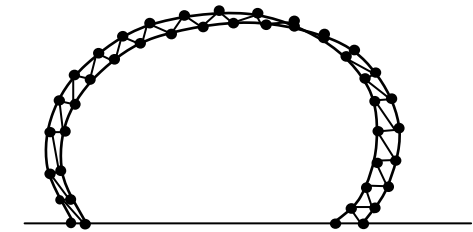


図9：ずれ面積を三角形の集合で近似

図8：特徴量ベクトルの比較
 同成分の差の二乗和の平方根を取る

4. 実験と考察

本研究では、株式会社アイウェアラボラトリーの足形計測装置 INFOOT[11]によってスキャンされたデータを用いている。手元にある靴型点群サンプルの内、全長の近い3つのサンプル A・B・C について3通りの比較実験を行った。図 11 は AB・BC・CA 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。少しの違いではあるが、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を受けた。

実際に提案手法に従い、特徴断面を取得して比較した例が図 12 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 3.1.2 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 OO 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差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、靴型の方向のずれに影響を受けやすいという不安定な動作の問題が鮮明になった。図 13 は特徴断面点群を各断面で重ね合わせた比較例で、図 11 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。

3.2 節で述べた 3 つの比較手法を適用し、類似度（厳密には非類似度）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・EO）に3倍、足首前の断面長（JB・JO）に2倍の重み付けをした結果が表 2 であるが、ここでも大小が覆らずに B と C の組み合わせが最も類似しているとの結果を得た。どの比較手法を用いても同一の結果が得られ、図 11 に見られる外見上の形状比較と一致した。長さ情報のみの靴型特徴量による比較でも、他の2つの手法と同様の結果が得られることが分かったが、更にどれがより良い手法であるかについての検討は今後の研究課題である。

表 1：重み付けなしの非類似度

	A&B	B&C	C&A
特徴量	32.1	20.7	25.6
ずれ面積	2934	2192	2710
Adamek	8.4	5.3	8

表 2：重み付けありの非類似度

	A&B	B&C	C&A
特徴量	33.2	23.6	27.2
ずれ面積	4313	3297	3806
Adamek	10.4	7.64	11

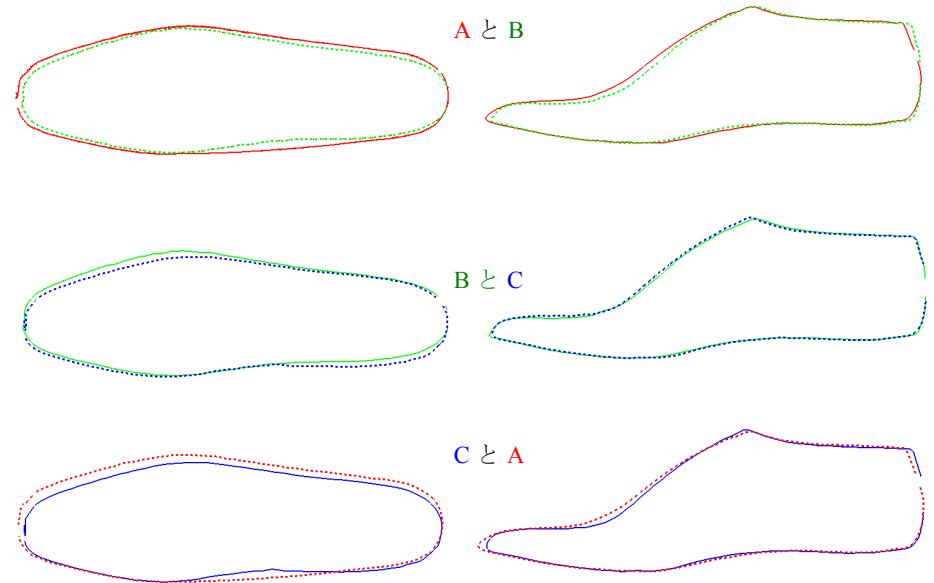


図 11：2つの靴型の輪郭を上面から投影した図（左）と側面から投影した図（右）

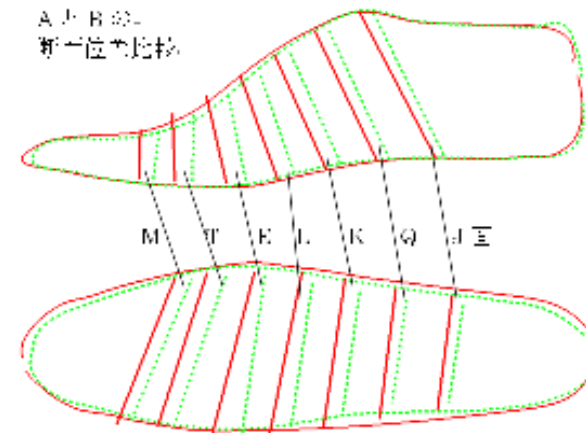


図 12：A（実線）と B（点線）の特徴断面のずれを側面と上面から見た図

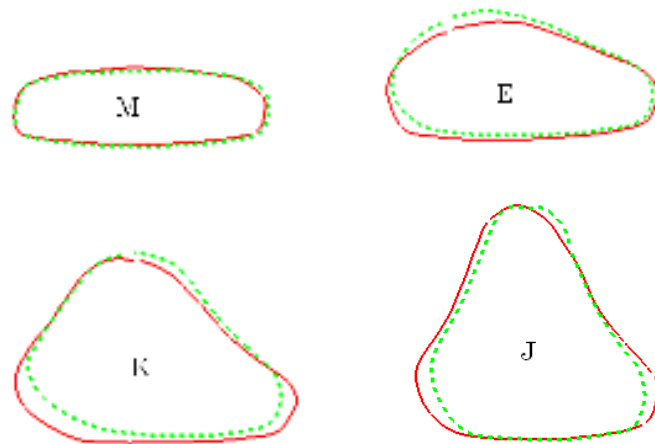


図 13 : A (実線) と B (点線) の特徴断面点群を比較

5. おわりに

本稿では、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、靴型同士の特性を定量的に比較する手法を提案した。こ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与えることになった。今後は、靴型設計の専門家の意見を基に、実用化に向けてさらに手法の精緻化、高度化を図りたい。

参考文献

- [1] 福嶋茂信、持丸正明、河内まき子：かがみ式靴型設計の自動化の検討、産業技術総合研究所、デジタルヒューマン基盤技術平成 14 年度成果報告書、pp.47-52、2003
- [2] J. Niu, Z. Li, G. Salvendy : Mathematical Methods for Shape Analysis and Form Comparison in 3D Anthropometry: A Literature Review, Digital Human Modeling, HCI2007, LNCS 4561, pp. 161-170, Springer-Verlag, 2007
- [3] Thomas W. Sederberg, Scott R. Parry : Free-Form Deformation of Solid Geometric Models, Proc. ACM SIGGRAPH 86, pp.151-160, 1986
- [4] M. Mochimaru, M. Kouchi, M. Doh : Analysis of 3D human foot forms using the FFD method and its application in grading shoe last, Ergonomics, vol.43, no.9, pp.1301-1313, 2000
- [5] M. Mochimaru, M. Kouchi, H. Yahara, Y. Fukui : Automatic Landmarking based on 3-D Foot Database using FFD Method, Digital Human Modeling for Design and Engineering, Society of Automobile Engineers, pp.2004-01-2197, 2004
- [6] 矢原弘樹, 日隈直紀, 福井幸男, 西原清一, 持丸正明, 河内まき子, "FFD を用いた 3 次元足部モデルの解剖学的特徴点抽出," 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J87-D2 No.4, pp.967-977, Apr. 2004.
- [7] A. Luximon, Y. Luximon : Shoe-last design innovation for better shoe fitting, Computers in Industry, 60, pp. 621-628, Elsevier, 2009
- [8] T. Adamek, N. O'Connor : Efficient Contour-based Shape Representation and Matching, Proc. 5th ACM SIGMM international workshop on Multimedia information retrieval (MIR '03), pp. 138 - 143, 2003
- [9] R. Grimmer, B. Eskofier, H. Schlarb, J. Hornegger : Comparison and classification of 3D objects surface point clouds on the example of feet, Machine Vision and Applications, 22, 235-243, 2011
- [10] (株)かがみ, "平成 11 年度東京と皮革技術委託研究報告足にあった履きやすい革靴の製作とその検証について", かわとはきもの 112 号, 東京都立皮革技術センター台東支所, 2000
- [11] アイウェアラボラトリー株式会社, <http://www.i-ware.co.jp/>