

衣服設計のための三次元点群からの曲率計算の検証

吉田 哲也^{1,a)} 伊藤 沙紀²

概要: 本稿では、衣服設計において重要となる人体の曲面を曲率の観点から評価するアプローチとして、三次元点群からの曲率計算に着目し、三次元点群に対する曲率計算法とその検証について報告する。非接触型の三次元計測装置を用いて計測した三次元点群に対してガウス曲率と平均曲率を計算するとともに、計算した曲率を可視化して視覚的な評価を行った。評価を通じて、非接触型の三次元計測装置で計測した多数の三次元点群に対して、三角形分割に基づいてガウス曲率と平均曲率の計算が可能であることを確認した。

キーワード: 三次元点群, 曲率, 三角形分割

Verification of Approximated Curvatures from Point Clouds

TETSUYA YOSHIDA^{1,a)} SAKI ITO²

Abstract: This paper reports the verification of approximated curvatures from point clouds. For clothing construction, it is important to match curvatures of clothing to those of the smooth surface of human body. We calculated both the approximated Gauss curvature and mean curvature for three dimensional point clouds measured by stereo cameras, and visualized the calculated curvatures on solid model. The results indicate that it is possible to approximately calculate curvatures for three dimensional point clouds.

Keywords: Point Cloud, Curvature, Triangulation

1. はじめに

衣服産業において、フィット性が高く着心地の良い衣服を作ることは重要な課題である。平面である布から立体である衣服を作るためには、人体の形状をできるだけ反映して制作した衣服の着心地を向上することが大切となる。被服構成学では従来からメジャーなどの長さに基づく計測が行われてきたが、近年では三次元での人体形状の計測も活用されている [2], [6]。

三次元計測装置は大別するとセンサやマーカーを装着して計測する接触測定型と、レーザーやカメラを用いて計測する非接触型のものがある。接触型計測装置は、装着した

マーカーなどを利用するため計測データの精度が高くなる反面、動作の自由度が低下するという課題がある。他方、非接触型計測装置では動作の制約がないため、測定範囲内であれば任意に動くことが可能であり、自由度が高いという利点がある。しかし、接触型と比較して計測精度が低下しがちであり、また、データ量が膨大となりやすいという課題がある。

私たちの日常生活を教育研究の対象とするため、奈良女子大学生生活環境学部では平成25年度にユビキタスドクター開発研究装置を導入した。この装置はユビキタス広域3次元画像統合システムを備えており、20台のステレオカメラを用いて日常体験における行動を3次元で記録し再現できるという特徴を持つ。しかし、現状では多数のステレオカメラにより人の動きを記録することで自由視点から疑似体験できるという装置の特性を十分に活用しているとは言い難い。そこで、この装置を積極的に活用することを目指して、衣服設計において重要となる人体の曲面の曲率を、こ

¹ 奈良女子大学大学院人間文化研究科
Graduate School of Humanities and Sciences, Nara Women's University, Nara, 630-8506 Japan

² 奈良女子大学生生活環境学部
Faculty of Human Life and Environment, Nara Women's University, Nara, 630-8506 Japan

a) tyoshida@cc.nara-wu.ac.jp

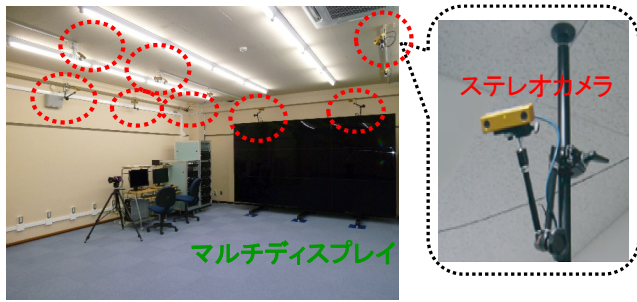


図 1 コビキタスドクター開発研究装置
Fig. 1 Ubiquitous doctor room

の装置で計測する三次元点群から計算することに取り組んでいる。

本稿では、衣服設計において重要となる人体の曲面を曲率の観点から評価するアプローチとして、三次元点群からの曲率計算に着目し、三次元点群に対する曲率計算法とその検証について報告する。非接触型の三次元計測装置を用いて計測した三次元点群に対してガウス曲率と平均曲率を計算するとともに、計算した曲率を可視化して視覚的な評価を行った。評価を通じて、非接触型の3次元計測装置で計測した多数の3次元点群に対して、三角形分割に基づいてガウス曲率と平均曲率の計算が可能であることを確認した。

2節で三次元点群からの曲率計算について説明し、3節で評価実験について報告し、4節でまとめを述べる。

2. 三次元点群からの曲率計算

2.1 準備

本稿では、行列は太字の大文字、ベクトルは太字のイタリック小文字で表記し、 \mathbf{A}_{ij} で行列 \mathbf{A} の第 ij 要素を表す。ベクトルの内積は $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$ のように \cdot を用い、ベクトルの外積は \times 、ベクトル \mathbf{v} の転置は \mathbf{v}^T 、行列 \mathbf{X} の転置は \mathbf{X}^T で表す。また、パラメータ表示された曲線の弧長パラメータ s による微分は $y' = \frac{dy}{ds}$ 、 $y'' = \frac{d^2y}{ds^2}$ などと表記する。

2.2 曲面の曲率

曲面は2次元的な広がりを持つため、曲面の曲率は方向に依存する [4]。曲面上の各点における法平面と曲面との切り口にできる平面曲線を考え、平面曲線の弧長パラメータ s とその範囲 I でパラメータ表示された曲線 $C(s) (s \in I)$ について、単位ベクトル $\mathbf{e}_1(s)$ 、 $\mathbf{e}_2(s)$ を以下のように定義する (図2参照)。

- (1) $\mathbf{e}_1(s) = C'(s)$
- (2) $\mathbf{e}_2(s)$ は $\mathbf{e}_1(s)$ を正の方向に90度回転したベクトル

任意の $s \in I$ について、定義より

$$\|\mathbf{e}_1(s)\|^2 = 1 \quad (1)$$

式 (1) の両辺を弧長パラメータ s で微分すると

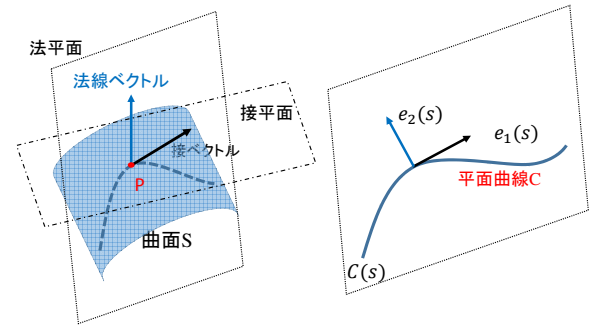


図 2 曲率
Fig. 2 curvature

$$2\mathbf{e}_1(s) \cdot \mathbf{e}'_1(s) = 0 \quad (2)$$

となり、 $\mathbf{e}'_1(s)$ と $\mathbf{e}_1(s)$ は直交し、また $\mathbf{e}'_1(s)$ は $\mathbf{e}_2(s)$ の方向であることがわかる。このとき、比例係数を κ とおいて

$$\mathbf{e}'_1(s) = \kappa \mathbf{e}_2(s) \quad (3)$$

と表し、 κ を曲線の曲率と呼ぶ。

法平面を回転させた際の点 P における法曲率の最大値と最小値を κ_1 、 κ_2 とすると、 κ_1 と κ_2 を点 P における主曲率と呼ぶ。 κ_1 と κ_2 を用いて、ガウス曲率 K と平均曲率 H は以下で定義される。

$$K = \kappa_1 \kappa_2 \quad (4)$$

$$H = \frac{1}{2}(\kappa_1 + \kappa_2) \quad (5)$$

パラメータ表示された曲面 $S(u, v)$ に対して、

$$\begin{aligned} E(u, v) &= \frac{\partial S}{\partial u}(u, v) \cdot \frac{\partial S}{\partial u}(u, v) = \left\| \frac{\partial S}{\partial u}(u, v) \right\|^2 \\ E(u, v) &= \frac{\partial S}{\partial u}(u, v) \cdot \frac{\partial S}{\partial v}(u, v) \\ G(u, v) &= \frac{\partial S}{\partial v}(u, v) \cdot \frac{\partial S}{\partial v}(u, v) = \left\| \frac{\partial S}{\partial v}(u, v) \right\|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

とおき、これを曲面 S の第1基本量と呼ぶ (図3参照)。

また、

$$\begin{aligned} L(u, v) &= \frac{\partial^2 S}{\partial u^2}(u, v) \cdot \mathbf{n}(u, v) \\ M(u, v) &= \frac{\partial^2 S}{\partial u \partial v}(u, v) \cdot \mathbf{n}(u, v) \\ N(u, v) &= \frac{\partial^2 S}{\partial v^2}(u, v) \cdot \mathbf{n}(u, v) \end{aligned} \quad (7)$$

とおき、これを曲面 S の第2基本量と呼ぶ (図3参照)。

ここで、 $\mathbf{n}(u, v)$ は曲面 S 上の点 $S(u, v)$ における単位法ベクトルである。

ガウス曲率と平均曲率は、曲面の第1基本量および第2基本量を用いて次のように表されることが知られている。

$$K = \frac{LN - M^2}{EG - F^2} \quad (8)$$

$$H = \frac{1}{2} \frac{EN - 2FM + GL}{EG - F^2} \quad (9)$$

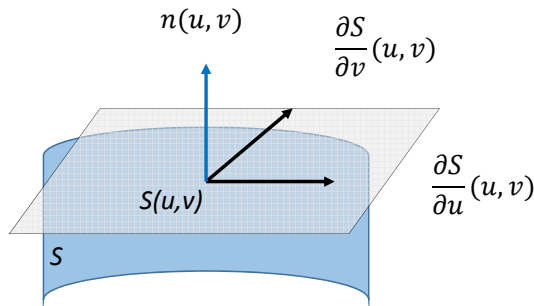


図 3 パラメータ表示された曲面
Fig. 3 parameterized surface

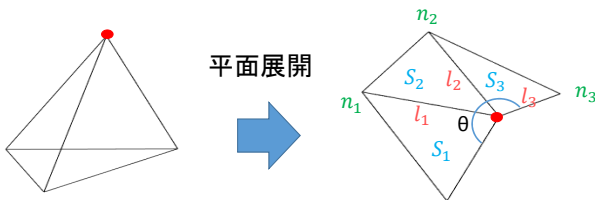


図 4 三角形分割に基づく曲率の近似計算

Fig. 4 approximated curvature based on triangulation

2.3 三角形分割に基づく曲率計算

ガウス曲率と平均曲率は、曲面の局所的な形状を表すとみなせる。曲率は本来は滑らかな曲面に対して定義されるものであるが、文献 [5] では、多面体のように平面の領域から構成される形状に対して、滑らかな曲面の曲率が頂点に集中したとみなし、近似的にガウス曲率と平均曲率を計算することを提案している。

三角形分割に基づく曲率計算 [5] では、1 点を共有する三角形を抽出し、その三角形の構成要素を用いてガウス曲率と平均曲率を近似している。この方法では、ガウス曲率 K は以下で近似される。

$$K = \frac{2\pi - \sum_i \theta_i}{S/3} \quad (10)$$

ここで、 $\sum_i \theta_i$ は着目した点周りの角度の和であり、 S はその点を共有する三角形の面積の和を表す。

また、平均曲率は以下で近似される。

$$H = \frac{\sum_i \phi_i l_i / 4}{S/3} \quad (11)$$

ここで、 ϕ_i は辺を共有する 2 つの三角形のなす角度、 l_i は辺の長さ、 S は点を共有する三角形の面積の和を表す。

2.4 3D α -shape に基づく曲率計算

α -shape 法とは、点群から多面体を推定する手法であ

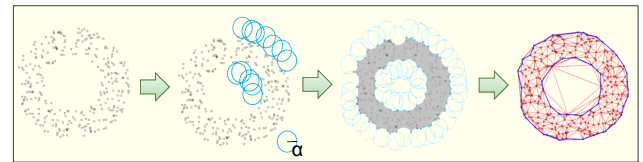


図 5 α -shape 法
Fig. 5 α -shape

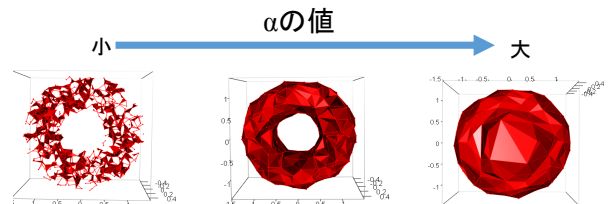


図 6 α -shape 法における α の影響
Fig. 6 Influence of α in α -shape

る [1]。この手法は点の集合から近傍の点を取り除かないように半径 α の円（あるいは超球）でくりぬいていき、くりぬいた円に外接する最大の三角形（単体）に置き換えることで多面体を推定する (図 5 参照)。

3D α -shape 法とは、現実の 3 次元空間に特化して、3次元の多面体を推定する手法である。点群から推定される多面体は α -shape と呼ばれるが、これはハイパーパラメータである α の値に依存し、 α の値が小さいと点群から構築した α -shape では穴が空くことになる。他方、 α を大きくすると α -shape は点群に対する凸包となることが知られている (図 6 参照)。

2.5 3D α -shape の実装

本研究では、R 言語のパッケージである alphashape3d を用いた [3]。3 次元点群を α -shape 法を用いて三角形分割し、alphashape3d で得られる三角形要素を用いて、2.3 節で紹介した曲率の近似計算を行った。

使用した alphashape3d では、点群の三角形分割を通じて点群から面の推定を行うとともに、三角形分割で得られる各三角形の法線ベクトルも得ることができる。さらに、各法線ベクトルの大きさはそれぞれの三角形の面積に比例する。そこで、点群の三角形分割で得られる各三角形に対し、法線ベクトルなどの三角形の情報を用いることで、式 (10)、式 (11) に示した三角形分割に基づくガウス曲率および平均曲率を計算した。

さらに、計算した曲率の値を色情報に変換して可視化することにより、3 次元点群から推定した多面体上での (近似的な) 曲率を直観的に把握できるようにした。

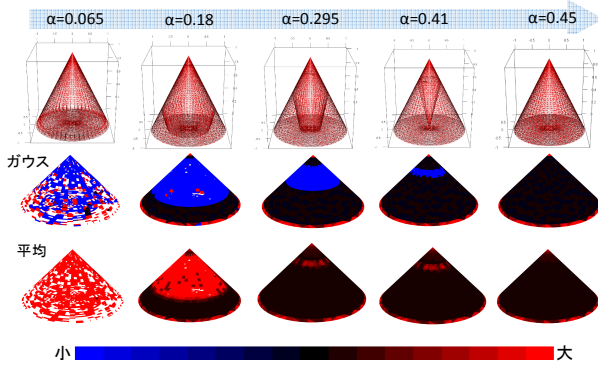


図 7 立体モデルにおける α の影響
Fig. 7 Influence of α for solid model

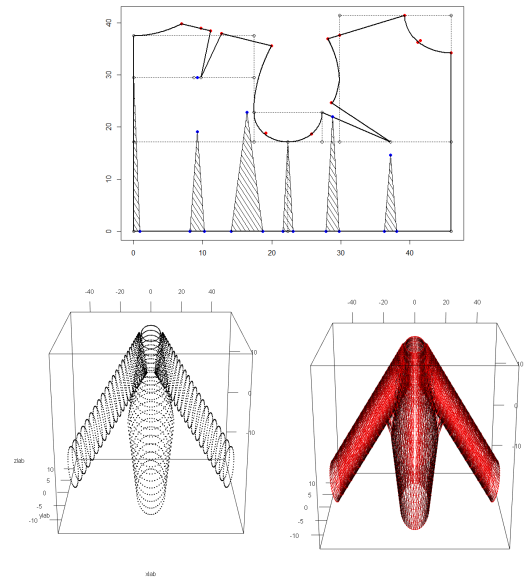


図 8 新文化式婦人原型とその立体モデル
Fig. 8 New bunka female pattern and solid model

3. 評価

まず、簡単な人工データを構築し、本研究で使った alphashape3d の挙動を確認した。次に、現在、日本における学校教育の場で最も多く用いられている成人女子用上半身原型である新文化式婦人原型の立体モデル [7] に対する曲率計算を確認した。最後に、図 1 に示したユビキタスドクター開発研究装置で被服構成で使用されるトルソーを計測した実データに対する評価を行った。

3.1 α -shape 法におけるハイパーパラメータ α の影響

α -shape 法を用いた点群からの多面体推定は、ハイパーパラメータとして与える α の値に大きく依存する。そこで、 α -shape 法を適用する際、 α の値に応じて面の推定と曲率計算がどのように影響を受けるかを調べた。実験では、簡単な立体モデルを生成し、生成した立体モデルの表面から点群をサンプリングして 3 次元点群を定義し、この 3 次元点群に対して α -shape 法を適用した。結果を図 7 に示す。

図 7 より、ハイパーパラメータである α の値を小さくした場合、立体を描画した際に面に穴が空いていることがわかる。これは、 α -shape 法を用いた多面体推定において、点群の間を半径 α の円（球）でくりぬくことができる部分は面が推定されないために描画できる三角形がなくなってしまったためと考えられる。また、 α の値を大きくした場合には立体の内部にも面が推定されており、ほぼ平面に近い形状であるはずの円錐の側面であっても、曲率の値が平面であるかのように計算されている。

上記の結果から、図 7 の一番右のように、立体の表面のみを正しく面として推定するためには、ハイパーパラメータである α の値を慎重に設定する必要があることが確認した。

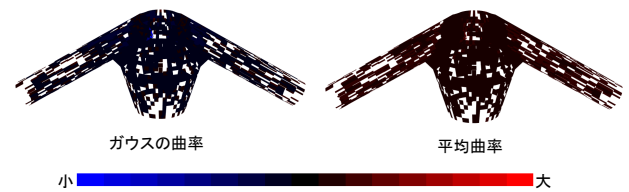


図 9 新文化式婦人原型立体モデルの結果
Fig. 9 Result for New bunka female pattern solid model

3.2 新文化式型紙モデルに対する曲率計算

図 8 に示すように、新文化式婦人原型を円錐台に近似した衣服の立体モデル [7] に対して実験を行った。結果を図 9 に示す。なお、実験では $\alpha=2.0$ とした。

残念ながら、新文化式婦人原型に対する立体モデル [7] については曲率の違いを明確に確認することが出来なかった。また、曲率を色情報に変換して描画する際に面に穴があいてしまっていた。2.5 節で述べたように曲率を計算をする際には三角形の法線ベクトルを活用しているため、alphashape3d で法線ベクトルを得られない三角形については曲率の計算ができないことになる。このため、近似的に曲率を計算することができなかった三角形は描画されず、穴があいてしまったと考えられる。さらに、袖下と身頃の間にも面が推定されている。

3.3 ユビキタスドクター開発研究装置から得られる 3 次元点群データ

図 1 に示したユビキタスドクター開発研究装置では、天井に取り付けた 20 台の各カメラから三次元座標と RGB 色

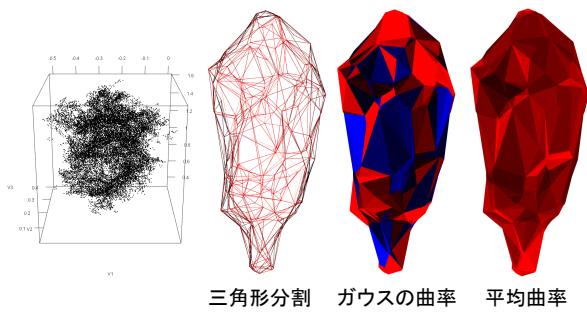


図 10 トルソーに対する結果
Fig. 10 Result for torso

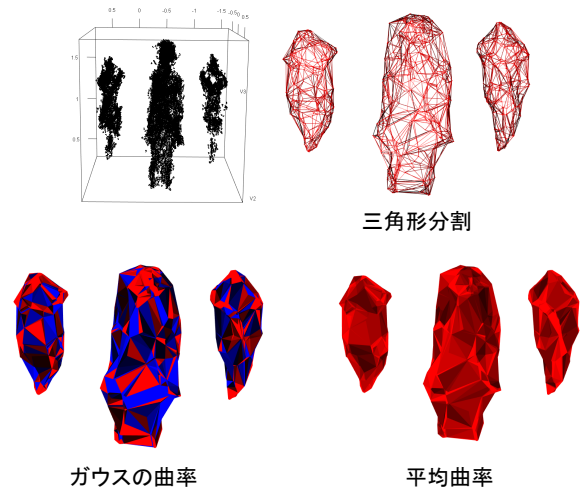


図 12 マネキンとトルソーの結果
Fig. 12 Result for mannequin and torso

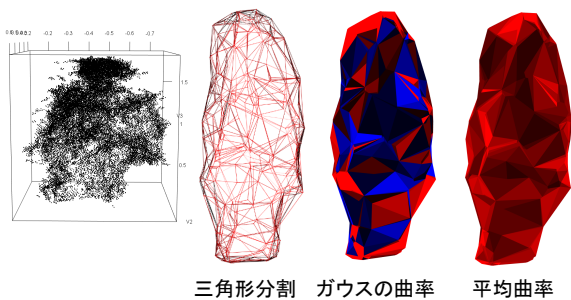


図 11 マネキンの結果
Fig. 11 Result for mannequin

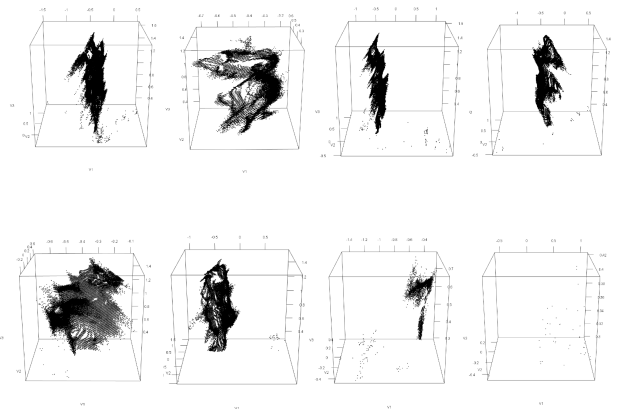


図 13 各カメラごとにフレームを統合した場合の例
Fig. 13 Result for frame integrated point cloud

情報を取得し、それらの情報を統合して三次元データを計測する。また、各カメラは一秒間に 30 フレームのデータを計測する。計測した三次元点群の座標値はローカル座標およびワールド座標のそれぞれで表現できるが、本研究ではワールド座標を用いて実験を行った。

以下の実験では、複数のカメラで計測したデータを統合することによる空間的な拡がりへの対応への検証と、一台のカメラで計測したデータのフレームを統合することによる時間的な拡がりへの対応への検証を行った。

3.3.1 空間的な拡がり

各カメラで計測する 1 フレーム分の三次元座標データを統合 (マージ) して 1 つの三次元座標と見なしたデータに対して実験を行った。結果を図 10, 図 11, 図 12 に示す。実験では $\alpha=0.25$ とした。

図 10, 図 11, 図 12 の結果より、三次元点群に対して三角形分割に基づく曲率の近似計算が可能であることを確認した。しかし、図 1 に示すユビキタスドクター開発研究装置が設置されている実験室での計測対象周辺のノイズを除去しきれていないために、立体の面を正確には推定することができていない。また、図 11 のマネキンに対する実験結果では、頭部や手足などがうまく推定されず、胴体の一部として面が推定されてしまっている。このため、ノイズの処理や細かい部分に対する面推定などに課題が残されて

いる。

3.3.2 時間的な拡がり

各カメラで 1 秒間に測定する 30 フレーム分のデータを各カメラごとに統合 (マージ) して 1 つの三次元点群とみなしたデータに対して実験を行った。3 次元計測装置で計測したカメラごとの点群データを図 13 に示す。

残念ながら、図 13 に示すデータに対しては α -shape 法を適用することができなかった。図 13 に示すデータでは、建物の振動などにより、カメラや測定物に微小なゆれが生じ、それぞれのカメラごとに点群が一定の方向に流れているように計測されている。 α -shape 法は一般の位置にない点群には適用できないため、多数の点群が平面上に観測されてしまうと適用できないため、図 13 に示すデータに対して α -shape 法を適用できなかったと考えられる。

4. おわりに

衣服設計において重要となる人体の曲面を曲率の観点から評価するアプローチとして、三次元点群からの曲率計算に着目し、三次元点群に対する曲率計算法とその検証について報告した。非接触型の三次元計測装置を用いて計測した三次元点群に対してガウス曲率と平均曲率を計算するとともに、計算した曲率を可視化して視覚的な評価を行った。評価を通じて、非接触型の3次元計測装置で計測した多数の3次元点群に対して、三角形分割に基づいてガウス曲率と平均曲率の計算が可能であることを確認した。

謝辞 本研究の一部は平成26年度奈良女子大学研究推進プロジェクト経費の補助による。

参考文献

- [1] Edersbrunner, H. and Mücke, E. P.: Three-Dimensional Alpha Shapes, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 13, No. 1, pp. 43-72 (1994).
- [2] 平岡忠志：測定点群を基にした採寸ソフトの開発，技術報告，徳島県立工業技術センター研究報告 (2008).
- [3] Lafarge, T., Pateiro-Lopez, B., Possolo, A. and Dunkers, J. P.: R Implementation of a Polyhedral Approximation to a 3D Set of Points Using the α -Shape, *Journal of Statistical Software*, Vol. 56, No. 4, pp. 1-19 (2014).
- [4] 中内伸光：じっくり学ぶ曲線と曲面，共立出版 (2005).
- [5] 李賢真，今岡春樹：曲面の曲率における性的ドレープ形状の比較，繊維製品消費科学会誌，Vol. 46, No. 2, pp. 49-57 (2005).
- [6] 辛貞殷：三次元人体スキャンデータからの特徴点抽出とその応用，博士論文，慶応義塾大学 (2008).
- [7] 吉田哲也，石川歌穂：ガウス写像に基づく衣服形状の特徴付けの検証，技術報告 2015-MPS-106，情報処理学会研究報告：数理モデル化と問題解決研究会 (2015).