

色の境界部分を用いた複数レンジデータの統合

石川知幸 大槻正樹 佐藤幸男
名古屋工業大学電気情報工学科

あらまし 本稿では、物体表面のテクスチャデータを用いて複数レンジデータの位置合わせを行う手法について述べている。実物体の全周形状データを取得するために、レンジファインダを用いて多視点から計測してレンジデータを取得し、統合を行う。しかし計測誤差や視点移動誤差により統合の際誤差が生じる可能性があるため、レンジデータの位置合わせが必要となる。これまで提案された形状特徴による位置合わせ手法では、単純で滑らかな物体には適用できない場合があるのが欠点であった。また、2つのレンジデータ間の位置合わせを繰り返し行くと位置合わせ誤差は蓄積されてしまうのも欠点である。本手法では、形状に依存しない特徴として色の境界情報を用いて位置合わせを行い、さらに全体的な位置合わせ誤差を最小限に抑えるため、複数のレンジデータの位置関係を同時に求める手法について述べる。

キーワード：レンジデータ、色の境界、位置合わせ、レンジファインダ

Multiple Range Data Registration Using Color Boundaries

Tomoyuki ISHIKAWA Masaki OTSUKI Yukio SATO
Dept. Electrical and Computer Engineering
Nagoya Institute of Technology

Abstract In this paper, a method for the multiple range data registration using texture data is described. To reconstruct the entire object surface, we need to take several range data from different viewpoints. However, integration errors are caused by the measurement errors due to the measurement system and viewpoint movement. Some methods for the range data registration using only object surface features were described. However, these methods may not apply if the shape is too smooth. And entire registration errors are stored if 2 range data registrations are repeated. In our method, object color boundaries which does not depend on the object shape are used here to fit the range data. Furthermore, a registration method to minimize the entire registration errors is described.

Keywords: Range Data, Color Boundaries, Registration, Rangefinder

1. はじめに

CG, CAD, バーチャルリアリティなどの分野において、実物体から形状モデルを構築することは重要な課題の一つとなっている。実物体のモデルを構築する方法として、レンジファインダを用いて物体の形状ならびに物体表面のテクスチャを計測する手法が実用的である。しかし、物体の全周形状モデルを構築するためには、その物体の全周形状データが必要となる。そのため、複数の視方向からレンジデータならびにテクスチャデータを計測し、それらのデータを統合する必要がある。さらに、テクスチャデータを用いてマッピングをすることによってカラーモデルを構築することができる[1]。レンジデータの統合手法として、例えばK.Pulliら[2]は、複数のレンジデータを立方体の細分化を繰り返すことによって近似し、それらをつなぎあわせることで全周形状データの統合を行っている。

しかし、計測されたレンジデータには計測誤差や視点移動誤差が含まれている。そのためレンジデータを統合しても、再構築される物体の全周形状モデルの精度は低下してしまう。高精度な形状モデルを構築するために、レンジデータ同士の位置合わせが必要となる。

これまでにレンジデータの位置合わせ手法が幾つか提案されてきた。例えば、Chenら[3]は、まず2枚のレンジデータから第1画像上の点における法線と第2画像上の形状面の交点を求め、その交点における接平面を求める。そしてその接平面と対応する第1画像上の点との距離を最小にすることにより位置合わせを行っている。河井ら[4]は、レンジデータを連結性をもとに領域分割し、各領域の特徴をもとに対応する領域を決定し、領域の重心が一致するように位置合わせを行っている。その他、エッジや曲率、凸法などといった形状特徴を用いる手法がある。これらの手法は主に何らかのレンジデータの特徴を用いているが、それらの特徴抽出を正確に行う必要がある。しかし、レンジデータに含まれるノイズや誤差に影響されやすいため、その結果、位置合わせも正確に行う

のは難しい。また、球や立方体のような単純で滑らかな物体や形状特徴が抽出されないような物体に適用できない場合があるのが欠点である。

またこれまでの手法では、主に隣り合う2つのレンジデータで位置合わせを行い、それを繰り返して行うことで全てのレンジデータの位置合わせが行われてきた。2枚のレンジデータの位置合わせでは局部的に最適な位置関係が得られるが、処理を繰り返すごとに位置合わせ誤差が蓄積されやすく、その結果最適な全周モデルを得ることはできないのが欠点であった。Shumら[5]は、多面体を対象としてすべての視点から得られたレンジデータすべてを用いて一挙にレンジデータ間全ての位置関係を求めている。しかしこの手法では物体が多面体に限られており、一般的な実物体への適用は難しい。

本研究では、形状特徴を用いた位置合わせが不可能な場合での位置合わせ手法として、形状に依存しないテクスチャデータを用いた手法を提案する。色情報を使ううえで、中でも最も有効的な特徴として色の境界部分を用いる。また本手法ではこれまでの手法を発展させ、複数のレンジデータを同時に扱うことで全体的な位置合わせ誤差を軽減するための手法を提案する。

2. 色の境界点抽出と対応点決定

本手法では、形状に依存しない特徴としてレンジデータ取得時と同一視方向から計測されたテクスチャデータを用いる。ここでレンジデータとテクスチャデータは画素単位で対応がとれているものとする。テクスチャの特徴の中で最も有効的な特徴としてテクスチャの変化を用いて位置合わせを行う。

まず、色の違い(色差)から複数のテクスチャデータの領域分割を行い、各領域の境界部分を抽出する。それぞれのテクスチャデータから得られた境界点同士に注目し、その境界点の両側の色が類似している点同士を対応点候補とし、その中で3次元空間上での距離が最小なものを対応点とし

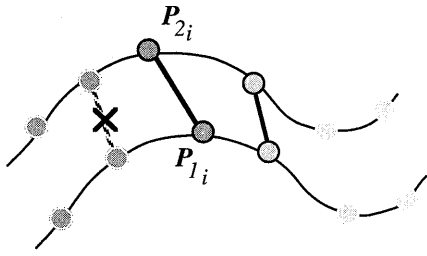


図1 境界点による対応点決定

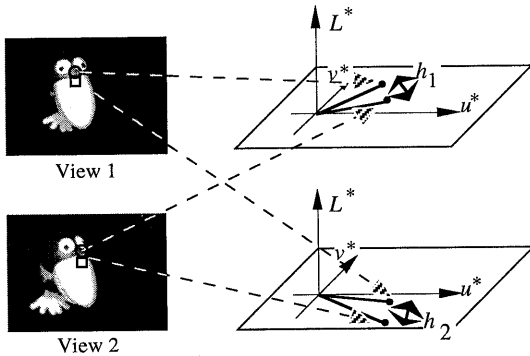


図2 色相角の定義

て決定する (図1)。

ここで、テクスチャデータを取り扱う上で色自体の性質を考える必要がある。物体表面の色は光源の方向や強度などにより変化する。しかし正反射光を除き、反射光の色度はあまり変化しない。そこでまず、境界点のテクスチャデータを、人間の知覚に対応するように構成された $L^*u^*v^*$ 色空間に変換する。 $L^*u^*v^*$ 色空間は均等色空間と呼ばれ、色差を定量的に表したとき、色差の値と色の知覚的な相違を均等にするということにより、色や式差を数値的に扱えるようになるというのが特徴である。次に $L^*u^*v^*$ 色空間の u^*v^* 平面上の色相角の差 h_1, h_2 がある閾値以下である境界点の組を検索し (図2)、その中で境界点同士の3次元空間上での距離が最小なものを対応点として決定する。

3. レンジデータの位置合わせ手法

この章では、まず2つのレンジデータの位置合わせ手法について述べる。そして、その手法を基にして、全体的な位置合わせ誤差を軽減するための位置合わせ手法について述べる。

3.1 2枚のレンジデータの位置合わせ手法

2枚のレンジデータ中の対応点の世界座標値を $P_{1i} = (x_{1i}, y_{1i}, z_{1i})$, $P_{2i} = (x_{2i}, y_{2i}, z_{2i})$ ($i = 1, \dots, n_{12}$) とする。ここで、 n_{12} は対応点の数を示す。形状計測やマニピュレータの移動に誤差がなければ $P_{1i} = P_{2i}$ となるが、誤差が存在する場合この条件は満たされない。しかし、レンジデータの誤差が位置のずれだけであるとすると、これらは X, Y, Z の各軸に対する回転角 ϕ, θ, ψ と平行移動 t_x, t_y, t_z のみを用いて関係付けられ、以下のように表すことができる。

$$P_{1i} = T(\phi, \theta, \psi, t_x, t_y, t_z) P_{2i}$$

$$T = \begin{bmatrix} c\theta c\psi + s\theta s\psi & c\theta s\psi & s\theta c\psi - s\theta c\psi & t_x \\ s\theta c\psi - c\theta s\psi & c\theta c\psi & s\theta s\psi + s\theta c\psi & t_y \\ c\phi s\theta & -s\phi & c\phi c\theta & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(1)

ここで $s\theta$ は $\sin\theta$, $c\theta$ は $\cos\theta$ を表す。式(1)を用いて、式(2)を最小とすように変換行列 T を求める。

$$\frac{\sum_{i=1}^{n_{12}} \|R_i - TP_{2i}\|^2}{n_{12}} \rightarrow \min \quad (2)$$

得られた T を用いて P_2 を変換し、再び P_{1i} に対応する点 P_{2i} を求める。 $k-1$ 回の変換後の P_2 を P_2^{k-1} , その時の変換行列を T^{k-1} と書くとすると、 P_2^k は以下のように表すことができる。

$$P_2^k = TP_2^{k-1} = T \cdot T^{k-1} P_2^0 = T^k P_2^0 \quad (3)$$

P_2^0 は P_2 の初期値を表す。 k 回目の二乗誤差の平均 d^k は以下のように表され、 $|d^k - d^{k-1}|$ が

閾値以下になった時点で繰り返し処理を終了する。

$$d^k = \frac{\sum_{i=1}^{n_{12}} \|P_{1i} - TP_{2i}^{k-1}\|^2}{n_{12}} \quad (4)$$

変換行列 T は以下のように求める。計測誤差が非常に小さいとすると、式(1)は以下のように近似することができる。

$$(x_{1i} \ y_{1i} \ z_{1i} \ 1)^t \equiv \begin{bmatrix} 1 & \psi & -\theta & t_x \\ -\psi & 1 & \phi & t_y \\ \theta & -\phi & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{2i} \\ y_{2i} \\ z_{2i} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)は以下のように変形することができる。

$$\begin{bmatrix} x_{1i} - x_{2i} \\ y_{1i} - y_{2i} \\ z_{1i} - z_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -z_{2i} & y_{2i} & 1 & 0 & 0 \\ z_{2i} & 0 & -x_{2i} & 0 & 1 & 0 \\ -y_{2i} & x_{2i} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \\ t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

そこで式(6)を2点以上の計測点を用いて解くことにより T を得ることができる。

3.2 複数レンジデータの位置合わせ手法

この節では、2枚のレンジデータの位置合わせ手法を元にした複数レンジデータの位置合わせ手法について述べる。

2枚のレンジデータの位置合わせ手法を順番に繰り返し行くと位置合わせ後の誤差が蓄積されてしまい、最終的には最適な位置合わせ結果を得ることはできない。全体的な位置合わせ誤差を最小限に抑えるためには、注目するレンジデータと他のすべてのレンジデータとの対応付けを行うため全ての組み合わせを比較する必要がある(図3)。

注目するレンジデータと他のすべてのレンジデータ間の対応点は前述した手法により決定すること

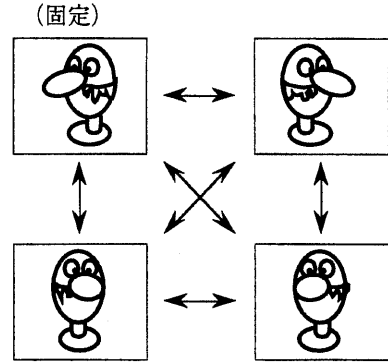


図3 対応点検索

ができる。これらを用いて、基準とするレンジデータを除き、各レンジデータにおける変換行列を求める。基準とするレンジデータは他のレンジデータとの対応点の総数をもっとも多いものを選択し、そのレンジデータは位置合わせ時は固定とする。

3次元空間上で、 N 枚のレンジデータの対応点同士の関係は以下ようになる。

$$T_i P_{ik} = T_j P_{jk} \\ i = 1, \dots, N-1, \quad j = i+1, \dots, N, \quad k = 1, \dots, n_{ij} \quad (7)$$

P_{ik} , P_{jk} は各レンジデータ上の対応点の3次元座標値、 n_{ij} はデータ i とデータ j における対応点の数である。また、 T_i , T_j は各レンジデータの変換行列であり、 $T_1 = I$ である。式(7)から式(8)を最小とするような各変換行列 T_i を求める。

$$\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\sum_{k=1}^{n_{ij}} \omega_{ij} \|T_i P_{ik} - T_j P_{jk}\|^2}{n_{ij}} \right) \rightarrow \min \quad (8)$$

ω_{ij} は対応点の数によって決定される重みづけを表す。この場合においても前節と同様に繰り返し処理を行い、 $|dk - dk-1|$ がある閾値になるまでこの処理を繰り返す。

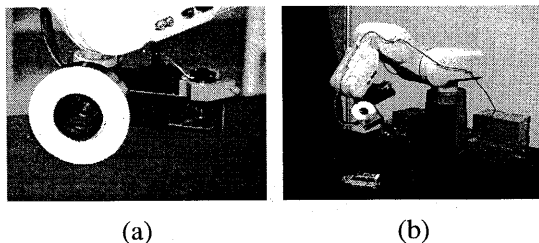


図4 Cubicscope

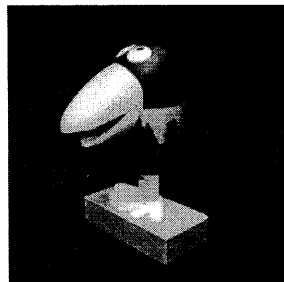


図5 計測対象物

4. 計測システム

レンジデータならびにテクスチャデータを取得するために、レンジファインダCubicscope（図4(a)）を用いる[1]。このレンジファインダは時系列空間コード化法に基づくレーザレンジファインダである。カラーCCDカメラと半導体レーザ、回転ミラー、リングライトから構成されており、

半導体レーザから照射されたスリット光を回転ミラーで走査し、その画像をカラーCCDカメラで撮影することでレンジデータを取得する。形状計測後リングライトを点灯させて撮影することで、レンジデータ取得時と同一視方向からテクスチャデータを取得することが可能である。このテクスチャデータはレンジデータと画素単位で対応のとれた画像として得られる。

このレンジファインダは小型であり、5軸のロボットマニピュレータの先端に搭載されている（図4(b)）。そのため、マニピュレータを移動させることで任意の視点からレンジデータならびにテクスチャデータを取得することができる。

5. 実験結果

以上のアルゴリズムを用いて実験を行った結果を示す。図5に今回使用した計測対象物を示す。今回の実験では6方向からレンジデータとテクスチャデータの計測を行った（図6）。マニピュレータの制御パラメータを用いて統合を行った結果が図7である。視点移動時のマニピュレータの移動

誤差や計測誤差により、統合誤差が存在している。

テクスチャデータを用いて色の境界点を抽出した結果が図8である。抽出した境界点から対応点を決定して位置合わせを行った結果が図9である。視覚的な評価として、位置合わせを行った結果、色の境界部分が正確に重なり合っているのがわかる。位置合わせを行う前の平均誤差が約2.5mmに対し、位置合わせ後の平均誤差は約1.5mmであった。

この計測対象物は比較的単純な形状であり、特に対象物の後部の形状は非常に滑らかである。しかし位置合わせを行った結果、正確に重なり合っている。

6. まとめ

本稿では、レンジデータ計測時と同一視方向から計測されたテクスチャデータを用いて、レンジデータの位置合わせを行うためのアルゴリズムを提案した。本手法は形状の特徴を用いた位置合わせが不可能な場合に有効な手法である。また、複数のレンジデータを同時に用いて位置合わせを行うため、全体的な位置合わせ誤差は軽減される。

今回提案した手法では、色領域が明確である場合であったが、今後グラデーションのように色領域が明確でない物体に対して考慮する必要がある。

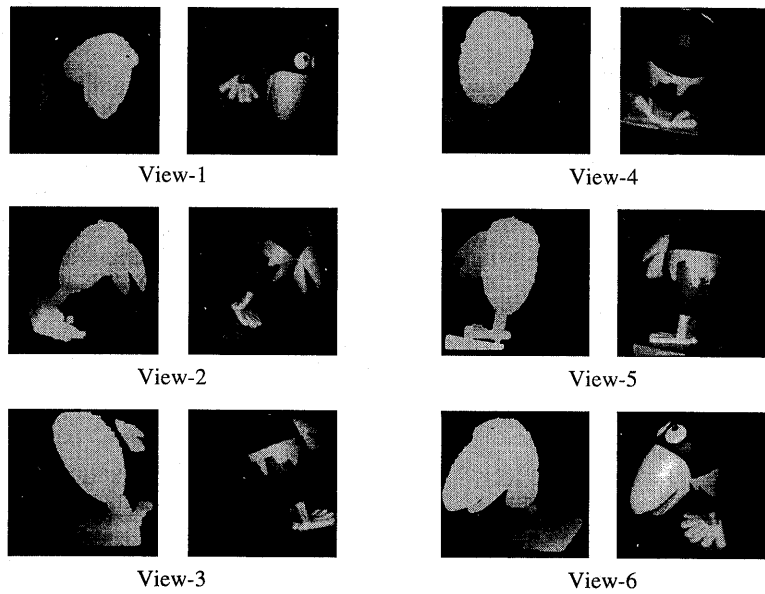


図6 レンジデータとテクスチャデータ



図7 レンジデータの初期統合結果

参考文献

- [1] M.Otsuki and Y.Sato, "Active 3-D Shape Reconstruction by Cubicscope," Proc.Asian Conf. Computer Vision, Osaka, pp.616-619, 1993
- [2] K.Pulli, M.Cohen, T.Duchamp, H.Hoppe, J.McDonald, L.Shapiro and W.Stuetzle, "Surface Modeling and Display from Range and Color Data," ICIAP'97 Image Analysis and Processing, Vol.1, pp385-397, 1997
- [3] Y.Chen and G.Medioni, "Object Modeling by Registration of Multiple Range Images," Proc.IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation, pp.2724-2729, 1991
- [4] 河井良浩, 植芝俊夫, 吉見隆, 大島正隆, "多視点レンジデータからの3次元形状復元," 信学論(D-II), Vol.J75-D-II, No.4, pp.737-748, 1992
- [5] H.Shum, K.Ikeuchi and R.Reddy, "Principal Component Analysis with Missing Data and Its Application to Polyhedral Object Modeling," IEEE Trans. PAMI, Vol.17, No.9, pp.854-867, 1995

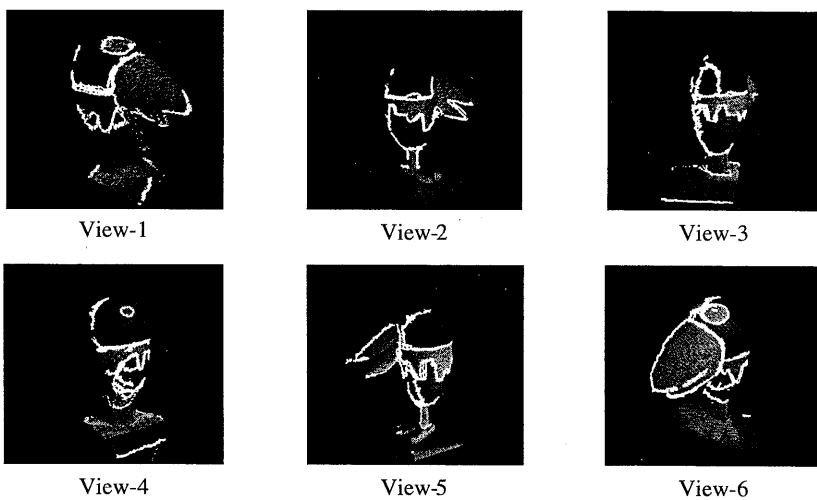


図8 色の境界点抽出結果



図9 位置合わせ結果