

古代ローマ彫像の3次元形状解析による考古学調査

比留間英¹ 藤原研人¹ 鎌倉真音¹ 高松淳² 芳賀京子³ 池内克史¹

¹東京大学 ²奈良先端科学技術大学院大学 ³東北大学

実物体の3次元デジタルアーカイブ技術を用いて取得した、古代ローマ期の彫像「ペプロフォロイ」の3次元デジタルデータを用いた形状解析をおこない、制作背景を考察した。3次元デジタルデータは自由に形状の加工（任意箇所での切断、重ね合わせ）することができ、その特徴を利用することで容易に形状を比較することができる。本論文では、剛体位置合わせ・FFD法による変形位置合わせを用いて形状差異を視覚化し客観的評価をおこなうことで、諸説の裏付け、もしくは新たな知見を提供する可能性があることを示した。

Archeological Survey of the Ancient Roman Statue Using 3D Shape Analysis

Hideru Hiruma¹, Kent Fujiwara¹, Mawo Kamakura¹, Jun Takamatsu², Kyoko Sengoku-Haga³ and Katsushi Ikeuchi¹

¹The University of Tokyo ²Nara Institute of Science and Technology ³Tohoku University

This paper analyzes the 3D digital data of the ancient Roman sculpture *Peplophoroi*, which is obtained using digital archiving techniques, and examines the hypothesis concerning the possibility of mass-manufacturing of the sculptures. 3D digital data can be freely manipulated. These manipulations include cutting on any cross-sections, aligning and superimposing. This property enables us to understand the difference of 3D shapes. In this paper, we visualize the differences by superimposing the result of alignment with rigid transformation or with deformation. We show that the subjective evaluation of visualization results can provide us with proof to existing hypotheses or with discovery of a novel hypothesis.

1. はじめに

1.1 背景

実物体の3次元デジタルアーカイブ化技術を用いて有形文化財・文化資源をデジタルデータとして詳細に記録することは、文化財保存・保護、修復に有用である。デジタル保存されたデータは文化資源の価値そのものを包含し、半永久的なものとして蓄積できるだけでなく、これらデジタルデータの様々な利活用はあらゆる学問分野への展開が期待できる。

デジタルデータの特長として、仮想的な複製・加工が容易であるため、実物に直接影響を与えることなく、考古学や美術史などの様々な分野への調査研究に応用することができる。

1.2 目的

古代ローマでは紀元前1世紀以降、私邸を華やかに装飾することが流行し、特に、数体の像を併置することが好まれた。そのため彫像群の需要は急増し、それに応えるべく彫刻家の工房内では、さまざまな局面で、作品制作の省力

化・効率化がはかられたと推測される。そうした中、紀元前1世紀前半の彫刻家パシテレスが「原型はブロンズ彫刻、大理石彫刻、貴金属細工の母である」と述べたように（プリニウス『博物誌』35, 156）、鋳造などのもととなる原型は、非常に大切なものとみなされていた。

イタリア、ナポリ国立考古学博物館に所蔵されている、エルコラーノ遺跡「パピルス別荘」で出土した5体のブロンズ製の《ペプロフォロイ *Peplophoroi*》（図1）は、群像として単調にならないよう、1体ずつ髪型や衣やポーズに変化を持たせてある。だが、上述したような当時の状況からして、足などの副次的な部分においては原型をつかいまわしていた可能性もあるのではないか。もしもいくつかの足の形が3次元形状的に一致する、あるいは非常に近いことが確認できれば、型を使いまわすことで制作効率をあげていたと結論することができるだろう。

本論文では、実物体の3次元デジタルアーカイブ技術[1]を用いて取得した3次元デジタルモデルを用いて、形状解析を行う。その結果から、これら古代ローマ期彫像に関する考古学的制作背景を考察する。

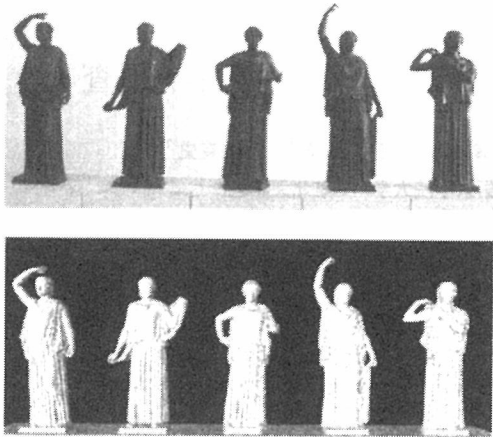


図1：ペプロフォロイ像。上：実物写真，下：デジタル化されたデータ。

2. 3次元デジタルアーカイブ技術

3次元デジタルアーカイブは、物体の表面形状を高い精度で計測し、デジタルデータとして保存することが可能であるレーザレンジセンサ（図2）を用いて行う。レーザレンジセンサを用いた物体の形状取得は、データ取得、位置合わせ、統合の3つの処理を行うことで成り立っている。本章では、この3つの処理について述べる。

2.1 データ取得（スキヤニング）

レーザレンジセンサを用いて物体全体を複数回にわたって計測する。[2]通常、レーザレンジセンサの計測範囲は、可視領域に限られ、1回の計測では物体の部分的な形状しか得ることができない。このため、物体全体の形状を取得するには、異なる位置、異なる方向から複数回の計測を行う必要があり、得られた複数の部分的3次元モデルを処理して物体の3次元モデルを生成する。

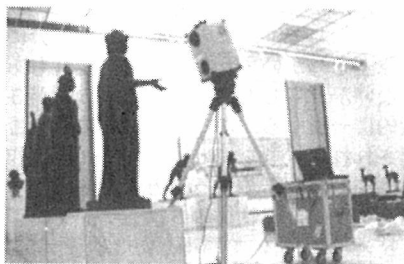


図2：レーザレンジセンサによる計測作業

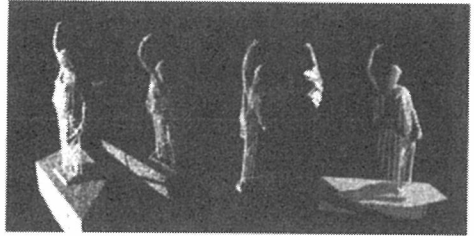


図3：取得データ

2.2 位置合わせ（アラインメント）

取得した部分モデルの相対的位置姿勢を求める位置合わせ処理を行う。レーザレンジセンサによって得られた複数の部分モデルは、計測された位置と姿勢によってそれぞれ異なった座標系で記述されている。そのため、すべての部分モデルの相対位置を同時に推定する手法を用いてこれらの座標系を統一する必要がある。[3]

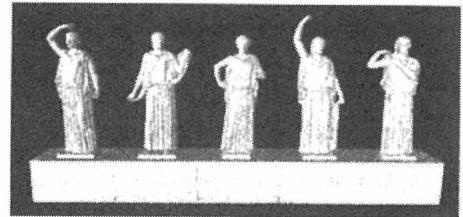


図4：位置合わせ処理したデータ

2.3 統合（マージング）

位置合わせされた複数の部分モデルを統合して、1つのメッシュモデルを生成する。複数の部分モデル間に重なり領域があるため、この領域を統合して1つのモデルに変換する必要がある（図1下）。

3. 3次元形状解析

本論文が問題とする推察に関する考察のためには、物体の形状比較が必要不可欠となる。本論文では剛体変換（並進+回転）、剛体変換+変形の2つの位置合わせ手法を用いて、形状差異の解析をおこなう。

3.1 剛体位置合わせによる形状比較

2つのデータを並進・回転によりできるだけ一致させ、その結果を3次元的に描画することにより形状の差を視覚化し、主観的判断をおこなう。剛体位置合わせは、以下のような手順でおこなわれる：

1. 大雑把に2つのデータを位置合わせする
2. あるデータの頂点に対し、もうひとつの

- データの対応する頂点を類推する
3. 対応する頂点間の距離を最小化する
 4. 収束するまで2. と3.を繰り返す

本論文では、項目1の大雑把な位置合わせは手動でおこない、項目2の対応する頂点として最近傍点[4]を利用した。

また、項目3の距離尺度として点-面距離[5]を利用した。つまり、式(1)を最小化することにより、位置合わせがおこなわれることになる。

$$E = \sum_c \|\mathbf{n}_c \cdot (\mathbf{R}\mathbf{x}_c + \mathbf{t} - \mathbf{y}_c)\|^2 \quad (1)$$

ただし、 \mathbf{x}_c はあるデータ上の点、 \mathbf{y}_c はその対応点、 \mathbf{n}_c は対応点における法線ベクトル、 \mathbf{R}, \mathbf{t} はそれぞれ回転を表す行列、並進を表すベクトルである。

回転は微小であると仮定することで、式(1)を線形化し最小2乗法により最小化をおこなう。線形化した式は以下のように表わされる。

$$E = \sum_c \|(\mathbf{x}_c \times \mathbf{n}_c) \cdot \mathbf{r} + \mathbf{n}_c \cdot \mathbf{t} - \mathbf{y}_c\|^2$$

ただし \mathbf{r} は回転軸の向きと大きさを同時に表すベクトルである。

3.2 FFD法による形状解析

3.1節と異なり、並進・回転に加え、B-Spline基底関数を用いたFFD法[6]による変形も考慮して位置合わせをおこない、二つの形状の差異の抽出する。変形を考える理由として、型の劣化や castingの際の変形、casting後の修復などにより、必ずしも同じ形状でない可能性があるためである。

FFD法概要

FFD法[6]とは、物体の周囲に格子点を定義し、その格子点の移動にあわせて対象形状を滑らかに変形させる方法である。以下に詳細を示す。

変形させたい物体を直方体で囲み、縦、横、奥行き方向に等間隔に l, m, n 個の格子に分割し、 $(l+1)(m+1)(n+1)$ 個の初期格子点 \mathbf{P}_{ijk} を得る。ただし、 i, j, k はそれぞれ縦、横、奥行きの方向の分割位置を表し、

$$i \in \{0, \dots, l\}, j \in \{0, \dots, m\}, k \in \{0, \dots, n\}$$

である。

形状データ上の点 \mathbf{X} の変形後の位置 \mathbf{X}_d は、格子点 \mathbf{P}_{ijk} に従い以下の式により決定される。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_d &= \mathbf{f}(\mathbf{x}) \\ &= \sum_{i=0}^l B_i^l(s) \left(\sum_{j=0}^m B_j^m(t) \left(\sum_{k=0}^n B_k^n(u) \mathbf{P}_{ijk} \right) \right) \\ &= \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n c_{ijk}(\mathbf{x}) \mathbf{P}_{ijk} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 $c_{ijk}(\mathbf{x}) = B_i^l(s) B_j^m(t) B_k^n(u)$ を満たす。

(s, t, u) は変換前の点 \mathbf{X} のFFD座標系での位置を表し、

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + s\mathbf{S} + t\mathbf{T} + u\mathbf{U}$$

で計算される。ただし \mathbf{X}_0 は変形前の格子点

\mathbf{P}_{000} の位置に等しく、 $\mathbf{S}, \mathbf{T}, \mathbf{U}$ はそれぞれその頂点から縦、横、奥行き方向に伸びる直方体の辺を表す。

$B_i^l(s)$ はB-Spline基底関数であり、以下の式で表わされる。

$$\begin{aligned} B_i^l(s) &= N_{i,l}(s) \\ &= \frac{(s - x_i) N_{i,r-1}(s)}{x_{i+r-1} - x_i} + \frac{(x_{i+r} - s) N_{i+1,r-1}(s)}{x_{i+r} - x_{i+1}} \end{aligned}$$

$$N_{i,l}(s) = \begin{cases} 1 & (x_i \leq s \leq x_{i+1}) \\ 0 & (\text{上記以外}) \end{cases}$$

ノット列 x_i は等間隔に配置し、また初期格子点

\mathbf{P}_{ijk} は式(2)が恒等変換になるように配置する。

FFD法による位置合わせ

今、比較する2つの形状A, B(ただしBのみ変形するものとする)の点群データの対応関係は既知であると仮定する。つまり形状A上のある1点 \mathbf{r}_c が形状B上の点 \mathbf{q}_c に対応するとする。このとき、変形位置合わせの一致度は式(3)で計算される。

$$E = \sum_c \|\mathbf{f}(\mathbf{q}_c) - \mathbf{r}_c\|^2 \quad (3)$$

つまり式(3)を最小化することにより、変形位置合わせを行うことができる。

式(2)と(3)より、最小化において格子点の x, y, z 座標を個別に考えても良いことがわかる。 x 座標の場合を例に挙げて説明する。

式(3)が最小になるとき、すべての i, j, k において $P_{x,ijk}$ (\mathbf{P}_{ijk} の x 座標)の微分は0でなければならない。つまり、以下の式を満たす必要がある。

$$\frac{\partial E}{\partial P_{x,ijk}} = 2 \sum_c (\mathbf{f}(\mathbf{q}_c) - \mathbf{r}_c) \cdot \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{q}_c)}{\partial P_{x,ijk}} = 0 \quad (4)$$

また、定義より以下の式が成り立つ。

$$\frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{q}_c)}{\partial P_{x,ijk}} = (c_{ijk}(\mathbf{v}_c), 0, 0)^T$$

(5)

ただし \mathbf{v}_c は点 \mathbf{q}_c の FFD 座標系での位置を表す。

式(5)を式(4)に代入することにより、以下に示す線型方程式が得られる。

$$\mathbf{A} \mathbf{P}_x = \mathbf{b}_x$$

ただし、

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{111}^{111} & a_{112}^{111} & \cdots & a_{lmn}^{111} \\ a_{111}^{112} & a_{112}^{112} & \cdots & a_{lmn}^{112} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{111}^{lmn} & a_{112}^{lmn} & \cdots & a_{lmn}^{lmn} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{P}_x = (p_{x,111}, p_{x,112}, \dots, p_{x,lmn})^T$$

$$\mathbf{b}_x = (b_{x,111}, b_{x,112}, \dots, b_{x,lmn})^T$$

$$a_{ijk}^{JK} = \sum_c c_{ijk}(\mathbf{a}_c) c_{JK}(\mathbf{a}_c)$$

$$b_{x,ijk} = \sum_c c_{ijk,r}(\mathbf{a}_c) r_{x,c}$$

この線型方程式を解くことにより、対応点間の距離の2乗和が最小となるような変形をおこなうことができる。剛体位置合わせと同様に対応点探索と最小化を繰り返すことにより位置合わせをおこなう。

局所位置合わせを用いた対応点探索

剛体位置合わせと異なり、変形位置合わせ、特に繰り返し演算の初期段階において最近傍点探索が対応点探索として適当でないことが示されている[7]。対応点探索の高速性と頑健性の兼ね合いを考え、局所的な位置合わせを用いた対応点探索法[8]では変形形状を分割し、部分ごとに位置合わせをおこなう。全体としての誤差が小さくなるまで分割・位置合わせを繰り返し、最後に分割して位置合わせをした結果に一致するように、分割前の変形形状を FFD 法により変形する(図5)。その後、最近傍点探索を用いた変形位置合わせをおこなう(図6)。

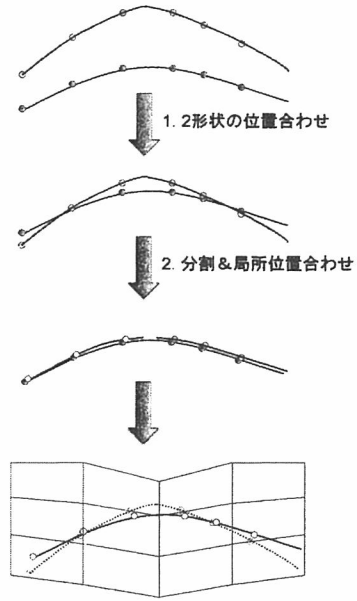


図5：局所的な位置合わせを用いた FFD 法

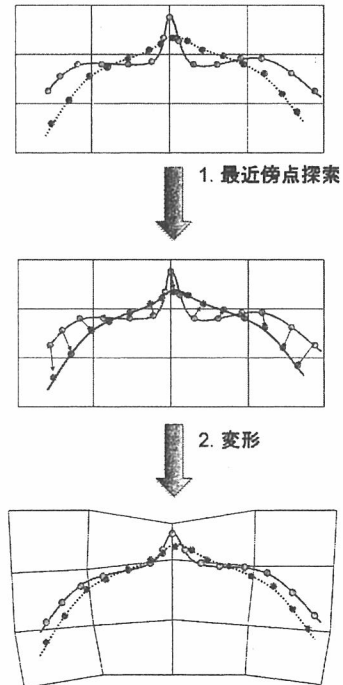


図6：最近傍点探索型 FFD 法

4. 解析結果

レーザーレンジセンサを用いて取得した3次元データを用いて、「ペプロフォロイ」の足を総当りで形状比較を行った。

4.1 剛体位置合わせによる比較結果

視覚的形狀比較の結果を図7に示す。重ね合わせにより形状の差異が視覚的に強調されている。さらに、2つのデータについて比較データ（図7右）が基準データ（図7左）より凸である領域を赤色、凹である領域を青色、類似領域を白色で示している（図8）。図9、10に「ペプロフォロス」の5体の中で特に類似度の高い組み合わせを示す。

なお、5体の総当りすべての形状比較結果を図12、13に示す。

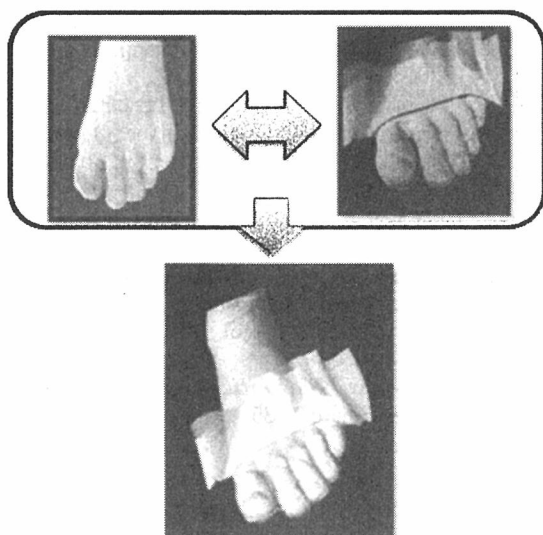


図7：視覚的重ね合わせ形状比較結果

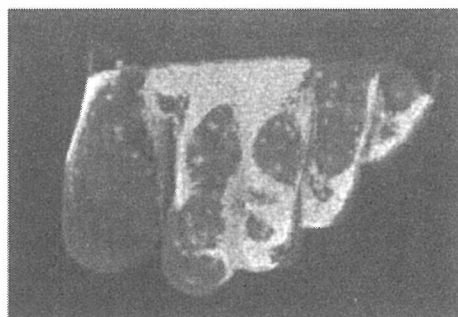


図8：形状類似の可視化結果



図9：「ペプロフォロイ」の中の類似度の高い組み合わせ1

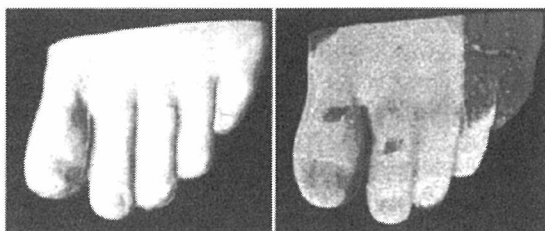


図10：「ペプロフォロイ」の中の類似度の高い組み合わせ2

4.2 FFD法による比較結果

FFD法を用いた形状比較解析の結果を図11に示す。赤色、青色で示された領域に注目することで、形状類似度が極めて低い領域のみを抽出していることがわかる。

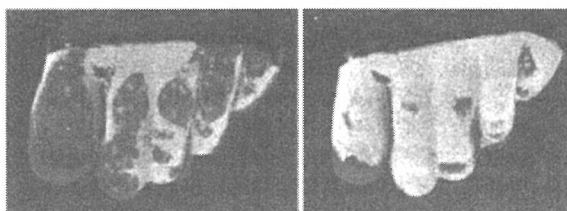


図11：剛体合わせによる比較（左）とFFD法による比較（右）

5. 考察

これまで古代ローマにおける彫刻工房を研究する考古学者たちは、彫像制作に原型が用いられたことを想定しながらも、その研究手法は肉眼による様式比較に留まり、実際どのように原型が使い回されたのかについて、具体的な事例を知ることはなかった[9]。もし彫像の中で比較したい箇所を重ね合わせて比較したければ、両

者のパーツの石膏像をつくらねばならず、その場合でも3次元的にどの程度一致するのかは肉眼で感覚的に判断するしかなかった[10]。我々は、調査対象である彫像の3次元形状のデジタルデータを用いた形状比較解析をおこない、その結果、これまで不可能であった、重ね合わせによる形状比較が可能となり、視覚的かつ客観的に形状の類似度を検証できた。特にFFD法を用いた形状解析の結果、対象データのおおまかな形状を変形させ、比較する2つのデータの形状を極力近づけることで、形状類似度が極めて低い領域のみを抽出できた。これらの解析結果より、「ペプロフォロイ」5体の中に、形状の類似度が高いものがあることが明らかとなり、このことは、大量生産のための制作方法として、いくつかの型を使いまわして彫像制作を行っていたという説を後押しできる。また、特にFFD法による解析の結果は、制作過程の鋳造時の不本意な変形、もしくは、制作時、または制作時期とは異なる時期に、部分的な修復作業が行われた箇所領域を明示している可能性を示唆している。

今後の課題として、ペプロフォロイに年代や様式が近く、同じ工房で制作された可能性がある彫像や、ナポリ近郊パイアで出土した大量の石膏製の古代の原型そのものの調査を行い、3次元デジタルデータ化することが挙げられる。その結果、古代の彫刻工房に関するより考察が可能になろう。

6. まとめ

本論文において、古代ローマ期の彫像3次元デジタルデータを用いた形状比較を行った。視覚的・形状比較では、考古学分野の研究者にとって、3次元デジタルデータの特徴である自由形状加工ならびに自由複製を用いることにより、調査対象箇所の切断、重ね合わせを行うことができることで、容易に視覚的に形状を比較できるというメリットを持つ。さらに、FFD法による形状解析では、視覚情報のみでない定量化された結果の取得により、その考古学的見地での議論に情報科学技術による解析を導入できることで、諸説の裏付け、もしくは新たな知見の可能性を提供することができた。

参考文献

- [1] Katsushi Ikeuchi, Yoichi Sato: Modeling from Reality, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [2] Cyrax2500, <http://www.leica-geosystems.com>
- [3] T. Oishi, et.al, "Fast Simultaneous

Alignment of Multiple Range Images using Index Images," *Proc. Int'l Conf. on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 476-483, 2005.]

- [4] P. J. Besl and N. D. McKay: A method for registration of 3-D shapes, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.2, pp.239-256, 1992
- [5] Y. Chen and G. Medioni: Object modeling by registration of multiple range images, in *Proc of IEEE Conf. on Robotics and Automation*, Vol.3, pp.2724-2729, 1991.
- [6] T. Sederberg: Free-form deformation of solid geometric models, in *Proc. of ACM SIGGRAPH in Computers & Graphics*, Vol.20, No.4, pp.151-160, 1986.
- [7] H. Chui and A. Rangarajan: A new point matching algorithm for non-rigid registration, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.89, No.2-3, pp. 114 - 141, 2003.
- [8] 真川純, 高松淳, 池内克史: 位置合わせに基づく Free-form deformation を用いた3次元形状解析, 画像の認識・理解シンポジウム 2007.
- [9] C. Gasparri, "L'officina dei calchi di Baia. Sulla produzione copistica di età romana in area flegrea," *Mitteilungen des deutschen archäologischen Instituts. Römische Abteilung*, vol. 102, pp. 173 - 187, 1995.
- [10] C. Landwehr, *Die antiken Gips-abgüsse aus Baiae*, Berlin 1985.

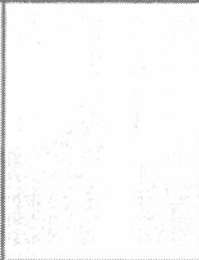
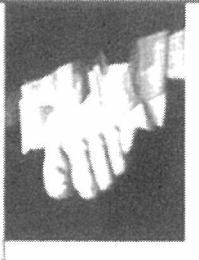



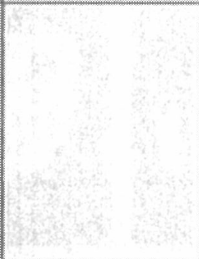
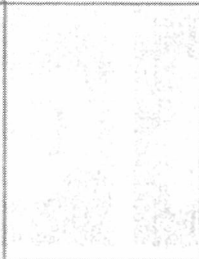



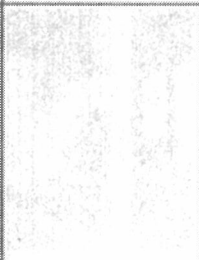

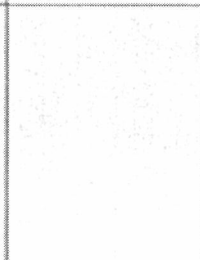



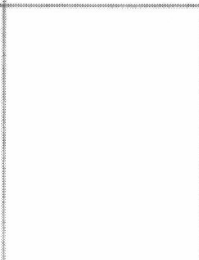
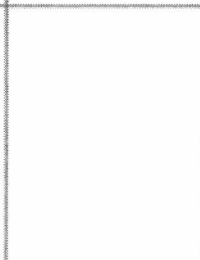
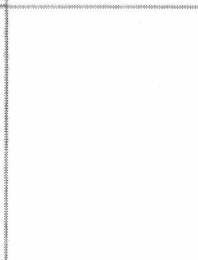

	dancer1	dancer2	dancer3	dancer4	dancer5
dancer1					
dancer2					
dancer3					
dancer4					

図12： 左足 総当り形状比較結果


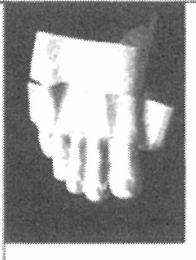


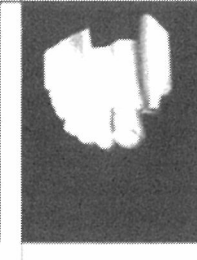

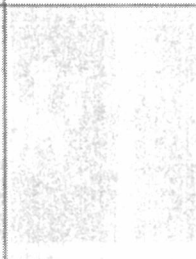
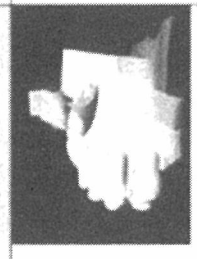
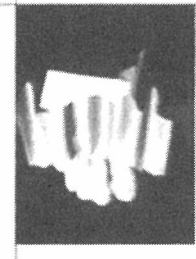
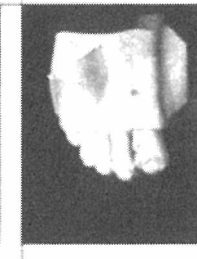

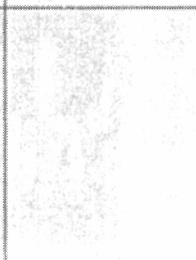
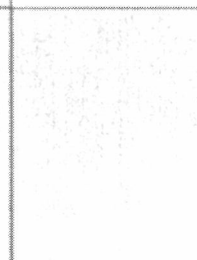
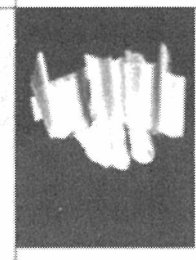
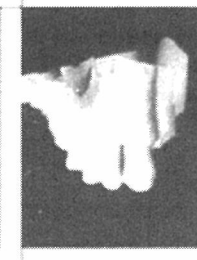
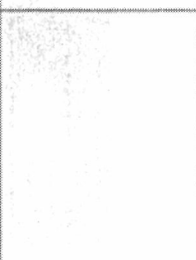
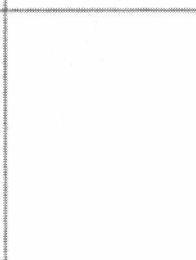
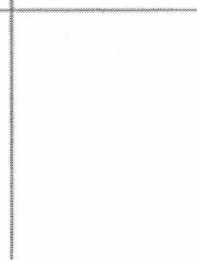
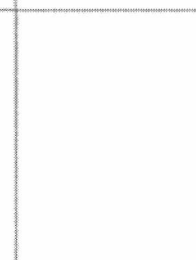
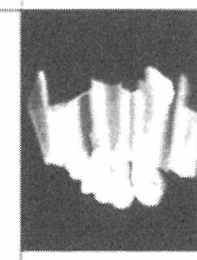
	dancer1	dancer2	dancer3	dancer4	dancer5
dancer1					
dancer2					
dancer3					
dancer4					

図13: 右足 総当り形状比較結果