

修士論文

「握りやすさ」を意識した
把持体形状デザインのための
三次元データ分析法に関する研究

平成23年度修了
三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 電気電子工学専攻

平田 知也

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究の背景	1
1.2	従来研究とその課題点	2
1.3	本研究の目的及び概要	3
第2章	実験材料	4
2.1	我杯	4
2.2	我杯の製作過程	4
2.3	スキャン工程により得られる三次元ポリゴンデータ	6
第3章	特徴量と抽出領域に関する基礎検討	8
3.1	ユーザによる把持体形状の違い	8
3.2	把持形状の個人差が大きい領域を決定するための予備実験	9
第4章	ポリゴンクラスタリングによる末節領域抽出	12
4.1	従来法の課題点	12
4.2	提案手法	13
4.2.1	杯に象られた握り型の凹凸度評価	13
4.2.2	クラスタリングによる凹面領域の抽出	15
第5章	実験結果と考察	21
5.1	握り型の深度評価	21
5.2	末節領域の抽出	21
5.3	本手法の問題点	24
第6章	おわりに	26
6.1	本論文のまとめ	26
6.2	今後の課題	26
	謝辞	27

目次	ii
参考文献	28
発表論文リスト	30

図一覧

1.1	手の特徴と把持体形状の関係の数理モデル化（文献 [10]）	3
2.1	本論文にて用いた我杯のタイプ	4
2.2	我杯の製作過程（象り工程）	5
2.3	我杯の製作過程（スキャニング行程）	5
2.4	我杯の製作過程（切削行程）	6
2.5	STL 形式のデータ構造	7
2.6	三次元ポリゴンデータのワイヤーモデル	7
3.1	把持体に象られた握り型例	8
3.2	三次元モデルの二次元展開（イメージ）	9
3.3	二次元画像への変換	9
3.4	予備実験の結果	11
4.1	従来手法の流れ	13
4.2	従来研究の処理結果	14
4.3	我杯側面の断面図	15
4.4	z 軸上での分割	16
4.5	深度評価値 $TD(\theta, z)$	16
4.6	d_{min} の値によるポリゴンの分類	19
4.7	末節領域とその他の凹面領域の位置関係	20
5.1	各種法により得られた深度値の分布（一例）	22
5.2	抽出結果	25

表一覧

4.1 クラスタリングの手順	17
--------------------------	----

第1章

はじめに

1.1 研究の背景

物体を握る（把持する）ことは，生まれながらに持つ生物的な本能動作であるとともに，握手といったコミュニケーションの手段としても用いられる重要な機能である．また「握る」という行為は日常生活や医療・福祉の現場などで多く目にするとともに，現在，様々な「握る」道具が流通している．これらの製品は，使いやすさ（すなわち握りやすさ）がその製品のユーザビリティを決定する大きな要因となる．

一方，株式会社バンザイ・ファクトリーでは各ユーザにとって最も使いやすいという観点から，各ユーザの手の握り型を彫り上げたオーダーメイドのコップ「我杯（わがはい）」を製造している [1][2]．我杯は，各ユーザの握り型をコップに彫り込むため，把持力の低下した高齢者や脳梗塞等の疾患によって手が不自由となったユーザには非常に使いやすい，すなわち持ち手のユーザビリティを最大限に考慮したコップといえる．実際，我杯は多くのユーザから高い評価を受けるとともに「我杯は究極のユニバーサルデザインの製品ではないか」という声が寄せられている．

ユニバーサルデザイン（Universal Design: U.D.）とは，年齢や性別，障害の有無に関わらず利用することができるような製品を設計することであり，1980年代に Ronald L. Mace によってそのコンセプト（7原則）が提唱された [3]．現在，多くの製品の製造や設計においてユニバーサルデザインのコンセプトが採用されている．しかしながら，Mace によって提唱された原則は

1. Equitable Use（公平な利用）
2. Flexibility in Use（利用における柔軟性）
3. Simple and Intuitive Use（単純で直感的な利用）
4. Perceptible Information（認知できる情報）

5. Tolerance for Error (失敗に対する寛大さ)
6. Low Physical Effort (少ない身体的な努力)
7. Size and Space for Approach and Use (接近や利用のためのサイズと空間)

の7原則であり、全ての原則が直感的あるいは感覚的な表現のみを用いて規定されている¹。特に、コップに対してユニバーサルデザインの原則を適用するには、上記項目6と7が特に重要であると考えられるが、それらに対する数値的な指針やその算出方法や基準値については十分な研究が進んでいない。そのため、ユニバーサルデザインをうたった製品は、一部のユーザの意見や設計者らのアイデアや経験に基づく試作と評価の繰り返し、言い換えれば設計者の主観的感覚に基づいて設計されているのが現状である[4]。

1.2 従来研究とその課題点

近年、人間工学やユニバーサルデザイン等の分野においては、手の寸法や把持力等の実測データを分析するといった試みが盛んに行われている[5][6][7][9]。例えば文献[5]では、把持力が最大となるようなハンドルの位置と直径の関連性について検討するため、320個のセンサが取り付けられたグローブを用いた大規模な実験を行っている。文献[6]では、推力とトルクを予測するために、円筒状ハンドルにおける把持力と把持領域、ハンドルの直径、手のサイズ等の関係等について検討している。また同文献では、実験結果が把持効率が最大となるハンドルサイズを決定するために有用であったことも示されている。しかしながら、これらの研究では把持対象となる物体の形状は円筒形といったように予め規定されており、それらの条件下における被把持体とヒューマンファクターに関する検討が行われている。すなわち、これらのケースではその傾向が把持対象となる物体の形状に対して強く依存するため、得られた知見を他の把持体設計に応用することは容易ではない。

一方、前節にて紹介した(株)バンザイ・ファクトリー製の我杯は、各ユーザの手の握り型、すなわち各ユーザにとって最も「握りやすい」形状を粘土に象り、それをカップ側面に彫り込んでいる²。言い換えれば、我杯の製造過程により得られた把持体の形状を分析することにより、把持体の形状設計における「ユニバーサルデザインの原則に基づいた数値的指針」を構築できるかもしれない。

このような点に着目し、川中らは、各個人の握りやすい形状を決定する数理モデルの導出と把持体設計への応用を目的として、これらの把持体データからの特徴抽出手法に関する基礎的検討を行っている[10]。文献[10]では、各指の末節領域(指先から第一関節

¹上記の日本語部分については、Center for Universal Design のページ(日本語版)から引用した。

²本論文では、ユーザの把持形状を粘土等に転写することを「象り(かたどり)」と呼ぶこととする。

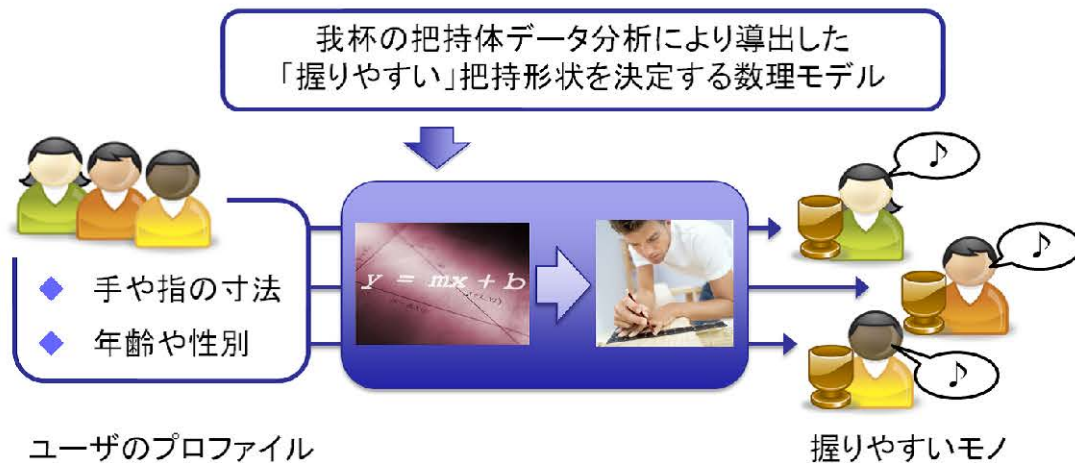


図 1.1: 手の特徴と把持体形状の関係の数理モデル化（文献 [10]）

までの領域）から各指の把持力とその方向を特徴量として抽出し、これら特徴量と「握りやすさ」との関連について考察するとともに、各ユーザーの手の特徴と把持体形状の関係を数理モデルとして記述することを試みている（図 1.1）。また文献では、抽出された特徴量は人間の身体的特徴と関係する可能性が高く、数理モデルの構築には多量のデータを用いた実験と統計学的な観点からの検討の必要性についても述べている。しかしながら、把持の特徴量として使用する末節領域の抽出精度が十分でなかったため、抽出結果の一部を手動で補正した後、把持力等の特徴量を算出する必要があった。現在、バンザイ・ファクトリーにて保管されている我杯製作のために採取されたデータは 2000 を超えており、これら大量の把持体データを分析するには、より精度の高い末節領域抽出法が必要となる。

1.3 本研究の目的及び概要

本研究では、コップの製造に用いられている把持体データから各指の末節領域を自動かつ高精度で抽出するアルゴリズムについて検討する。ここでは、ユーザーの握り型を三次元レーザスキャナを用いて三次元ポリゴンデータ化されたものを対象とし、把持体を構成する各ポリゴンの位置情報を利用したクラスタリングによる末節領域抽出法を提案する。本論文ではまず、第 2 章にて実験試料となる把持体や我杯の製作過程とそのデータの特徴について述べる。第 3 章では、各ユーザーから得られた把持体側面の凹凸形状を分析することにより、抽出すべき末節領域に関して検討する。第 4 章では我杯に象られた指の末節領域の形状特徴を利用した領域抽出法を提案し、第 5 にて抽出実験とその評価・考察を行う。最後に第 6 章にて本論文の内容をまとめ、今後の課題について述べる。

第2章

実験材料

2.1 我杯

「我杯」とは，秋田県仙北市にある株式会社バンザイ・ファクトリーが製作し販売する木製の杯のことである．我杯の把持部には各ユーザーの手形が握り型として残るため，還暦祝いや退職祝い等の記念日の贈呈品として発注されることが多い．現在，同社では日本酒を飲む際に使用する「おちょこ」からビール等を飲むための大きいものまで数種類の我杯を製造・販売している．本研究では，採取されたデータ数が最も多いタイプ（図 2.1）の三次元ポリゴンデータを実験材料として使用することとした．



図 2.1: 本論文にて用いた我杯のタイプ

2.2 我杯の製作過程

以下に我杯の製作手順の概要を示す．我杯の購入者はまず，図 2.2(a) に示すようなバーベル状のコップに化学粘土とオイル，水等を混合した特殊な印象材を巻き付けたものを



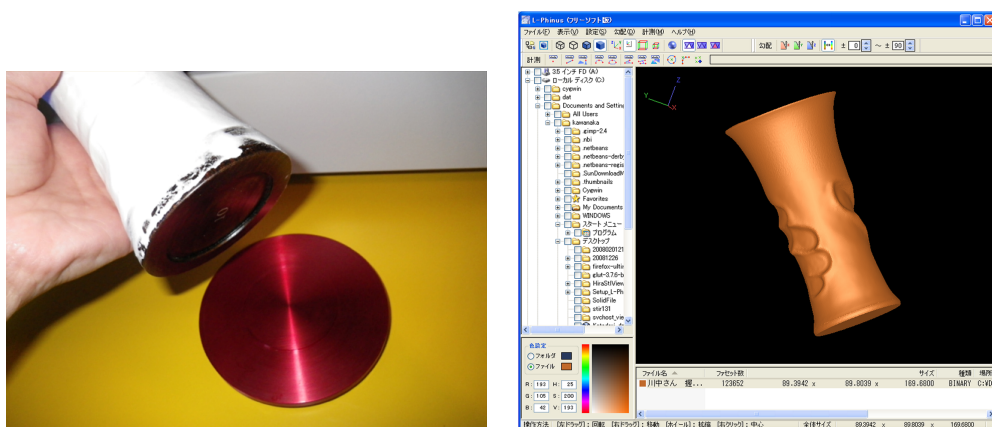
(a) 象り作業の例

(b) 把持形状が象られた印象材

図 2.2: 我杯の製作過程（象り工程）

用いて握り型を象る．印象材は，把持する際の力の入れ方によって形が自由に変形するように堅さ調整がなされており，ユーザはこの印象材を握ることによって，図 2.2(b) のように最も握りやすい形状を象ることができる．

次に，象りされた印象材（以下，把持体と呼ぶ）は高精度の三次元レーザスキャナ（空間分解能 0.2mm）を用いて三次元ポリゴンデータ化される．把持体には，杯の中心軸をスキャナ内の回転台の回転軸と一致させるため，把持体の底には特殊な窪みが設けられている．一方，スキャナの回転台にはこの窪みに対応する治具が取り付けられており，把持体の窪みと治具を合わせることで把持体の中心軸とスキャナの回転軸を一致させることが可能となっている（図 2.3(a)）．スキャナを用いてスキャンされた把持体は，約 150,000 ポリゴンから構成される三次元ポリゴンデータとなる．この段階で得られるポリゴンデータはスキャン時の計測ミス等によりポリゴンが欠落（ポリゴン欠けと呼ばれる）



(a) 把持体固定のための窪みと治具

(b) 生成された切削用三次元データ

図 2.3: 我杯の製作過程（スキャニング行程）

している場合もあるため、それらの修正と平滑化等の処理が適用された後、図 2.3(b) のような切削用データとなる。

次に、作成された切削用データは、図 2.4(a) に示すような三次元切削機によって木地が削り出され、サンディングや漆塗像といった仕上げ処理が施されたあと、完成となる。これら製作過程からも明らかなように、得られる三次元ポリゴンデータは各ユーザの握り型を象った把持体データであり、各ユーザがコップを把持する際の手の形状や癖といった特徴をそのまま象っていることがわかる。このようなユーザビリティを考慮した道具の製造において発生するデータには、ユーザビリティ（本研究の場合は握りやすさ）を表す何らかの情報が含まれている可能性が高い。これらデータを分析することにより、握りやすさを指標化するような数理モデルを導出することが可能であると考えられる。



(a) 三次元切削機による木地の切削 (b) 完成した我杯

図 2.4: 我杯の製作過程（切削行程）

2.3 スキャン工程により得られる三次元ポリゴンデータ

本研究で使用する三次元ポリゴンデータは、バンザイ・ファクトリーより STL フォーマットの三次元ポリゴンデータとして提供される。STL(Standard Triangulated Language) は 3D Systems Cooperation によって提案されたファイルフォーマットであり、数多くの CAD システムで利用されている [11]。図 2.5 に STL (ASCII) 形式のデータフォーマットを示す。STL データには、物体を構成する各ポリゴンの頂点の x , y , z 座標の値と正規化された法線ベクトルの値が格納されており、これらの情報を用いて三次元モデルの表面が構成されている（図 2.6）。なお、本論文で使用した我杯の把持体データは約 150,000 ポリゴンである。本研究では、30 年代～60 年代の手に障害を持たない男女 149 名の右手の握り型を象った三次元ポリゴンデータを実験材料として用いた。

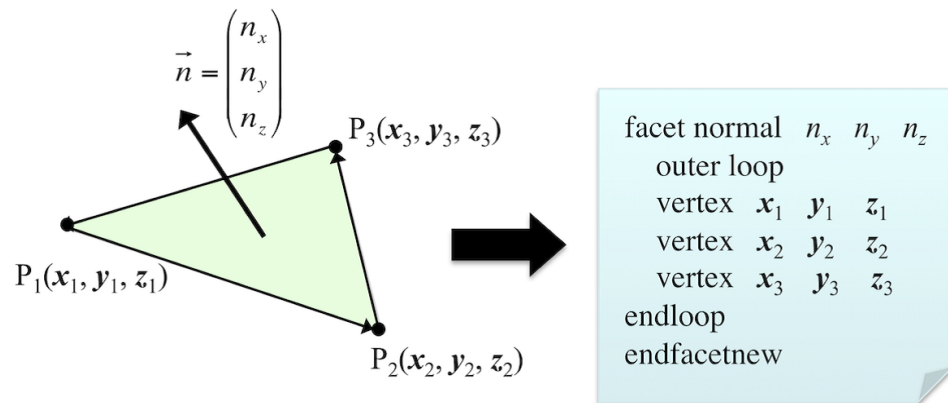


図 2.5: STL 形式のデータ構造

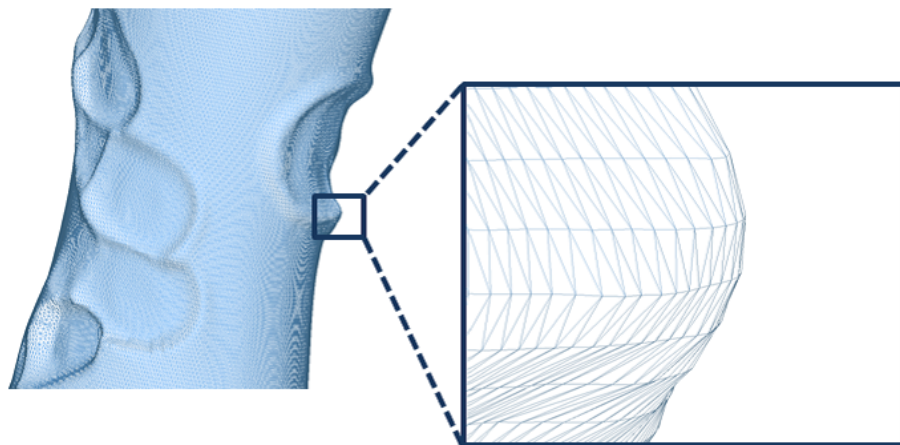


図 2.6: 三次元ポリゴンデータのワイヤーモデル

第3章

特徴量と抽出領域に関する基礎検討

3.1 ユーザによる把持体形状の違い

図 3.1 に提供された三次元ポリゴンデータを三次元モデルとして表示した例を示す．図から，各ユーザによって把持体形状が大きく異なっていることが確認できる．例えば，(a) のユーザ 1 は他のユーザと比較して深く握り型が象られているのに対し，(c) のユーザ 3 は浅い握りであることがわかる．また指の位置や角度等についても，その特徴が各ユーザごと大きく異なっている．これは，各個人の手の大きさや指の太さなどの身体的特徴や握り方の違いによって，把持する形状や位置に個人差が生じるためである．このように，物体を把持する際に個人差が生じる領域には，各個人の握りやすい型を決定するための情報が含まれている可能性が高いと考えられる．しかしながら，個人差が特に大きくなる把持領域が手のどの部位に存在しているかという詳細な議論は，文献 [10] では行われていなかった．そこで本研究では，我杯に象られた把持領域の中で特に個人差が大きくなる領域を決定するための予備実験を行うこととした．

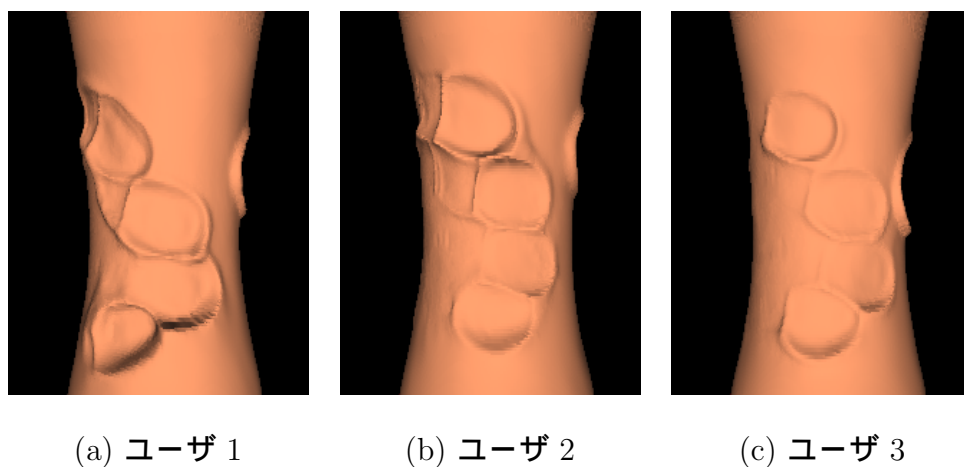


図 3.1: 把持体に象られた握り型例

3.2 把持形状の個人差が大きい領域を決定するための予備実験

本節では、把持により生じる個人差について検討するため、バンザイ・ファクトリーから提供された多人数の三次元把持体データについて、把持体の形状がどのように変化しているのかを調査した。ここではまず、各三次元ポリゴンデータ中の x, y, z 座量の値を円筒座標系 ($r - \theta$ 座標系) に変換し、把持形状が象られたモデル側面を二次元平面に展開する (図 3.2)。図中における r は、把持体を構成する各ポリゴンと把持体の中心軸 (z 軸) の距離、 θ はポリゴンから z 軸までの線分と x 軸とのなす角度を示している。次に、展開された平面空間を $dz, d\theta$ で定義される小領域によって分割し、その各小領域に含まれるポリゴンの中心軸からの距離 r の平均値 \bar{r} を小領域ごとに求める。なお、各小領域には少なくとも一つ以上のポリゴンが含まれている必要があるため、 $dz, d\theta$ は、ポリゴンデータ化に使用した三次元スキャナの空間分解能 $0.2[\text{mm}]$ 以上の長さに設定した。そして、各小領域に対応する \bar{r} の値を輝度値 $0 \sim 255$ の画素データに変換し、疑似カラー画像を作成した (図 3.3)。

図 3.4 に、処理結果を疑似カラー画像化したものを示す。図 3.4(a) は、把持体データを

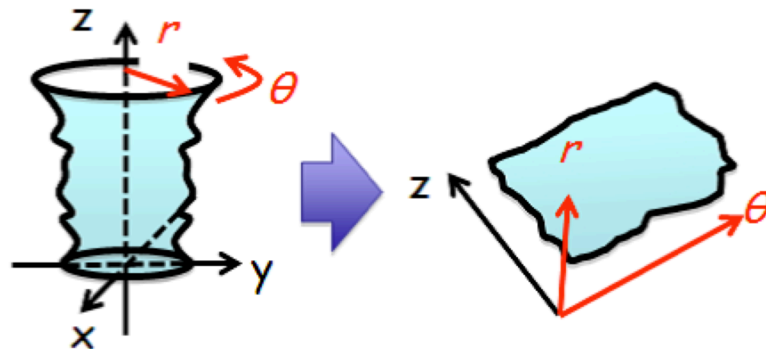


図 3.2: 三次元モデルの二次元展開 (イメージ)

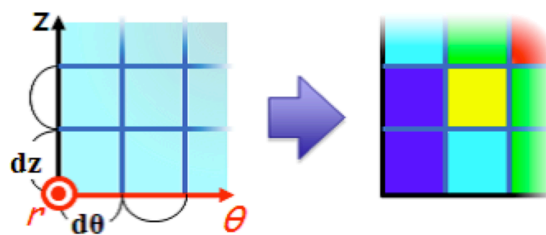
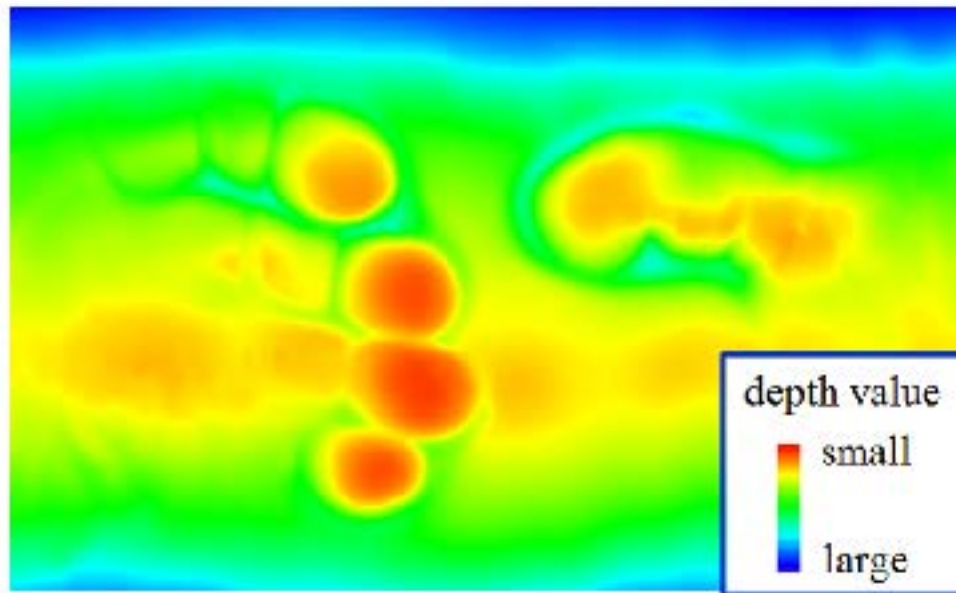
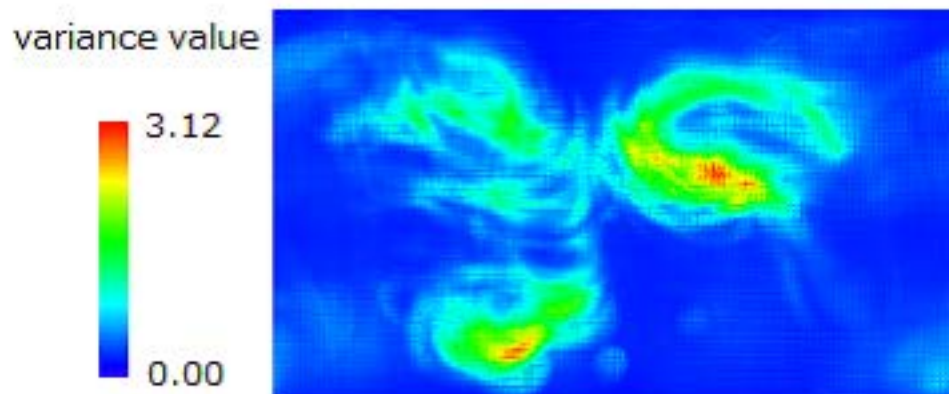


図 3.3: 二次元画像への変換

展開して各小領域における \bar{r} （ここでは深度値と呼ぶ）の値を擬似カラーにより可視化した例である．図のように展開された側面は，その形状の凹凸の度合いに応じて色付けされており，把持体側面に象られた把持形状と5本の指の位置を確認することができる．また図3.4(b)は，149名の把持体データを用いて各小領域の深度値 \bar{r} の分散を計算し，その分布を擬似カラー画像化したものである．図3.4(a)(b)より，指先の領域に相当する領域については分散値が高くなっていることが分かる．言い換えれば，各個人の持つ把持特徴が各指の末節部に現れやすいということを示唆していると捉えることができる．すなわち，末節領域から各指の把持力の強度や方向等を数値データとして抽出し特徴量とすることにより，各ユーザ固有の把持に関する情報を抽出可能であると考えられる．なお，上述の知見については文献[10]でも指摘されていたものの，多人数の把持体データを用いた検討はなされていなかった．本実験の結果は文献[10]の知見を裏付けるものとなったと考えられる．



(a) 把持体の展開図



(b) 把持体形状の分散分布

図 3.4: 予備実験の結果

第4章

ポリゴンクラスタリングによる末節領域抽出

ここでは3章にて得られた知見に基づいて、握りやすさを表す特徴量となる領域（指の末節領域）を抽出する。指の末節領域抽出法については、文献[10]でも紹介されている。しかしながら、その抽出手法は課題点が多く、抽出精度も十分ではなかった。本章では、従来手法の問題点について指摘するとともに新しいアプローチでの末節領域抽出法を提案する。

4.1 従来法の課題点

図4.1に、従来法における各指の末節領域を抽出するアルゴリズムの概要を示す。従来法は、抽出対象となる指の末節領域が楕円領域となるという仮定のもと、楕円近似アルゴリズムを用いて末節領域の抽出を試みている。ここではまず、レイトレーシング法を用いて我杯の三次元モデルの側面を二次元画像に変換する[12]。得られた2次元画像（図4.2(a)）は3章における図3.4(a)と同様のものであり、 r の値が各画素の濃度値に対応している。次に、得られた二次元画像に対して微分フィルタを用いて各指の末節領域の一部を検出し、最小二乗法を用いた楕円近似アルゴリズムにより末節領域の輪郭を抽出する。図4.2(b)に、従来法を用いた抽出結果の一例を示す。図中赤色・緑色部分は微分フィルタによって抽出された末節領域の一部を、黄色のラインは楕円近似アルゴリズムによって抽出された末節領域を示している。図から分かるように、末節領域の一部のみが末節領域として抽出されているのがわかる。実際、抽出領域から把持力の強度や把持力方向を得るためには、図4.2(c)の黄色い点線で囲まれたような領域、すなわち末節領域の中心を含む領域を構成するポリゴンの位置情報や方向ベクトルが必要となる。しかしながら、図4.2(b)では、その領域を適切に抽出できていない。このようなケースについては、抽出に失敗した領域を全て手動で補正した後、補正された領域から特徴抽出を行わなければならない。

また従来法では、三次元モデルの側面を二次元画像に展開する際に、杯の形状を考慮

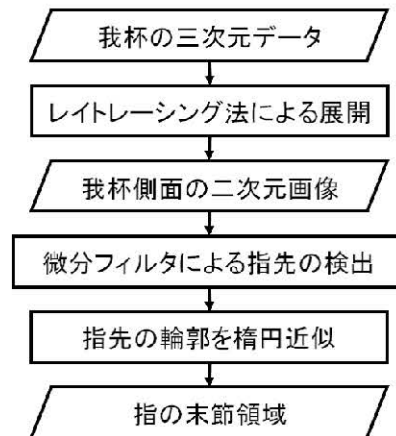


図 4.1: 従来手法の流れ

していない．現在，製造されている我杯は杯の中央部に大きなくびれが存在するため，杯の形状を考慮しなければ末節領域の輪郭情報が欠落してしまう可能性が高い．特に，末節領域の凹凸度の偏差が少ない把持体の場合についてはその傾向は顕著となり，微分フィルタにより末節領域の輪郭を正しく検出することが困難となると考えられる．また，象られた指の末節領域の中には，楕円領域に沿わない形状をしている例も存在する．そのため，これらのケースについては従来法を適用することは難しい．

4.2 提案手法

本研究では，従来法の持つ問題点を解決するために，杯のくびれを考慮した把持体側面の深度評価法を提案する．さらに，そこから把持に関する特徴量が含まれる領域を抽出するために，把持体を構成するポリゴンの位置情報と末節領域の形状特徴を用いた領域抽出法を提案する．

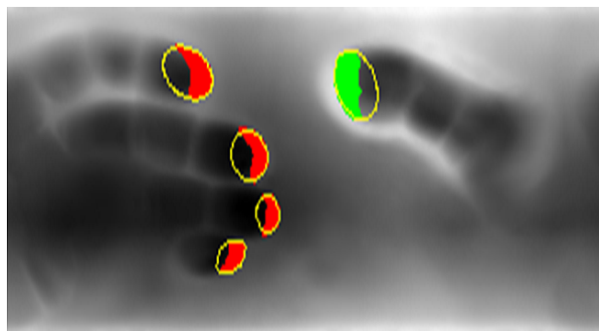
4.2.1 杯に象られた握り型の凹凸度評価

先にも述べたように，現在製造されている我杯は完全な円筒形ではなく杯の中央に大きなくびれが存在する．そのため，三次元ポリゴンデータから得られるポリゴンの座標情報から実際にユーザが握った型のみを抽出するには，杯の持つ形状も考慮する必要がある．そこで本手法ではまず，以下に示す近似式を用いた重回帰分析を用いて象り前の印象材表面の形状を推定する [13][14] ．

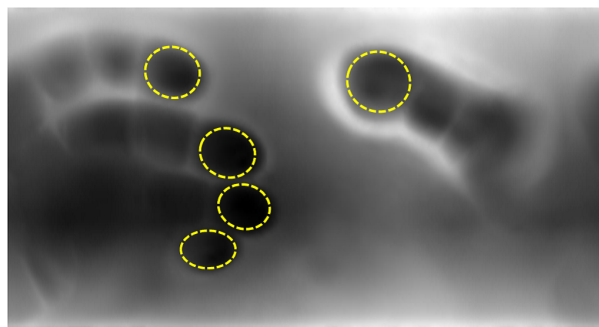
図 4.3 に，我杯を $x - y$ 平面に対して平行な面で切った場合の断面図（一例）を示す．図中 $r(\theta, z)$ は，杯の中心軸（ z 軸）からポリゴンまでの距離を示している．図から分かるように，杯の側面には握り型がかたどられた凹凸のある領域が存在するため，これらの



(a) 側面展開画像



(b) 抽出された末節領域



(c) 特徴抽出に必要な領域

図 4.2: 従来研究の処理結果

領域を除外して重回帰分析を行う必要がある．なお，粘土面の推定方法として，何も象られていない粘土を予めスキャンしてモデルを作成する方法も考えられる．しかしながら，粘土の塗布作業は手作業による部分も多いため，各象りキットによる形状の分散も大きい．そのためここでは，象りによって凹凸ができていない面を選択し，その部分のみを用いて杯側面の形状を推定することとした．ここではまず，3.2節で得られた全ユーザ

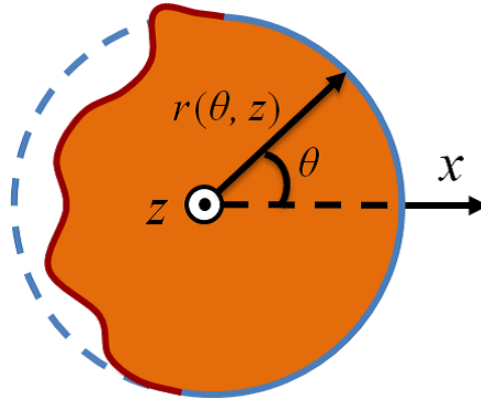


図 4.3: 我杯側面の断面図

(149 名) の把持形状の分散分布 (図 3.4(b)) において, 一定しきい値以上の分散を持つ領域 (握り領域である確率の高い領域) を除外する. 次に, 図 4.4 のように我杯の三次元モデルを z 軸方向の微少区間 dz の長さで区切り, n 層目に含まれるポリゴンの $r(\theta, z)$ の平均値 $\bar{r}_n(\theta, z)$ を層ごとに求める. なお, 既に除外した領域のポリゴンの $r(\theta, z)$ は計算に含めないこととする. 本研究では, dz の値は 3.2 節で用いたものと同じものを使用した. そして, 各層における $\bar{r}_n(\theta, z)$ とその層に含まれるポリゴンの $r(\theta, z)$ を比較し, 一定しきい値以上の差を持つ領域を更に除外する. 以上の処理の後, 除外されずに残った領域を印象材の形状データとして重回帰分析を行い, 印象材表面の近似式

$$R_{ref}(z) = az^4 + bz^3 + cz^2 + dz + e \quad (4.1)$$

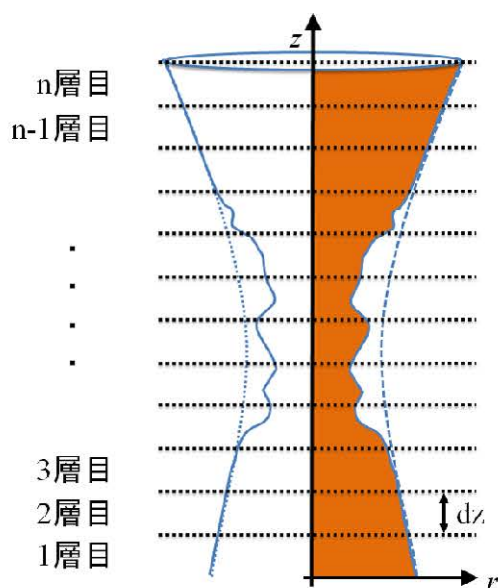
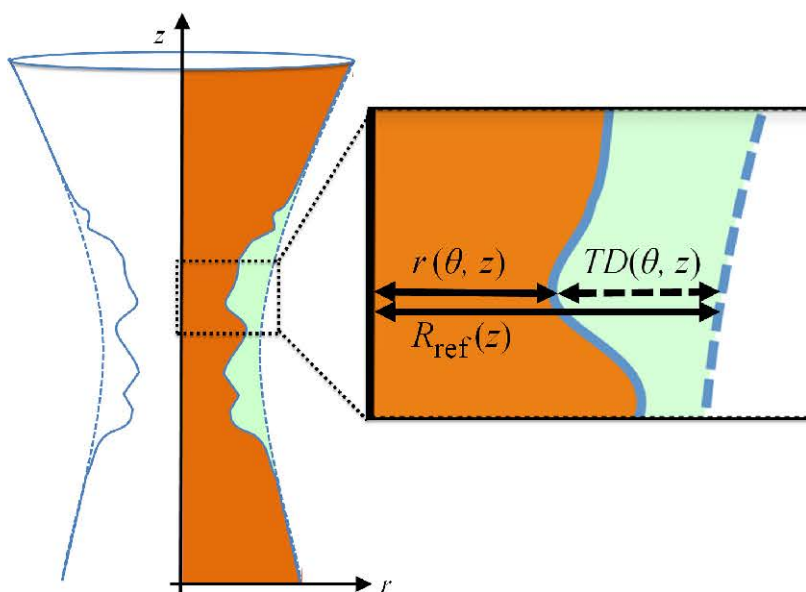
を求める. 上式において, $R_{ref}(z)$ はある高さ z における印象材の半径, すなわち杯の中心軸から印象材表面までの距離である. なお本研究では, 印象材表面の形状が単純な放物線でないことを考慮して, 近似関数に 4 次関数を用いることとした. 上述の (4.1) 式が決まれば杯の形状を考慮した深度値, すなわち象りによって形成された深さの分布 $TD(\theta, z)$ は,

$$TD(\theta, z) = R_{ref}(z) - r(\theta, z) \quad (4.2)$$

により求めることができる (図 4.5). なお本論文では, $TD(\theta, z)$ を深度値と呼ぶこととする.

4.2.2 クラスタリングによる凹面領域の抽出

通常, 我杯に象られた握り型は, 凹面形状をしているという特徴を持っている. 特に指の末節領域はその傾向が強いため, その特徴を利用して指の末節領域とその他の領域を区別することは容易であると考えられる. そこで本研究では, 指の末節領域の凹面形

図 4.4: z 軸上での分割図 4.5: 深度評価値 $TD(\theta, z)$

状に着目した抽出法を提案する．提案法では，一つの凹面領域を構成するポリゴン群を一つのクラスタとみなして分類することにより，把持体を構成するポリゴン群から末節領域を抽出する．表 4.1 に本手法におけるクラスタリングの手順を示す．

まず，クラスタリングの第一段階として，把持体を構成する全てのポリゴンを深度値の大きさに基づいてソートする．ここで，把持体を構成するポリゴンの中で最も大きい

表 4.1: クラスタリングの手順

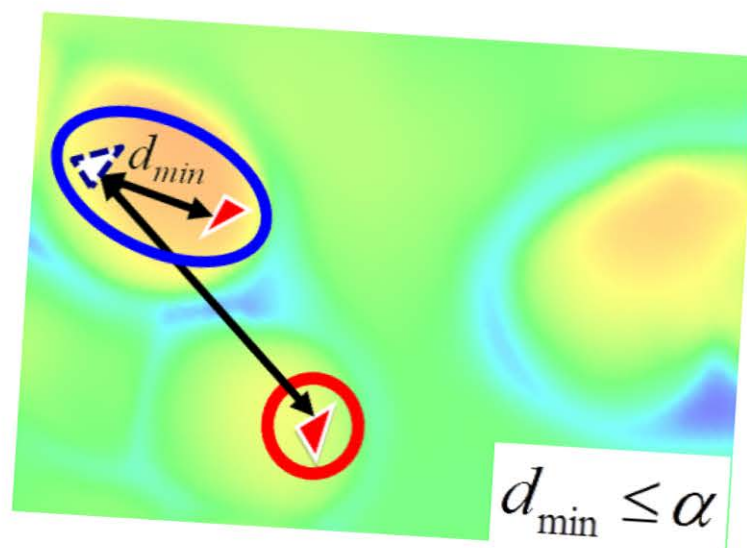
STEP1	ポリゴンデータの深度評価を行い，深度順に整列する． 最も深度値の大きいポリゴンを第一の凹面領域クラスタに分類する．
STEP2	未分類かつ最も深度値の大きいポリゴンと分類済みのポリゴンの 最短距離 d_{\min} を求める．
STEP3	その未分類のポリゴンは，以下の条件式により分類する． if $d_{\min} \leq \alpha$: 最短距離となった分類済みのポリゴンと 同じ凹面領域クラスタに分類． if $d_{\min} > \alpha$: 新たな凹面領域クラスタに分類． (α : 事前に求めた指と指の間隔の最短距離)
STEP4	すべてのポリゴンを分類するまで，STEP2 と STEP3 を繰り返す．

深度値を持つポリゴン，すなわち最も窪んだ部分に位置するポリゴンは，凹面領域を構成するポリゴンである可能性が最も高い．そのため，このポリゴンは凹面領域クラスタの要素とする．

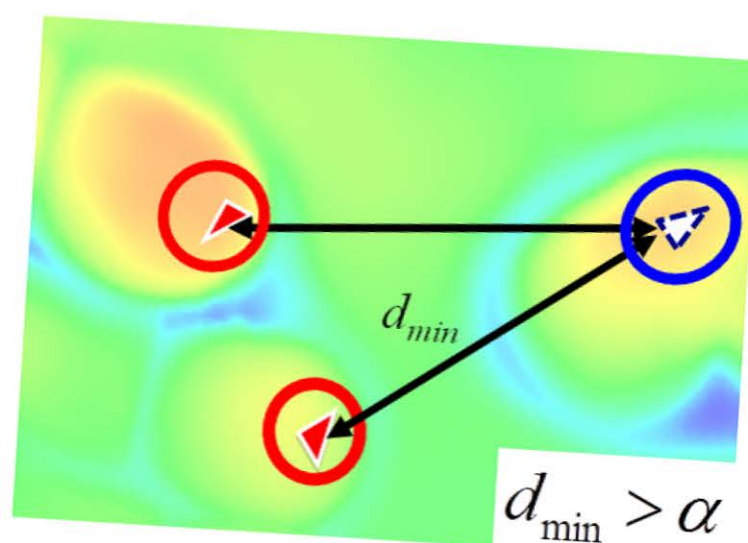
次に STEP2 では，未分類かつ最も深度値が大きいポリゴンと各クラスタ内の全てのポリゴンとの距離を計算し，当該ポリゴンと各クラスタ内のポリゴンの最小距離 d_{\min} を求める．得られた d_{\min} としきい値 α を比較し， d_{\min} が α 以下となった場合，最小距離となったポリゴンが属するクラスタに当該ポリゴンを分類する（STEP3）．図 4.6 に，STEP3 で行うしきい値判別の概要を示す．図中の赤い三角形はクラスタに分類されたポリゴン，青い三角形は未分類のポリゴンを示している．本研究では，各ポリゴンの深度値に基づいてクラスタリングを行うため，未分類のポリゴンが分類済みのポリゴンと同じ凹面領域に属する場合，それらは互いに隣接するため d_{\min} は非常に小さい値となる（図 4.6(a)）．一方，未分類のポリゴンが新しい凹面領域を構成するポリゴンである場合，少なくともその距離は指と指の間隔以上の長さとなるため， d_{\min} は大きい値となる（図 4.6(b)）．以上の特徴を利用し，提案法では α の値を各指の末節領域中心点の二点間距離の最小距離とした．

これらの処理を，全てのポリゴンが分類されるまで繰り返し行うことにより，凹面を構成するポリゴンはその凹面領域の底に相当するものから順に抽出される．しかしながら，STEP4 が終了した時点では分類されたクラスタに末節領域ではないもの（第二関節から第一関節までの中節領域など）が含まれる．そのため提案法では，抽出された凹面

領域の位置関係を利用して末節領域の選択的に抽出する．図 4.7 に，把持体に象られた指の末節領域とその他の領域の位置関係を示す．図中の赤線で囲まれた領域は各指の末節領域を，青線で囲まれた領域はその他の領域を示している．図からも分かるように，各指の末節領域に該当する部分は，他の領域と比較して深度値が大きい傾向にあることがわかる．また，把持形状が象られたコップは，スキャニングの際に象られた末節領域が正面を向くように固定されているため，各指の末節領域は必ず円筒座標における $\theta = \pi$ 付近に存在することとなる．すなわち， $\theta = \pi$ 付近であり，かつ深度値の大きいクラスタを順次選択していくことにより，抽出した各凹面領域から指の末節領域をのみを取り出すことが可能となる．



(a) 同じ凹面領域クラスに分類される場合



(b) 新規の凹面領域クラスを生成する場合

図 4.6: d_{min} の値によるポリゴンの分類

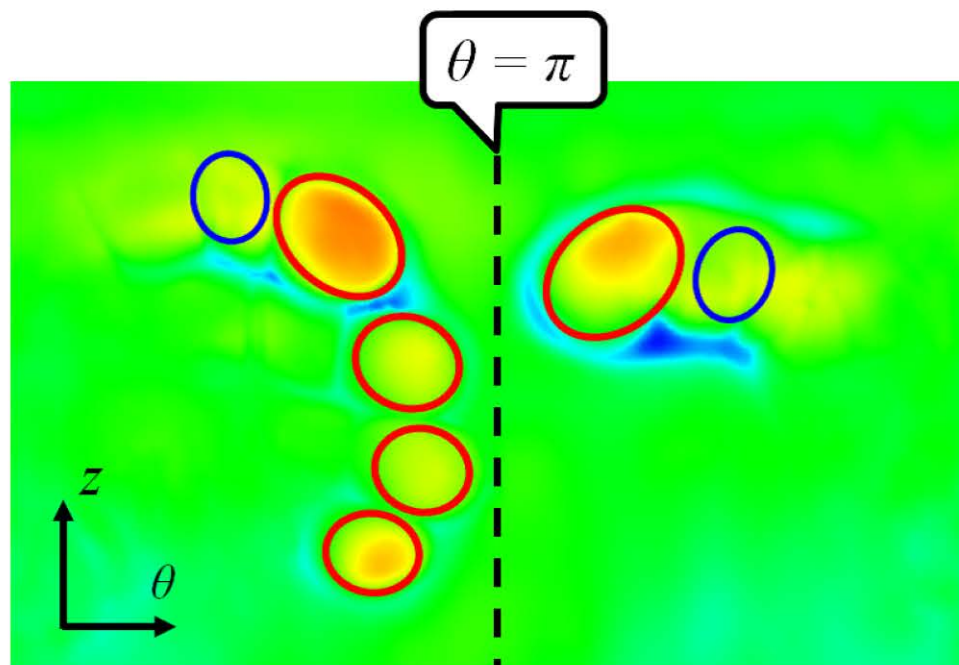


図 4.7: 末節領域とその他の凹面領域の位置関係

第5章

実験結果と考察

5.1 握り型の深度評価

図 5.1 に深度評価の結果（一例）を示す．本研究では，三次元モデルの表示に OpenGL とその拡張ライブラリ GLUT の関数を使用した [15][16]．図 5.1 の (a) は，杯の中心軸（ z 軸）から粘土面の距離 $r(\theta, z)$ の値（従来法）を，(b) は，提案法により得られた深度値 $TD(\theta, z)$ の分布を擬似カラー画像化した結果を示している．図からもわかるように，従来法では中指と人差し指の末節領域の $r(\theta, z)$ 値は小さく，他の領域と比較して強い力で握られているように見える．しかしながら，これは杯が持つ中央部のくびれにより，実際の深度より深く評価されている．一方，図 5.1 の (b) では，杯の形状を考慮しているため，(a) のように中指と人差し指の深度は深くない．また，(a) の場合では，比較的浅い深度と評価されていた人差し指部分が最も深く握られていることが明らかとなった．これらの結果は，実際の把持体側面の凹凸を精査した結果とも一致していた．

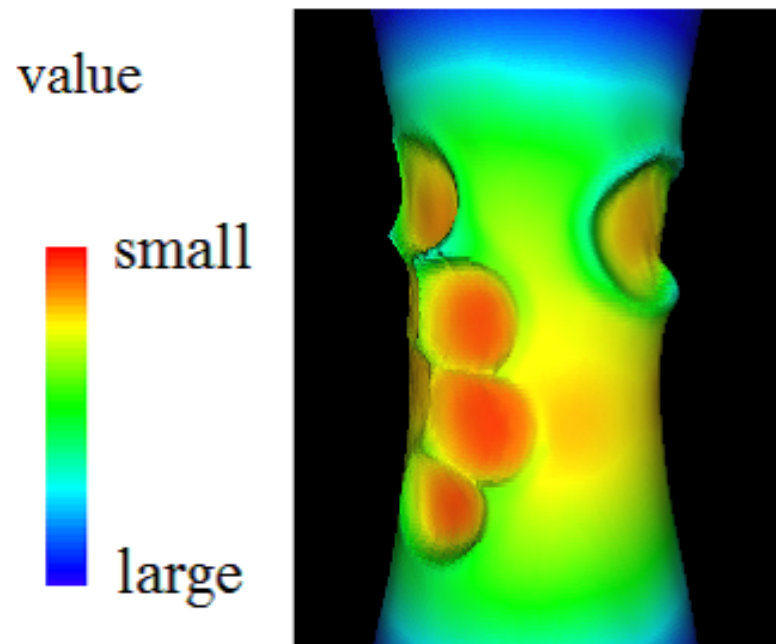
また従来法では，得られる深度値の分布が握り型が象られた位置に依存する．一方，提案法の場合は，握り型が把持体のどの部分に象られていても杯の形状による影響を排除した深度値の分布を得ることができるため，把持位置に依存することはない．そのため，各指間での形状の比較や各ユーザの把持形状の比較等が可能となった．

5.2 末節領域の抽出

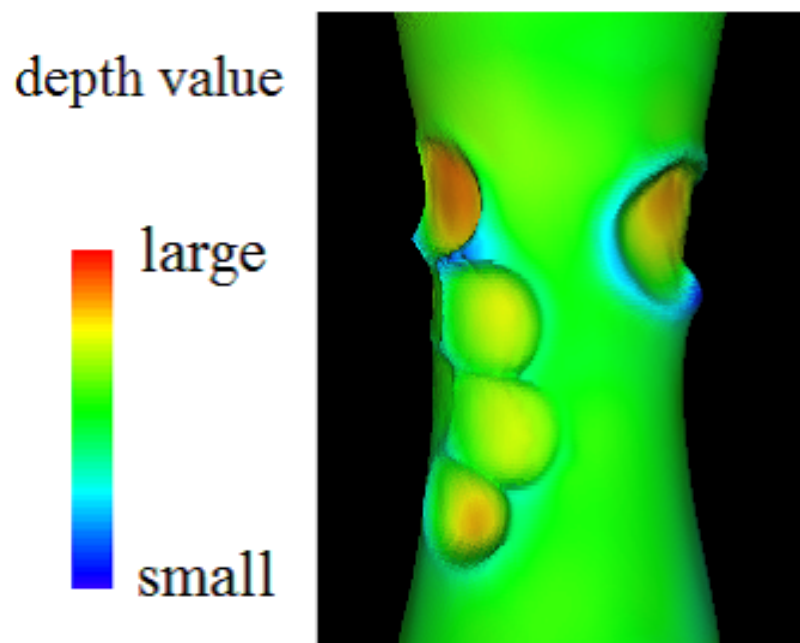
図 5.2 に，本手法により抽出した指の末節領域の一例を示す．図において把持体中の白い領域が抽出された末節領域を示している．また，図 5.2(a) と (b) は抽出成功例を，(c) と (d) は失敗例である．本論文では末節領域の抽出率を下記の式を用いて算出した．

$$\text{抽出率} = \frac{\text{抽出に成功した領域の数}}{5[\text{finger/person}] * 149[\text{person}]} [\%] \quad (5.1)$$

実験の結果，149 名の把持体データ（745 本の指）から 671 本の指の末節領域の抽出に



(a) 従来法による深度値の分布 ($r(\theta, z)$ の値)



(b) 提案法による深度値の分布 ($TD(\theta, z)$ の値)

図 5.1: 各種法により得られた深度値の分布 (一例)

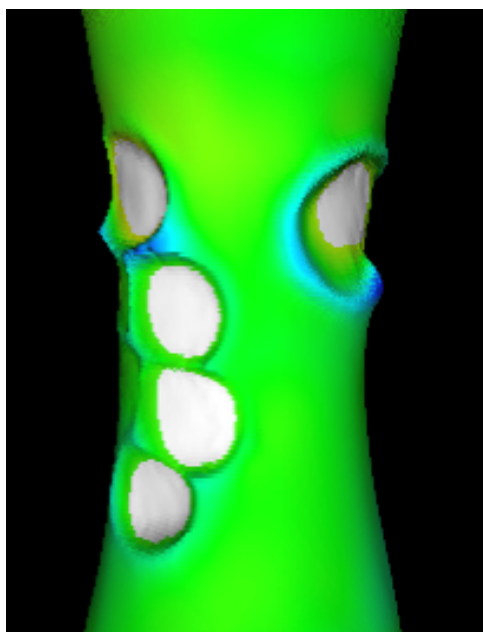
成功し、90.1%の抽出率が得られた。提案法は、前処理として重回帰分析を用いて象り前の印象材の形状推定を行った後、それらを考慮した深度評価を行っているため、握り型領域の輪郭に凹凸の偏差が少ない把持体からも指の末節領域を抽出することが可能となった。また、従来法のように末節領域を楕円と仮定せずにポリゴンの位置情報を用いて末節領域を抽出するため、各ユーザの指の大きさや形の情報を損なうことなく抽出することが可能となった。

なお本実験では、各指の末節領域の中心付近の領域が抽出できていれば抽出成功としている。これは、本研究における抽出対象となっている領域が印象材により象られた領域であるため、データの中には指の末節領域と第一関節の境界線が曖昧であるものや、ユーザの把持力が弱いために末節領域の輪郭が不明瞭なケースも少なからず存在したためである。このような理由から本論文では、上述のような判定基準を設けるために被験者（大学生）12名に対して末節領域をトレースするアンケート実験を事前に実施し、人による抽出結果の傾向とばらつきについて検討している。アンケート調査では、我杯の側面を展開した画像7枚を用いて画像中の末節領域をトレースしてもらい、その位置や形状の分散などについて検討した。その結果、トレース領域の輪郭線は人によって大きく異なるため、粘土に象られた指の末節領域の正解領域を一意に決定することは困難であることが明らかとなった。それに対し、トレースした領域の中心付近の領域は各被験者間で一致していた。これら指の末節領域の中心付近の領域は、把持力ベクトル等の把持特徴を抽出するために必要な領域であるため、ここでは上述のような判定基準を用いた。

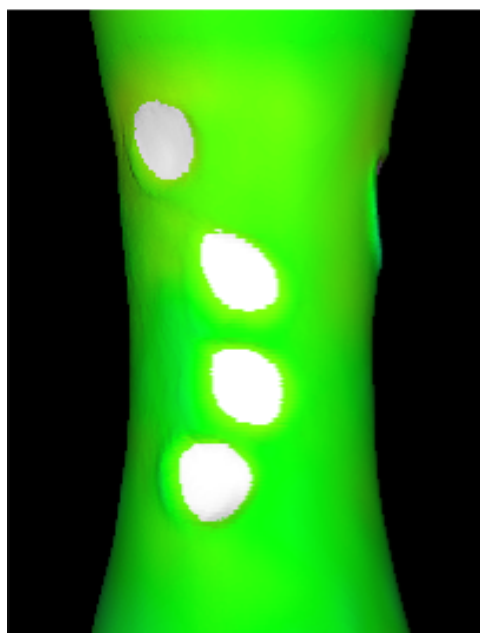
5.3 本手法の問題点

図 5.2(c)(d) に、末節領域の抽出に失敗した例を示す。図 5.2(c) は、中指の末節領域の抽出に失敗した例である。この例では、中指の把持力が非常に弱かったために中指の末節領域に握り型（凹面の形状）が象られていなかった。本手法は、指の末節領域が凹面形状であることを前提としたものである。そのため、この例では末節領域凹面の底に相当するポリゴンを検出できなかったと考えられる。しかしながら、把持力の低下した高齢者や手に障害を持つ人の場合、一部の末節領域が凹面形状でないケースが多い。今後は、ハンディキャップを持つ人の把持特徴を利用し、抽出困難な末節領域を事前に予測する、あるいは抽出に成功している末節領域の位置関係から抽出できなかった末節領域の位置を推定する等の工夫が必要になると考えられる。

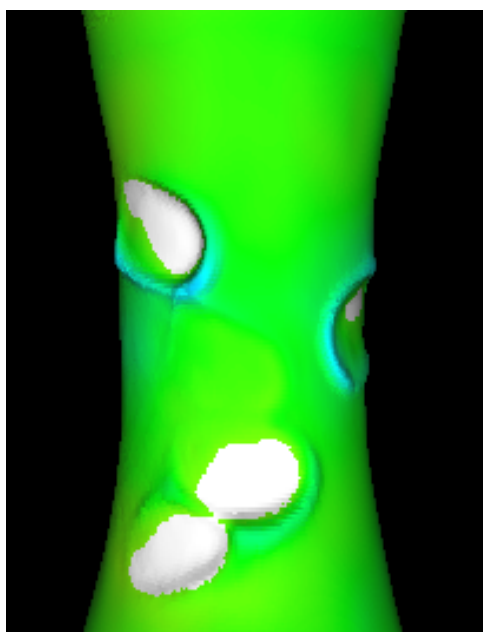
また図 5.2(d) は、親指の指の末節領域の抽出ではなく第一関節の領域を誤って抽出した例である。このような失敗例が生じた理由としては、ユーザが印象材に握り型を象る際に親指の側面で粘土を握ったため、凹面形状が第一関節領域によって象られてしまったことが原因であると考えられる。ただ、このような結果は当該ユーザが持つ把持に関する特徴を示しているという考え方もある。今後は、抽出対象を指の末節領域に限定せず、その他の節領域や骨格線の抽出などについても検討する必要があると思われる。



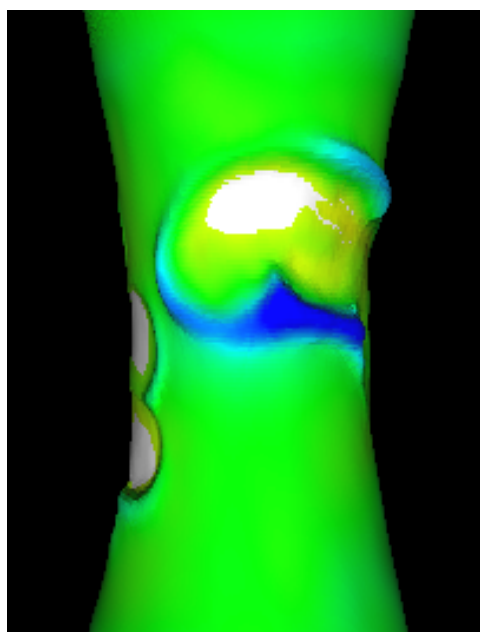
(a) 成功例 1



(b) 成功例 2



(c) 失敗例 1



(d) 失敗例 2

図 5.2: 抽出結果

第6章

おわりに

6.1 本論文のまとめ

本研究では、把持部の形状デザインに利用する数理モデルを導出するため、把持体の三次元ポリゴンデータを対象とした分析手法について検討した。本論文では、ユーザの把持領域の中でその形状に個人差が生じる領域を決定するため、三次元ポリゴンデータに含まれる把持形状の分散分析を行った。その結果、指の末節部によって象られた指の末節領域がユーザの握り形状の個性を反映する領域であることが明らかとなった。また、円筒座標変換と重回帰分析を用いた把持体側面の深度評価法と凹面形状に着目した指の末節領域の抽出手法を提案した。149名の三次元ポリゴンデータに提案手法を適用した結果、90.1%の抽出率が得られた。

6.2 今後の課題

今後は、抽出できなかった特異な把持形状を持つ一部ユーザの指の末節領域の形状特徴を分析し、抽出アルゴリズムの改善を行う必要がある。また、提案手法を用いて、蓄積されている多量の把持体データから指の末節領域とその把持特徴量を抽出し、各ユーザのプロファイルと握りやすさの関係性を結びつけるための統計的な分析が必要である。本研究の最終目標である握りやすさの数理モデル構築のためには、本論文で抽出した末節領域以外に加えて他の領域を抽出する方法、あるいは把持力ベクトル以外の把持特徴量の抽出方法に関する検討が必要である。また、人の手の指の形状や把持特徴量について考察するためには、医学や生物学分野の知識が必要になる。そのため今後は、それらの分野の観点からも検討を進め、握りやすさの数理モデル化に有用な特徴量を決定する必要があると考えられる。

謝辞

本研究の遂行および修士論文の作成にあたり，丁寧なご指導とご助言を頂きました本学工学研究科電気電子工学専攻の高瀬治彦准教授，川中普晴助教，本学地域イノベーション学研究科の鶴岡信治教授に感謝致します．また貴重な時間をさいて本論文を査読していただいた本学工学研究科電気電子工学専攻の北英彦准教授に深く感謝致します．そして，本研究の共同研究者であり，実験試料の提供や研究方針の検討に協力していただきました（株）バンザイ・ファクトリー代表取締役の高橋和良様，鈴鹿医療科学大学医療情報工学科の山本皓二教授に深く感謝いたします．また，日頃お世話になった情報処理研究室の皆様に感謝致します．

最後となりましたが，本論文をまとめるにあたり，ご助言，ご討論，その他お世話になりました全ての方々に感謝致します．

参考文献

- [1] 株式会社バンザイ・ファクトリー ホームページ: <http://www.sagar.jp/>
- [2] 長谷川辰雄, 小林正信, 高橋和良他, “唯一形状製品(我杯・カタノブ)の生産技術高度化に関する研究開発”, 岩手県工業技術センター研究報告, 15(5), pp.18-21, 2008
- [3] Official Web Site of the Center for Universal Design, NC State Univ., <http://www.ncsu.edu/project/design-projects/udi/>
- [4] ユニバーサルデザイン研究会編, 人間工学とユニバーサルデザイン, 日本工業, 2008
- [5] A. Mastalerz, E. Nowak, I. Palczewska and E.Kalka, “Maximal Grip Force During Holding a Cylindrical Handle with Different Diameters”, Human Movement, Vol.10, No.1, pp.26-30, 2009
- [6] Na Jin Seo and Thomas J. Armstrong, “Investigation of Grip Force, Normal Force, Contact Area, Hand Size, and Handle Size for Cylindrical Handles, Human Factors”, The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, Vol.50, No.5, pp.734-744, 2008
- [7] Y. K. Kong, B. D. Lowe, “Optimal Cylindrical Diameter for Grip Force Tasks”, International Journal of Industrial Ergonomics, Vol.35, No.6, pp.495-507, 2005
- [8] T. Yakou, K. Yamamoto, M. Koyama and K. Hyodo, “Sensory Evaluation of Grip Using Cylindrical Objects”, International Journal of Japan Society of Mechanical Engineers (Series C), Vol.40, No.4, pp.730-735, 1997
- [9] Cally S. Edgren, Robert G. Radwin and Curtis B. Irwin, “Grip Force Vectors for Varying Handle Diameters and Hand Sizes”, The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society Summer, Vol.46, pp.244-251, 2004
- [10] H. Kawanaka, K. Yamamoto, K. Takahashi, K. Suzuki, “Feature Extraction and Visualization from 3D Polygon Data for Determining a More Comfortable Grip Form—Awareness of Comfortability—”, International Journal of Innovative Computing Information and Control, Vol.7, No.5(B), pp.3007-3018, 2011

- [11] Official Web Page of 3D Systems Corporation, <http://www.3dsystems.com/>
- [12] Peter Shirley, R. Keith Morley, Realistic Ray Tracing (Second Edition), A K Peters Ltd, 2008
- [13] David G. Kleinbaum, Lawrence L. Kupper, Keith E. Muller, Applied regression analysis and other multivariable methods, Duxbury Pr, 2007
- [14] 山口和範, 高橋淳一, 竹内光悦, 図解よくわかる多変量解析の基本と仕組み, 秀和システム, 2006
- [15] OpenGL, <http://www.opengl.org/>
- [16] 床井浩平, GLUT による OpenGL 入門, 工学社, 2005

発表論文リスト

国際会議

(1) T. Hirata, K. Takahashi, H. Kawanaka, K. Yamamoto, H. Takase, S. Tsuruoka, "A Study on Extraction Method of Distal Phalanx Regions from 3D Polygon Data for Determining a More Comfortable Grip Form", Proc. of the 12th Intl. Symposium on Advanced Intelligent Systems ISIS2011, pp.184-187, 2011

(2) T. Hirata, K. Takahashi, H. Kawanaka, K. Yamamoto, H. Takase, S. Tsuruoka, "Extraction Method of Distal Phalanx Regions from 3D Polygon Data of " Waga-Hai " for Determining Comfortable Grip Form", Proc. of Intl. Symposium for Sustainability by Engineering at MIUISSEMU2011, pp.267-270, 2011

国内会議

(1) 平田知也, 川中普晴, 山本皓二, 高瀬治彦, 鶴岡信治, "「握りやすさ」の指標化を目的とした3次元把持体データからの末節領域抽出法に関する一考察", 平成22年度電気関係学会東海支部連合大会 講演論文集, N3-6, 2010

(2) 太田諒, 平田知也, 山本皓二, 川中普晴, "把持力分析のための3次元把持体データからの末節領域抽出法に関する一検討", 平成22年度日本生体医工学会東海支部大会, p.21, 2010

(3) 平田知也, 高橋和良, 川中普晴, 山本皓二, 高瀬治彦, 鶴岡信治, "「握り易さ」の定量化を目的とした3次元把持体データと把持特徴量の関係に関する一考察", 平成23年度電気関係学会東海支部連合大会 予稿集, D3-3, 2011

(4) 平田知也, 高橋和良, 川中普晴, 山本皓二, 高瀬治彦, 鶴岡信治, "三次元把持体データからの握り型抽出とCADデザイン応用への一試み" 平成23年度日本生体医工学会東海支部学術集会 予稿集, p.54, 2011

(5) 高橋和良, 平田知也, 川中普晴, 山本皓二, 高瀬治彦, 鶴岡信治, "他人数の3次元

把持体データを用いた把持傾向分析に関する一考察～把持体形状設計のための指針 構築を目指して～ ”, 日本人間工学会東海支部 2011 年研究大会論文集, pp.40-41, 2011