色情報を利用した複数の三次元データの合成手法の開発*

花房昭彦** 藤本周央*** 磯村 恒** 関口行雄**

Development of a Composing Method Using Color Information for Multiple Three Dimensional Data

Akihiko HANAFUSA, Syuou FUJIMOTO, Tsuneshi ISOMURA and Yukio SEKIGUTI

Three-dimensional (3-D) model can be constructed by composing multiple 3-D data obtained by non-contact 3-D measurement equipment. Recent equipment can obtain not only 3-D position data but also red, green and blue color brightness data. This paper describes an automatic method that utilizes the color information for composing the multiple 3-D data. United distance that is sum of 3-D distance and color distance multiplied by weighted coefficients is defined. Also the mean for calculating the closest point that minimizes the united length using triangular area co-ordinate is devised. The method obtains conversion matrix that minimizes average united distance ($\bar{d}$) among closest points of two 3-D data by improving the matrix and closest points repeatedly. Also two-step process is applied; first best conversion matrix is derived from the extracted data points; and next all data are moved and the matrix is improved. The results of the experiment show that when the coefficient 0.9 is used for 3-D distance and 0.1 for color distance, two data can be composed in the position where not only shape but also color of the surface is matched. Also processing time can be reduced one sixth of whole data process by extracting from one thirty-second to one sixteenth data points.

Key words : three-dimensional data, three-dimensional model, color data, automatic composition

1. 緒 言

三次元のCAD, CGが幅広く利用されるようになるにつれて, 三次元モデルを計算機内に容易に作成できるシステムが求められている。特に整形外科, 形成外科のコンピュータによる手術支援の分野, 義肢, 装具のコンピュータによる設計・製作分野においては, 人体の三次元モデルを作成する必要がある^{1)~3)}。三次元モデルを計算機内に作成するための方法の一つとして, 三次元計測装置により計測した三次元座標データを入力して作成する方法がある。人体など接触によって変形する対象物を計測するにはレーザを用いた光切断法⁴⁾やしまを投光するモアレ法⁵⁾等の非接触式のもの⁶⁾が適している。

しかし, これらの三次元計測装置は後ろ側など死角にあたる箇所の計測が行えない。このため全周モデルを作成するためには複数方向から計測したデータを合成する必要がある。よく用いられるのは被計測物をターンテーブル上に置いて一定角度ずつ回転して計測する方法や, 人手で複数計測データ間の対応関係を指示する方法である。前者の方法では計測方向が限定されてしまう, 後者の方法では人手指示による誤差が伴うといった欠点がある。そこで任意の方向からの計測データを自動で合成しようとする研究^{7)~10)}が行われてきている。

一方, 最近の三次元計測装置には三次元位置座標による位置情報だけでなく, CCDカメラによりその座標点のRGB(Red, Green, Blue)各色の輝度による色情報も入力可能なものがある。この色情報は三次元モデルにテクスチャマッピングを行ったり, 両者の対応関係を人手で指示するときに指示しやすくするためにだけ用いられてきた。これまでの合成手法は三次元位置座標のみを用いる方法であったのに対して, 我々はこの色情報も積極的に使用することにより, 球や円柱など解が一意に定まらない場合にも表面に彩色されている場合には合成できるようにしたり, 面だけでなく色も合うように合成することによって合成精度を向上させるこ

とが可能になると考えた¹¹⁾。

本研究では, 位置情報と色情報を同時に取得可能な非接触型三次元計測装置によって得られた複数方向からの計測データを, 面だけでなく色も合った状態で自動合成する手法を開発した。以下, 位置情報と色情報を統合した距離の定義方法, その距離の定義式を利用した合成処理手順, 合成条件を変更した時の実験結果の順に説明する。なお, 2方向から計測したデータを一つに合成することができれば, その繰返しにより複数方向からの計測データは合成可能であるため, 基本となる2方向からの計測データを合成する手法について記述する。三次元計測装置は位相シフトモアレ方式を採用したIn-Speck 3D(InSpeck社), プログラム開発および実験にはPentium-II450MHz, メモリ192MB, OSにWindows NT Workstation 4.0を搭載したパーソナルコンピュータを, プログラムにはMATLAB(Math Works社)を使用した。

2. 位置情報と色情報を統合した距離の定義

三次元計測装置からは二次元配列の各計測データ点における三次元位置座標 $P(x, y, z)$ とRGB色座標 $C(r, g, b)$ が得られる。ここで三次元位置座標による位置情報とRGB各色成分の輝度データによる色情報を統合した距離は, 三次元位置座標 $P(x, y, z)$ による距離とRGB色座標 $C(r, g, b)$ による距離に重みづけの係数を掛けてその和を取ったものと定義した。以降本論文ではこの距離のことを統合距離と呼称する。ただし, RGB色座標の各 r, g, b 成分とも0~1の範囲の値であるため, 三次元位置座標による距離を計算する場合にも計測データ点の x, y, z 座標のうち最大値と最小値の差が最大となる成分を1とするように正規化した。2点 a, b 間の統合距離の二乗 (d^2) の定義式を式(1)に示す。

$$d^2 = k_p^2 |\vec{P}_a - \vec{P}_b|^2 + k_c^2 |\vec{C}_a - \vec{C}_b|^2 \quad (1)$$

ここで $\vec{P}_a, \vec{P}_b, \vec{C}_a, \vec{C}_b$ は原点から各座標点へのベクトルである。 k_p と k_c は重みづけ係数値で, $k_c = 0$ のとき位置情報のみの距離となり, $k_p = 0$ のとき色情報のみの距離となる。この k_p と k_c の値を変えた時の効果については4. 実験結果と考察の章に示す。

*原稿受付 平成11年6月21日

**正 会 員 職業能力開発総合大学校(相模原市橋本台4-1-1)

***正 会 員 千葉職業能力開発促進センター(千葉市稲毛区六方町274)

3. 合成手法の処理手順

3.1 変換行列の求め方

2方向から計測したデータを合成して一つのデータにするには、2方向から計測したデータの重なる領域を求め、重なる領域に最も良く合う一方のデータの変換行列を求めた後、その求めた変換行列でデータを変換して合成すればよい。本論文では変換行列を求めて移動する側のデータを移動側データ、もう一方の基準となる座標にあるデータを基準座標側データと呼ぶ。本手法の特徴は、この最も良く合う変換行列として、重なる領域における両データ間の式(1)で示す色情報も統合した距離の平均の値が、最も小さくなる変換行列を求めていることである。統合距離の平均の定義式を以下に示す。

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^N \sqrt{d_i^2} \quad (2)$$

ここで N は重なる領域における両データの最近接する点の組の数である。以下この最近接する点を対応点と呼称する。

変換行列を求める手順を以下の(1)~(6)に示す。

- (1) 大量の計測データ点からも効率よく変換行列を求めるため、まず全計測データ点の中からデータ点を抽出する。
- (2) 移動側データを基準座標側データに変換するための初期配置候補を複数求める。
- (3) 上記の初期配置候補から、両者間の統合距離が短くなるよう配置すなわち変換行列を改善する。改善の方法を以下に示す。
 - ・両者の重なる領域を求める。
 - ・移動側の各々の計測データ点と、統合距離の最も近い基準座標側の対応点を求める。
 - ・対応する点同士の間距離の二乗和を最小にする変換行列を quaternion を利用する方法¹²⁾により解析的に求める。
 - ・求まった変換行列により、移動側データを変換して式(2)で示される対応点間距離の平均 $\bar{d}$ を計算する。指定の改善回数に到達したか、またはこの $\bar{d}$ の値が減少しないときには次の初期配置候補に移る。それ以外のときは、以上の改善処理を繰り返す。
- (4) 全初期配置候補から求められた変換行列のうち、 $\bar{d}$ の値が最小のものを採用し、さらに手順(3)の改善処理を制限回数を設けずに、 $\bar{d}$ の値が改善されなくなるまで実行する。この結果が抽出データ点によって得られる変換行列となる。
- (5) 全計測データ点を手順(4)で求めた変換行列で変換し、再び手順(3)の改善処理を $\bar{d}$ の値が改善されなくなるまで実行する。その結果、最終的な変換行列が得られる。
- (6) 両データの統合処理を行う。

この手順(3)の改善処理と同様な手法は、Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズム¹³⁾として発表されている。ICP アルゴリズムでは、三次元位置座標のみを利用して対応点を求めているのに対し、本研究では、式(1)で示す色情報も考慮した統合距離の最も近い対応点を求める手法を考案した。また移動しようとしているデータが基準座標側のデータに包含されていなければならないという問題点があったのに対しては、変換行列の改善時に両者のデータの重なる領域を求めることにより解決した。

3.2 二段階による手法

ICP アルゴリズムでは初期配置位置から改善を行っていく手法のため、得られる解が初期配置の位置に大きく依存する。そのため、なるべく数多くの初期配置候補から改善を行ってみてその中

からよい結果、すなわち本手法では対応点間距離の平均 $\bar{d}$ が小さくなるものを選択する必要がある。ただし、処理時間は初期配置の候補数に比例して増大してしまう。このため、まず手順(1)に示す計測データの抽出処理をして点数を減らした状態で配置を求めたのち、最後に全計測データ点で改善する2段階の手法を取った。

点の抽出方法に関してはなるべく距離が等間隔となるように抽出する方法と、計測データ点の法線方向または色が変化する点を優先して抽出する方法を試みた。前者の方法ではまずランダムに処理対象の計測データ点を選び、最も近い点との距離がしきい値以上の時にはその点を抽出し、以下の時には間引くようにした。後者ではさらに法線ベクトルのなす角または色情報による距離がしきい値以上の時のみ抽出するようにした。

初期配置の位置は移動側データの重心を基準座標側データの X , Y 座標の最大値と最小値の間を等分割する位置においた。さらにその位置において移動側データの回帰平面の法線周りに等間隔の角度で回転を行う。 x 方向に t_x , y 方向に t_y 回平行移動し、 t_r 回転したとすると、総初期配置候補数は $t_x \times t_y \times t_r$ 個となる。さらに各初期配置候補位置において基準座標側のデータと重なる領域を求め、両者の回帰平面の法線方向が一致するまで回転変換した位置を初期配置とした。ただし、両データの重なる領域に属する点数がしきい値以下の配置は、局所的な位置で合成する解の得られる可能性があるため除外した。

3.3 対応点の求め方

二つのデータ間の対応する点が一対一対応で求まっていれば、その対応点間の距離の二乗和を最小にする変換行列を quaternion を利用して解析的に求めることができる。そこで色情報も考慮した統合距離の最も近い対応点を求められるようにした。ここで両者の計測データ点数に違いがあったり、疎密があったりしてもなるべく正確な対応点が求められるよう、基準座標側はデータ点を頂点とした三角形の面で構成されているとし、その三角形の平面上の点のうち、現在対象としているデータ点と最も距離の短い点を対応点とした。三次元位置座標のみによる距離では、最も垂線の短くなる平面を求め、その垂線の足を対応点とすればよい。色情報も考慮する本研究の方法では、統合距離の最も短くなる対応点を面積座標を利用して求めた。面積座標とは三角形平面上の点を三角形面積比で表した座標である。面積座標の例を図1に示す。

三角形の各頂点の三次元位置座標 P_1, P_2, P_3 、RGB 色座標を C_1, C_2, C_3 とすると三角形平面上の点 b の三次元位置座標 P_b と RGB 色座標 C_b は面積座標 L_1, L_2, L_3 を利用して式(3)で表現できる。ここで $L_1 + L_2 + L_3 = 1$ である。

$$\begin{cases} P_b = L_1 P_1 + L_2 P_2 + L_3 P_3 \\ C_b = L_1 C_1 + L_2 C_2 + L_3 C_3 \end{cases} \quad (3)$$

Fig.1 Triangular area co-ordinate system

データ点 a, b 間の(1)式で示す統合距離 d^2 を最も短くする三角形

平面上の点 b の L_1, L_2, L_3 は、以下の連立方程式(4)を解くことにより求めることができる。

$$\begin{cases} \partial d^2 / \partial L_1 = 0 \\ \partial d^2 / \partial L_2 = 0 \\ L_1 + L_2 + L_3 = 1 \end{cases} \quad (4)$$

3.4 統合処理

最終的な変換行列が得られたのち、移動側データをその変換行列により基準座標側へ移動して二つのデータを一に統合する。両データの重ならない領域では両方のデータが有効である。一方重なる領域では、移動側の各データ点と最も距離の近い基準座標側の三角形を求め、三角形平面の内側にある時は移動側のデータを、外側にある時は基準座標側のデータを採用するようにした。このとき重なる領域との境でその外側のデータがなるべく滑らかにつながるよう、移動側のデータにはその重心に近いほど大きくなる係数値により重みづけをしたのち、両者のデータの平均を取る処理を行った。

4. 実験結果と考察

4.1 位置・色重みづけ係数値と対応点間距離の平均との関係

この実験では、位置重みづけ係数値 k_p と色重みづけ係数値 k_c の比率を変化させたとき、「三次元位置座標による対応点間距離の平均 $\overline{d_p}$ 」と「RGB色座標による対応点間距離の平均 $\overline{d_c}$ 」と「正規化した三次元位置座標とRGB色座標による対応点間距離の平均の和 $\overline{d_{pnorm}} + \overline{d_c}$ 」の3項目の値がどう変化するかを調べた。実験には、図2に示すように赤色で外側から黄、緑、青、紫、赤の同心円状の配色を施した円筒モデルを使用した。計測データは、正面から計測した570点のものと正面からみて右約30°、仰角35°で計測した580点のものである。この実験では計測データの一部抽出、全計測データによる改善という2段階の処理は行っていない。初期配置の位置はX方向、Y方向ともに等分割した7×7か所で、回転は行わなかった。これらの初期配置候補から3回改善を行った中から最小となった値を採用した。実験結果を図3に示す。

図3より $\overline{d_p}$ の値は k_p の比率が増加するほど減少し、 $\overline{d_c}$ の値も k_c の比率が増加するほど減少している。 $\overline{d_{pnorm}} + \overline{d_c}$ の値は k_p の比率が0.4~0.8の間ほぼ一定となった。図4に $k_p=1.0, k_c=0.0$ 、図5に $k_p=0.9, k_c=0.1$ 、図6に $k_p=0.4, k_c=0.6$ の結果を示す。 $k_c=0.0$ の場合には面は合ったが色は合わない状態で合成されたのに対して、 $k_c=0.1$ の場合には面も色も共に合った状態で合成することが可能であった。しかし $k_p=0.4, k_c=0.6$ に設定した

場合、同心円上の配色はほぼ合っているが、面同士は一部が離れた状態となった。

Fig.3 The relation between average distance after composition and ratio of k_p and k_c (cylinder model)

Fig.4 Result of composition using $k_p = 1.0$ and $k_c = 0.0$ (cylinder model)

Fig.5 Result of composition using $k_p = 0.9$ and $k_c = 0.1$ (cylinder model)

Fig.6 Result of composition using $k_p = 0.4$ and $k_c = 0.6$ (cylinder model)

Fig.2 Cylinder model used in the experiment

Fig.7 Result of composition using $k_p = 1.0$ and $k_c = 0.0$ (human face model)

円筒モデルでは面形状に特徴がなく色情報を利用しない限り合成は不可能であったのに対して、面形状に特徴のある場合と比較するため人の顔の計測データを使用して同じ実験を行った。データ数は正面からみて左約30°で計測したものが961点、正面からみて右約20°で計測したものが906点である。図7に $k_p = 1.0$, $k_c = 0.0$ の結果を示す。人の顔のモデルにおいては $k_c = 0.0$ としても $k_c = 0.1$ としてもほぼ同じ結果が得られた。顔のように面形状に特徴のあるデータでは、色情報の無い三次元位置座標のみでも合成可能であった。

以上の実験の結果から三次元形状の合成においては、まず面が合うことが重要であること、また色は照明の条件などから値が変動する可能性のあることから、 k_p を大きくし、補助的に k_c を利用するのがよいと考えられる。

4.2 初期配置位置、改善回数と対応点間距離の平均との関係

この実験では、各初期配置候補の位置、改善回数と対応点間距離の平均 $\bar{d}$ との間にどのような関係があるか調べた。実験に使用したデータは前項4.1で使用した円筒のデータと同じである。また位置および色重みづけ係数値はそれぞれ $k_p=0.9$, $k_c=0.1$ とした。

まず X, Y 軸方向については各々12等分した13か所の配置位置とし合計169か所から制限値を10回として改善処理を行った後の $\bar{d}$ の値を求めた。 $\bar{d}$ の値が最小の0.023となる配置位置から X 軸方向に沿った位置における $\bar{d}$ の改善過程を図8に、Y 軸方向については図9に示す。改善回数0回目の値は改善前の値を示す。また棒グラフの無い箇所は値が改善されなかったため、改善処理を打ち切った所である。 $\bar{d}$ が最小となった配置位置における例では改善前0.031であった値が3回改善後には0.023と最小値となった。また最小となる位置に隣接した位置で2番目に値が小さくなり、最小値との差はX軸方向0.001、Y軸方向0.002であった。

Fig.8 Transition of $\bar{d}$ in each position along X axis (cylinder model)

Fig.9 Transition of $\bar{d}$ in each position along Y axis (cylinder model)

Fig.10 Transition of $\bar{d}$ in each position rotated by normal vector (cylinder model)

次に、先に求めた $\bar{d}$ の値が最小となる配置位置で移動側データの回歸平面的法線周りに回転した位置を初期配置として、制限値10回で改善処理を行った後の $\bar{d}$ の値を求めた。-90~90°まで15°きざみで12等分した時の結果を図10に示す。回転を行うと円筒面が合わなくなってしまうため、0°, -15°以外では一度も改善に成功しなかった。回転方向においても最小値となる0°と-15°との差は0.002であった。

以上より、 $\bar{d}$ の値が0.002程度悪くなることを許せば、平行移動および回転の回数を半分の6等分に減らしても同等な結果の得られることがわかった。

4.3 抽出処理と処理時間・対応点間距離の平均との関係

この実験では、双方の全計測データ点の中から 1/128, 1/64, 1/32, 1/16, 1/8, 1/4抽出したときの合成処理時間と全計測データの対応点間距離の平均を求め、抽出処理を行わなかった場合との比較により抽出処理の有効性を検討した。抽出方法としては、最近接点との距離がしきい値以上の点のみ抽出するようにした場合とさらにその最近接点との法線方向が20°以上異なるか、色座標による距離が0.1以上異なったときに抽出するようにした場合との比較を行った。図11に1/16抽出したときの例を示す。(a)は距離のみ考慮したときであり、(b)は法線方向と色も考慮したときである。(a)ではほぼ均等に点が抽出されているのに対して、(b)では輪郭部、眉、目、鼻、唇など面形状または色に変化している点が抽出されている。

データ点抽出後は $k_p = 0.9$, $k_c = 0.1$ として、初期配置XY軸方向には各7か所、法線周りの回転は行わない計49か所の初期配置位置で3回改善処理を行った。ただし重なる領域のデータ点数が全体の 1/3以上の配置のみを対象とした。求まった配置のうち最小の $\bar{d}$ となる配置において、まず抽出したデータ点で制限回数無しでの改善を行った後に、全計測データ点でも制限回数無しでの改善を行った。

Fig.11 Comparison of extracted points distribution when the method of selection is changed (human face model)

*1) Numbers on the chart are the number of times of unlimited improvement with selected points and(plus) that with all data.

Fig.12 Comparison of processing time when the ratio and the method of extracting points are changed (cylinder model)

*1) Numbers on the chart are the number of times of unlimited improvement with selected points and(plus) that with all data.

*2) Unlimited improvement was not performed because correct placement cannot be obtained by extracted points.

Fig.13 Comparison of processing time when the ratio and the method of extracting points are changed (human face model)

実験には円筒モデル8529点、8493点と人の顔モデル12325点、12662点を使用した。図12、図13に各々の配置を求める時間と抽出点および全計測データ点でさらに改善処理を行うのに必要な時間を示す。図中の+記号の左右の数字は各々抽出点お

Fig.14 Comparison of average corresponding points distance($\bar{d}$) when the ratio and the method of extracting points are changed (cylinder model)

*1) Unlimited improvement was not performed because correct placement cannot be obtained by extracted points.

Fig.15 Comparison of average corresponding points distance($\bar{d}$) when the ratio and the method of extracting points are changed (human face model)

よび全計測データ点による改善回数である。図14、図15には各々の配置位置を求めた後、抽出点および全計測データ点でさらに改善処理を行った後の対応点間距離の平均 $\bar{d}$ を示す。この $\bar{d}$ に関しては全計測データに対する配置の良否の比較が行えるよう、すべて得られた変換行列によって全計測データを移動した時の値を求めた。

人の顔モデルでは1/128、等距離になるようにデータを抽出したときの1/64、1/32、1/4では明らかに誤った配置を求めたため、引き続き改善処理は行わなかった。誤った例では配置位置として左側から計測したモデルの額部と右側から計測したモデルのほお部のお互いに平らで比較的特徴の無い面同士が重なる位置を解としていた。一方方法線方向と色も考慮して抽出したときには該当する領域のデータは間引かれて少なくなっているため、このような配置は改善処理対象外となっていた。一方円筒モデルの例では円環のしみが計測データのほぼ全領域にわたっていたため、抽出方法による顕著な差異は認められなかった。

抽出処理を行わない場合の合成処理時間は、円筒モデルの場合全計測データ点で配置を求める時間190分、全計測データ点を改善する時間15分の計205分であった。人の顔モデルの場合は全計

測データ点で配置を求める時間252分、改善時間42分の計294分であった。抽出したデータ点で配置を求める時間は図12および図13に示すように抽出データ点数が増えるにしたがって増加している。移動側、基準座標側のデータ共にデータ点数が n 倍になったとすると、対応点を求める処理時間は n^2 のオーダーで増加すると考えられることから、移動側と基準座標側のデータ点数の和を x 、1か所の初期配置位置あたり3回改善処理を行って配置を求めるのに必要な時間を y 分として両者の関係を二次式で近似すると、以下の式(5)が得られた。

$$y = 7.3 \times 10^{-9} x^2 + 1.4 \times 10^{-4} x - 8.4 \times 10^{-3} \quad (5)$$

一方、全計測データを改善する時間は、円筒モデルの等距離で1/4抽出した時と人の顔モデルの法線方向と色も考慮して1/8抽出した時を除いて、抽出点数が増えるにつれて減少する傾向がみられた。これは全計測データによる改善処理に先立って、抽出したデータ点による制限回数の無い改善を行っているためである。図14、図15に示すようにこの時1/4、1/8、1/16と数多く抽出した場合の方が、それより抽出数の少ないものよりも、 $\bar{d}$ の値が小さい値まで改善されている。さらに全計測データで改善を行うと、いずれの場合においても $\bar{d}$ がほぼ同じ値まで改善された。全計測データの1回あたりの改善に必要な時間は円筒モデルの場合約1.5分、人の顔モデルの場合約3.3分であった。

全処理時間に関しては、抽出するデータ点数の割合を円筒モデルの場合1/32～1/8にすると約32分と抽出しない場合と比較して1/6以下の時間で、人の顔モデルの場合1/64～1/16にすると約25分と1/11以下の時間で処理可能であった。以上の実験結果を総合すると、抽出するデータ点数の割合を1/32～1/16程度にすることにより、抽出処理無しで無制限に改善を行った場合と同等の結果を1/6以下の時間で得ることができると考えられる。

5. 結 言

三次元位置座標による距離とRGB色座標による距離に重みづけをして和をとった統合距離を定義し、三角形面積座標より統合距離が最短となる対応点を求めて、その対応点間距離の平均を改善していく手法を開発した。また抽出したデータ点でなるべく多くの初期配置位置から良い配置を求めておいた後、全計測データで改善を行う2段階の手法を採った。本手法により、複数の計測データを物体の面だけでなく色も合わせた状態で自動合成することが可能となった。また実験結果より以下の事項が明らかとなった。

- ・位置重みづけ係数値を $k_p = 0.9$ と大きくし、色重みづけ係数値は $k_c = 0.1$ と補助的に使うと良い合成結果が得られる。
- ・両者の解となる配置の重なる領域に面の形状あるいは色に特徴がある場合には、法線方向と色の変化する点を抽出する方法により、正しい解の得られる確率が高くなる。

- ・1/32～1/16のデータ点数を抽出して配置を求め、さらに抽出データおよび全計測データで無制限回の改善処理を行う方法により、抽出処理無しで無制限に改善を行った場合と同等の結果を1/6以下の時間で得ることができる。

今後の課題を以下に挙げる。

- ・より効果的な特徴点の抽出方法を考案することにより、処理時間を短縮しつつ、より良い配置位置、正確な対応点を求められるようにする。
- ・改善処理時間をさらに短縮するためには、改善処理1回にかかる時間および改善回数を削減する必要がある。このためにはより効率的に対応点を求める方法、より少ない回数で対応点間距離の平均を収束させる手法を考案していかなければならない。
- ・2方向から計測したデータの合成は可能となったので基本的には3方向以上から計測したデータの合成も可能である。ただし、全周方向の合成を行うには初期配置位置をすでに形成された面に沿って配置するなどの改善が今後必要である。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり数多くの有益な助言をいただきました東京大学大学院工学系研究科の土肥健純教授に深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 山田朋弘, 菅原利夫, 森 悦秀, 南 克浩, 三島克章: 液晶レンジファインダを用いた顔面形態評価システムの開発と唇裂手術の評価, 第5回日本コンピュータ外科学会論文集, (1996) 94.
- 2) 藤本周央, 花房昭彦, 磯村 恒, 関口行雄, 垣本 映, 高橋 元, 土肥健純: 耳介の形態異常治療支援システム (耳介形状の特徴抽出), 第6回日本コンピュータ外科学会論文集, (1997) 103.
- 3) 田沢英二, 高島孝倫, 安田義幸: 義肢装具用CAD-CAMシステム, 義肢装具用CAD-CAMシステム講習会テキスト, (1993) 2.
- 4) 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭見堂, (1990) 36.
- 5) 吉澤 徹: 光三次元計測, 新技術コミュニケーションズ, (1993) 53.
- 6) 吉見 隆, 植芝俊夫, 大島正毅: 複数光源によるレンジファインダシステム, 日本ロボット学会誌, 9, 7 (1991) 803.
- 7) B. Kamgar-Parsi, J.L. Jones and A. Rosenfeld: Registration of Multiple Overlapping Range Images: Scenes without Distinctive Features, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 13, 9 (1991) 857.
- 8) Y. Chen and G. Medioni: Object Modelling by Registration of Multiple Range Images, Image and Vision Computing, 10, 3 (1992) 145.
- 9) 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三次元形状復元, 電子通信学会論文集, J75-D-II, 4 (1992) 737.
- 10) 樋口和則, マーシャルヘバート, 池内克史: 複数視点レンジデータからの3次元物体モデル構築, 電子通信学会論文集, J79-D-II, 8 (1996) 1354.
- 11) 藤本周央, 花房昭彦, 磯村 恒, 関口行雄: 色情報を有する複数の三次元計測データの合成手法, 1999年度精密工学会春期大会学術講演会講演論文集, (1999) 602.
- 12) B. K.P. Horn: Closed-form Solution of Absolute Orientation Using Unit Quaternions, J. Opt. Soc. A., 4, 4 (1987) 629.
- 13) P. J. Besl and N. D. McKay: A Method for Registration of 3-D Shapes, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14, 2 (1992) 239.