

NAIST-IS-MT9451055

修士論文

3次元形状モデル生成のための 多視点距離データの位置合せと統合

下鍋 忠

1996年2月16日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学)授与の要件として提出した修士論文である。

下鍋 忠

指導教官： 横矢 直和 教授
千原 國宏 教授
竹村 治雄 助教授

3次元形状モデル生成のための 多視点距離データの位置合せと統合*

下鍋 忠

内容梗概

CG (Computer Graphics) や CAD (Computer Aided Design) の分野においては、描画の対象とする物体の3次元形状モデルを扱うものが主流である。従来、3次元形状の計算機への入力には人間の手作業によって行われることが多く、そのために複雑な形状の入力には多大な時間と労力が必要であった。このような背景から、レンジファインダなどによって計測された実物体の3次元データから、3次元形状モデルを自動的に生成する手法への要求が高まっている。これまでにも様々な研究が行われているが、モデルの自動生成のためには、物体表面の完全な形状を得るために複数の方向から計測されたデータ間の位置合せを正確に行い、データを1つに統合することが重要な課題となる。

本論文では、3次元形状モデルの生成において必要な処理である多視点から得られた複数の距離データの位置合せ問題に対して、複数の異種距離データ間の位置合せを並行的に行い、計測誤差を考慮した位置合せ誤差関数の最小化により、全体としての位置合せ誤差を平均的に最小化する手法を提案する。また、データ統合においては、従来の手法を簡略化したものを実装することで実現する。最後に複雑な形状をした実物体に対して本手法を適用した実験を行い、その有効性を確認する。

キーワード

3次元形状モデル, レンジファインダ, 多視点距離データ, 位置合せ, データ統合

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT9451055, 1996年2月16日.

Registration and Integration of Multiview Range Data for Building a 3D Model*

Tadashi Shimonabe

Abstract

In the field of CG (Computer Graphics) and CAD (Computer Aided Design), 3D models of objects have been generally used. 3D models are usually constructed by humans with support of solid modelers, and in the case of complicated objects, it is very difficult to build the 3D models. Recently a method of automatically building 3D models is required and studied. The method involves registering between multiview range data and integrating them to a complete 3D model.

This paper proposes the method of registering different types of range data from multiple views in parallel by minimizing a registration error function considering data acquisition errors. In this paper, the registered data is integrated by the prototype of previous method. The experimental results with range data of existing objects are described in order to show the effectiveness of the method.

Keywords:

3D model, rangefinder, multiview range data, registration, data integration

*Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT9451055, February 16, 1996.

目次

1. はじめに	1
2. 多視点距離データの位置合せと統合	3
2.1 レンジファインダと距離データ	3
2.1.1 全周計測レンジファインダ	3
2.1.2 平行投影型レンジファインダ	6
2.1.3 計測誤差	9
2.2 位置合せ問題	9
2.2.1 3次元剛体変換パラメータ	9
2.2.2 従来の位置合せ手法とその問題点	10
2.3 統合問題	13
2.3.1 従来の統合手法	13
3. 計測誤差を考慮した複数の異種距離データの位置合せ	15
3.1 位置合せ手法の概要	15
3.2 初期変換パラメータの獲得	16
3.2.1 カラーデータと輝度データを利用した対応点の決定	16
3.2.2 Hornらの手法による初期変換パラメータの推定	18
3.3 メッシュデータへの変換	19
3.3.1 距離データの三角パッチ化	19
3.4 補正処理	20
3.4.1 各頂点における対応点の決定	20
3.4.2 位置合せ誤差関数の定義	22
3.4.3 線形最小二乗法による微小変換行列の計算	23
3.4.4 収束判定	24
4. 複数距離データの統合	25
4.1 統合処理の概要	25
4.2 冗長な三角パッチの削除	26

4.3	頂点座標の更新	26
5.	実験と結果	28
5.1	実験環境および設定条件	28
5.2	実験 1: 埴輪の馬	29
5.3	実験 2: 陶器の人形	33
5.4	実験 3: 鷲と蛇の置物	37
5.5	実験 4: 木彫りの犬	41
6.	むすび	45
	謝辞	47
	参考文献	48

目 次

2.1	全周計測レンジファインダの構成	4
2.2	円筒座標系の距離画像とカラー画像 (木彫りの犬)	5
2.3	平行投影型レンジファインダの構成	7
2.4	平行投影型レンジファインダによる計測データ	8
2.5	平行投影型の距離画像と輝度画像 (木彫りの犬)	8
3.1	カラーデータと輝度データを利用した対応点の決定	17
3.2	初期変換パラメータ	18
3.3	三角パッチ化	19
3.4	対応点の決定	21
5.1	入力距離データ (埴輪の馬)	30
5.2	位置合せ補正前の統合結果 (埴輪の馬)	31
5.3	位置合せ補正後の統合結果 (埴輪の馬)	31
5.4	位置合せ誤差の分布 (埴輪の馬)	32
5.5	入力距離データ (陶器の人形)	34
5.6	位置合せ補正前の統合結果 (陶器の人形)	35
5.7	位置合せ補正後の統合結果 (陶器の人形)	35
5.8	位置合せ誤差の分布 (陶器の人形)	36
5.9	入力距離データ (鷲と蛇の置物)	38
5.10	位置合せ補正前の統合結果 (鷲と蛇の置物)	39
5.11	位置合せ補正後の統合結果 (鷲と蛇の置物)	39
5.12	位置合せ誤差の分布 (鷲と蛇の置物)	40
5.13	入力距離データ (木彫りの犬)	42
5.14	位置合せ補正前の統合結果 (木彫りの犬)	43
5.15	位置合せ補正後の統合結果 (木彫りの犬)	43
5.16	位置合せ誤差の分布 (木彫りの犬)	44

1. はじめに

CG (Computer Graphics) や CAD (Computer Aided Design) の分野においては、描画の対象とする物体の 3 次元形状モデルを扱うものが主流である。また、物体の 3 次元形状モデルは文化財などの形状データベースへの応用も期待されている。しかし、3 次元形状の計算機への入力には人間の手作業によって行われることが多く、そのために複雑な形状の入力には多大な時間と労力が必要であった。このような背景から、レンジファインダなどによって計測された実物体の 3 次元データから、3 次元形状モデルを自動的に生成する手法への要求が高まっており、これまでも様々な研究が行われている [1, 2]。

3 次元形状モデルの自動生成のためには、まず、物体の 3 次元形状を計測する必要がある。3 次元形状の計測は様々な方法で実現されるが、レンジファインダによる計測が一般的になってきた。レンジファインダは非接触に物体の 3 次元形状を計測する装置で、一般に光などを対象物に投射するような能動的な方法で実現されている。しかしながら、一般にレンジファインダによる 1 方向からの計測では、物体の背面や凸部に隠された部分などの形状が得られない。これを解決するものとして物体の周囲を回転しながら全周の計測を行うレンジファインダが存在するが、この場合にも物体の上下や凸部に隠された部分は計測することができない。そこで、異なった視点から複数回計測を行い、得られた複数の距離データを元に全周の形状情報を獲得する必要がある。

多視点からの計測により得られた複数の距離データはそれぞれ視点に依存した異なる座標系で表現されている。従って、それらのデータを統合するためには、それぞれの座標系で表現されたデータを物体固有の座標系で表現されたデータに変換する処理が必要である。この変換の際に必要な 3 次元剛体変換パラメータを推定する処理は位置合せと呼ばれ、距離データを利用する上で非常に重要な処理である。これまでも、2 つの距離データ間の位置合せに関しては様々な研究が行われてきた。それらは、2 つの距離データ間の対応付けに基づく方法 [3, 4, 5, 6]、繰り返しアルゴリズムによる方法 [7, 8, 9] に大きく分類される。これらの 2 つの距離データ間の位置合せ手法では、対象物の形状や初期条件に制限があるものの、比較的精度良く位置合せが行えることが示されている。しかし、これらの方法を 3

つ以上の距離データの統合へ適用した場合、2つの距離データ間の位置合せ誤差の累積によって、全体としての位置合せ誤差が大きくなってしまいう問題がある。この問題に対処するためには、複数の距離データ間の位置合せを並行的に行い、全体としての位置合せ誤差を最小化する方法が必要である。この問題に対する研究として Gannon ら [10] および, Blais ら [11] の手法があるが、いずれの手法も、入力として1方向から得られる直交座標系で表現された距離データのみを対象としている。また、複数の距離データ間の位置合せを並行的に行うものではないが、異なる形式の距離データを対象とした位置合せ手法として、藤木ら [12] の手法があるが、この手法の適用範囲は限られている。

本論文では、多視点から得られた複数の異なる形式の距離データを対象とし、それらの距離データ間の位置合せを並行的に行い、全体としての位置合せ誤差を最小化する手法を提案する。その概略は、異なる形式の距離データを区別なく扱うために三角パッチ表現であるメッシュデータに変換し、補正処理によって手動により求めた初期変換パラメータの精度を向上させるというものである。補正処理に関しては、Gannon ら [10] の手法を三角パッチ表現を扱えるように拡張し、より精度良く位置合せを行うことを考え、計測誤差を考慮した位置合せ誤差関数を新たに定義する。また、位置合せによって複数の距離データは物体固有の座標系に変換されるが、そのままではある部分に対して複数の異なる記述が存在し、データとして利用しにくいだけでなく冗長である。従って、それらを1つの3次元形状データとして統合する必要がある。この問題に関するものとして、Soucy ら [13, 14, 15] および, Turk ら [16] の手法があるが、本研究では Turk らの手法を簡略化したものを実装し統合を行った。

以下、2章で多視点距離データの位置合せと統合に関して、レンジファインダと距離データ、及び求めるべき3次元剛体変換パラメータについて説明し、3章では本論文における提案手法について述べる。さらに、4章で位置合せされた複数の距離データの統合について説明し、5章では実物体に提案手法を適用した結果を示す。最後に、6章で結果をまとめ、むすびとする。

2. 多視点距離データの位置合せと統合

実物体の計測に基づく 3 次元形状モデルの自動生成は,

1. レンジファインダによる物体の多視点からの計測.
2. 多視点から得られた複数の距離データの位置合せ.
3. 位置合せされた複数の距離データの統合.

の 3 つのステップから構成される.

本章では, 本研究において使用した 2 種類のレンジファインダと得られる距離データについて説明し, 位置合せ問題, 統合問題の概略とこの問題に関する従来手法について述べる.

2.1 レンジファインダと距離データ

レンジファインダは非接触に物体の 3 次元形状を計測する装置で, 一般に光などを対象物に投射するような能動的な方法で実現されており, 近年非常に一般的になってきた. 本研究では, 対象物の周りを回転しながら計測する Cyberware 社製の全周計測レンジファインダと, 1 方向からの計測を行うクボタ社製の並行投影型レンジファインダ *Cubist* を使用し, 多視点から実物体の 3 次元形状の計測を行った.

本節では, 本研究で使用した 2 種類のレンジファインダと得られる距離データについて説明する. また, レンジファインダによる計測における計測誤差についても述べる.

2.1.1 全周計測レンジファインダ

Cyberware 社製の全周計測レンジファインダは, 図 2.1 に示すように PS プラットフォームとホストコンピュータから構成されている. PS プラットフォームには, レーザー光源とイメージセンサからなるアームが取り付けられており, このアームが対象物の周りを回転しながらレーザーを照射し, その反射光を受光することによって計測を行う装置である.

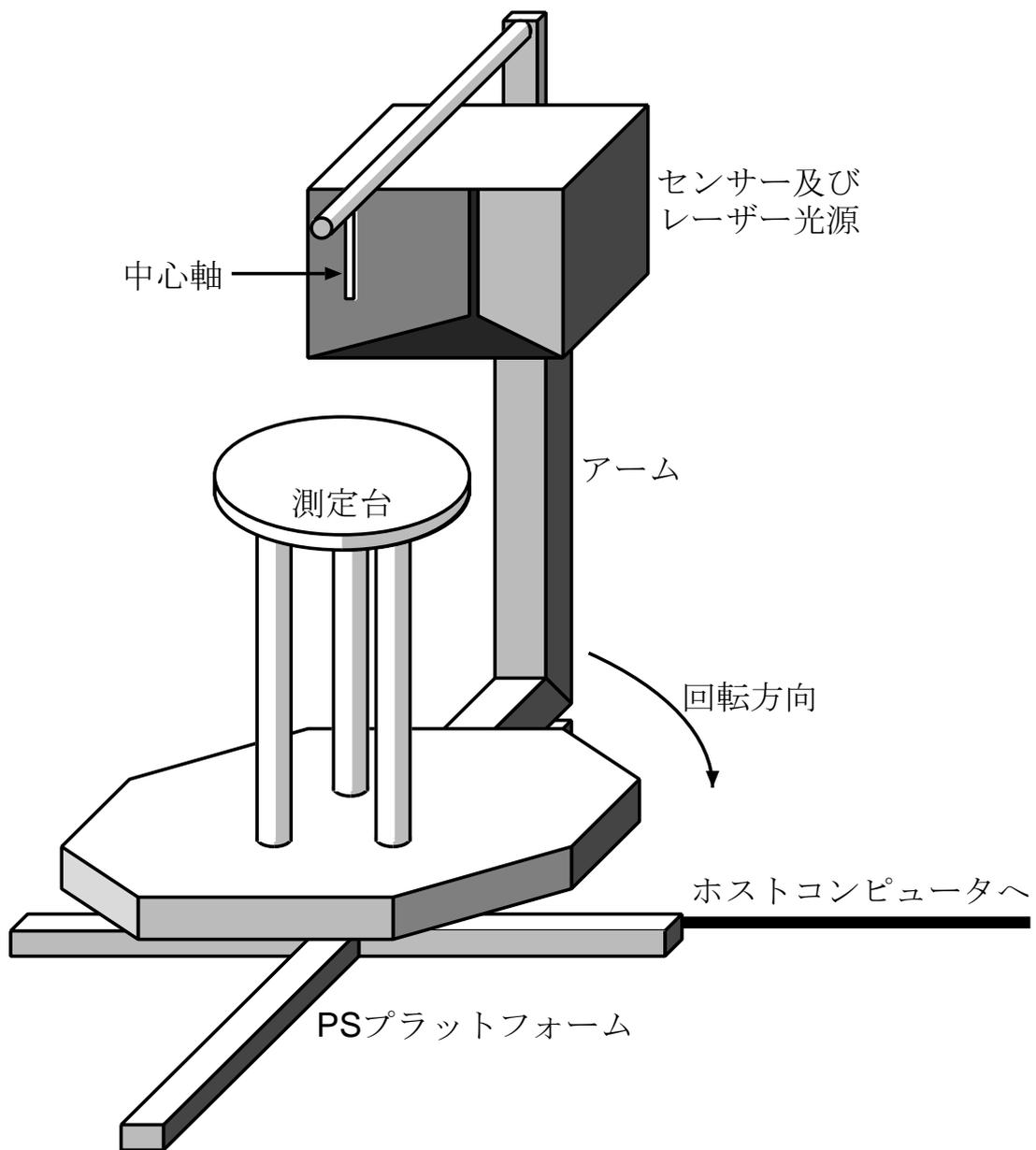
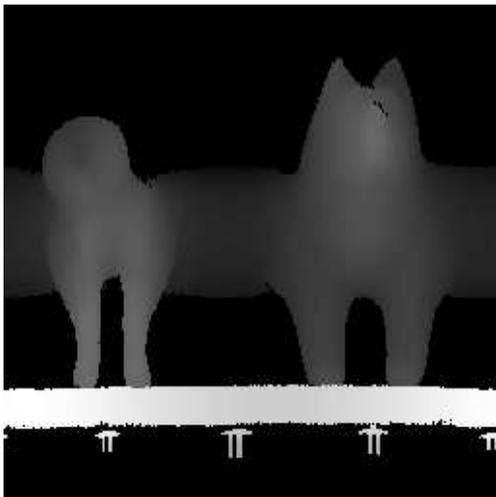


図 2.1 全周計測レンジファインダの構成

この装置で得られる距離データは円筒座標系で表現されており, 各計測点は高さ
と回転角及び, 回転軸からの距離で表される. また, 今回使用した距離データの
高さ方向, 及び回転角方向はそれぞれ 512 分割されており, サンプル間隔はそ
れぞれ $500\mu\text{m}$, $12272\mu\text{rad}(2\pi/360\mu\text{rad})$ となっている. さらに, 各計測点のカラー
データも同時に得られる. 図 2.2 に, それぞれ, 回転角を横軸, 高さを縦軸, 回転軸
からの距離とカラーデータをその画素値として表現した円筒座標系の距離画像と
カラー画像の例を示す.



(a) 円筒座標系距離画像



(b) 円筒座標系カラー画像

図 2.2 円筒座標系の距離画像とカラー画像 (木彫りの犬)

2.1.2 平行投影型レンジファインダ

クボタ社製の平行投影型レンジファインダ *Cubist* は, 図 2.3 に示すようにカメラヘッド, 測定テーブル, 信号処理装置, ホストコンピュータの部分から構成されている. カメラヘッドには, レーザー光源, イメージセンサが取り付けられており, レーザーを測定物に高速, 高精度に走査し, その反射光をイメージセンサ上で受光する. そして, 得られたセンサ情報を信号処理装置でリアルタイムに信号処理し, 距離の情報を検出する. また, 測定テーブルにはスライドテーブルが取り付けられており, スライドテーブル上の測定対象をカメラヘッドの走査に合わせて移動させることによって計測を行う. 測定空間は, スライドテーブル上の $250 \times 200 \times 200\text{mm}$ の空間となっている.

Cubist による計測で得られるデータは, スライドテーブルの移動方向である x 方向, レーザーの走査方向である y 方向それぞれに対し 512 分割されており, x 方向に関しては $500\mu\text{m}$ 毎に等間隔にならんでいるが, レーザースポット光を y 方向に走査しながら測定しているため, y 方向は一様にそろっていない. 従って, 図 2.4 に示すように, 各計測点ごとに y 座標値と z 座標値をもっている. ここで, z 座標値はスライドテーブルからの距離を表している. さらに, 各計測点の輝度値も同時に得られる. 図 2.5 に, y 方向を等間隔になるように線形補間により変換し, z 座標値と輝度値をその画素値として表現した距離画像と輝度画像の例を示す.

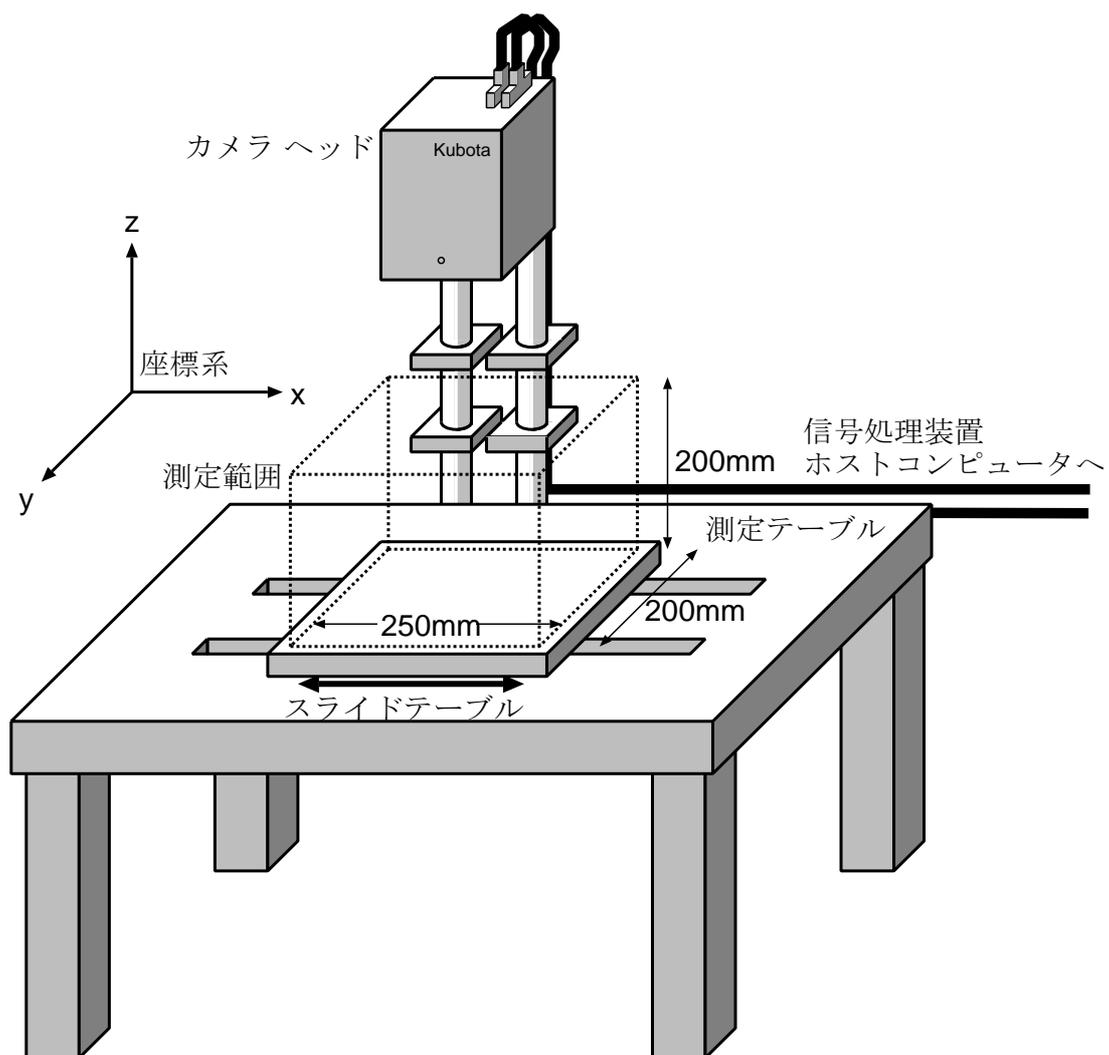


図 2.3 平行投影型レンジファインダの構成

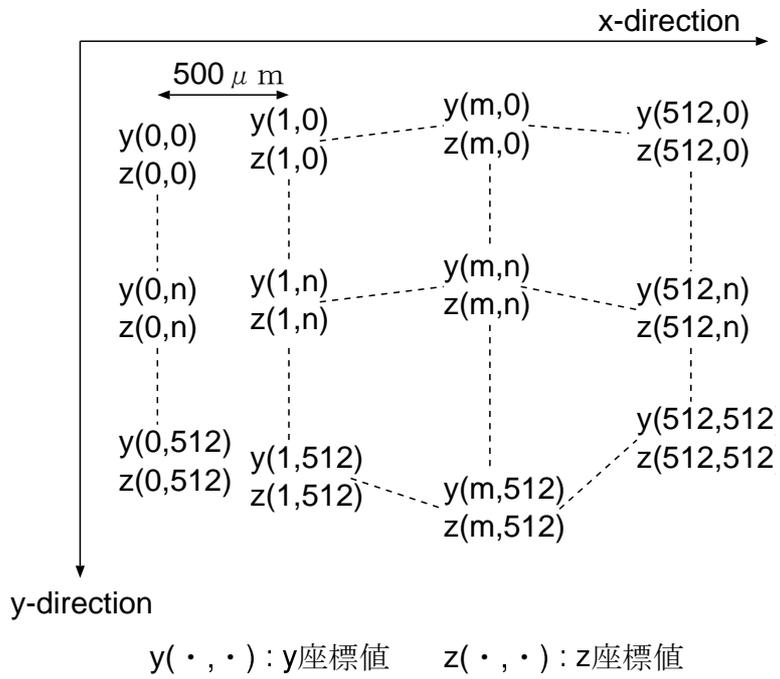
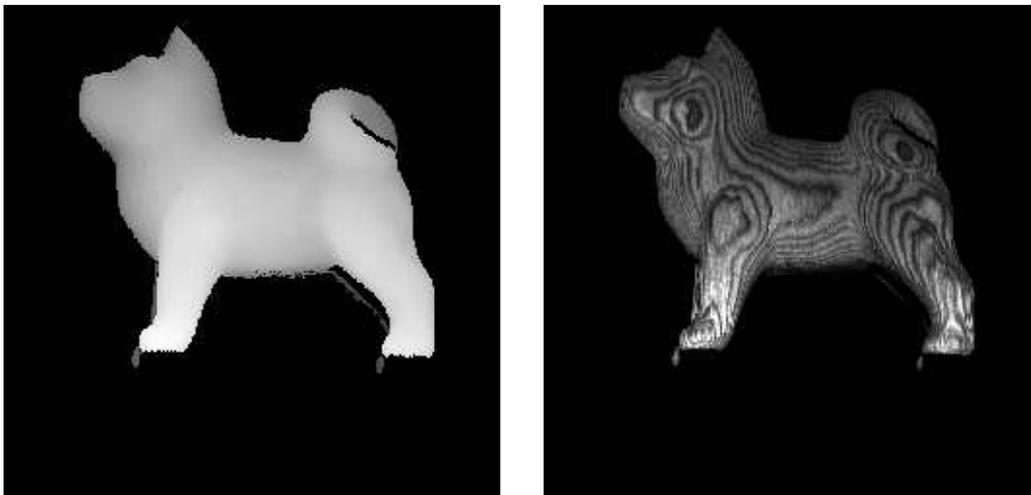


図 2.4 平行投影型レンジファインダによる計測データ



(a) 平行投影型距離画像

(b) 平行投影型輝度画像

図 2.5 平行投影型の距離画像と輝度画像 (木彫りの犬)

2.1.3 計測誤差

レンジファインダは、レーザー光を対象物に投射し、その反射光を基に距離の情報を獲得している。従って、対象物の測定面がセンサに対して大きく傾いている領域や、物体表面に変化の激しい凹凸が存在する場合のエッジ部分においては、反射光が弱くなるためその計測誤差が大きくなる可能性がある。

本研究では、この計測誤差の影響を考慮した位置合せを行うが、具体的には3章で説明する。

2.2 位置合せ問題

一般に異なる方向から得られた距離データは、それぞれ視点に依存した異なる座標系で表現されている。従って、それらを同時に利用するためには、それぞれの座標系で表現されたデータを物体固有の座標系で表現されたデータに変換する処理が必要である。この処理は位置合せと呼ばれており、距離データを利用する上で非常に重要な処理である。位置合せの対象となる物体は、一般に運動によって形状が変化しない剛体であり、この剛体の変換は3次元剛体変換パラメータによって決定される。

本節では、この3次元剛体変換パラメータについて説明し、位置合せに関する従来手法とその問題点について述べる。

2.2.1 3次元剛体変換パラメータ

3次元剛体変換は、 x, y, z 軸周りの回転運動と、 x, y, z 軸方向の平行移動によって表現され、それらの6つのパラメータ（各軸周りの回転角、 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ と、各軸方向の並進成分、 t_x, t_y, t_z ）は3次元剛体変換パラメータと呼ばれている。この6つのパラメータによる3次元剛体変換は、 3×3 の回転行列 \mathbf{R} と並進成分 \mathbf{t} で表現される1次変換であり、3次元空間の点 $\mathbf{p} = [x \ y \ z]^t$ はこの変換により、

$$\mathbf{p}' = [x' \ y' \ z']^t = \mathbf{R}\mathbf{p} + \mathbf{t} \quad (2.1)$$

へ移動する. ここで, x, y, z 軸周りの回転行列をそれぞれ, $\mathbf{R}_x, \mathbf{R}_y, \mathbf{R}_z$ とすると, \mathbf{R} は,

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{R}_x \mathbf{R}_y \mathbf{R}_z \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_x & -s_x \\ 0 & s_x & c_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_y & 0 & s_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_y & 0 & c_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_z & -s_z & 0 \\ s_z & c_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c_y c_z & -c_y s_z & s_y \\ s_x s_y c_z + c_x s_z & -s_x s_y s_z + c_x c_z & -s_x c_y \\ -c_x s_y c_z + s_x s_z & c_x s_y s_z + s_x c_z & c_x c_y \end{bmatrix} \\ &\quad (\text{但し, } s_* = \sin(\theta_*), c_* = \cos(\theta_*), * = x \text{ or } y \text{ or } z) \end{aligned}$$

と表され, \mathbf{t} は,

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_x & t_y & t_z \end{bmatrix}^t$$

と表される.

3次元座標値, 及び3次元剛体変換を同次座標系で表現することにより, 式(2.1)は以下のように表される.

$$\begin{aligned} \mathbf{q}' &= \mathbf{T} \mathbf{q} & (2.2) \\ \left(\begin{array}{l} \text{但し, } \mathbf{q}' = \begin{bmatrix} x' & y' & z' & 1 \end{bmatrix}^t, \quad \mathbf{q} = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^t \\ \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{o} & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{o} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \right) \end{aligned}$$

この表現により, 例えば2つの3次元剛体変換 ($\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2$) を順に行う場合, その変換行列は,

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_2 \mathbf{T}_1$$

と, 積の形で表現できる利点がある. 従って, 以降はこの表現で3次元剛体変換を扱うものとする.

2.2.2 従来の位置合せ手法とその問題点

本節では, 位置合せに関する従来手法とその問題点について述べる.

2 つの距離データ間の対応付けに基づく方法 Faugeras ら [3] および, Horn [4] は, 2 つの距離データ間の正しい対応点が 3 組以上求まっている場合に, 回転行列を単位四元数を用いて表現することにより, 対応点間の距離の二乗誤差の和で定義される誤差関数を線形化し, それを最小にするような 3 次元剛体変換パラメータを推定する方法を提案している. この手法では, 2 つの距離データ間の対応付けが正しく行われていることが必要であるが, その場合には比較的精度良く 3 次元剛体変換パラメータを推定することができる. これに関して, 対象物の形状や特徴を基に 2 つの距離データ間の対応付けを自動的に行うための研究も行われている [5, 6].

繰り返しアルゴリズムによる方法 2 つの距離データ間の対応付けを事前に行う必要のない手法として, Besl ら [7] の提案した ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズムがある. この手法では, まず, 3 次元剛体変換パラメータを初期化する. そして, それを基に第 1 の距離データを変換し, 変換された第 1 の距離データの各点から最も近い距離にある第 2 の距離データ内の点を対応点として対応関係を設定する. 次に, 得られた対応関係から Horn らの手法によって 3 次元剛体変換パラメータを推定する. 以上の処理を繰り返すことによって, 最終的に正しい 3 次元剛体変換パラメータを獲得することができる. しかし, 一般に異なる視点から得られた 2 つの距離データ間にはオクルージョンなどによって正しい対応付けができない点が存在するため, このままでは利用できない. 増田ら [8] は, これを解決するために, LMS (Least Median of Squares) 推定に基づいた誤差関数を定義し, ランダムサンプリングによって選ばれた少数の点を ICP アルゴリズムに適用することを繰り返し, この誤差関数の最小化を行う手法を提案している. また, ICP アルゴリズムと本質的に類似するが, 明確に対応付けを行わず, 誤差関数の最小化によって 3 次元剛体変換パラメータを求める方法に Chen ら [9] の手法がある. Chen らは, 一方のデータの比較的滑らかな部分から得らんだ制御点での法線と他方のデータとの交点における接平面とその制御点との距離の和で誤差関数を定義し, それを最小化する微小変換パラメータを線形最小二乗法によって求めている.

遺伝的アルゴリズムによる方法 山村 [17] は, 近似解が未知の位置合せ問題をまず組合せ最適化問題として定式化し, これを最適化手法の 1 つである遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) によって解くことで近似解を推定し, この近似解を隠蔽を含むデータに対しても利用できるように一部修正した変形 ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズムに初期値として与えることでより精度の高い解を求める手法を提案している.

複数の距離データ間の並行的な位置合せ 上述の通り, 2 つの距離データ間の位置合せに関しては, 対象物の形状や初期条件に制限があるものの, 比較的精度良く位置合せが行える手法が提案されている. しかし, これらの方法を 3 つ以上の距離データの統合へ適用した場合, 2 つの距離データ間の位置合せ誤差の累積によって, 全体としての位置合せ誤差が大きくなってしまいうという問題がある. この問題に対処するためには, 複数の距離データ間の位置合せを並行的に行い, 全体としての位置合せ誤差を最小化する方法が必要である. この問題に対し, Gannon ら [10] は, Chen ら [9] の手法を複数の距離データに適用できるように一般化し位置合せを行っている. この手法では, ある 1 つの距離データの座標系を基準座標系とし, 他の距離データの座標系から基準座標系への変換パラメータを繰り返し処理によって補正している. その際, 各点に対応する接平面をすべての距離データに対して探索し, 各点と接平面との距離の二乗和という形で誤差関数を定義している. また, Blais ら [11] は, レンジファインダのキャリブレーション処理を逆に行うことにより距離データ間の対応点を決定し, その対応点間の距離の和として定義した誤差関数を確率的な最適化手法である VFSSR (very fast simulated reannealing) によって最小化している. しかし, いずれの手法も, 入力として 1 方向から得られる直交座標系で表現された距離データのみを対象としている.

また, 複数の距離データ間の位置合せを並行的に行うものではないが, 異なる距離データを対象とした位置合せ手法として, 藤木ら [12] の手法がある. しかし, この手法の適用は, 対象物の側面の形状を表す円筒座標系の距離データと, 上下方向から測定した平行投影型の距離データの位置合せに限られる.

以上のことから, 3次元形状モデルを生成するためには, 複数の距離データの位置合せを並行的に行う必要がある. また, 異なる形式の距離データを位置合せすることで, 応用範囲も広がると思われる. そこで, 本論文では, 多視点から得られた複数の異なる形式の距離データを対象とし, それらの距離データ間の位置合せを並行的に行い, 全体としての位置合せ誤差を最小化する手法を提案する. また, 計測誤差を考慮した位置合せ誤差関数を定義することにより, 位置合せ精度の向上を図る.

2.3 統合問題

複数の距離データは位置合せされることによって, 物体固有の座標系に変換され, 物体の欠落のない形状データとなるが, このままでは, ある部分に対して複数の異なる記述が存在し, データとして利用しにくいだけでなく冗長である. そこで, 複数の記述の存在する領域を1つの記述で表現し, 分割されている複数の距離データを1つの3次元形状モデルとして統合する必要がある.

統合の手法は, 以下の2つに分類される.

- 未構成データの統合
- 構成済みデータの統合

本節では, 統合に関する従来手法について述べる.

2.3.1 従来 of 統合手法

未構成データの統合 Chen ら [18] は, balloon model という変形可能モデルを提案している. この手法は, 複数の距離データから得られた点群内に三角メッシュで構成された多面体を置き, 頂点数を増加させながら膨張させ, 点群に張りつけることにより全体の形状情報を三角メッシュで求めるものである.

構成済みデータの統合 Soucy ら [13, 14, 15] は, 複数の三角メッシュの重なり方に基いてベン図を作成し, その部分集合ごとに新たに設定した平面の格子に正射影したあと, その格子点の座標値を加重平均によって更新し, メッシュを再構成す

る. 最後に, 隙間を三角パッチで埋めることによりこれらのメッシュを接続し, 統合モデルを求めている.

Turk ら [16] は, ICP アルゴリズムを一部しか重なりのない三角メッシュ間に適用できるように変形し位置合せを行ったあと, 重なっている領域 (冗長な三角パッチ) をそれぞれの端から削除していき, 重なりがなくなったところでそれらを接続する. 生成された三角メッシュの頂点の法線とすべての入力データとの交点の座標値の平均を新たな頂点とすることで統合モデルを求めている.

以上のように, 位置合せされた複数の距離データに対して統合を行う手法が提案されており, これらは比較的複雑な物体に対しても適用可能である. 従って, 本論文ではメッシュデータを使用して位置合せを行っていることから, それらに適用可能な Turk らの手法を簡略化したものを統合処理において採用した. 手法の詳細については 4 章で述べる.

3. 計測誤差を考慮した複数の異種距離データの位置合せ

2.2.2 節でも述べたように、2つの距離データ間においては比較的精度良く位置合せが行える手法が提案されている。しかし、異なる視点から得られた距離データ間では計測点が完全に一致することがないため、比較的精度良く位置合せが行えた場合においても、わずかな位置合せ誤差が存在する。従って、これらの結果を3つ以上の距離データの統合へ適用した場合、2つの距離データ間の位置合せ誤差の累積によって、全体としての位置合せ誤差が大きくなってしまいう問題がある。この問題に対処するためには、複数の距離データ間の位置合せを並行的に行い、全体としての位置合せ誤差を最小化する方法が必要である。しかし、複数の距離データを同時に扱った従来の研究では、入力として平行投影型の距離データのみを使用したものがほとんどである。そこで、本研究では、全周計測レンジファインダによって得られる円筒座標系距離データと平行投影型の距離データの2種類のデータを扱い、位置合せを行うことを提案する。また、計測誤差を考慮した位置合せ誤差関数を新たに定義することにより、位置合せの精度の向上を図る。

以下、本章では、本論文で提案した計測誤差を考慮した複数の異種距離データの位置合せ手法について説明する。

3.1 位置合せ手法の概要

本手法は、以下のような構成になっている。

1. 前処理

- 手動によりすべての距離データの座標系から基準座標系への初期変換パラメータ (近似解) を求める。
- 距離データの形式に依存しない処理を行うために、すべての距離データをメッシュデータ (三角パッチ表現) へ変換し、以降の処理はメッシュデータのみを使用する。

2. 複数のメッシュデータを同時に扱った補正処理を行い, 初期変換パラメータの精度を向上させる.

以下, それぞれについて順に説明する.

3.2 初期変換パラメータの獲得

制御可能なターンテーブルやロボットアームなどを利用できる場合, その制御装置から初期変換パラメータを獲得できるが, 本研究で使用した計測装置では, 対象物の移動量を得ることができないため, 手動により初期位置合せを行った. 以下, その方法について順に説明する.

3.2.1 カラーデータと輝度データを利用した対応点の決定

まず, 共通の観測領域を有する 2 つの距離データ間の対応点を 3 組以上指定する. ここで, 図 2.2, 2.5 からわかるように, 距離データ上で対応点を指定することは困難であるため, 計測時に同時に得られるカラーデータと輝度データを利用し対応点を指定する. 具体的には, カラーデータ, 及び輝度データをウィンドウ上に表示し, 対応関係をマウスによりクリックすることで指定する (図 3.1). そして, 距離データからクリックされた点の座標値を獲得し, 対応する点の座標値の組を得る.

対応点の座標値

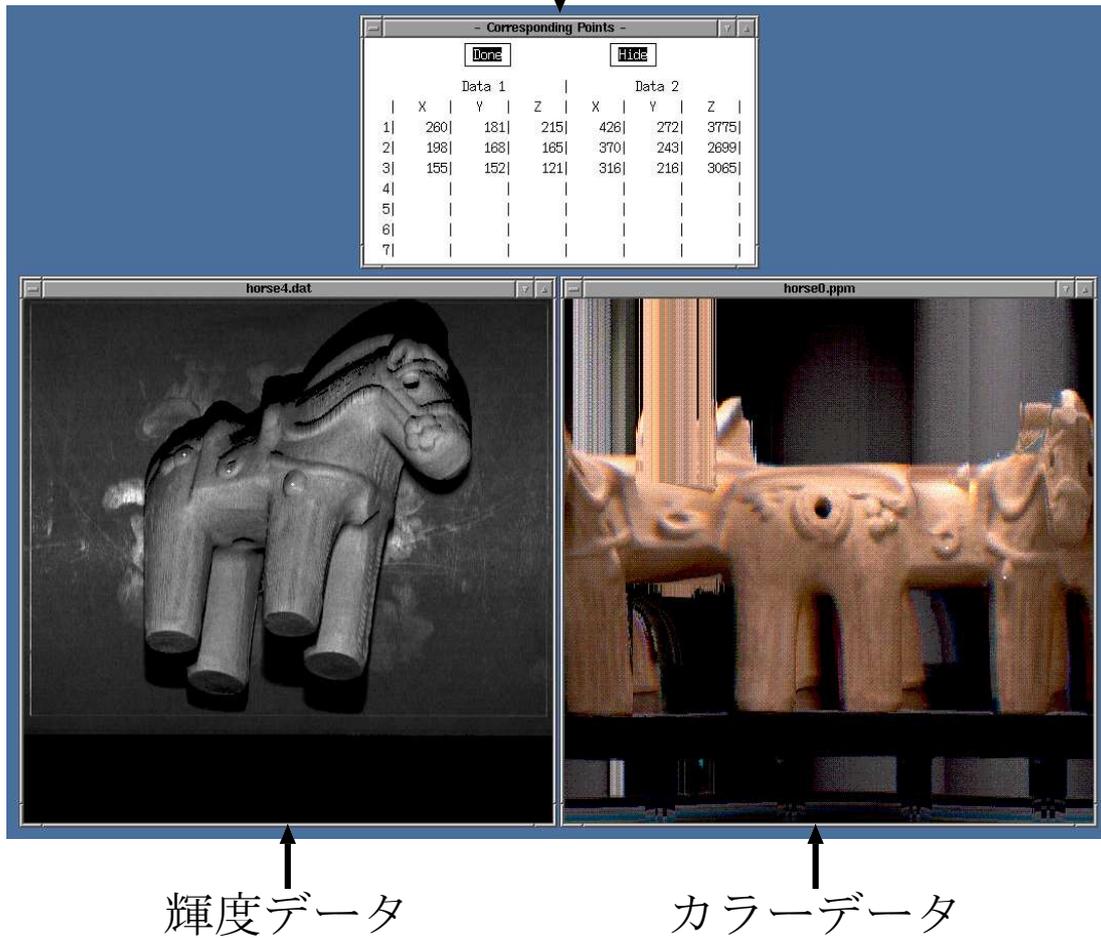


図 3.1 カラーデータと輝度データを利用した対応点の決定

3.2.2 Horn らの手法による初期変換パラメータの推定

対応点のクリックにより得られた 3 組以上の座標値の組から Horn らの手法 [4] により変換パラメータを推定する. これにより, 共通の観測領域を有する 2 つの距離データ間の変換パラメータが求まる. 以降の補正処理においては, すべての距離データの座標系からある基準となる座標系への変換パラメータを初期変換パラメータとして利用しているため, 得られた 2 つの距離データ間の変換パラメータからそれらを求める必要がある. 以下, 図 3.2 の場合を例にとり説明する. この場合, 求めるべき初期変換パラメータは $D_i (i = 0 \dots 6)$ の座標系から基準座標系として設定した D_0 の座標系への変換パラメータである. D_0 と比較的共通の観測領域が多いデータ (D_1, D_2, D_3, D_4) の場合は 3.2.1 節で説明した方法で対応関係が得られ, SVD 法によって変換パラメータを求めることができる. しかし, 共通の観測領域が少ないデータ (D_5, D_6) の場合は, 直接対応関係を求めることができない. そこで, まず, D_5 と D_2 , D_6 と D_3 の間で変換パラメータを求め, 図 3.2 に示すように, 2 つの変換パラメータの積という形で基準座標系への変換パラメータを計算する.

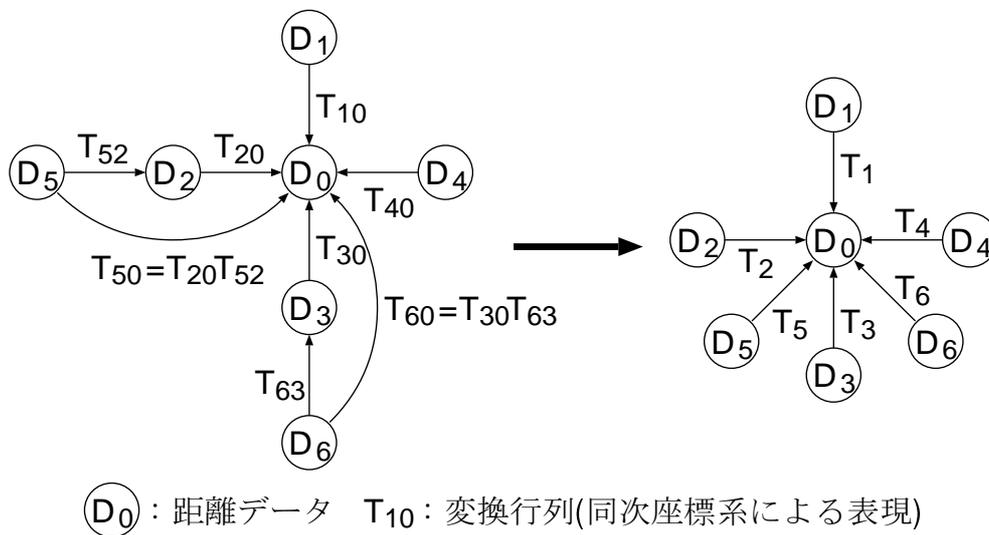


図 3.2 初期変換パラメータ

3.3 メッシュデータへの変換

本手法では、全周計測レンジファインダによって得られる円筒座標系距離データと平行投影型の距離データの2種類のデータを扱うため、前処理として距離データをメッシュデータに変換する。メッシュデータとは、格子状の離散点として得られる距離データを三角パッチ化したあとの、頂点のリストとその接続関係で表現されるデータである。

3.3.1 距離データの三角パッチ化

本研究で利用している距離データ（円筒座標系の距離データ、平行投影型の距離データ）は、共に 512×512 の計測点を持っている。そこで、隣接する4つの計測点によって構成される格子を2つに分割することで三角パッチを生成する（図3.3）。分割においては、短い方の対角線を選択するものとする。また、三角パッチの各辺がある閾値 (E_{th}) 以上の長さを持つ場合、不連続部分であると判断し、そのような三角パッチは生成しないものとする。

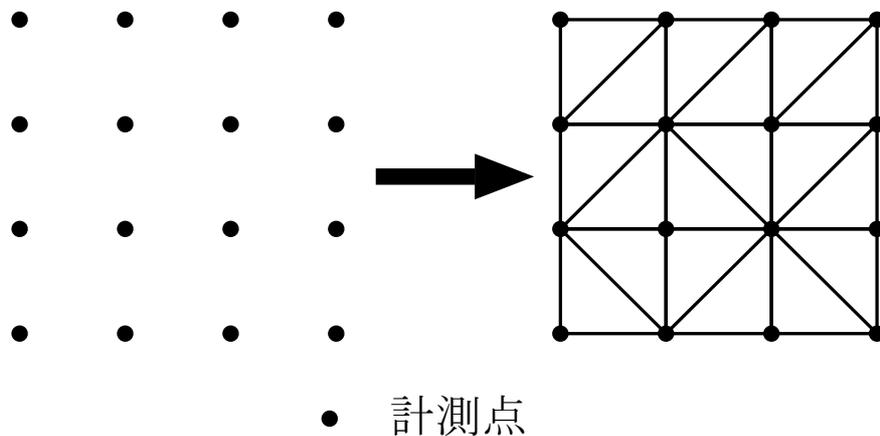


図 3.3 三角パッチ化

3.4 補正処理

ここでは、前処理によって得られた N 個のメッシュデータ ($\mathbf{M}_i : i = 0 \dots N - 1$) をもとに、基準座標系として設定した \mathbf{M}_0 の座標系への初期変換パラメータ ($\mathbf{T}_i : i = 0 \dots N - 1$) を補正する処理を行う。

そのアルゴリズムを以下に示す (図 3.2 参照).

- 以下の処理をメッシュデータ \mathbf{M}_i ($i = 1 \dots N - 1$) に対して行う.
 1. メッシュデータ \mathbf{M}_i を変換パラメータ $\mathbf{T} = \mathbf{T}_j^{-1}\mathbf{T}_i$ により他のメッシュデータ \mathbf{M}_j ($j \neq i$) の座標系へ変換し、 \mathbf{M}_i の境界の三角パッチ上にない各頂点における \mathbf{M}_j 上の対応点を求める.
 2. 1 で求めた対応をもとに計算された位置合せ誤差関数を最小化する微小変換行列 $\Delta\mathbf{T}$ を線形最小二乗法で求める.
 3. 変換パラメータを更新する ($\mathbf{T}_i = \Delta\mathbf{T}\mathbf{T}_i$).

以上の処理を $\Delta\mathbf{T}$ が単位行列に十分近づくまで繰り返す. 以下では、アルゴリズムについて詳しく述べる.

3.4.1 各頂点における対応点の決定

図 3.4 に示すように、各頂点における法線方向の線分 (頂点から両側に N_{th} の長さをもつ) と交わる他のメッシュデータ上の三角パッチをすべて求め、その交点の中で最も近いところにある点を対応点とする. ここで、各頂点における法線ベクトルは、その頂点を含むすべての三角パッチの法線ベクトルの平均として定義しており、境界の三角パッチ上の頂点の法線は信頼性に欠けるため、位置合せの際に考慮しないものとした.

本手法では、この対応点の探索において、対応点は法線方向の閾値 N_{th} 内に存在し、頂点の法線ベクトルと対応点の法線ベクトルのなす角は 90 度以下であるという制約を設定した. すなわち、手動により求めた初期変換パラメータは真の変換パラメータにかなり近いものであると仮定されるので、適切な対応点が存在するならば法線方向の閾値 N_{th} 内で発見できるという根拠に基いている. また、一般に対

応点の探索にかかる計算量は莫大なものとなるが、この閾値処理により探索空間が制限されるため処理の高速化にもつながる。具体的には、探索空間を閾値 N_{th} で分割し、各分割に属する三角パッチのリストを作成する。そのリストに基づいて、頂点の属する分割とそれに隣接する分割に属するすべての三角パッチに対して、法線方向の線分が交点を持つかどうかを調べることにより、対応点の探索を行う。

さらに、適切な対応点は対象物上の同一の面領域上に存在すると仮定できるため、2つの法線ベクトルのなす角が90度以上であれば、対応点ではないとした。この制約により、対象物に厚みのない部分（例えば、鳥の造形物の羽の部分）が存在する場合、その表側と裏側が閾値 N_{th} 内におさまリ、対応点の候補となってしまう可能性があるが、表と裏の面では法線ベクトルが反対方向をさすため、適切な対応点の設定が行える。

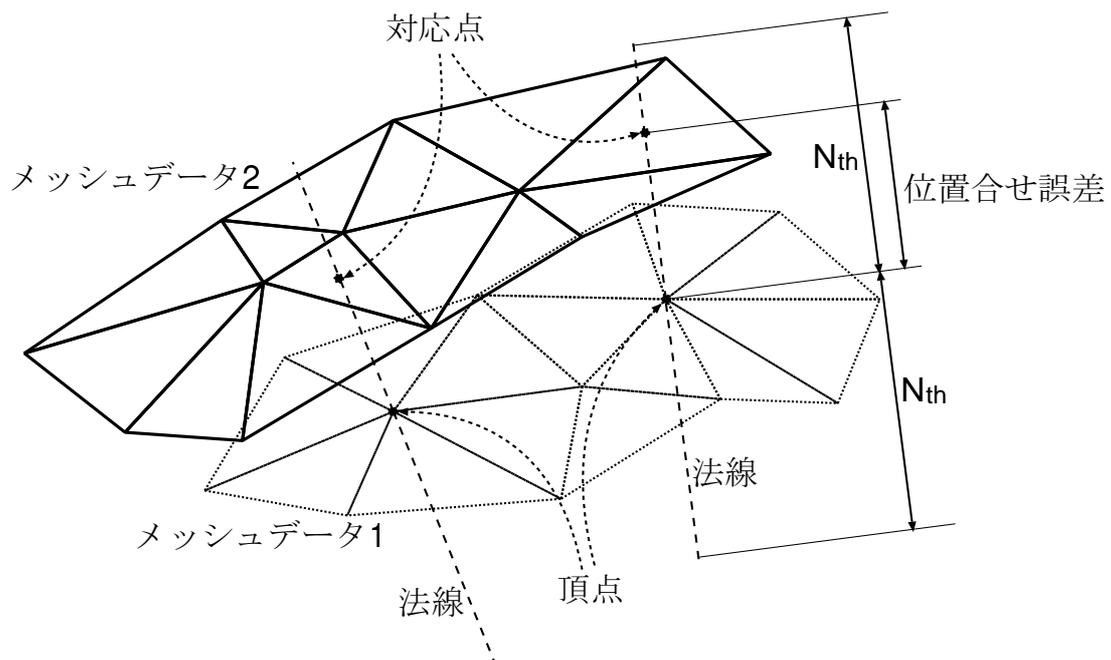


図 3.4 対応点の決定

3.4.2 位置合せ誤差関数の定義

2.1.3 節でも述べたように、一般にレンジファインダによる計測では、各計測点での法線ベクトルとカメラ方向ベクトルのなす角 (θ) が大きい程、計測誤差が大きくなると考えられる。また、計測点が曲率の大きな領域 (特にエッジ部分) 上に存在するような場合にも計測誤差の増加が考えられる。そこで、本手法では、計測誤差が小さい領域での距離データをより重視した位置合せを行うために、以下のような位置合せ誤差関数を定義した。

$$Errr_i = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{P_i-1} w_{p(i,k)} w_{q(j,k)} d^2(\mathbf{T}_j^{-1} \Delta \mathbf{T} \mathbf{T}_i p(i,k), q(j,k))$$

$p(i,k)$: M_i 上の頂点

P_{ij} : M_i 上の頂点の個数 (M_j 上に対応点が存在するもの)

$q(j,k)$: $p(i,k)$ に対応する M_j 上の点

$d(\cdot, \cdot)$: 2 点間の距離

$w_{p(i,k)}$: $p(i,k)$ に対する重み係数

$w_{q(j,k)}$: $q(j,k)$ に対する重み係数

ここで、重み係数 w は、計測誤差が小さいところでの位置合せ誤差の影響を大きくするための係数であり、以下のように定義することにより達成される。

$$w_{p(i,k)} = \cos^2(\theta_{p(i,k)}) * ((\cos(\rho_{(i,k)}) + 1)/2)^2$$

$$w_{q(j,k)} = \cos^2(\theta_{q(j,k)}) * ((\cos(\rho_{(j,k)}) + 1)/2)^2$$

$\theta_{p(i,k)}$: $p(i,k)$ の法線ベクトルと $p(i,k)$ を計測した時点でのカメラ方向ベクトルのなす角

$\theta_{q(j,k)}$: $q(j,k)$ の法線ベクトルと $q(j,k)$ を計測した時点でのカメラ方向ベクトルのなす角

$\rho_{p(i,k)}$: $p(i,k)$ の属する三角パッチの法線ベクトルとそれに隣接しているすべての三角パッチの法線ベクトルのなす角の最大値

$\rho_{q(j,k)}$: $q(j,k)$ の属する三角パッチの法線ベクトルとそれに隣接している

すべての三角パッチの法線ベクトルのなす角の最大値

すなわち, ρ が大きい点では, 隣接する三角パッチ間でエッジが構成されている可能性があり, そのような領域では計測誤差が大きくなる可能性があるため, このような重み係数を定義することにより計測誤差の大きい可能性のある領域での位置合せ誤差の影響をおさえることができる.

3.4.3 線形最小二乗法による微小変換行列の計算

手動で求めた初期変換パラメータは, 真の変換パラメータにかなり近いものであると仮定されるため, 微小変換行列 ΔT で表現される変換は, 小さな回転成分 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ と並進成分 (t_x, t_y, t_z) をもっていると考えられる. 従って, 近似式

$$\sin(\theta_*) \approx \theta_*, \quad \sin(\theta_*) \times \sin(\theta_*) \approx 0, \quad \cos(\theta_*) \approx 1$$

(但し, $*$ = x or y or z)

を適用することによって, ΔT は

$$\Delta T = \begin{bmatrix} c_y c_z & -c_y s_z & s_y & t_x \\ s_x s_y c_z + c_x s_z & -s_x s_y s_z + c_x c_z & -s_x c_y & t_y \\ -c_x s_y c_z + s_x s_z & c_x s_y s_z + s_x c_z & c_x c_y & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\approx \begin{bmatrix} 1 & -\theta_z & \theta_y & t_x \\ \theta_z & 1 & -\theta_x & t_y \\ -\theta_y & \theta_z & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(但し, $s_* = \sin(\theta_*)$, $c_* = \cos(\theta_*)$, $*$ = x or y or z)

と表される.

一般に, 誤差関数を最小化する微小変換パラメータを求める問題は非線形の最小化問題となるが, この近似を行うことにより, 位置合せ誤差関数は 6 つのパラメータに対して線形となり, 線形最小二乗法により解くことができる.

3.4.4 収束判定

補正処理は, 微小変換行列 ΔT が単位行列に十分近づくまで繰り返される. すなわち, ΔT と単位行列の各要素の差の二乗和が閾値 T_{th} より小さくなった時, 処理を終了する.

4. 複数距離データの統合

位置合せによって複数の距離データは物体固有の座標系に変換されるが, そのままではある部分に対して複数の異なる記述が存在し, データとして利用しにくいだけでなく冗長である. 従って, それらを1つの3次元形状データとして統合する必要がある. 本研究では, Turk らの [16] の手法を適用して統合を行ったが, 位置合せの精度を確認することができる程度に簡略化したアルゴリズムを採用した.

本章では, Turk らのアルゴリズムと本論文で採用したアルゴリズムについて説明する.

4.1 統合処理の概要

Turk らの手法では, まず, 2つのメッシュデータ間の統合を行い1つのメッシュデータを生成する. そして, 生成されたメッシュデータに対し, 他のメッシュデータを統合する処理を繰り返し, 最終的に1つのメッシュデータを生成している. 最後に, 生成された1つのメッシュデータの各頂点の座標値を更新する処理を行っている.

2つのメッシュデータ間の統合は, 以下の手順で行われる.

1. メッシュデータ間で重なっている領域 (冗長な三角パッチ) を削除する.
2. 重なりのなくなったメッシュデータを接続する.

本論文では, 複数距離データの位置合せの精度を確認することができる程度に, Turk らのアルゴリズムを簡略化したものを採用した. 具体的には, メッシュデータの接続を行っていないため, 統合により得られたモデルは1つの接続されたモデルではなく, 複数のメッシュデータが境界部分でわずかに重なったものとなっている. しかし, 重なっている領域がわずかであるため, 精度良く位置合せが行われていれば, そのモデルは境界部分で滑らかに表示されるはずである.

以下, 冗長な三角パッチの削除, 頂点座標の更新について順に説明する.

4.2 冗長な三角パッチの削除

最終的に得られる 3 次元形状モデルは, 1 つの面領域に対して 1 つの記述で表現されているべきである. 従って, 複数のメッシュデータ間で同一の面領域を表している複数の三角パッチを冗長な三角パッチとし, それらを削除する必要がある. その手順は以下ようになる.

- 2 つのメッシュデータから三角パッチが削除されなくなるまで以下の操作を繰り返す.
 1. 第 1 のメッシュデータの境界部分の冗長な三角パッチを削除する.
 2. 第 2 のメッシュデータの境界部分の冗長な三角パッチを削除する.

ここで, 注目している三角パッチが冗長な三角パッチであるかどうかの判断は, 三角パッチの 3 つの頂点それぞれに対し, 3.4.1 節で説明した対応点の探索を行う. すべての頂点の対応点が見つかった場合に, その三角パッチは冗長な三角パッチであるとする.

4.3 頂点座標の更新

冗長な三角パッチの削除により, 接続されてはいないが各領域に対して 1 つの記述しか存在しない, 対象物の全周の形状を表す 3 次元形状モデルが得られる. 3 次元形状モデルの精度に関する要求が低いアプリケーションでの利用を考えるならば, 得られた 3 次元形状モデルで十分であるといえるであろう. しかし, モデルの精度に関する要求が高い場合, 得られたモデルの頂点の座標を更新する必要がある. つまり, 最終的に得られる 3 次元形状モデルは, 入力されたすべてのメッシュデータの情報を取り入れるべきである. しかし, 冗長な三角パッチの削除によって得られた 3 次元形状モデルは, すべての形状情報を加味していない. 従って, 以下に示すような頂点座標の更新処理を行う.

1. 冗長な三角パッチの削除によって得られたメッシュデータの各頂点に対して, 3.4.1 節で説明した方法で入力されたすべてのメッシュデータ上の対応点を求める.

2. 求まったすべての対応点の座標値の加重平均を計算し,それを新たな頂点の座標値とする. ここで,加重平均の際の重み付け係数は,3.4.2 節において定義した重み付け係数を採用するものとする.

5. 実験と結果

本論文では, 提案手法の有効性を検証するために, 鷲と蛇の置物, 埴輪の馬, 木彫りの犬, 人形の複雑な形状をした4つの実物体に対し実験を行った. これらの実物体は, 全周計測レンジファインダにより計測を行った場合においても, セルフオクルージョンにより1回の計測では全周の形状情報を獲得できない物体である.

以下, 実験環境と設定条件について述べ, それぞれの実物体に関する実験結果を示す.

5.1 実験環境および設定条件

今回の実験では, 2章で述べたように, 全周計測レンジファインダと平行投影型レンジファインダの2種類のレンジファインダを使用して, 実物体の計測を行った. 手順としては, まず, 全周計測レンジファインダにより対象物の大部分の形状を計測し, 次に, セルフオクルージョンによって計測できなかった領域に対し, 平行投影型のレンジファインダ *Cubist* により多視点から計測を行った. *Cubist* は, 図 2.3 に示したように, スライドテーブル上に置かれた対象物に対し, 上方からレーザーを照射することによって計測を行っている. そこで, 粘土を利用して対象物の向きを変えることで, 多視点を実現した. 以上のことから, 位置合せ手法に対する入力は, 1つの円筒座標系で表現された全周計測距離データと複数の方向から計測した直交座標系で表現された平行投影型距離データとなる. また, 得られた距離データは, いずれも 512×512 の計測点を有しているが, 計算時間短縮のために, 縦, 横それぞれを半分のサイズに縮小し, 256×256 の計測点を入力とした.

また, 提案手法における各閾値は, 以下のように設定した.

E_{th} 三角パッチの各辺の長さの最大値を表し, 入力データのサンプリング間隔 ($1mm$) の4倍である $4mm$ に設定した.

N_{th} 対応点の法線方向の探索範囲を表し, 入力データのサンプリング間隔 ($1mm$) の2倍である $2mm$ に設定した.

T_{th} 収束判定における微小変換行列と単位行列の各要素の差の二乗和の閾値を表し, 10^{-6} に設定した.

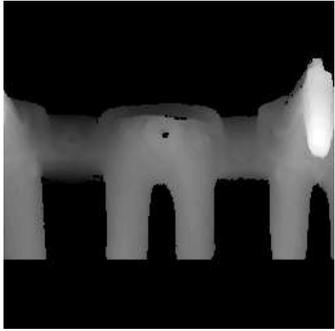
この閾値は実験的に設定したものである.

5.2 実験 1 : 埴輪の馬

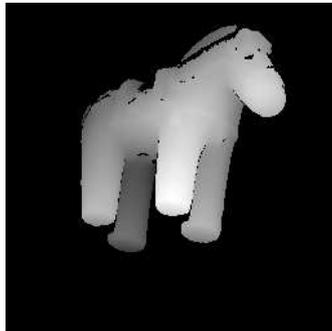
図 5.1 は, 埴輪の馬を計測し, その入力距離データを距離画像として示したものであり, 1 つの円筒座標系の距離データと, 6 つの平行投影型距離データからなる. この実物体は, 全周計測レンジファインダにより計測を行った場合においても, 足の内側と上下の部分のデータが欠落する. 従って, 4 本の足の内側を計測するための斜めの 4 方向と, 上下部分を計測するための 2 方向の計 6 方向から計測を行った.

図 5.2, 5.3 は, それぞれ, 提案手法の補正処理の前後における変換パラメータを基に, 複数のメッシュデータを基準座標系に変換し, 異なる 2 視点から見た統合結果である. 補正処理前の足の部分などでは, メッシュの接続部分において筋が見られるが, 補正処理によって手動により求めた初期変換パラメータの精度が向上し, 滑らかに接続されていることから, 異種距離データ間において精度の良い位置合せが行えていることが分かる.

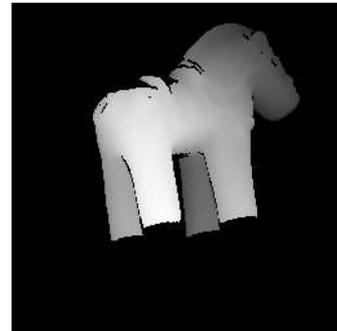
また, 図 5.4 は, 補正処理前 (手動による位置合せ) と計測誤差を考慮した位置合せ誤差関数の最小化により補正処理を行った後, および, 計測誤差を考慮しない位置合せ誤差関数の最小化により補正処理を行った後の位置合せ誤差の分布を示したものである. 計測誤差の考慮の有無にかかわらず, 補正処理によりすべての入力距離データの位置合せ誤差が平均的に最小化され, 位置合せ誤差の小さい頂点の数が増加している. また, 計測誤差を考慮した位置合せ誤差関数を定義することにより, わずかではあるが, 考慮しない場合と比較して位置合せ誤差の小さい頂点の数が増加しており, このことから, 本手法における位置合せ誤差関数の有効性が示されたといえる.



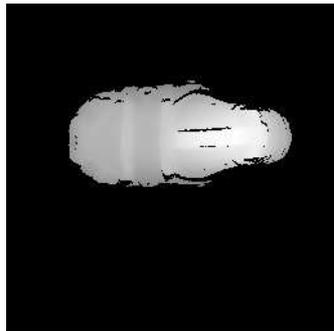
(a) 円筒座標系データ



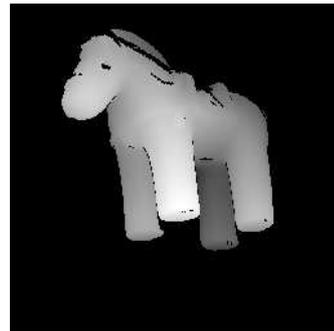
(b) 直交座標系データ 1



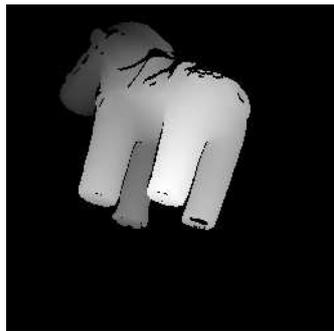
(c) 直交座標系データ 2



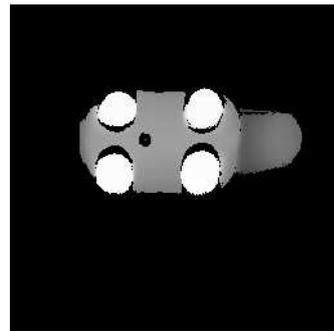
(d) 直交座標系データ 3



(e) 直交座標系データ 4

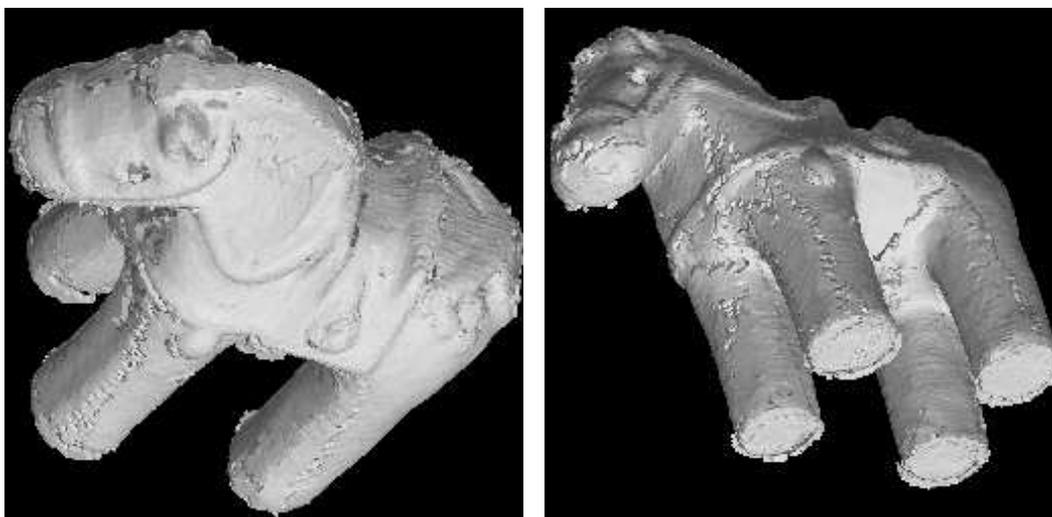


(f) 直交座標系データ 5



(g) 直交座標系データ 6

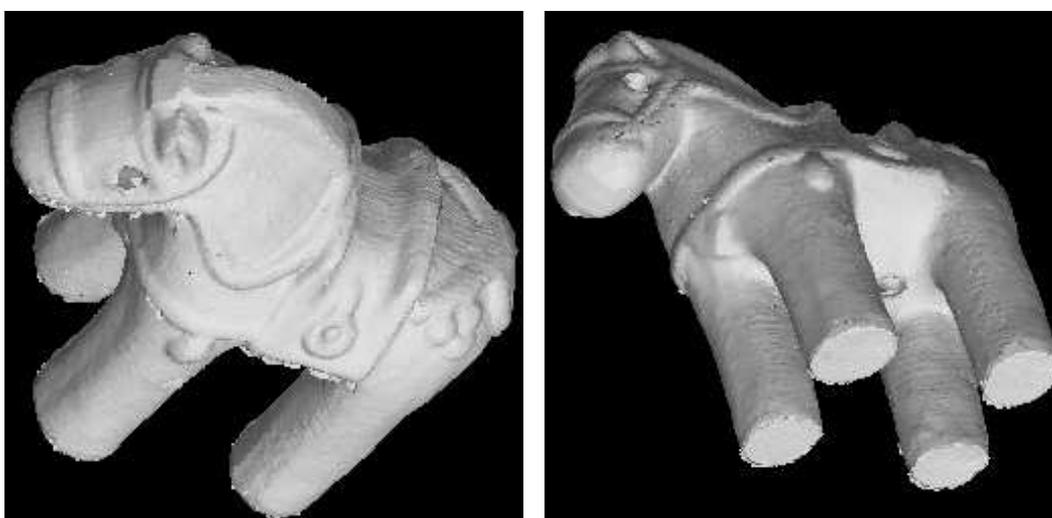
図 5.1 入力距離データ (埴輪の馬)



(a) 視点 1

(b) 視点 2

図 5.2 位置合せ補正前の統合結果 (埴輪の馬)



(a) 視点 1

(b) 視点 2

図 5.3 位置合せ補正後の統合結果 (埴輪の馬)

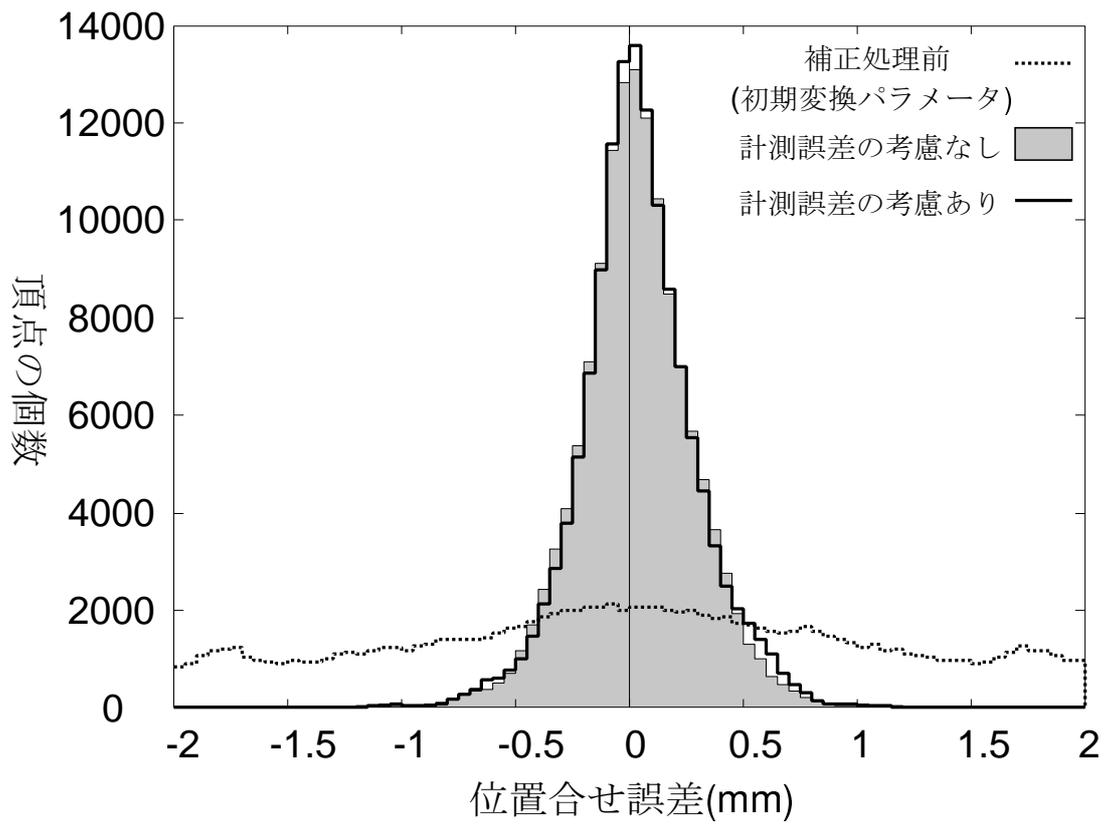


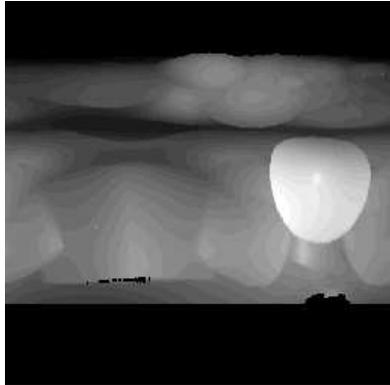
図 5.4 位置合せ誤差の分布 (埴輪の馬)

5.3 実験 2 : 陶器の人形

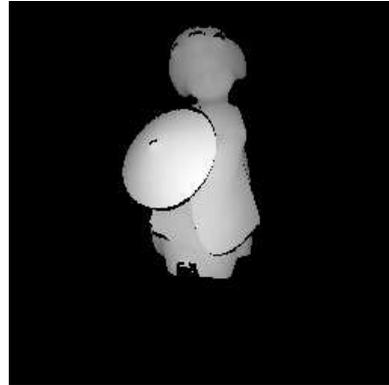
実験 1 と同様に, 図 5.5 は, 陶器でできた人形を計測し, その入力距離データを距離画像として示したものであり, 1 つの円筒座標系の距離データと, 5 つの平行投影型距離データからなる. また, 図 5.6, 5.7 は, それぞれ, 提案手法の補正処理の前後における変換パラメータを基に, 複数のメッシュデータを基準座標系に変換し, 異なる 2 視点から見た統合結果である. さらに, 図 5.8 は, 補正処理の前後における位置合せ誤差の分布を示したものである.

この実物体に関しても, 同様に補正処理によって手動により求めた初期変換パラメータの精度が向上し, 統合結果が滑らかに接続されていることがわかる. また, 傘の部分が比較的薄い面を構成しているが, 3.4.1 節で述べたように, そのような領域に対しても表側と裏側をその法線ベクトルにより区別し, 誤対応をすることなく位置合せされているといえる.

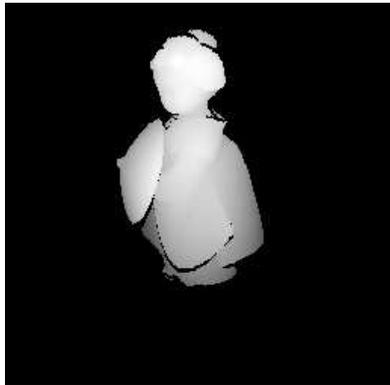
また, 位置合せ誤差の分布においても, 実験 1 と同様の結果が得られた.



(a) 円筒座標系データ



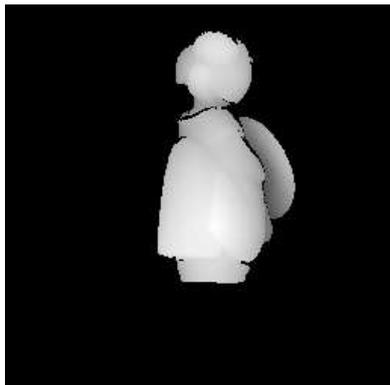
(b) 直交座標系データ 1



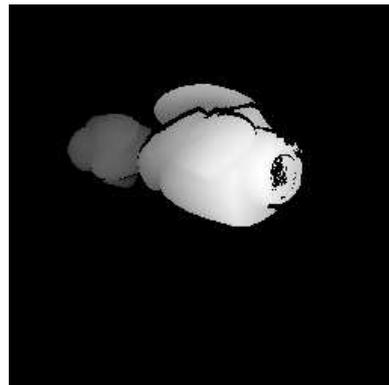
(c) 直交座標系データ 2



(d) 直交座標系データ 3

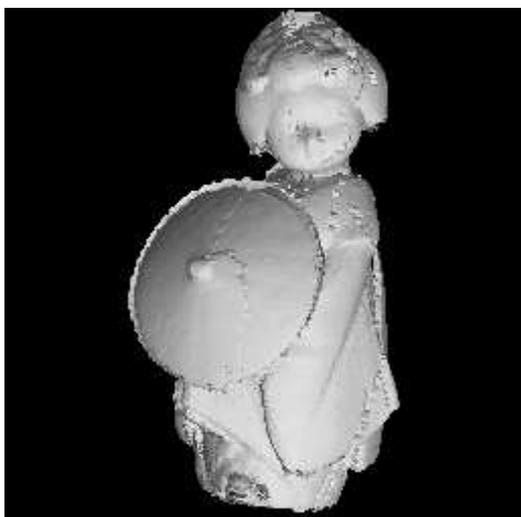


(e) 直交座標系データ 4

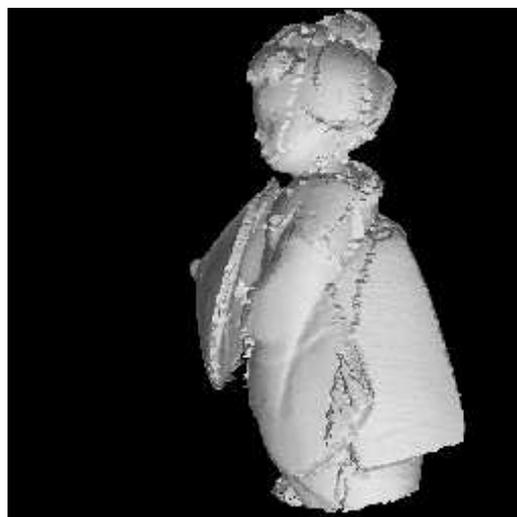


(f) 直交座標系データ 5

図 5.5 入力距離データ (陶器の人形)

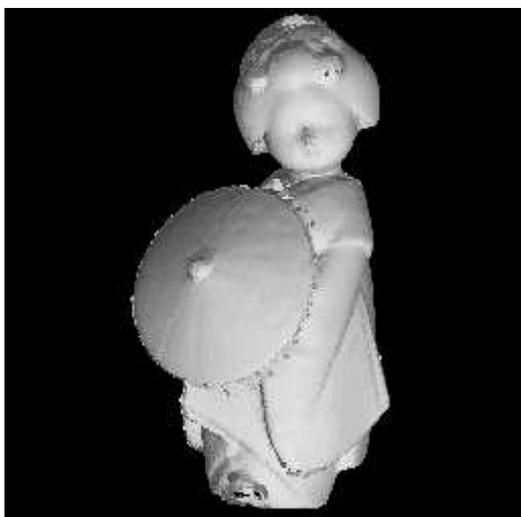


(a) 視点 1

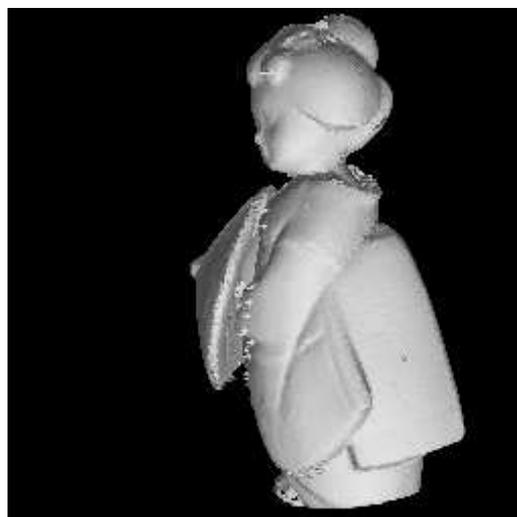


(b) 視点 2

図 5.6 位置合せ補正前の統合結果 (陶器の人形)



(a) 視点 1



(b) 視点 2

図 5.7 位置合せ補正後の統合結果 (陶器の人形)

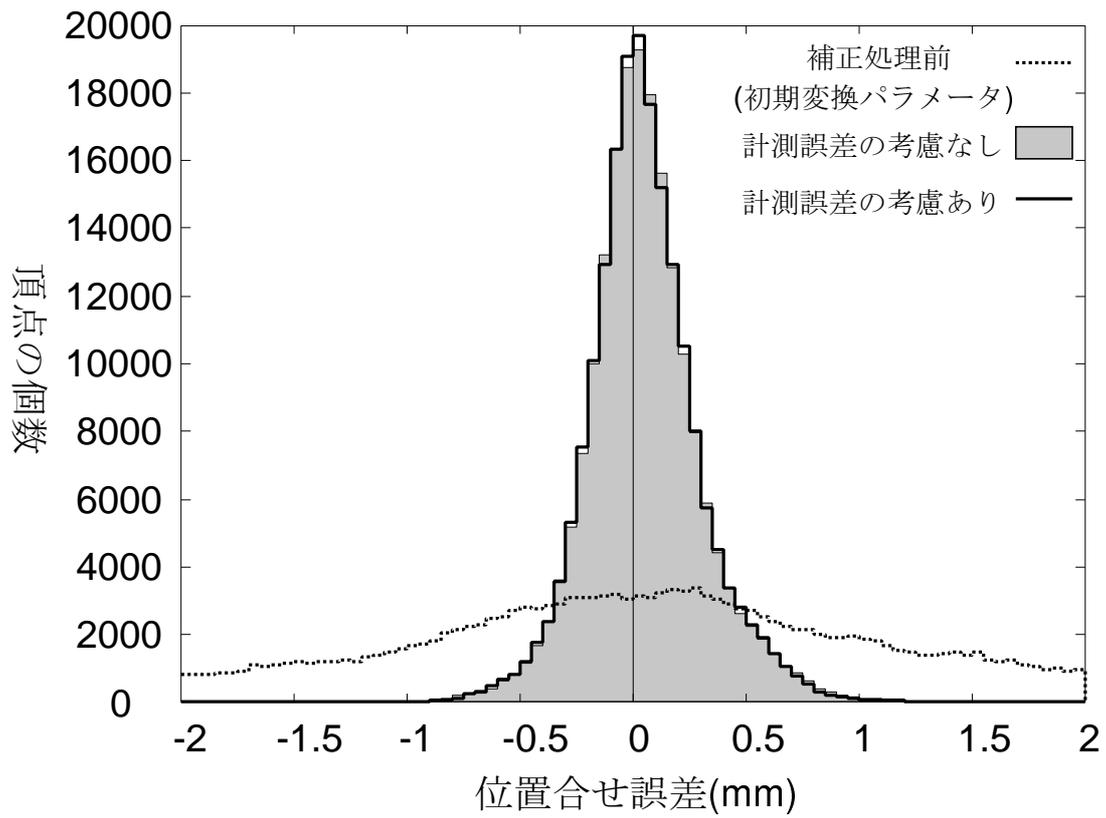


図 5.8 位置合せ誤差の分布 (陶器の人形)

5.4 実験 3 : 鷺と蛇の置物

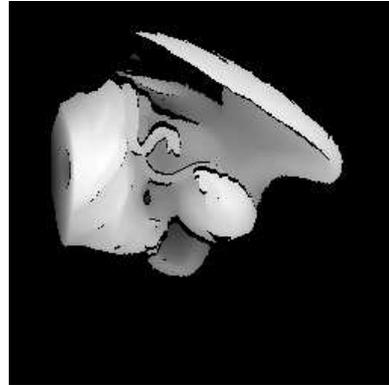
図 5.9 は, 鷺と蛇の置物を計測し, その入力距離データを距離画像として示したものであり, 1 つの円筒座標系の距離データと, 5 つの平行投影型距離データからなる. この物体は, 鷺の足元に蛇が存在するもので, かなり複雑な形状であり, セルフオクルージョンが頻繁に発生する. 従って, 全体の形状を獲得するためにはさらに多くの視点から計測を行う必要があるが, 対象物の置き方が制限されるため, 今回は図に示す 5 つの入力データで実験を行った.

図 5.10, 5.11 は, それぞれ, 補正処理の前後における統合結果を示している. この図に示されるように, 複雑な形状をしている蛇の部分や, 比較的薄い面を構成している羽の部分などにおいてかなりの精度で統合されており, 本手法が複雑な実物体に対してもうまく動作することが確かめられた.

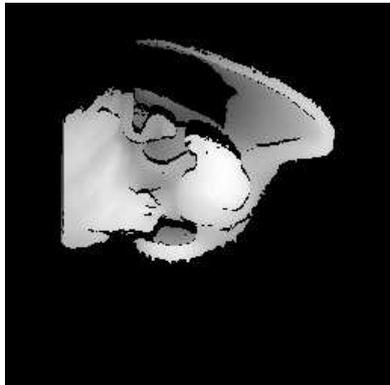
図 5.12 に示されるように, 実験 1, 2 と同様に, 計測誤差の考慮によって位置合せ誤差の小さい頂点の数が増加しており, 複雑な形状に対して計測誤差を考慮することの有効性が示されている.



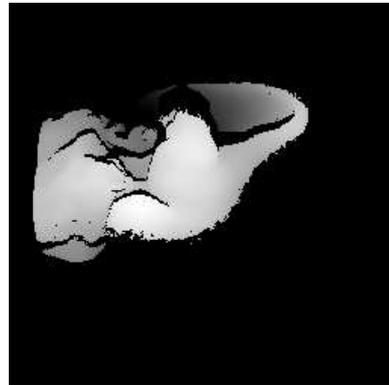
(a) 円筒座標系データ



(b) 直交座標系データ 1



(c) 直交座標系データ 2



(d) 直交座標系データ 3



(e) 直交座標系データ 4

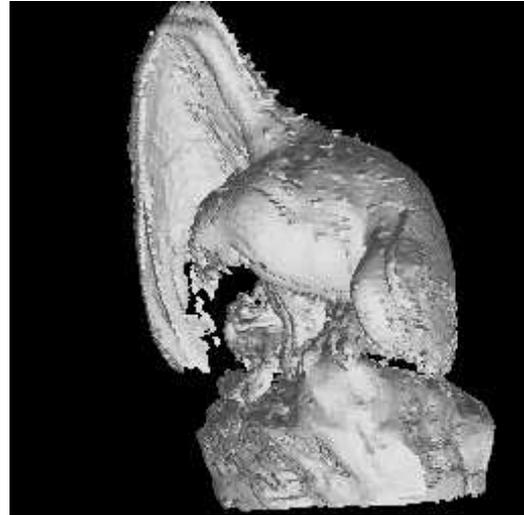


(f) 直交座標系データ 5

図 5.9 入力距離データ (鷲と蛇の置物)



(a) 視点 1

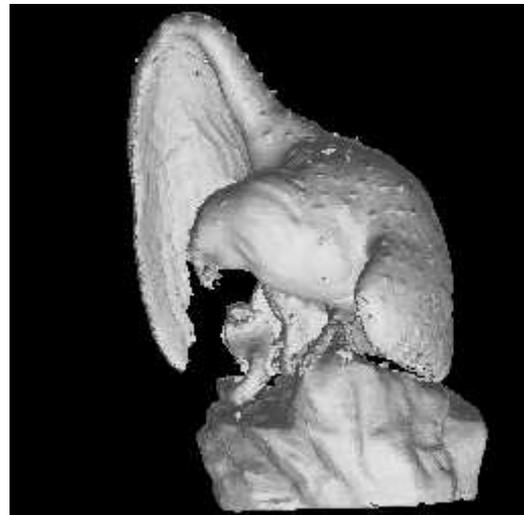


(b) 視点 2

図 5.10 位置合せ補正前の統合結果 (鷲と蛇の置物)



(a) 視点 1



(b) 視点 2

図 5.11 位置合せ補正後の統合結果 (鷲と蛇の置物)

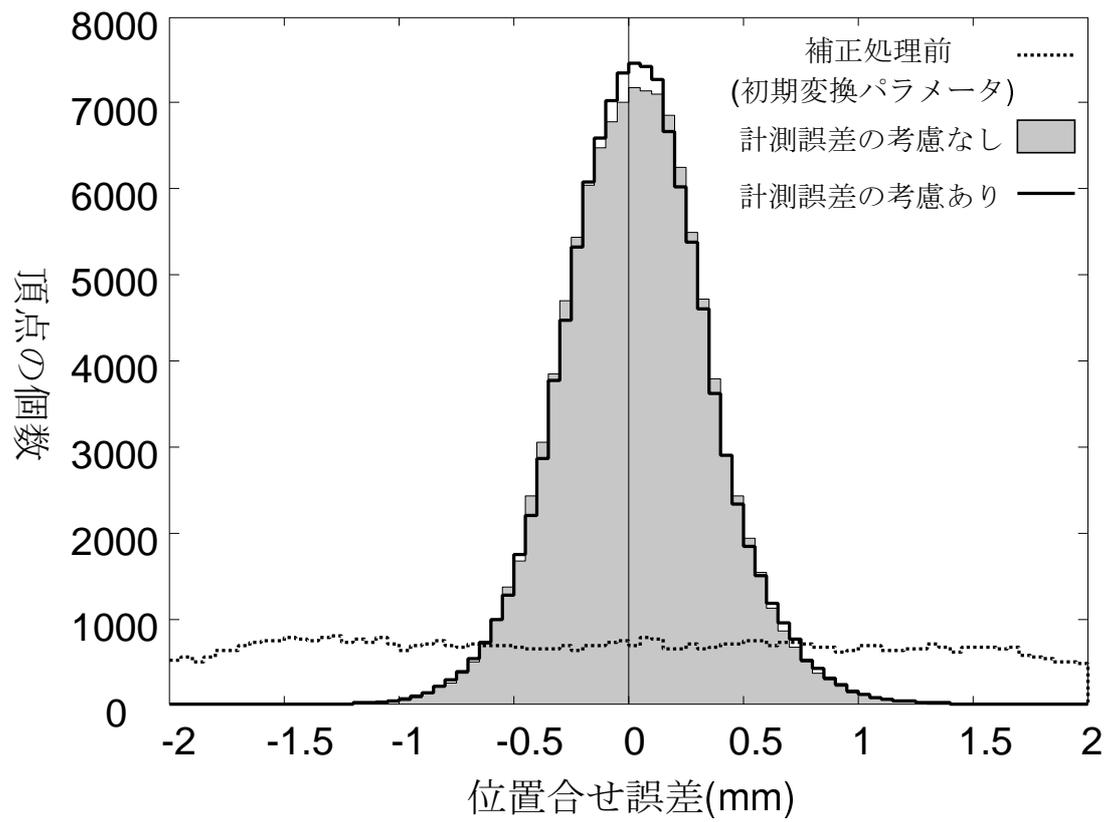
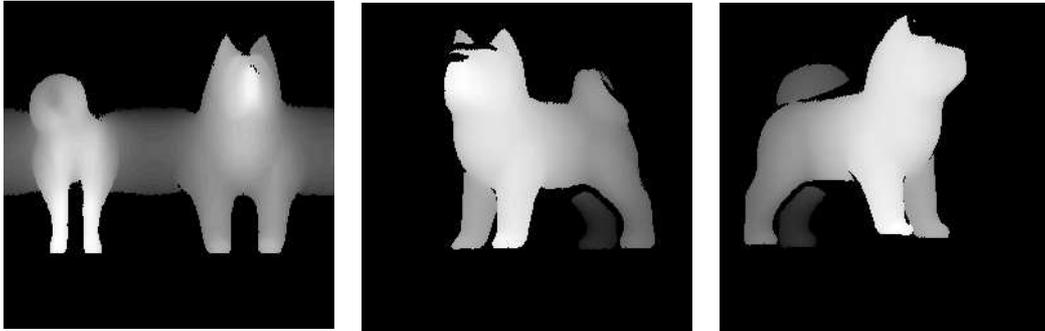


図 5.12 位置合せ誤差の分布 (鷲と蛇の置物)

5.5 実験4：木彫りの犬

図 5.13 は, 木彫りの犬を計測し, その入力距離データを距離画像として示したものであり, 1 つの円筒座標系の距離データと, 6 つの平行投影型距離データからなる. この物体は, これまでの実験で用いた物体と比較して, エッジ状の部分が少く, 全体的に滑らかな形状をしている.

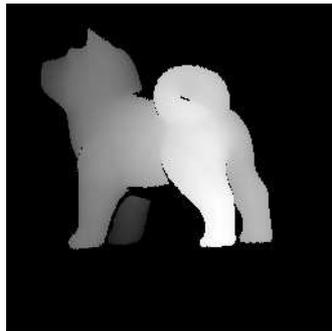
図 5.14, 5.15 は, それぞれ, 補正処理の前後における統合結果を示している. この図に示されるように, 滑らかに接続されており, 統合に関しては精度上の問題はないといえる. しかし, 図 5.16 に示されるように, 位置合せ誤差の分布を見ると, 計測誤差を考慮することの有効性が見られなかった. これは, この物体が比較的滑らかな形状をしており, 計測誤差が全体的に小さくなっているためであると考えられる.



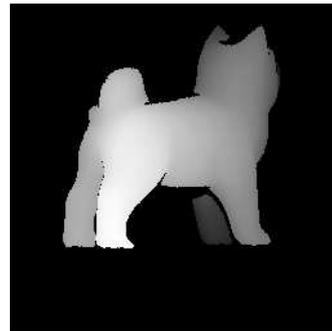
(a) 円筒座標系データ

(b) 直交座標系データ 1

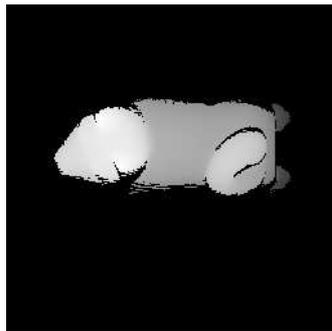
(c) 直交座標系データ 2



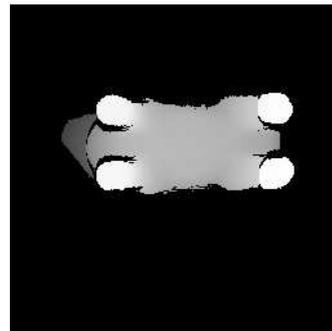
(d) 直交座標系データ 3



(e) 直交座標系データ 4

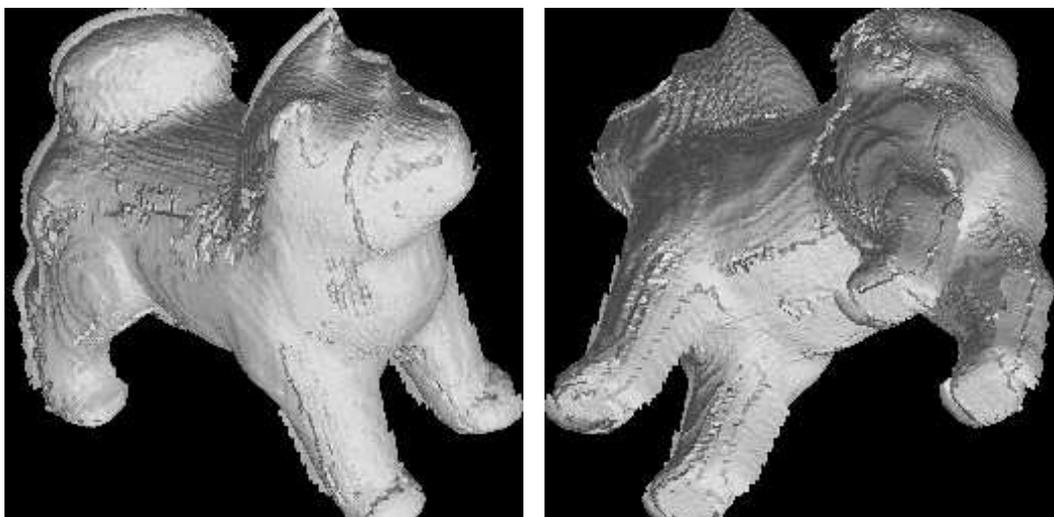


(f) 直交座標系データ 5



(g) 直交座標系データ 6

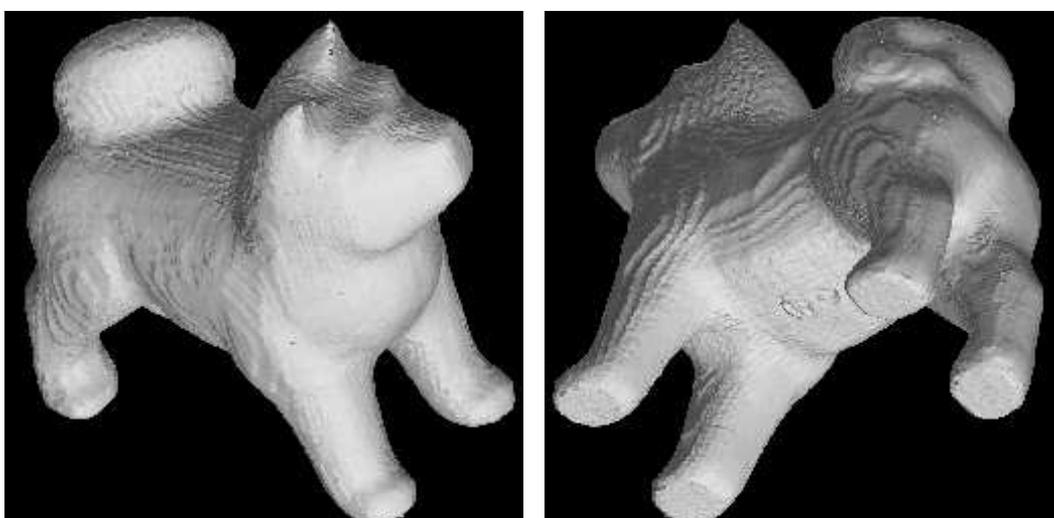
図 5.13 入力距離データ (木彫りの犬)



(a) 視点 1

(b) 視点 2

図 5.14 位置合せ補正前の統合結果 (木彫りの犬)



(a) 視点 1

(b) 視点 2

図 5.15 位置合せ補正後の統合結果 (木彫りの犬)

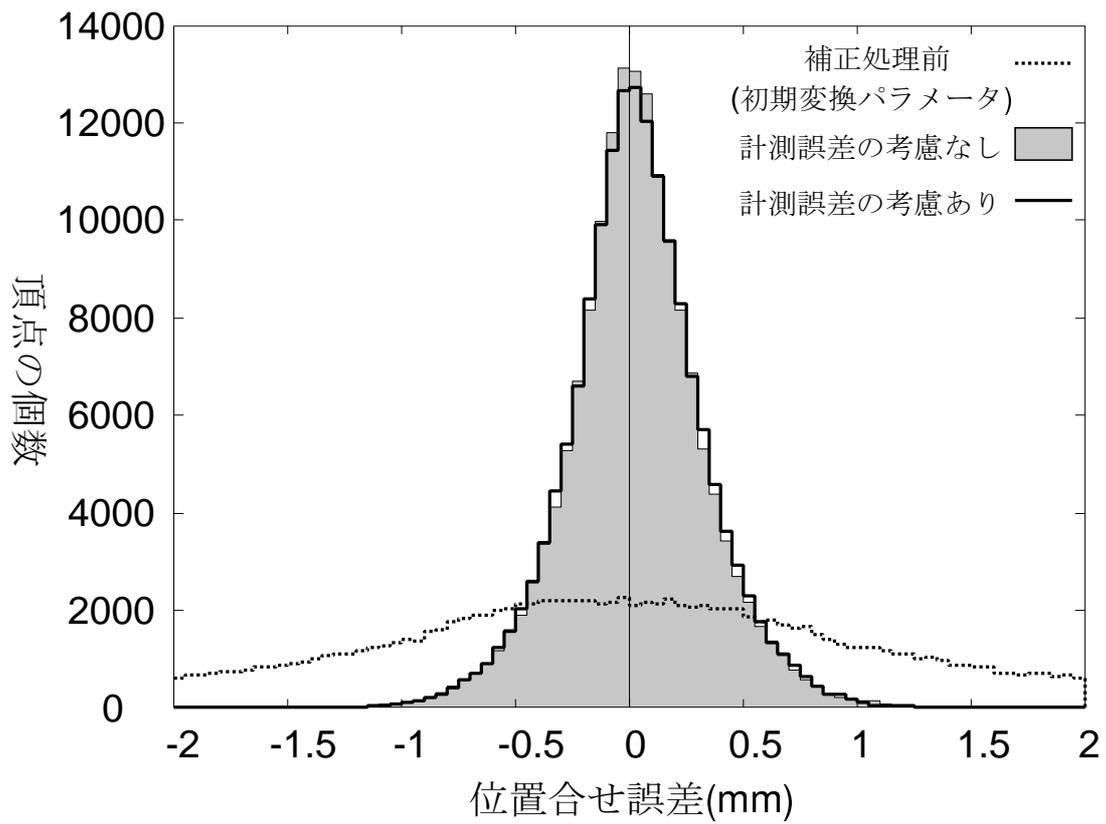


図 5.16 位置合せ誤差の分布 (木彫りの犬)

6. むすび

レンジファインダなどによって計測された実物体の3次元データから、3次元形状モデルを自動的に生成する方法は、

1. レンジファインダによる物体の多視点からの計測.
2. 多視点から得られた複数の距離データの位置合せ.
3. 位置合せされた複数の距離データの統合.

の3つのステップから構成される.

本論文では、複数の異種距離データ間の位置合せを並行的に行い、計測誤差を考慮した位置合せ誤差関数の最小化により、全体としての位置合せ誤差を平均的に最小化する手法を提案し、実物体を用いた実験により本手法の有効性を示した.

提案手法の特徴は以下に示すものである.

- 入力距離データを三角パッチで表現し、その頂点のリストと接続関係から構成されるメッシュデータに変換することにより、異種距離データの処理を可能にした.
- レンジファインダによる計測誤差の影響を考慮し、計測誤差の小さい領域での位置合せ誤差を最小化するような位置合せを行うために、計測誤差の影響に基づいた重み係数による対応点間の距離の加重和として位置合せ誤差関数を定義した. その結果、複雑な物体に対して位置合せ誤差を減少させることができた.
- 手動により求めた初期変換パラメータは近似解であり、適切な対応点はある閾値内に存在すると仮定できるため、ある閾値内でのみ対応点の探索を行うことにより処理の高速化を実現した.

実物体を対象とした異種距離データ間に本手法を適用した実験では、対象物の表面にエッジが存在するなど形状が複雑な場合は、計測誤差を考慮することにより位置合せ精度の向上が見られた. しかし、比較的表面が滑らかな物体に対して

は、計測誤差を考慮することの有効性は見られなかった。これは、表面形状が滑らかであるため、計測誤差が比較的小さかったためであると考えられる。しかし、統合モデルからもわかるように、位置合せの精度としては十分な性能が得られたといえる。

また、本論文で示した統合モデルは、冗長な三角パッチは削除されているが、複数のメッシュが接続されていないものである。従って、CG や CAD の分野、文化財の形状データベースなどにおける応用を考えるならば、接続された 3 次元形状モデルが必要となってくる。

今後の課題としては、統合において複数のデータを最終的に 1 つのモデルとして接続すること、及び、対象物の形状によらない位置合せ誤差関数を考察する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり, 終始暖かい御指導を頂いたソフトウェア基礎講座 横矢 直和教授に厚く御礼申し上げます.

本研究を通じて, 副指導教官として御助言頂いた像情報処理講座 千原 國宏教授, 並びにソフトウェア基礎講座 竹村 治雄助教授に深く感謝いたします.

本研究に際し適時御助言下さいましたソフトウェア基礎講座 岩佐 英彦助手に感謝します.

最後に, ソフトウェア基礎講座の諸氏には, 本研究の様々な局面にて多大なる御協力をいただきました. ここに感謝の意を表します.

参考文献

- [1] 井口 征二, 佐藤 宏介. “三次元画像計測”. 昭晃堂, 1990.
- [2] 増田 健, P. Boulanger. “多視点距離画像の空間的統合による全周計測”. 計測と制御, Vol. 34, No. 6, pp. 449–452, June 1995.
- [3] O. D. Faugeras and M. Hebert. “The representation, recognition, and locating of 3-D objects”. *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 5, No. 3, pp. 27–52, 1986.
- [4] B. K. P. Horn. “Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions”. *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 4, No. 4, pp. 629–642, Apr. 1987.
- [5] 河井 良浩, 植芝 俊夫, 吉見 隆, 大島 正毅. “多視点レンジデータからの3次元形状復元”. 信学論, Vol. J75–D–II, No. 4, pp. 737–748, Apr. 1992.
- [6] 和田 信彦, 鳥山 裕史, 田中 弘美, 岸野 文郎. “凸包を用いた複数レンジデータの統合”. 画像の認識・理解シンポジウム, Vol. I, pp. 373–380, July 1992.
- [7] P. J. Besl and N. D. McKay. “A Method for Registration of 3-D Shapes”. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 14, No. 2, pp. 239–256, Feb. 1992.
- [8] T. Masuda and N. Yokoya. “A Robust Method for Registration and Segmentation of Multiple Range Images”. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 61, No. 3, pp. 295–307, May 1995.
- [9] Y. Chen and G. Medioni. “Object modeling by registration of multiple range views”. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2724–2729, Sacramento, Cal, 1991.
- [10] H. Gagnon, M. Soucy, R. Bergevin, and D. Laurendeau. “Registration of Multiple Range Views for Automatic 3-D Model Building”. *Proc. IEEE CVPR*, pp. 581–586, June 1994.

- [11] G. Blais and M. D. Levine. “Registering Multiview Range Data to Create 3D Computer Objects”. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 17, No. 8, pp. 820–824, Aug. 1995.
- [12] 藤木 真和, 山本 裕之, 田村 秀行. “幾何形状モデル生成のための異種距離画像データの接合”. 信学技報, PRU95–163, Vol. 95, No. 365, pp. 31–36, Nov. 1995.
- [13] M. Soucy and D. Laurendeau. “A General Surface Approach to the Integration of a Set of Range Views”. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 17, No. 4, pp. 344–358, Apr. 1995.
- [14] M. Soucy and D. Laurendeau. “Multi-Resolution Surface Modeling from Multiple Range Views”. *Proc. IEEE CVPR*, pp. 348–353, June 1992.
- [15] M. Soucy and D. Laurendeau. “Surface Modeling from Dynamic Integration of Multiple Range Views”. *Proc. 11th IAPR Int. Conf. Pattern Recog.*, Vol. I, pp. 449–452, 1992.
- [16] G. Turk and M. Levoy. “Zippered Polygon Meshes from Range Images”. *Proc. SIGGRAPH 94*, pp. 311–318, 1994.
- [17] 山村 直史. “遺伝的アルゴリズムと ICP アルゴリズムによる 2 視点距離データの位置合せ”. 修士論文, 奈良先端科学技術大学院大学, 1996.
- [18] Y. Chen and G. Medioni. “Description of Complex Objects from Multiple Range Images Using an Inflating Balloon Model”. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 61, No. 3, pp. 325–334, May 1995.