

修士論文

任意姿勢の人体点群データからの表面再構成

指導教官 美濃 導彦 教授

京都大学大学院情報学研究科
修士課程知能情報学専攻

毛呂 功

平成14年2月5日

任意姿勢の人体点群データからの表面再構成

毛呂 功

内容梗概

レーザーレンジファインダ等で獲得される任意姿勢の人体形状の点群データから表面を再構成する手法を提案する．本手法では点群データから姿勢を推定し，胸部・上腕などの体節ごとに表面を作成する．まず，点群データに対して全体を覆うようなボリュームデータを構築する．このボリュームデータに対して，円筒などの幾何形状の組み合わせで構築された人体モデルをマッチングすることで人体の姿勢を推定する．その後，もとの点群データを用いてマッチング結果を調整する．この結果を利用して点群データを体節ごとに分類する．二次元ドロネー網を用いて分類した体節ごとに表面を構成し，それらを組み合わせることによって人体の表面を再構成する．実験では，シミュレーションデータに対して姿勢を推定できることを示した．また点群を分類することによって妥当な表面を再構成できることを示した．また，実際の計測データに対しても表面を再構成することができた．

Surface Reconstruction from Point Cloud of Human Body in Arbitrary Postures

Isao MORO

Abstract

We propose a method for surface reconstruction from point cloud of human body in arbitrary postures. In this method, we make volume data from the point cloud. Then a human model is matched to the volume data and human body posture is estimated. Point cloud is classified into parts by the estimated posture. For each classified point cloud, surface is reconstructed with 2D delaunay triangulation. Then whole body surface is reconstructed by collecting surfaces of parts. In our experiments, postures are estimated and surfaces are reconstructed from synthetic data and real data.

任意姿勢の人体点群データからの表面再構成

目次

第 1 章	緒論	1
第 2 章	点群データからの人体表面再構成	4
2.1	表面再構成の問題点と解決手法	4
2.2	表面再構成のための姿勢推定	5
2.3	手法の概要	6
2.4	入力データ	6
第 3 章	モデルマッチングによる姿勢推定	8
3.1	人体モデル	8
3.2	ボリウムデータ(ボクセル)の構築	10
3.3	ボリウムデータと人体モデルのマッチング	12
3.4	点群を利用したマッチング精度の向上	16
第 4 章	点群の分類と表面再構成	17
4.1	点群の分類	17
4.2	表面再構成	17
4.2.1	射影する平面の決定	17
4.2.2	円筒面への射影	18
4.2.3	半球面への射影	18
4.2.4	二次元ドロネー網	18
4.2.5	ドロネー網の作成法	21
4.2.6	ドロネー網を用いた体節の表面再構成	22
4.3	妥当な表面を構成するための点群の分類	24
4.4	複数の体節の候補となる点の分類	26
4.4.1	関節で接続された二つの体節の候補となる点の分類	27
4.4.2	関節で接続されていない二つの体節の候補となる点の 分類	27
4.4.3	三つ以上の体節の候補となる点の分類	28
第 5 章	実験と評価	29

5.1	シミュレーションデータ	29
5.2	姿勢推定実験	31
5.3	表面再構成実験	37
5.4	欠損割合と姿勢推定精度の評価	41
5.5	実計測データに対する実験	43
5.6	欠損部分の補完に関する考察	46
第6章	結論	47
	付録	
A.1	姿勢推定における誤差	
	謝辞	
	参考文献	

第1章 緒論

計算機の高速化が飛躍的に進む昨今，コンピュータグラフィックスの需要はますます高まっている．特に個人の形状的特徴を反映した人体を仮想的に計算機上に表現することはテレビや映画をはじめとしたエンターテインメントのみならず，衣服設計など様々な分野からその発展が望まれている．

個人の形状を取得するには，何らかの方法で実際に計測するのがもっとも有効である．レーザーレンジファインダ等の三次元形状計測装置の登場により，実物体の形状を三次元形状データとして計算機に取り込むことが可能になった．

計測によって獲得されるデータは装置によって様々であるが，一般的には対象の表面の離散的な三次元座標値の集合（点群データ）である．このため，人体形状を表示あるいは設計等に利用するためにはこれらのデータから表面を再構成することが必要である．装置によっては点群データ以外に輝度データなどが得られる場合もあるが，データの汎用性を考慮すると，これらのうち点群データのみを用いることが有効である．点群データのみを利用することで計測装置の相違を考慮することなくデータを扱うことができる．

本研究では人体を計測して得られた点群データから表面を再構成する手法の確立を目指す．

点群データから表面を再構成する研究はこれまでも行われてきた．三次元ドロネー網を用いたもの [1][2] や曲面フィッティングによって表面を再構成するもの [3]，ボリュームデータを構築してそこから表面を再構成するもの [4] などがある．これらの手法はいずれも人体に限らず一般的な点群データを対象に研究されてきた．しかし，これらの手法はもとの表面が凹面を構成するような領域に対して脆弱であった．このため，これらの手法を用いて人体を計測したデータに対して表面を再構成すると，腋下や股下をうめるような表面を構成してしまい，もとの人体の形状を十分にあらわす表面を再構成できなかった．

そこで本手法では，人体の構造的特徴を利用して表面を構成することで，腋下や股下に余分な表面を構成する問題の解決を試みる．人体は大まかに言って頭部・体幹部と左右の上腕・前腕・大腿・下腿といった体節に分類することが出来る．そこで点群データを体節に分類し，体節ごとに表面を構成することで，腋下や股下をうめる余分な表面のない表面を構成する．

体節ごとの表面再構成には二次元射影及び二次元ドロネー網を用いる [5]．造

作の複雑な頭部や手先・足先を除いて、一つの体節はおよそ一つの円筒形とみなすことが出来る。そこで点群を円筒面などの二次元平面に射影し、射影した平面上で二次元ドロネー網を作成して点の接続関係を構築する。ドロネー網によって構築された接続関係をもとの点群に当てはめることによって表面とする。

体節ごとに点群を二次元平面に射影して表面を構成することで、データが欠損している部分についても、本来つながっていない体節をつなぐ表面を構成することはない。体節ごとに構成した表面を組み合わせることで全身の表面を再構成する。

本研究では、データが欠損している部分に対して、推定処理などでデータを補完することを行わない。これは、用途によっては推定処理などの結果を用いて補完することが望ましくない場合があるからである。欠損部分に対しては二次元ドロネー網によって構築された単一の平面をもって表面とするにとどめる。

ところで、現在人体形状の計測は主に直立姿勢を対象に行われている。これは、現在の計測装置では計測に時間がかかるため、計測の間直立以外の姿勢を維持することが困難であるからである。しかし、人体は姿勢の変化にともなう筋肉の変形等によって形状が変化するため、衣服設計などに用いるには直立姿勢のみでの計測では不十分である。今後計測装置の発展に伴い、様々な姿勢の人体形状の計測と、計測された点群データから表面を再構成する必要が出てくることが予想される。

そこで本研究では任意姿勢の人体を対象とした表面の再構成手法の確立を目指す。

任意姿勢の人体形状を計測した点群データから表面を再構成する場合にも点群を体節に分類し、体節ごとに表面を構成することで腋下や股下などの問題を解決できる。任意姿勢の人体形状を扱う上で、手作業で点群を体節に分類することは煩雑な作業であるため、この作業を自動化することは重要である。体節への分類を自動化するためには、体節の位置や向き、すなわち人体の姿勢を点群データから推定する必要がある。

また、人体を計測したデータを扱う以上、オクルージョン（自己隠蔽）によるデータの欠損は避けることができない。これは、どのような計測装置を用いても、限られた方向からの計測ですべての表面を計測することは非常に困難であるからである。そこで、データに欠損があった場合にも姿勢を推定できる手法を確立することが必要である。

本手法ではこの問題をポリウムデータとモデルマッチングを用いることで解決する。まず点群データに対してポリウムデータを構築する。このポリウムデータに対して人体モデルをマッチングすることで欠損に影響されることなく、大まかな姿勢を推定することができる。さらに点群データを利用して各体節の位置、角度を調整することで、より精密に姿勢を推定する。姿勢推定の結果から点群データを各体節に分類し、体節ごとに表面を再構成することで余分な表面を構成することなく全身の表面を再構成する。

本稿の構成は以下のとおりである。第2章では本研究で扱う問題について整理し、その解決手法について述べる。第3章では点群データに対してポリウムデータを構築し、モデルをマッチングすることによって姿勢を推定する手法について説明する。第4章では点群を体節に分類する手法について述べる。第5章で実験結果を示す。第6章で結論を述べる。

第2章 点群データからの人体表面再構成

本章では，任意姿勢の人体点群データから表面を再構成する上での問題点を整理し，それらの解決手法について述べる．まず2.1では，点群から表面を再構成する問題点について述べ，その解決手法について説明する．2.2では，表面再構成のための姿勢推定について述べる．2.3では，本手法の概要を説明し，2.4では，本手法で扱う点群データについて説明する．

2.1 表面再構成の問題点と解決手法

本研究では，人体形状の点群データに対して点の接続関係を構築し，三次元パッチモデルを構成することをもって，表面の再構成とする．

三次元空間中の点群データから表面を作成する際に問題となるのが，凹面を構成する領域である．Amenta[1] や Fang[2] は三次元ドロネー網を用いて，Metaxas[3] は曲面フィッティングを用いて，松岡 [4] はボリュームを用いて点群から表面を構成する手法をそれぞれ提案している．しかし，これらの手法を用いて三次元空間中の点群データから表面を再構成すると，凹面領域を埋めるような余分な表面が構成され，凹面を十分に再現することができない(図2.1)．これは単純な点同士の距離や，ボリュームを作成することで推定した形状の情報のみを元に点の隣接関係を求めているからである．

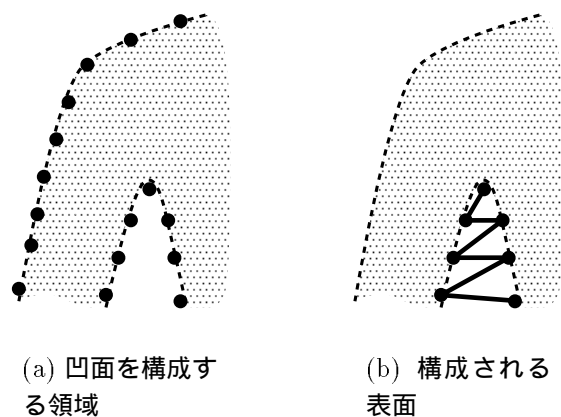


図2.1: 凹面領域と構成される表面

こうした凹面領域は人体形状においては関節付近に見られる．直立姿勢にお

ける腋下付近や股下付近，あるいは肘，膝関節を曲げた姿勢におけるそれらの関節の内側などである．従来の手法で人体形状の表面を再構成すると，腋下や股下を塞ぐような形の余分な表面を構成してしまう．

そこで，本手法では人体点群データを体節に分類し，体節ごとに表面を構成することでこの問題を解決する．人体を大きく分けて頭部・体幹部（胸部及び腰部）及び左右の上腕・前腕・大腿・下腿で構成されていると考える．点群をこれらの体節に分類し，体節ごとに表面を構成することによって，関節付近で発生していた凹面領域の問題を解決することができる．またデータの欠損が存在した場合にも，体節ごとに表面を構成することによって，本来存在しない，腋下や股下を塞ぐような余分な表面の構成を回避することができる．

本研究では，データが欠損している部分に対して，推定処理などで表面を補完することは行わず，欠損部分を単一の平面で表した上で，その扱いについて考察するにとどめる．また，造作の細かい頭部や手先，足先は全身を計測する装置からは十分なデータが得られないため，扱わないものとする．

2.2 表面再構成のための姿勢推定

人体を計測して獲得された点群データを手作業で体節に分類することは，作業が煩雑であり，誤りを防ぐことが難しい．そこで本手法では自動で点群データを体節に分類する手法を提案する．

点群を体節に分類するためには，どの体節がどの位置と向きに存在するか，つまり姿勢を推定する必要がある．本手法では各体節を円筒などで表した人体モデルを用意し，人体モデルを点群データにマッチングすることで姿勢を推定し，点群中の各点が属する体節を決定する．

点群データに対してモデルをマッチングする際には，点群の離散性が問題となる．点群中の各点はそれぞれ独立した座標値であり，隣接関係や物体の内外の情報などを持たない．また，多数の体節が関節によって接続された，非常に自由度の高い人体モデルと点群データとを直接マッチングすると，計算コストが高くなるだけでなく，解が一意に定まらないおそれがある．

そこで本手法では点群データからボリュームデータを構築し，はじめにこのボリュームデータと人体モデルとをマッチングする．計測によって獲得された点群が十分に密であれば，人体の内外の領域を推定することが可能である．点群が存在する領域をおよそ輪郭のある部分とみなし，輪郭で囲まれた部分を物

体の内部であると推定する．この推定をもとに点群データからポリウムデータを構築する．このポリウムデータと人体モデルとをマッチングすることによっておおまかな姿勢を推定する．

ポリウムデータと人体モデルとのマッチングの後，点群データを用いて推定された姿勢を細かく調整し，より精密な姿勢を推定する．

姿勢推定の結果を利用して点群を分類し，体節ごとに表面を構成することによって，腋下や股下などに余分な表面の無い表面再構成が可能となる．

2.3 手法の概要

本節では，点群データから姿勢を推定し，表面を再構成する流れを簡単に説明する．

ポリウムデータの構築 点群データからポリウムデータを構築し，観測された人体のおおまかな形状をポリウムデータであらわす．輪郭となるボクセルを点群から生成し，人体の内外を推定する．

ポリウムデータと人体モデルとのマッチング あらかじめ用意しておいた人体モデルと，点群から構築したポリウムデータとをモデルマッチングし，おおまかな姿勢を推定する．

点群データを用いたマッチング精度の向上 ポリウムデータを用いて姿勢推定した結果と，もとの点群データを比較し，人体モデルの位置・向き・大きさの調整を行うことで姿勢推定の精度を高める．

点群の分類 モデルマッチングの結果を利用して点群を体節に分類する．

表面再構成 体節ごとに点群を二次元平面に射影し，二次元ドロネー網を作成することによって表面を構成する．

2.4 入力データ

計測装置などを利用して人体形状の表面から多数サンプリングした三次元座標値の集合(以下，点群データ)を入力データとして想定する．装置によっては全身を一度に計測することが困難であり，複数の部分的な点群データが獲得される場合もあるが，本手法ではそれらを統合したデータを扱うものとする．点群データには，オクルージョン(自己隠蔽)による欠損があっても構わないとする．

座標軸は鉛直方向上向きを y 軸正方向とし， x 軸及び z 軸はそれぞれが直交す

るように設定する．原点は床面に設定する（図 2.2）．

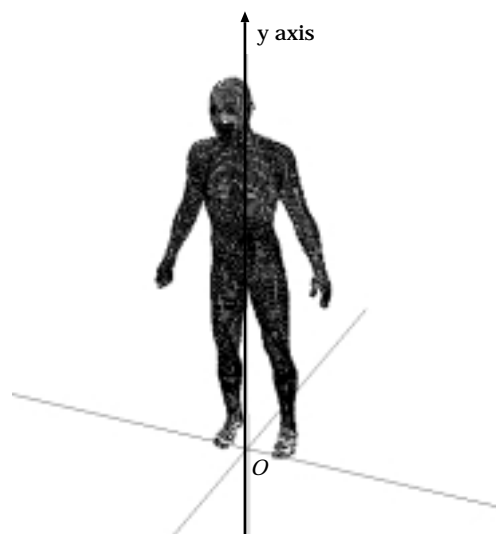


図 2.2: 入力データ

第3章 モデルマッチングによる姿勢推定

モデルマッチングを用いて点群データから姿勢を推定する手法について説明する。

シルエット画像やボリュームデータからモデルマッチングを用いて人体の姿勢を推定する手法はこれまでも提案されてきた [6][7]。しかし、点群データから姿勢を推定する手法は提案されていない。点群データは独立した三次元の座標値の集合でしかなく、隣接関係や物体の内外の情報などをもたないため、姿勢を推定することは困難であった。

本手法ではモデルマッチングによる点群データからの姿勢推定を、次の2つの処理で行う。

まず点群データからボリュームデータを作成し、はじめにこのボリュームデータと人体モデルとをマッチングする。次に点群データを用いて推定された姿勢を細かく調整することで、より精密な姿勢を推定する。

3.1 人体モデル

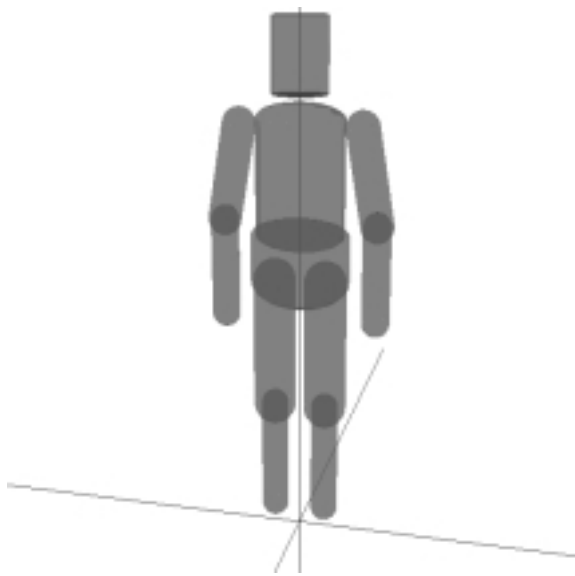
人体を頭部・体幹部と左右の上腕・前腕・大腿・下腿の10の体節に分け、体幹部をさらに胸部と腰部に分類する。それぞれの体節を円筒や半球、楕円筒などを組み合わせた立体で表し、それらを組み合わせることで人体モデルを構成する(図3.1(a))。それぞれの体節は関節とみなされる部分で接続され、関節を中心に回転する。また初期位置探索のため、体幹部に当たる胸部と腰部を覆う円筒モデルを用意する。各体節に対応する立体は次の通りである。

体幹部 円筒のみで構成される立体。長さ (length) 及び半径 (radius) のパラメータを持つ(図3.1(b))。

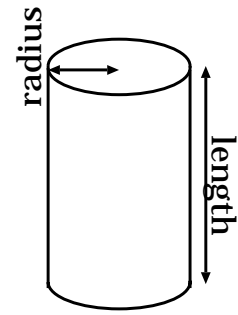
胸部・腰部 楕円筒及びその一方を閉じる形の楕円曲面で構成される立体。楕円筒部分の長さ (length)、長径 (major axis)、短径 (minor axis)、及び楕円曲面の高さ (cap height) のパラメータを持つ(図3.1(c))。

その他の体節 円筒及びその両端を閉じる形の半球で構成される立体。円筒部分の長さ (length) 及び半径 (radius) のパラメータを持つ(図3.1(d))。

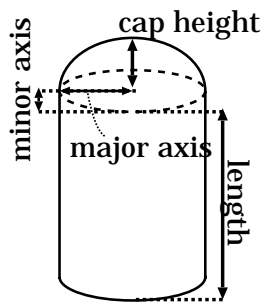
各体節の大きさに関するパラメータは、成人男性の平均値 [8] から算出した値をあらかじめ与えておく。



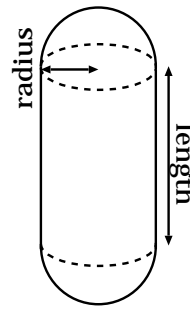
(a) 全身



(b) 体幹部のモデル



(c) 胸部・腰部のモデル



(d) その他の体節のモデル

図 3.1: 人体モデル

3.2 ボリュームデータ (ボクセル) の構築

ボリュームデータの構築は松岡ら [4] の手法を応用する . 松岡らの手法を示す .

1. 点群は物体の表面に沿って分布していると考えられるので , 物体表面の単位面積あたりの点の個数を表面密度 ρ と定義することができる . 点群 $P = p_1, p_2, \dots, p_n$ 中のある点 p_i について k 近傍

$$N_{bhd}(p_i) = n_{bhd}(1), n_{bhd}(2), \dots, n_{bhd}(k)$$

を計算する . $n_{bhd}(j)$ とは $N_{bhd}(p_i)$ のなかで点 p_i から j 番目に近い点を示す . 近傍点のなかで p_i から最も遠い点 $n_{bhd}(k)$ と p_i との距離を半径とする円の面積 A_{disk} を計算する .

$$A_{disk} = \pi \cdot \|p_i - n_{bhd}(k)\|^2$$

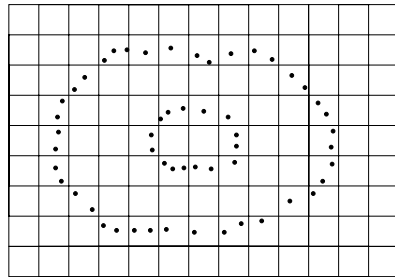
点 p_i を中心とし , 点 p_i と点 $n_{bhd}(k)$ との距離を半径とする球の内部に k 近傍の点は全て含まれる . また , 点は物体の表面に分布するため , 局所的には平面にのるものと考えられる . したがって点 p_i における局所的な表面密度 ρ_i は

$$\rho_i = \frac{k + 1}{A_{disk}}$$

となる . ρ_i を全ての点または代表点について計算し , その中で得られた最小の表面密度 ρ_{min} を点群の最小表面密度と推定する .

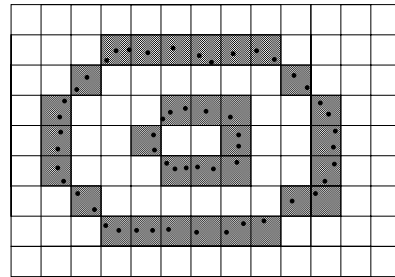
2. 物体表面を全て覆うようなボリュームデータが生成できるよう , 点群最小表面密度 ρ_{min} をもとにボクセルサイズを決定する .
3. 点群を包含するだけの数と位置にボクセルを生成する (図 3.2 (a)) .
4. 内部に点群を含むボクセルなら輪郭ボクセルとみなす . その他のボクセルは外部ボクセルとする (図 3.2 (b)) .
5. ある方向に走査し , 輪郭ボクセルに挟まれるボクセルは内部ボクセルの候補とする (図 3.2 (c)) . この走査を 6 方向 (x, y, z 各軸の正 , 負方向) 行い , 4 方向以上で候補としてあがったボクセルを内部ボクセルとする (図 3.2 (d)) .

この手法で , 点群データからもとの物体の形状をボリュームデータとして構築することが出来る . しかし , この手法では点群にノイズや欠損が存在する場合には , ボクセルサイズが非常に大きくなってしまふ . 点群の最も疎な部分の



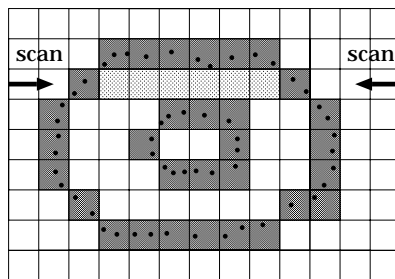
● :Point
□ :Voxel

(a) ボクセルの生成



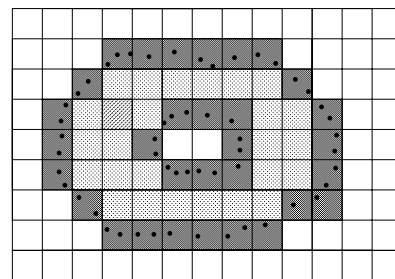
■ :Outline Voxel
□ :External Voxel

(b) 輪郭ボクセルの決定



■ :Outline Voxel
▨ :Internal Voxel
□ :External Voxel

(c) 内部ボクセルの候補



■ :Outline Voxel
▨ :Internal Voxel
□ :External Voxel

(d) 内部ボクセルの決定

図 3.2: 点群とボクセル

密度を用いてボクセルサイズを決定しているためである．ボクセルサイズが大きくなると，胸部と上腕などの間の空間をボリュームデータで表現することができなくなり，マッチングによって姿勢を推定することが困難になる．

そこで，本手法ではボクセルサイズに適切な上限・下限を設け，ある程度の位相関係を保つボリュームデータを構築する（図 3.3）．

ボクセルサイズを制限することで物体の表面すべてを覆うような輪郭ボクセルは構築できなくなり，また内部ボクセルも正確に求めることはできなくなる．さらに，体節の大部分が欠損しているような部分については，輪郭ボクセル・内部ボクセルともに構築されないおそれがある．しかし，本手法の目的はマッチングの手がかりとなるボリュームデータを構築することであるため，完全なボリュームデータが構築されなくても問題ではない．

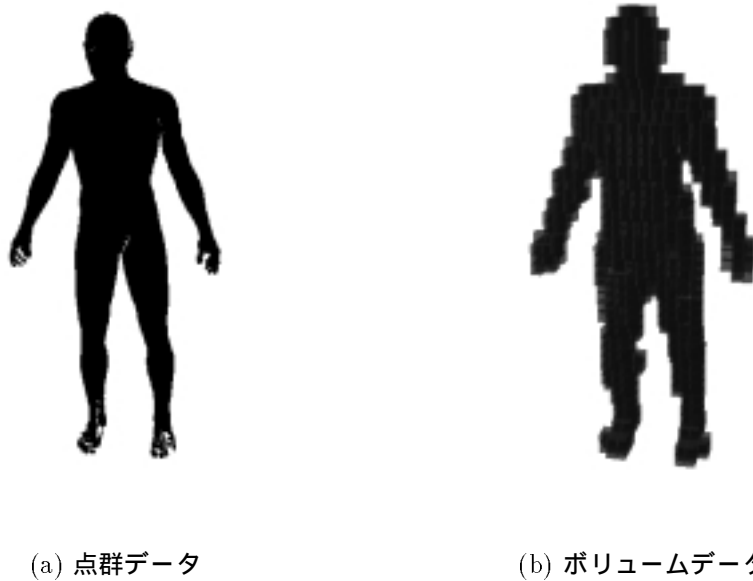


図 3.3: 点群データとボリュームデータ

3.3 ボリュームデータと人体モデルのマッチング

前節で述べた手法を用いて構築したボリュームデータに対して人体モデルをマッチングする．人体モデルのマッチングは以下の手順で行う．

1. 人体モデルの初期位置設定

初期位置を定め、モデル全体を移動させる。人体モデルの腰部モデルの中心を、あらかじめ求めておいた点群データの重心に合わせる。これは、欠損の有無や姿勢に依らず、十分に密にサンプリングされた点群データの重心がほぼ人体の下腹部に近い位置にあることが予備実験で確認されたからである。

2. 初期体幹部姿勢推定

体幹部モデルとボリュームデータとをマッチングすることで、初期的な体幹部の姿勢を推定する。これは、体幹部がもっとも容積が大きく、マッチングしやすいためである。まず体幹部の位置と向きをおおまかに求め、次に体幹部がマッチングした領域のなかで胸部モデルをマッチングすることにより、マッチングの誤りを減らす。

体幹部モデルを回転と並進の6自由度で動かしながら、体幹部モデルが最も多くのボクセルと重なるような位置、角度を探索する(図3.4(a))。つまり、体幹部モデル M^{torso} が覆う空間を $A(M^{torso})$ 、輪郭ボクセルの集合を $V_{outline}$ 、内部ボクセルの集合を $V_{internal}$ とすると、

$$A(M^{torso}) \cap (V_{outline} + V_{internal})$$

を最大化するようにマッチングを行う。

ここで体幹部モデルと重なった輪郭ボクセルの集合を体幹部輪郭ボクセル $V_{outline}^{torso}$ 、内部ボクセルの集合を体幹部内部ボクセル $V_{internal}^{torso}$ と呼ぶことにする。

3. 胸部モデルのマッチング

2. であらかじめ求めておいた体幹部輪郭ボクセル、体幹部内部ボクセルの集合に対して胸部モデルをマッチングする。胸部モデルを回転と並進の6自由度で動かしながら、マッチングの評価が最も高くなる位置・角度を探索する(図3.4(b))。マッチングの評価はモデルの表面から一定の閾値以内にある体幹部輪郭ボクセルの数及びモデルに重なる体幹部内部ボクセルの数をを用い、輪郭ボクセルを重視する。胸部モデル M^{chest} が覆う空間を $A(M^{chest})$ 、胸部モデルの表面からの距離が一定の閾値以内の空間を $B(M^{chest})$ とすると

$$n \times (B(M^{chest}) \cap V_{outline}^{torso}) + (A(M^{chest}) \cap V_{internal}^{torso})$$

を最大化するようにマッチングを行う。ここで n はマッチングの際の輪郭ボク

セルの重みで，あらかじめ与えておく．

4．腰部モデルのマッチング

胸部モデルをボリウムデータにマッチングした後，胸部に接続している腰部を，関節を中心とした回転のみを用いてマッチングする（図3.4(c)）．次の評価値を最大化するように胸部モデルを回転させる．

$$n \times (B(M^{weist}) \cap (V_{outline} - V_{outline}^{matched})) + (A(M^{weist}) \cap (V_{internal} - V_{internal}^{matched}))$$

ここで $V_{outline}^{matched}$, $V_{internal}^{matched}$ は，すでに胸部とマッチングしている輪郭ボクセル，内部ボクセルを表す．つまり，すでに胸部とマッチングしているボクセルを除くボクセルとの重なりが最大となるようにする．

5．上腕・大腿モデルのマッチング

すでにマッチングしているボクセルを除き，残りのボクセルに対して上腕・大腿モデルのマッチングを行う．

ここで，回転のみを用いてマッチングを行うと，胸部や腰部のマッチングが十分な精度で得られなかった場合に良い結果が得られない場合がある．

そこで，回転と並進の双方を用いてマッチングを行う（図3.4(d)）．この際，上腕・大腿モデルの軸方向へ遠ざかる向きの並進を禁止する．これは，上腕や大腿がいたずらに体幹部から離れた位置に移動することを防ぐためである．

評価値としては次のものを用い，これを最大化するように回転する．

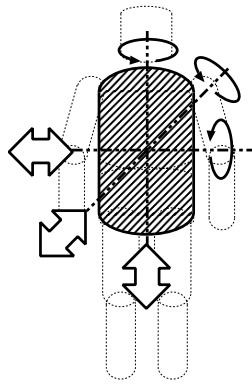
$$n \times (B(M_{weist}) \cap (V_{outline} - V_{outline}^{matched})) + (A(M_{weist}) \cap (V_{internal} - V_{internal}^{matched}))$$

ここで $V_{outline}^{matched}$, $V_{internal}^{matched}$ はすでにマッチングに用いられたボクセルの集合を表す．つまり，既にマッチングに用いられたボクセルを除くボクセルとの重なりが最大となるようにする．

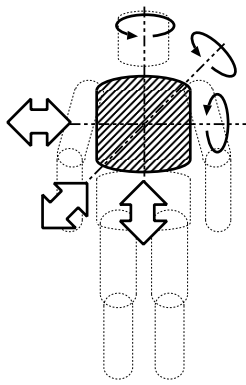
6．前腕・下腿モデルのマッチング

上腕・大腿モデルのマッチングの後，関節を中心とした回転のみを用いて前腕・下腿モデルをマッチングする（図3.4(e)）．上腕・大腿モデルは胸部・腰部モデルと比べて十分な精度でマッチングできるため，前腕・大腿モデルのマッチングには回転のみを用いる．

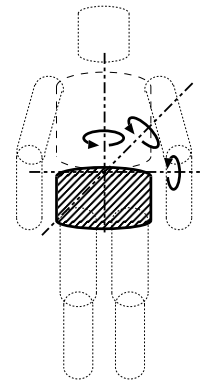
これまでと同様，すでにマッチングに用いられたボクセルを除くボクセルとの重なりが最大となるようにする．



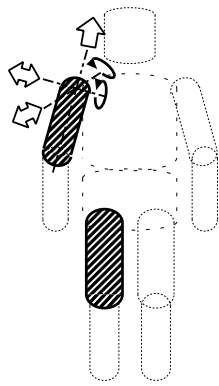
(a) 体幹部のマッチング



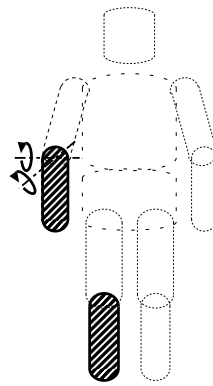
(b) 胸部のマッチング



(c) 腰部のマッチング



(d) 上腕・大腿のマッチング



(e) 前腕・下腿のマッチング

図 3.4: マッチング時の体節の移動, 回転

3.4 点群を利用したマッチング精度の向上

ボリウムデータとモデルとのマッチングによって、大まかな姿勢推定を行った後、さらに点群データを利用して、より精密な体節位置の推定を行う。また、各体節のモデルの太さや長さを調整する。

ボリウムデータとのマッチングによって得られた推定結果をもとに、各体節モデルの表面からの距離が一定の範囲内である点を抽出し、これらの点を用いてモデルを調整する。モデルの表面から各点の距離としてはユークリッド距離を用いる。

抽出された点群に対してモデルからの距離の自乗和が最小になるようにモデルの位置を調整する。精度向上のためのマッチングには回転及び並進を用いる。

位置の調整の後、モデルの太さ・長さを調整する。人体モデルの大きさに関するパラメータは統計データをもとに作成したものであるため、実際の体節の大きさと異なる。また、姿勢変化による筋肉の変形などによって体節の太さは変化する。そこで点群データを利用して各体節のモデルのパラメータを調整し、マッチングの精度を向上させる。

先ほど抽出した点群に対してモデルの中心軸からの距離の平均値を計算し、モデルの太さとする。

長さの調整は、モデルの中心軸と点群中の点との距離が、あらかじめ与えた閾値より小さくなる点を探索することで行う。これは、モデルの中心軸に近い位置に点があるということが、その付近に体節の端をあらわす表面が存在することを意味するからである。モデルの両端を中心軸に沿って移動させ、こうした点とモデルの端点を近づけることで調整を行う。モデルの中心軸との距離が近い点が存在しない場合には、長さに関する調整は行わない。これは、腕を伸ばした状態のように、複数の体節がほぼ直線上に並ぶような姿勢では、関節位置を点群のみから特定するのが困難であり、またそういった姿勢の場合、関節位置が正確に求まらなくても表面作成に支障がないからである。

各体節の位置の調整と、モデルの太さ・長さの調整は同時に行うことも可能であるが、計算量が膨大となるため、本手法では位置の調整の後に太さ・長さの調整を行うことにした。

第4章 点群の分類と表面再構成

前章ではモデルマッチングを用いて点群データから姿勢を推定する手法について説明した。本章では点群中の各点がどの体節に属する点であるかを分類し、体節ごとに表面を構成する手法について説明する。

まず、4.1では、点群を体節ごとにおおまかに分類する手法について説明する。4.2では、二次元射影及び二次元ドロネー網によって三次元空間中の点群に対して表面を構成する手法について説明する。4.3では、妥当な表面を構成するために必要な条件について述べ、妥当な表面を構成する点群の分類について説明する。4.4では、複数の体節の候補となる点を分類する手法について述べる。

4.1 点群の分類

点群中の各点がどの体節に属する点であるかをおおまかに分類する。姿勢推定によって各体節がおおよそどの位置、向きに存在するかを推定した。ここで改めてモデルの表面と点群中の各点とのユークリッド距離を計算し、距離が一定の範囲内にある点をそのモデルの表す体節に属する点の候補であるとする。

分類された体節ごとの点群に対して表面を構成し、それらをつなぎあわせることで全身の表面を再構成する。

4.2 表面再構成

分類された体節ごとの点群に対して表面を作成する手法について説明する。人体の各体節は造作の細かい頭部や手先、足先などを除いて、ほぼ円筒ないし楕円筒に近い形をしていると考えることができる。体節の表面は、円筒の主軸の周りとその端を閉じるような形の面で構成されていると考える。

そこで体節ごとに分類された点群データを円筒面などに射影し、射影した平面上で二次元ドロネー網を作成する。ドロネー網によって構築される点の接続関係を、もとの三次元空間での点群に当てはめることによって表面を構成する。

ここでは三次元座標系との混同を避けるため、二次元座標系を x, y ではなく u, v で記述する。

4.2.1 射影する平面の決定

射影する平面は各体節のモデルを構成する円筒や半球、楕円筒や楕円曲面の表面を用いる(図4.1(a))。ここで、腕を伸ばした姿勢での肘関節付近のよう

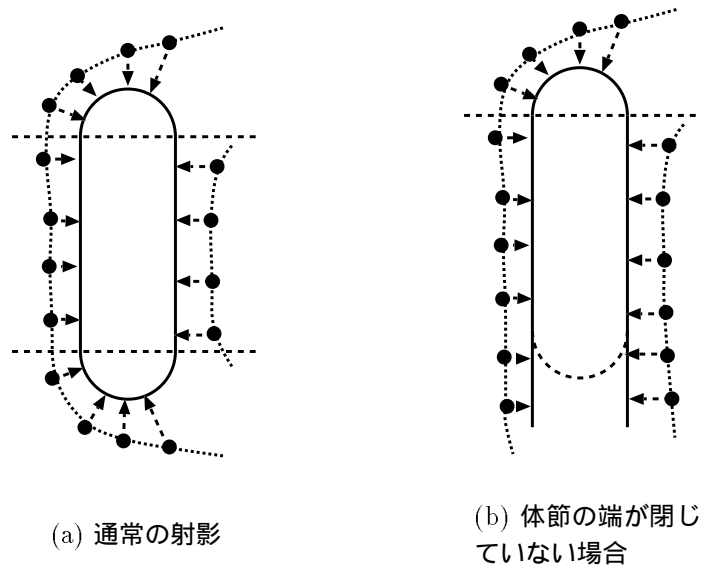


図 4.1: 射影する平面

に，体節の端を閉じるような形の面が存在しない場合には，半球面や楕円曲面ではなく，その体節のモデルを構成する円筒面や楕円筒面を延長した面に点群を射影する（図 4.1 (b)）。

4.2.2 円筒面への射影

円筒面に射影する各点を円筒面の軸方向の成分 h と軸からの距離 r ，及び軸に垂直な平面における角度 $\theta (0 \leq \theta \leq 2\pi)$ からなる三次元円筒座標 (r, θ, h) で表す（図 4.2 (a)）。角度 0 方向は適当に与える。 (r, θ, h) に存在する点は， (R, θ, h) に射影される（ R は射影する円筒面の半径）（図 4.2 (b)）。 $u = R\theta$ ， $v = h$ とし，射影された円筒面上の各点を二次元座標 (u, v) で表す（図 4.2 (c)）。

4.2.3 半球面への射影

半球面に射影する各点を，射影する半球面の中心を原点とした三次元の極座標 (r, θ, φ) で表す（図 4.3 (a)）。 (r, θ, φ) に存在する点は， (R, θ, φ) に射影される（ R は射影する半球面の半径）（図 4.3 (b)）。射影された半球面上の各点を θ と φ の成分を用いて $u = R\varphi \cos \theta$ ， $v = R\varphi \sin \theta$ とし，二次元座標 (u, v) で表す。（図 4.3 (c)）。

4.2.4 二次元ドロネー網

二次元平面上に存在する点群からその接続関係を構築する手法としてドロネー網があげられる。ドロネー網は点群を頂点とした三角形の集合（三角網）を構

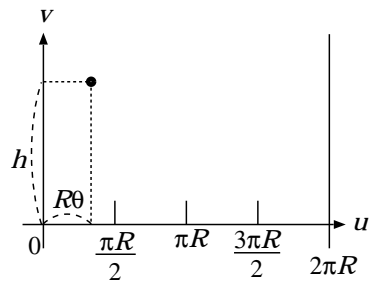
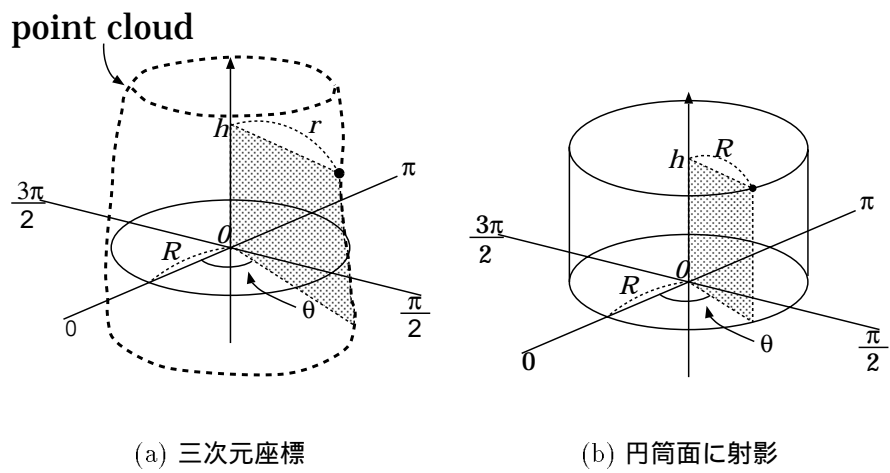
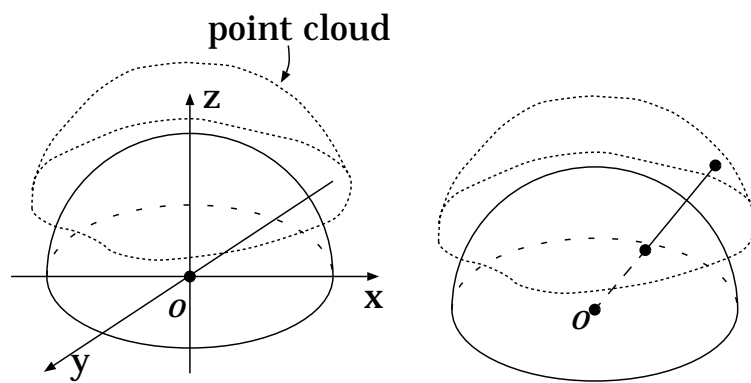
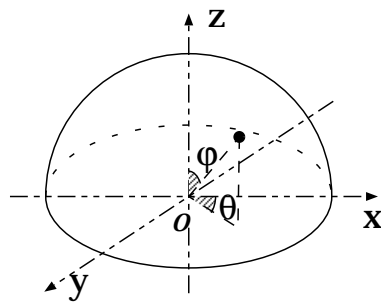


図 4.2: 円筒面への射影と二次元座標



(a) 三次元座標

(b) 円筒面に射影



(c) 二次元座標

図 4.3: 半球面への射影と二次元座標

築する手法である．構築される三角形は，他のいかなる組み合わせで繋いだ三角形よりもその最小角が大きいか等しいという性質を持つ．

ドロネー網を構成する点群 $p_i = (u_i, v_i)$ を母点と呼ぶ．各母点の勢力圏 $V(p_i)$ を，

$$V(p_i) = \{p = (u, v) | d(p, p_i) < d(p, p_j), \forall j \neq i\}$$

で定義する． $d(p, p_i)$ は点 (p) と点 (p_i) の距離を表す．すなわち，母点 p_i からの距離が他の点からの距離よりも小さくなるような点 p の集合が母点 p_i の勢力圏である．平面をこの勢力圏で分割したものがボロノイ図である（図 4.4 (a)）．一方，ボロノイ図の隣接領域の母点間を結び，グラフ表現したものがドロネー網である（図 4.4 (b)）．

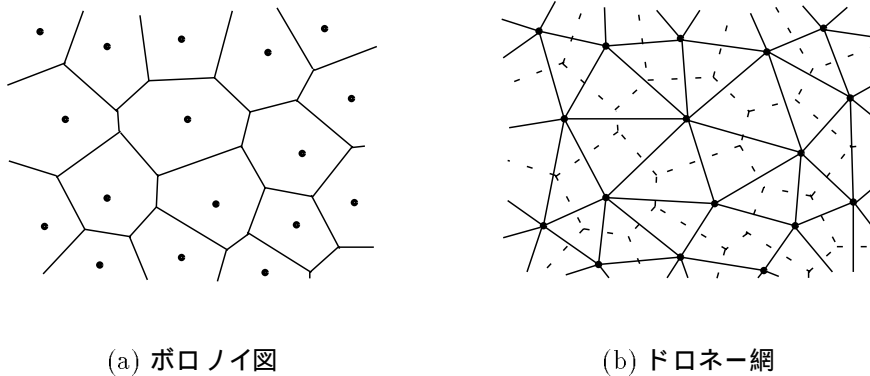


図 4.4: ボロノイ図とドロネー網

4.2.5 ドロネー網の作成法

ここでは母点を一点ずつ追加してドロネー網を作成する，母点逐次追加法を簡単に説明する [9]．

- 初期ドロネー三角形

母点逐次追加法は，既に存在するドロネー網に対して母点を追加し，ドロネー網を更新する手法である．処理に先立ち，初期ドロネー網を与える必要がある．母点を n 個とし，以下の式を満たす $u_{min}, u_{max}, v_{min}, v_{max}$ を設定する．

$$u_{min} \leq u \leq u_{max}$$

$$v_{min} \leq v \leq v_{max}$$

$$u_{min} < \forall u_k, u_{max} > \forall u_k$$

$$v_{min} < \forall v_k, v_{max} > \forall v_k$$

$$(k = 1, 2, 3, \dots, n)$$

点 $P_1(u_{min}, v_{min})$, $P_2(u_{min}, v_{max})$, $P_3(u_{max}, v_{min})$, $P_4(u_{max}, v_{max})$ を用いて, 三角形 $P_1P_2P_4$ と三角形 $P_1P_4P_3$ から構成される初期ドロネー網を与える.

- 母点の追加

以下の手順でドロネー三角網を更新する.

1. 母点を追加する (図 4.5 (a)).
2. すでにある三角形のうち, その外接円内部に追加した母点を含む全ての三角形を抽出する (図 4.5 (b)).
3. 2. で抽出された三角形を統合して一つの多角形を形成する. 多角形の各辺と追加点によって三角形群を構成する (図 4.5 (c)).
4. 元のドロネー三角網中の 2. で抽出された領域を, 3. で得られた三角形群に置き換える (図 4.5 (d)).

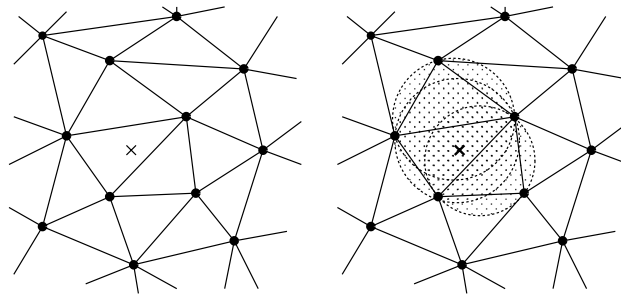
4.2.6 ドロネー網を用いた体節の表面再構成

ここまで, 点群を二次元平面に射影する手法及び二次元平面でドロネー網を作成する手法について説明した. ここではこれらの手法を用いて体節の表面を再構成する手法について説明する.

各体節に属する点群を 4.2.1 に基づいて円筒面や半球面に射影し, 4.2.5 の手法で点群に対してドロネー網を作成する. 作成したドロネー網の点の接続関係を, もとの三次元空間中の点群に当てはめることによって表面を構成する.

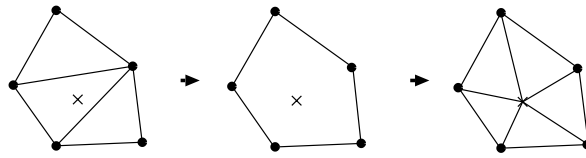
ここで, 一つの体節に属する点群を二つ以上の平面に射影し, それぞれドロネー網を作成すると, それらを接続する部分の表面が構成されない. そこで射影する際に円筒面に射影する部分, 半球面に射影する部分がそれぞれ重なりあうように射影する範囲を広げる. そのうえでドロネー網を作成し, 後に重なり合う余分な表面を削除することによって接続する部分を持つ表面を構成する.

同様のことが円筒面に射影した点群に対してドロネー網を作成する際にも生じる. 円筒射影によって作られた二次元平面において, その両端 ($\theta = 0$ と $\theta = 2\pi$ であった部分) は三次元空間上では同じ位置を表す. しかし, 4.2.5 の手法で作成したドロネー網はこの性質を失っている. そこで, $\theta = 0$ 付近の点を $\theta = 2\pi$ 付近に, $\theta = 2\pi$ 付近の点を $\theta = 0$ 付近にも射影し, その上でドロネー網を作成

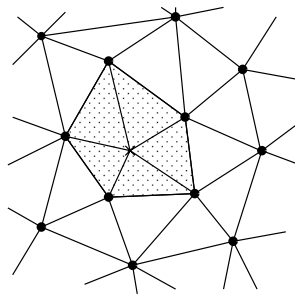


(a) 母点の指定

(b) 三角形の抽出



(c) 該当領域の更新



(d) 更新結果

図 4.5: ドロネー網の作成

する．後に重なり合う余分な表面を削除することによって接続関係を保持した表面を構成する．

体節ごとに表面を構成した後，各体節の表面を接続する．ここでは体節に分類する際に，関節に当たる部分では“のりしろ”として，関節の両側にある体節について，それらの体節の双方に属する点を残しておく．これらの点を双方の体節に含まれるものとして表面を構成することで，関節の両側にある体節の表面を接続する．関節付近における点群の分類手法については4.4で詳説する．

以上のような手法を用いて，体節ごとに分類された点群から体節の表面を構成する．

4.3 妥当な表面を構成するための点群の分類

本節では表面から突起した針のような表面や，腋下・股下のような凹面を塞ぐような表面の無い表面を，二次元射影及び二次元ドロネー網を用いて構成することができるように点群を分類する手法について説明する．

点群を体節に分類することで，余分な表面を構成することなく表面を構成することができる．しかし，4.1で述べた手法を用いた大まかな分類では十分であるとはいえない．これは，単純な立体を組み合わせただけのモデルでは，人体の体節の形状を正確には表現しておらず，マッチングによって細部にわたる形状まで推定することが出来ないためである．そこで，余分な表面を作らないような分類を行う必要がある．

二次元平面への射影及び二次元ドロネー網を利用して表面を構成する手法を用いた場合，余分な表面は次の二つである．

針のような突起 表面に針のような突起状の平面を構成するのは，射影する二次元平面と，点群中の点との距離が極端に離れたものが混在する場合である(図4.6(a))．この場合，三次元空間での二点間の距離と，それらの点を射影した後の二次元平面での距離が極端に異なるため，射影によって点群の位置関係が損なわれてしまう(図4.6(b))．このような場合，突起状の表面が構成される(図4.6(c))．

凹面を塞ぐ平面 凹面を塞ぐ平面を構成するのは，射影する二次元平面から見て同じ方向に複数の平面を表す点群が混在する場合である(図4.7(a))．この場合，射影前後で点群の順序関係が損なわれてしまう(図4.7(b))．その結果凹面を塞ぐ表面が構成される(図4.7(c))．

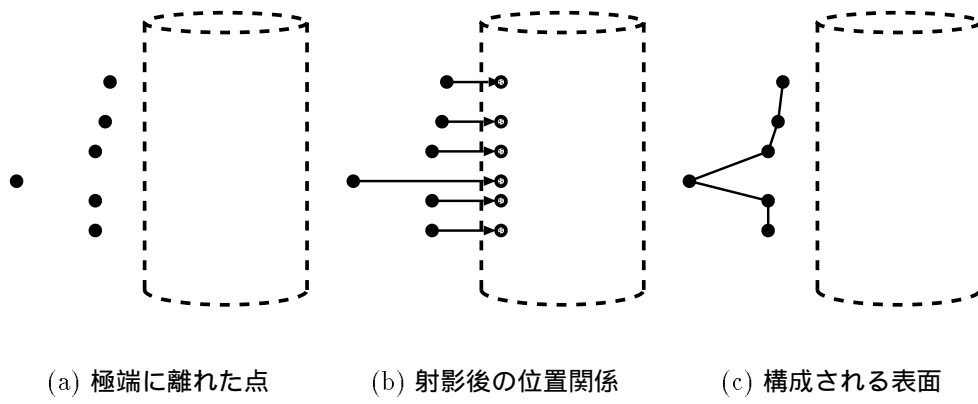


図 4.6: 針のような突起

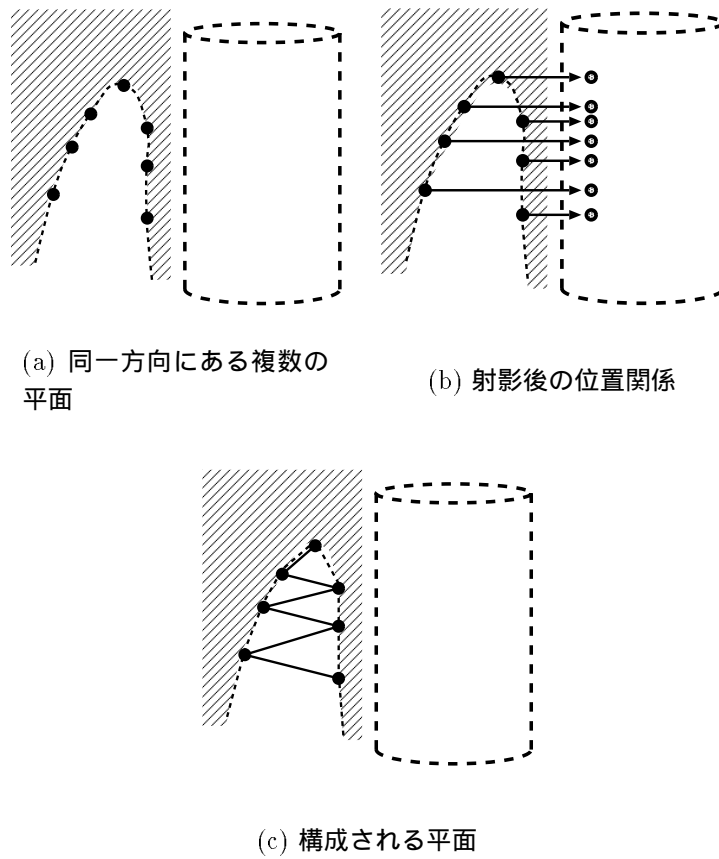


図 4.7: 凹面を塞ぐ平面

いずれも三次元空間において離れた位置にある二点が、二次元平面上の近い位置に射影されることによって余分な面が構成される。このような点を除外することで、妥当な表面を構成する分類が可能になると考えられる。

本手法ではある体節に属する候補となった点に対して射影する平面との位置関係を検証し、極端に離れた二点が近い位置に射影される場合には、その平面から遠い方の点を候補から除外する。具体的な手法は次の通りである。

1. 射影する平面（体節モデルの表面）において近い位置に射影される二点を選びだす
2. 体節モデルの表面からそれぞれの点までの距離 d_1 、 d_2 と二点間の距離 d_{12} を比較して

$$|d_1 - d_2| > N d_{12}$$

であれば遠い方を候補から除外する。但し N は適当に定めた閾値である（図 4.8）。

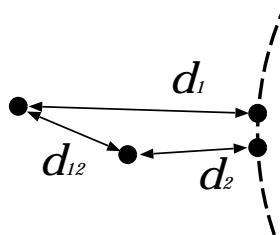


図 4.8: 二点の距離と射影する表面からの距離

このような手法を用いて、妥当でない表面を構成する要因となる点を除外し、体節ごとに妥当な表面が構成できるようにする。

4.4 複数の体節の候補となる点の分類

ここまで、妥当な表面を構成する条件に基づいて余分な点を候補から除外する手法について述べた。しかし、ここで複数の体節が同じ点を候補として挙げることがある。

このような複数の体節が同じ点を候補とし挙げる状況は、複数の体節が近い位置にある場合に発生する。

近い位置にある体節の数・種類によって複数の体節の候補となる点を次のように分ける。

1. 関節で接続された二つの体節のそれぞれの候補となる点
2. 関節で接続されていない二つの体節のそれぞれの候補となる点
3. 三つ以上の体節のそれぞれの候補となる点

これらの点を正確に分類することが、妥当な表面を作成するための必要条件となる。本手法では、それぞれの状況に応じて以下の手法で点群を分類する。

4.4.1 関節で接続された二つの体節の候補となる点の分類

二つの体節の候補として挙げられたある点に対して、その点を候補としている体節を体節 A、体節 B と呼ぶことにする。その点の近傍点がどの体節の候補であるかを調べる。近傍点の状況に応じてその点がどちらの体節に属する点であるかを決定する。

- 状況 1：近傍点が全て A (B) の候補である場合 (図 4.9 (a))
体節 A (B) に属する点であるとする。
- 状況 2：近傍点の一部が A (B) の候補であり、残りは A , B の双方の候補である場合 (図 4.9 (b))
A (B) に属していると仮定して十分なめらかな表面を構成できるならば、A (B) に属する点であるとする。
- 状況 3：近傍点が、A の候補である点、B の候補である点、双方の候補である点、の三通りである場合 (図 4.9 (c))
近傍点のうち、双方の候補である点が十分に少ない場合には、体節同士を結合する際“のりしろ”として残すため、双方に属する点であるとする。近傍点のうち、双方の候補である点が多い場合には先に他の点进行处理する。後に改めて近傍点がどの体節の候補であるかを調べ、近傍点の状況に応じて分類する。

4.4.2 関節で接続されていない二つの体節の候補となる点の分類

関節付近以外の二つの体節の候補として挙げられた点は、そのどちらか一方に属しているとするべきである。なぜなら、仮にその点を双方の体節に属しているものとして表面を構成すると、双方の体節でその点を含めた表面が構成され、本来関節で接続されていない二つの体節がその点においてつながってしまうからである。

そこで点の分類を、どちらの体節に属していることがより望ましいかを評価することによって行う。

二つの体節の候補として挙げられた点のうち一点に着目する。その点を候補

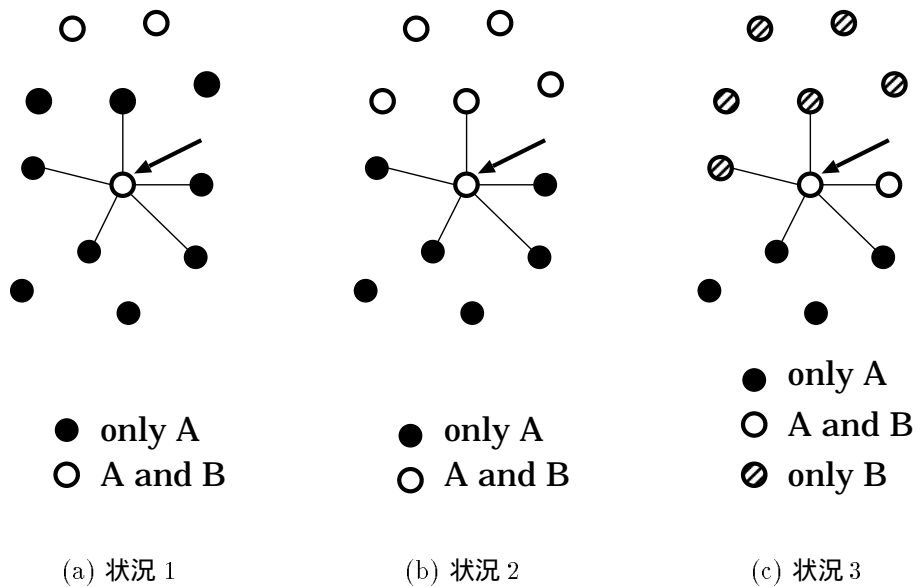


図 4.9: 関節付近の 2 体節の候補となった点の分類

として挙げた二つの体節を体節 A，体節 B と呼ぶことにする．A，B それぞれの候補として挙げられている点のうち，着目している点に近い位置に存在する点を抽出する．それらの点と比較して各体節モデルからの距離の差が小さい方の体節に，着目している点は属していると分類する．

4.4.3 三つ以上の体節の候補となる点の分類

三つ以上の体節の候補となる点が発生するのは，関節と別の体節の距離が近い位置や，複数の関節の距離が近い位置など様々である．本手法ではこうした様々な状況を画一的に扱うため，次のような処理で点群を分類する．

三つ以上の体節の候補となっている一つの点 p に着目し，その点に最も近い点 p_1 が幾つの体節の候補となっているかを調べる．点 p より点 p_1 の方が候補となっている体節が少なければ，点 p を，点 p_1 と同じ体節の候補とする．これは，ある点が属する体節にはその近傍点も属しており，属してない体節にはその近傍点も属していない可能性が非常に高いからである．この処理を繰り返し適用し，一つの点が二つ以上の体節の候補となることがなくなるまで続ける．候補となる体節が二つ以下になった段階で，先に述べた手法で分類する．

第5章 実験と評価

本章では提案手法に基づく実験を示し、評価及び考察を行う。5.1では、実験に用いるシミュレーションデータについて説明する。5.2では、シミュレーションデータに対して姿勢推定を行った結果を示す。5.3では、シミュレーションデータに対して表面を再構成した結果を示す。5.4では、点群データの欠損割合が姿勢推定におよぼす影響を定量的に評価する。5.5では、実際の計測装置から獲得された点群データに対して本手法を適用した結果を示す。5.6では、点群データの欠損している部分に対する処理について考察する。

5.1 シミュレーションデータ





















計測装置から獲得される点群データを想定し、シミュレーションデータを作成した。

計測装置としてはレーザーレンジファインダを想定した。レーザーレンジファインダはスリット状のレーザー光を物体に照射し、その反射光をカメラで観測して、三角測量の原理で物体とカメラとの距離を計測する。つまり、カメラとレーザーの位置、及びカメラから物体表面までの距離から物体表面上の点の三次元座標を獲得することができる。このため、物体表面から三次元座標が獲得される点は、レーザー光が照射され、かつカメラから観測できる点に限られる。そのどちらか一方または双方が満たされない領域は点が獲得されず、その部分は欠損となる。

こうした計測装置の特徴を反映させるため、カメラの光軸方向とレーザー光の照射方向とをあらかじめ定め、その双方から観測することのできる点のみを計算することでシミュレーションデータを作成した。人体形状の三次元モデルを作成するソフトウェア、Poserを用いて様々な姿勢の人体形状のパッチモデルを作成し、計測対象とした。人体形状のパッチモデルから上記の手法で計算して得られたシミュレーションデータを表5.1に示す。

今回の実験では、人体形状を前後二方向から計測するものとした(図5.1)。

表 5.1: シミュレーションデータ

姿勢	正面	側面	姿勢	正面	側面
直立			腕を横		
走る			座る		
歩く 1			歩く 2		
ダンス 1			ダンス 2		
ダンス 3			ダンス 4		

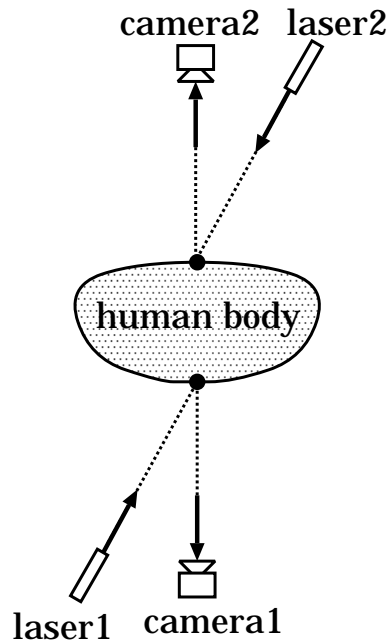


図 5.1: 想定した計測

5.2 姿勢推定実験

シミュレーションデータに対して第3章で述べた姿勢推定手法を適用して、姿勢を推定する実験を行った。点群データに対してボリュームデータを構築し、人体モデルをマッチングした結果を表5.2に示す。また、点群データを用いてマッチング結果を修正した結果を表5.3に示す。各点ごとに求めた近傍の数は $k = 5$ 、ボクセルサイズの上限は40mm、モデルマッチングの際の輪郭ボクセルの重みは $n = 2$ とした。

姿勢推定実験の結果を評価するため、シミュレーションデータのもととなる人体形状の各体節と推定した結果の各体節の位置・向きの誤差を計算した。もとの人体形状の各体節の位置・向きは直接獲得することができなかったため、手作業で人体モデルをマッチングし、得られたモデルの各体節の位置・向きを正解として用いた。

まず、向きの誤差の計算について説明する。各体節の向きは本来3自由度であるが、本手法で用いた体節モデルのうち、胸部・腰部を除く体節モデルは、円筒と、その両端を閉じる形の半球を組み合わせたモデルである。このため、円筒の軸を中心とした回転方向の誤差は、姿勢推定の評価としては意味を持たない。そこで胸部と腰部を除く各体節の向きの誤差評価は単純な1次元の角度と

した。胸部・腰部に関しては、体節モデルの前後方向を中心とした回転、左右方向を中心とした回転、軸方向を中心とした回転の3つの角度で表した。

次に体節の位置の誤差の計算についてであるが、位置の誤差評価はもとの人体形状の各体節の始点位置と推定結果の各体節の始点位置とのユークリッド距離で表した。

直立姿勢及び腕を横に広げた姿勢についてポリウムモデルとのマッチングによって得られた姿勢の誤差評価を表5.4, 5.5に示す。点群を用いて修正した結果の評価を表5.6, 5.7に示す。また、その他の姿勢についてマッチングによって得られた姿勢の誤差を表A.1～A.16に示す。

結果から、ほぼ全ての姿勢について、各体節の向きを10度以内の誤差で、始点位置を50mm以内の誤差で推定することができた。これは、点群を体節に分類するための姿勢推定の結果としては十分であった。また、大部分の姿勢で、点群を用いてマッチング結果を修正することで誤差を減少させることができることを確認した。

一部の体節で始点位置に100mm程度の誤差が見られた。これは腕を伸ばした姿勢のように、どこまでがその体節でどこからが別の体節であるかを判断することが難しい部位に多く見られた。しかし、こうした誤差は点群の分類や表面の再構成には影響しないと考える。

また、点群を用いてマッチング結果を修正することで逆に誤差が大きくなった体節があった。これは点群の欠損により体節モデルが点群の欠損の少ない方の位置に片寄り、正しい位置からずれてしまったためであると考えられる。

表 5.2: ボリュームデータとのモデルマッチング結果





















姿勢	正面	側面	姿勢	正面	側面
直立			腕を横		
走る			座る		
歩く 1			歩く 2		
ダンス 1			ダンス 2		
ダンス 3			ダンス 4		

表 5.3: 点群を用いたマッチングの修正結果





















姿勢	正面	側面	姿勢	正面	側面
直立			腕を横		
走る			座る		
歩く 1			歩く 2		
ダンス 1			ダンス 2		
ダンス 3			ダンス 4		

表 5.4: ポリウムモデルとのモデルマッチングにおける誤差 (直立)

	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
	前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	2.86618	0.647035	14.2153	17.7393
腰部	4.09500	0.0166524	14.2384	7.53184
右上腕	2.80448			22.4590
右前腕	4.15640			17.3399
左上腕	5.80812			34.9950
左前腕	2.51065			5.45217
右大腿	9.72413			48.3085
右下腿	3.01422			27.0331
左大腿	5.14725			23.5741
左下腿	3.58954			6.66651

表 5.5: ポリウムモデルとのモデルマッチングにおける誤差 (腕を横)

	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
	前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	5.69203	4.08224	5.52313	47.2329
腰部	8.03297	0.628117	171.565	63.1159
右上腕	5.86306			21.8268
右前腕	3.91389			24.4456
左上腕	1.79900			29.9121
左前腕	3.60421			91.9453
右大腿	2.68234			71.6425
右下腿	5.62655			72.7237
左大腿	4.42353			68.6510
左下腿	6.76731			69.9717

表 5.6: 点群を用いて修正した結果における誤差 (直立)

	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
	前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	2.86619	0.647010	14.2153	17.7393
腰部	4.09500	0.0166391	14.2384	7.53184
右上腕	2.71196			12.2929
右前腕	0.223114			10.8371
左上腕	1.52915			12.8164
左前腕	0.419123			4.26977
右大腿	8.39565			41.1483
右下腿	1.25942			21.0151
左大腿	5.35227			23.0294
左下腿	1.82488			5.45119

表 5.7: 点群を用いて修正した結果における誤差 (腕を横)

	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
	前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	5.69218	4.08231	5.52313	47.2329
腰部	8.03310	0.628109	171.565	63.1159
右上腕	4.88057			15.0702
右前腕	2.89073			17.0811
左上腕	2.57955			29.3263
左前腕	6.91408			90.1509
右大腿	4.48550			109.220
右下腿	3.49604			71.0304
左大腿	7.50357			116.509
左下腿	2.61863			66.1758

5.3 表面再構成実験

シミュレーションデータに対して本手法を適用して、点群データから表面を再構成する実験を行った。姿勢推定の結果から点群を体節に分類し、体節ごとに表面を再構成した。再構成した各体節の表面をつなぎあわせることで全身の表面とした。表面を再構成した結果を表 5.8 に示す。

また、もとの人体形状と点群から再構成した表面とを比較するため、もとの人体形状をワイヤフレームで表示し、再構成した表面を重ねあわせたものを図 5.2 に示す。

さらに、もとの人体形状と再構成した表面との比較をより精密に行うため、以下の処理を用いて、もとの人体形状にはない表面を抽出した。

点群データから再構成した表面の各パッチをそれぞれ取り出し、その頂点がもとのパッチモデルのどのパッチから得られた点であるかを計算する。各頂点が得られたもとのパッチの法線を計算し、その平均をとる。この法線の平均と、再構成したパッチの法線を比較し、その差が 10 度以内であれば、再構成したパッチはもとの人体形状にある表面とする。この処理を再構成した全てのパッチに対して行い、もとの人体形状にはない表面を抽出する。

この処理によって抽出された表面を図 5.3 に示す。





















結果から、腋下や股下などを埋めるような余分な表面を構成することなく、全身の表面を再構成することを確認した。また、様々な姿勢の人体形状を十分に近似する表面を構成できた。

“走る”姿勢や“座る”姿勢では、足の部分に欠損が見られた。これは、もとの点群データに大幅な欠損が存在する場合、その部分の表面を再構成することができなかったことを示している。しかし、大幅な欠損が存在しない部分については余分な表面を構成することなく、表面を再構成することを確認した。

また、もとの人体形状と再構成した表面との比較から、点群データの欠損している部分については、もとの人体形状と異なる表面を作成していることがわかった。これは本手法では欠損部分の推定等の処理を行っておらず、欠損部分を単一の平面で表しているために発生することであると考える。

手先や足先に余分な表面を構成しているが、これらの部位は本手法の対象外としている。

表 5.8: 表面再構成結果

姿勢	正面	側面	姿勢	正面	側面
直立			腕を横		
走る			座る		
歩く 1			歩く 2		
ダンス 1			ダンス 2		
ダンス 3			ダンス 4		



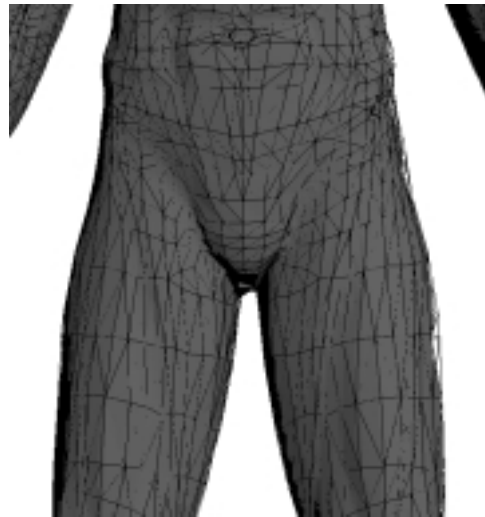
(a) 正面，全身



(b) 側面，全身



(c) 腋下



(d) 股下

図 5.2: もとの人体形状と再構成された表面との比較 (直立姿勢)



(a) 正面



(b) 側面

図 5.3: もとの人体形状にない表面 (直立姿勢)

5.4 欠損割合と姿勢推定精度の評価

点群データの欠損が，モデルマッチングにどのような影響を与えるかを調べる実験を行った．

まず，点群データの欠損割合の計算について説明する．今回の実験ではもとの人体形状のパッチモデルから欠損割合を計算した．パッチモデルのうち，カメラの光軸方向かレーザーの照射方向のいずれか，または双方から観測されないパッチの面積を計算し，全体の面積と比較することで欠損割合とした．また，体節ごとの欠損割合も同様に計算した．

姿勢ごとの点群データの欠損割合とモデルマッチングの誤差を表 5.9 に示す．

また，想定した計測装置のカメラ光軸方向とレーザー照射方向を変えて欠損割合を変化させたデータに対してモデルマッチング実験を行った．その結果，モデルマッチングに失敗する例が見つかった．それらの結果を図 5.4 に示し，点群の各体節の欠損割合及びマッチングの誤差を表 5.10 に示す．

結果から，欠損がある程度以下の場合，欠損のモデルマッチングにおよぼす影響は小さいことが分かった．全身で約 30～40%の欠損がある点群データに対しても，角度にして数度の誤差でマッチングを行うことができることを確認した．また，それ以上の欠損がある点群データに対しても，各体節における欠損の割合が 80%程度以下であれば，十分な精度でマッチングを行うことができることを確認した．

図 5.4 では，本来胸部モデルとマッチングすべきボクセルが一部マッチングされず，上腕モデルのマッチングの際，それらのボクセルに影響されてマッチングに失敗したものと考えられる．このように，欠損が極端に大きい体節を含む姿勢では，その体節においてモデルマッチングが失敗することも確認した．

また，前腕モデルや下腿モデルはそれぞれ上腕モデル，大腿モデルをマッチングした後にマッチングを行うため，上腕モデル，大腿モデルのマッチングが失敗すると前腕や下腿における欠損が少ない場合もマッチングに失敗すると考えられる．

しかし，体節の 90%以上が欠損している点群データに対して表面を再構成することは困難であり，そもそもデータに問題があると考えられる．表示や設計に利用するのに十分な点群データが計測によって獲得された場合には，本手法で十分なモデルマッチングを行えることを確認した．

表 5.9: 姿勢ごとの欠損割合とモデルマッチングの誤差

	欠損割合 (%)	平均角度誤差 (度)	平均始点位置誤差 (mm)
直立	29.6822	4.12815	15.6131
腕を横	28.3926	4.84018	62.4913
走る	36.9381	6.63414	35.0947
座る	54.2547	8.12972	37.0994
歩く 1	30.9102	5.48314	27.0448
歩く 2	29.9522	3.92191	27.3985
ダンス 1	39.8267	3.40019	32.5431
ダンス 2	29.9175	3.35464	29.0999
ダンス 3	30.3354	4.25137	36.4120
ダンス 4	26.7038	6.85562	28.9174



(a) 正面



(b) 側面

図 5.4: マッチングに失敗した例

表 5.10: マッチングに失敗した例

	欠損割合 (%)	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
		前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	32.7555	3.72466	0.955007	3.75211	29.5044
腰部	38.1555	9.63152	1.82919	19.2301	43.0719
右上腕	93.3683	150.495			92.8046
右前腕	94.6843	115.469			542.938
左上腕	86.3890	0.908282			60.2453
左前腕	79.8943	13.3352			101.848
右大腿	42.6243	8.21024			85.9513
右下腿	78.3872	2.57102			25.7281
左大腿	29.2679	6.99566			53.7825
左下腿	36.7438	4.81105			31.9760

5.5 実計測データに対する実験

計測装置を用いて実際に人体を計測して得られた点群データに対して本手法を適用し、表面を再構成する実験を行った。その結果を図 5.5 及び図 5.6 に示す。

図 5.5 は直立姿勢の人体を計測して得られた点群データから手作業でノイズを除去し、本手法を適用したものである。また図 5.6 は直立以外の姿勢の人体を計測して得られた点群データに対して本手法を適用したものであり、ノイズは除去していない。

これらの結果から、人体を計測した点群データに対して姿勢を推定し、点群データを体節に分類することで、腋下や股下に余分な表面を構成することなく表面を再構成できることを確認した。

ノイズ除去を行っていない点群データに対して再構成した表面には、余分な表面が一部見られた。これはノイズが存在する場合、4.3 で述べた手法では十分にノイズを除去することができなかったことを示している。今後、ノイズ除去の手法を確立することが課題として考えられる。



(a) 点群データ (正面)



(b) 点群データ (側面)



(c) 再構成した表面 (正面)



(d) 再構成した表面 (側面)

図 5.5: 実計測データに対する実験 (直立姿勢)



(a) 点群データ (正面)



(b) 点群データ (側面)



(c) 再構成した表面 (正面)



(d) 再構成した表面 (側面)

図 5.6: 実計測データに対する実験 (ガッツポーズ)

5.6 欠損部分の補完に関する考察

本手法では，点群データが欠損している部分に対してはドローネー網によって構築された単一の平面をもって表面を再構成するものとし，欠損した形状を補完することは行わなかった．ここでは欠損部分を補完する処理について考察する．

欠損部分の表面を補完して再構成するには次のような手法が考えられる．

まず，自己隠蔽により計測できない部分を別に計測して，本手法で再構成した表面と合わせることによって全身の表面を再構成する手法である．これは，西田ら [10] の手法を応用することで可能であると考えられる．西田らは人体の部分的な計測データを，あらかじめ用意した標準人体モデルにあてはめることで全身の形状をパッチモデルとして作成する手法を提案した．この手法は直立姿勢の人体のみを対象としているが，姿勢推定を組み合わせることで任意姿勢の人体に拡張することができると考えられる．

また，欠損していない部分から欠損している部分の形状を推定する手法も考えられる．各体節の筋肉の形状や関節の形状などの知識を導入し，欠損していない部分の点群データや姿勢推定結果を考慮して，形状の知識と組み合わせることで欠損している部分の形状を推定することができると考えられる．

こうした手法を用いて欠損を補完することで，自己隠蔽により計測できない部分に対しても，本来の人体形状を反映した表面を再構成できると考えられる．

第6章 結論

本論文では任意の姿勢の人体形状を計測して得られた欠損のある点群データから姿勢を推定し，体節ごとに表面を構成することによって，腋下や股下などにも余分な表面を構成することなく人体の表面を再構成する手法を提案し，実験及び評価を行った．

対象を人体形状に限り，計測によって得られた点群データを体節ごとに分類し，体節ごとに表面を構成することによって，関節付近に存在する凹面を構成する領域に関しても余分な表面を構成することなく全身の表面を再構成する手法を提案した．また，自己隠蔽によりデータが欠損している部分に対しても，本来人体には存在しない，針のような突起や，凹面を埋めるような面を構成することなく，表面を再構成する手法を提案した．

本手法では，まず点群データから姿勢を推定することによって点群データを体節ごとに分類した．人体を頭部・胸部・腰部と左右の上腕・前腕・大腿・下腿からなるものと考え，それぞれの体節に対応する体節モデルからなる人体モデルを用意した．点群データに対してボリュームデータを構築し，ボリュームデータと人体モデルをマッチングすることによって，人体のおおまかな姿勢を推定した．点群データを利用して推定した各体節の位置・角度を調整することで，より精密に姿勢を推定した．

次に姿勢推定の結果を用いて点群から各体節に属する点の候補を抽出した．各体節に属する点の候補から，余分な表面を構成するおそれのある点を排除し，さらに複数の体節の候補となった点を分類することにより，点群データを体節ごとに分類した．最後に分類された点群データをそれぞれ二次元平面に射影し，射影した二次元平面上でドロネー網を作成することで点群の接続関係を構築し，構築した点群の接続関係を，もとの三次元空間中の点群に当てはめることによって表面を再構成した．

シミュレーション実験によって，様々な姿勢の人体形状から計測される点群データに対してボリュームモデルを構築し，人体モデルをマッチングすることで姿勢を推定できることを示した．また，点群を用いてマッチングの精度を向上させることができることを確認した．姿勢推定の結果を用いて点群を分類し，二次元射影及び二次元ドロネー網を用いることで，腋下や股下に余分な表面のない表面を再構成することを示した．

今後の課題には、以下の三つが挙げられる。

一つ目は、マッチングに用いるモデルの調整である。対象とする人体の体格に応じて、マッチングに用いるモデルの大きさを調整する必要がある。対象とする人体の身長や体重など、簡単な計測項目からおおまかな体格を推定し、人体モデルを調整する手法などが考えられる。

二つ目は、欠損部分の表面の処理である。本手法では点群データの欠損した部分については単一の平面で表面を表した。しかし、複数の計測結果を合わせることでこうした部分を補う手法や、人体形状の知識を導入して補完する手法などが考えられる。こうした手法を用いて全身の形状を欠損なく表すことが課題である。

三つ目は、データの重なりおよびノイズに対応する手法についての考察である。レーザーレンジファインダ等を用いて人体形状を計測する場合、一つのカメラで全身を計測することは困難である。そこで複数のカメラを同時に用いて計測し、得られたデータを結合することによって全身の形状を獲得している。このため、複数のカメラで計測される空間が存在し、重なりが生じる。また、装置を用いて計測する以上、ノイズの発生を防ぐことは困難である。こうした重なり部分やノイズに対する処理を考察する必要がある。

これらの課題を解決し、より有用な人体表面の再構成手法を確立することが今後の課題である。

付録

A.1 姿勢推定における誤差

表 A.1: “走る”, ボリュームデータとのマッチングにおける誤差

	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
	前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	3.98489	2.27577	2.54171	22.072
腰部	6.67098	6.94609	161.072	47.5848
右上腕	15.3896			44.9706
右前腕	13.4723			72.3374
左上腕	13.1991			62.0078
左前腕	11.4317			51.8894
右大腿	3.81701			10.8201
右下腿	3.17947			28.7548
左大腿	3.28730			25.1228
左下腿	4.63404			54.0535

表 A.2: “走る”, 点群を用いて修正した結果における誤差

	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
	前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	3.98485	2.27574	2.54171	22.0720
腰部	6.67077	6.94586	161.072	47.5848
右上腕	7.04925			22.4957
右前腕	8.83141			68.8385
左上腕	11.3300			48.0407
左前腕	4.79125			6.68278
右大腿	6.42301			31.0815
右下腿	2.67553			15.4897
左大腿	3.29540			35.8199
左下腿	7.13511			52.8412

表 A.3: “座る”, ボリュームデータとのマッチングにおける誤差

	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
	前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	1.03603	7.00080	5.35240	28.9662
腰部	4.31372	7.35583	153.609	28.2227
右上腕	2.04330			31.7596
右前腕	2.72042			18.766
左上腕	16.2931			61.7162
左前腕	9.69264			46.4458
右大腿	0.63987			80.9564
右下腿	8.68465			39.6348
左大腿	5.39534			21.8576
左下腿	2.78728			56.3017

表 A.4: “座る”, 点群を用いて修正した結果における誤差

	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
	前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	1.03607	7.00079	5.35240	28.9662
腰部	4.31373	7.35583	153.609	28.2227
右上腕	2.73669			26.0142
右前腕	5.07003			13.0828
左上腕	9.80727			33.2831
左前腕	15.0674			24.1798
右大腿	6.75851			76.2643
右下腿	9.26949			58.2782
左大腿	9.82233			25.3081
左下腿	3.83447			57.3946

表 A.5: “歩行 1” , ボリュームデータとのマッチングにおける誤差

	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
	前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	0.774952	2.32355	4.63698	13.4945
腰部	8.95437	1.90004	176.622	13.4945
右上腕	9.88307			49.0982
右前腕	8.95248			62.7458
左上腕	2.28716			32.3043
左前腕	6.38882			42.9505
右大腿	5.20127			32.4249
右下腿	4.06519			19.4848
左大腿	8.25614			25.0955
左下腿	9.62454			30.9078

表 A.6: “歩行 1” , 点群を用いて修正した結果における誤差

	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
	前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	0.775007	2.32354	4.63698	13.4945
腰部	8.95430	1.90004	176.622	13.4945
右上腕	3.84299			21.5792
右前腕	14.5936			66.8880
左上腕	5.24993			11.4210
左前腕	5.96845			12.4118
右大腿	11.4953			62.1419
右下腿	4.69158			23.9164
左大腿	7.09744			24.9945
左下腿	1.85686			20.1063

表 A.7: “歩行 2” , ボリュームデータとのマッチングにおける誤差

	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
	前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	5.99344	1.61887	3.06611	29.8497
腰部	2.80454	2.38567	176.891	15.4851
右上腕	7.00862			40.0973
右前腕	9.91401			52.2199
左上腕	6.93339			37.4986
左前腕	12.7629			84.8871
右大腿	5.65127			28.6675
右下腿	9.07044			40.0228
左大腿	5.58144			31.1657
左下腿	4.81293			24.6892

表 A.8: “歩行 2” , 点群を用いて修正した結果における誤差

	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
	前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	5.99349	1.61887	3.06611	29.8497
腰部	2.80455	2.38568	176.891	15.4851
右上腕	2.17663			4.21570
右前腕	5.35759			52.0276
左上腕	4.25834			15.1473
左前腕	12.4287			52.6072
右大腿	3.65847			22.6600
右下腿	4.32509			9.87549
左大腿	3.04928			18.3133
左下腿	0.674974			53.8034

表 A.9: “ダンス 1” , ボリュームデータとのマッチングにおける誤差

	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
	前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	0.247862	5.18329	0.933498	23.6958
腰部	1.62528	4.49109	176.330	31.8547
右上腕	5.22182			28.5811
右前腕	1.53484			61.7635
左上腕	9.20986			54.5752
左前腕	5.94033			61.6565
右大腿	0.482185			55.7419
右下腿	7.71130			36.5946
左大腿	4.13440			42.0548
左下腿	4.45584			20.0681

表 A.10: “ダンス 1” , 点群を用いて修正した結果における誤差

	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
	前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	0.247991	5.18328	0.933498	23.6958
腰部	1.62441	4.49128	176.330	58.3396
右上腕	4.54352			26.9107
右前腕	2.76862			60.1491
左上腕	2.17070			8.14894
左前腕	7.89027			59.8069
右大腿	7.22471			38.3041
右下腿	2.18855			14.6305
左大腿	0.295719			13.3994
左下腿	4.37017			22.0460

表 A.11: “ダンス2”, ボリュームデータとのマッチングにおける誤差

	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
	前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	0.644043	2.78684	1.13371	18.8495
腰部	6.79312	2.52337	177.367	14.5008
右上腕	5.58562			45.9275
右前腕	1.24729			38.4020
左上腕	4.88772			27.2088
左前腕	5.47460			87.9276
右大腿	3.05842			29.3765
右下腿	1.06725			19.2600
左大腿	5.14730			37.9045
左下腿	1.99867			27.0715

表 A.12: “ダンス2”, 点群を用いて修正した結果における誤差

	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
	前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	0.644063	2.78683	1.13371	18.8495
腰部	6.79305	2.52337	177.367	14.5008
右上腕	5.61951			13.7147
右前腕	1.11601			37.8616
左上腕	5.62248			28.6946
左前腕	5.69912			87.7583
右大腿	2.47964			18.4202
右下腿	0.55902			14.8424
左大腿	5.38486			35.7457
左下腿	3.97035			20.6109

表 A.13: “ダンス3”, ボリュームデータとのマッチングにおける誤差

	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
	前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	3.04664	10.6598	0.0136331	53.959
腰部	2.21899	7.29525	5.44795	55.5812
右上腕	10.9820			56.4071
右前腕	12.5602			45.1789
左上腕	17.7725			93.6127
左前腕	6.06884			21.7546
右大腿	6.89583			44.5710
右下腿	6.19854			43.3590
左大腿	6.54584			35.4901
左下腿	1.25308			28.0149

表 A.14: “ダンス3”, 点群を用いて修正した結果における誤差

	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
	前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	3.04649	10.66	0.0136331	53.959
腰部	2.21912	7.29519	5.44795	55.5812
右上腕	8.55084			42.1319
右前腕	1.42941			10.1098
左上腕	2.27715			55.6912
左前腕	3.00059			30.2039
右大腿	4.10792			43.5601
右下腿	2.18255			28.9604
左大腿	7.16412			28.0844
左下腿	2.12424			15.8376

表 A.15: “ダンス4”, ボリュームデータとのマッチングにおける誤差

	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
	前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	1.68808	6.26563	5.73820	30.0230
腰部	3.34364	4.98828	171.877	22.5404
右上腕	5.40816			22.4845
右前腕	6.12601			28.4646
左上腕	6.10748			30.9409
左前腕	9.82428			48.0906
右大腿	11.8317			51.7903
右下腿	2.33321			53.3637
左大腿	8.08788			37.9853
左下腿	8.88320			40.5798

表 A.16: “ダンス4”, 点群を用いて修正した結果における誤差

	角度誤差 (度)			始点位置誤差 (mm)
	前後方向	左右方向	回転方向	
胸部	1.68823	6.26568	5.7382	30.023
腰部	3.34363	4.9883	171.877	22.5404
右上腕	6.46939			6.29222
右前腕	4.51983			7.28528
左上腕	11.0615			32.9421
左前腕	11.8419			18.2080
右大腿	8.68676			41.2593
右下腿	5.12313			53.2152
左大腿	9.16491			44.5475
左下腿	8.96422			32.8609

謝辞

本研究を行うにあたり多くの御教示，熱心な御指導を賜りました美濃導彦教授に深く感謝致します。そして，貴重な助言を数多く頂きました角所考助教授，水田忍助手に心より感謝致します。また，数々の助言を頂きました美濃研究室モデルグループの方々，並びに美濃研究室の皆様にご深くお礼を申し上げます。最後に，人体形状データを提供して頂くと共に貴重な時間を割いてデータ採取に協力して頂いた人間生活工学研究センターの皆様にご感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Nina Amenta, Marshall Bern, Manolis Kamvysselis: A New Voronoi-Based Surface Reconstruction Algorithm, *SIGGRAPH 1998 Conference Proceedings*, pp. 415-421(1998)
- [2] Thung-Pao Fang, Les A. Piegl: Delaunay Triangulation in Three Dimensions *IEEE Computer Graphics and Applications* september 1995, pp. 62-69(1995)
- [3] Dimitris Metaxas, Eunyoung Koh, Norman I. Badler: Multi-Level Shape Representation Using Global Deformations and Locally Adaptive Finite Elements, *International Journal of Computer Vision* 25(1), 49-61(1997)
- [4] 松岡 司, 植田 健治, 早野 勝之: 格子点連結法と局所操作を用いた点群データからのソリッドモデル自動再構成, *情報処理学会論文誌* Vol.40, No.5, pp. 2377-2386(1999)
- [5] 毛呂 功, 福島 茂信, 水田 忍, 美濃 導彦: 二次元射影による点群データからの人体表面再構成, 2000 年電子情報通信学会情報・システムソサイエティ大会 No.D-12-42, pp. 229, 2000.
- [6] 亀田 能成, 美濃 導彦, 池田 克夫: シルエット画像からの関節物体の姿勢推定法, *電子情報通信学会論文誌* J79-D-II, No.1, pp. 26-35(1996)
- [7] 飯山将晃: 時系列 Volume Data からの関節点位置推定による関節物体姿勢の獲得, 修士論文, 京都大学大学院情報学研究科知能情報学専攻 (1999)
- [8] 生命工学工業技術研究所 編: 設計のための人体寸法データ集
- [9] 内山晋二: 3次元映像のための実対象情報の入力・表現 (1998)
- [10] 西田 典了, 福島 茂信, 美濃 導彦: 部分計測データへの標準人体モデル当てはめによる人体形状推定法, *電子情報通信学会論文誌* J83-D-II, No.7, pp. 1310-1318(2001).