

## SIFT と距離濃淡画像を用いた 幾何モデルとカラー画像のレジストレーション

猪股 亮<sup>†</sup> 寺林 賢司<sup>††</sup> 梅田 和昇<sup>††</sup> ギー ゴダン<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 中央大学大学院理工学研究科精密工学専攻, 〒 112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

<sup>††</sup> 中央大学 理工学部 精密機械工学科, 〒 112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

<sup>†††</sup> カナダ国立研究所 情報技術部 視覚情報技術グループ

1200 Montreal Road, Ottawa, Ontario K1A 0R6, Canada

E-mail: jinomata@sensor.mech.chuo-u.ac.jp, ††{terabayashi,umeda}@mech.chuo-u.ac.jp

あらまし 色情報を持つ三次元モデルの生成には, 3次元幾何モデルにカラー画像をテクスチャとして貼り付けるテクスチャマッピングが有効である. 一般に, 幾何モデルとカラー画像はレンジファインダとデジタルカメラといった異なる計測装置により取得されるため, 幾何モデルとカラー画像のレジストレーションが必要になる. 本論文では, SIFT と距離濃淡画像を利用した 2D と 3D のレジストレーション手法を提案している. 距離濃淡画像とは, 能動型のセンサを用いて距離画像を取得する際に同時に測定される一種の濃淡画像である. また, 2D と 3D のレジストレーションのためのパラメータに関する線形拘束式を導出している. 本研究では, SIFT を利用して距離濃淡画像とカラー画像の対応付けを行い, 線形拘束式を解くことで幾何モデルとカラー画像のレジストレーションを行っている. 本手法の有用性を, 実物体を用いたモデリング実験により確認している.

キーワード 距離画像, カラー画像, 距離濃淡画像, SIFT, レジストレーション, テクスチャマッピング

## Registraion of Geometric Model and Color Images Using SIFT and Range Intensity Images

Ryo INOMATA<sup>†</sup>, Kenji TERABAYASHI<sup>††</sup>, Kazunori UMEDA<sup>††</sup>, and Guy GODIN<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> Course of Precision Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Chuo University,  
1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

<sup>††</sup> Dept. Precision Mechanics, Faculty of Science and Engineering, Chuo University,  
1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

<sup>†††</sup> Visual Information Technology, Institute for Information Technology, National Research Council  
1200 Montreal Road, Ottawa, Ontario K1A 0R6, Canada

E-mail: jinomata@sensor.mech.chuo-u.ac.jp, ††{terabayashi,umeda}@mech.chuo-u.ac.jp

**Abstract** For constructed with a 3D model with color information, it is effective to use texture mapping that 3D geometric model is mapped color images as texture. However, since a geometric model and color images are usually obtained from different viewing positions through two independent range scanners and color sensors, it is necessary to perform registration of a geometric model and color images. In this paper, we propose a new method for 3D to 2D registration using range intensity images and SIFT(Scale-Invariant Feature Transform). A range intensity image is a kind of intensity image that is obtained at the same time when range image is obtained by using an active sensor. We also develop the linear constraint equation about parameters for 3D to 2D registration. In this study, matching points of range intensity and color image are extracted by using SIFT. Then, registration of a geometric model and color images are performed by solving linear constraint equation. The effectiveness is confirmed through several modeling experiments using real objects.

**Key words** range image, color image, range intensity image, SIFT, registration, texture mapping

## 1. はじめに

近年、情報技術の進歩に伴い、コンピュータグラフィックス (CG) 技術を用いて現実感の高いモデルを生成する試みが盛んに行われている [1] [2]。その効率的作成法のひとつとして、レンジセンサ等により測定された実物体の3次元幾何モデル上に、カラーセンサにより撮影された実物体表面のテクスチャ画像を貼り付けて表示するテクスチャマッピングの手法が知られている。一般に、テクスチャマッピングに用いられる幾何モデルとカラー画像は、レンジファインダとデジタルカメラといった異なる計測装置により取得される。そのため、正確なテクスチャマッピングを行うには、幾何モデルとカラー画像の正確なレジストレーション (位置合わせ) が必要になる。

従来、このレジストレーションは、両画像の特徴点を手動で対応付けることで実現されていた [3] が、最近ではこれを自動化する手法も提案されている。Violaら [4] は統計的手法を提案している。Stamosら [5] はレンジデータに平面を当てはめ、それらの交線エッジとカラー画像のエッジを比較することで位置合わせを行っている。

一方、シルエット画像や輪郭線を用いた位置合わせ手法も提案されている [6] ~ [9]。Lenschら [6] は、三次元物体の二次元投影シルエットと撮影画像のシルエット同士の間排他的論理和を用いてカメラパラメータを推定し、三次元形状にテクスチャを与えている。Neugebauerら [9] は、三次元モデルと二次元画像の特徴点を手作業で対応付けてカメラパラメータを推定した後、三次元形状の二次元投影画像のエッジとテクスチャ画像のエッジを比較し、テクスチャを対応付ける方法を提案している。

一方、多くのレンジセンサにおいて距離画像の付加的な情報として得られる距離濃淡画像 (リフレクタンス画像) を用いる手法も提案されている。図1に同一物体の距離濃淡画像とカラー画像を示す。距離濃淡画像とは、能動型のレンジセンサを用いて距離画像を取得する際に、距離画像の幾何学的なデータと全く同じサンプリングで得られる、物体表面の反射特性に関わる一種の濃淡画像のことである。距離濃淡画像は、通常の二次元画像に近い特性をもつと考えられるため、3Dと2Dとのレジストレーションに有効であると考えられる。Boughorbelら [10] らは、 $\chi^2$  類似度を用いて距離濃淡画像と濃淡画像との間の類似度を評価している。梅田ら [11] は、距離濃淡画像と2次元画像の勾配拘束を利用した、レンジセンサとカラーセンサの相対位置の推定法を提案している。

以上の研究では距離濃淡画像と2次元画像との類似性を利用している。他の距離濃淡画像を利用した研究では、距離濃淡画像から特徴を抽出し、それらのマッチングを求めることでレジストレーションを実現している。倉爪ら [12], [13] は、距離濃淡画像中のエッジ点とカラー画像中のエッジ点間の誤差を、ロバスト M 推定を用いて最小化することにより位置合わせする手法を提案している。



(a)Range intensity image (b)Color image

図1 距離濃淡画像とカラー画像

Fig. 1 Range intensity image and color image.

また Elstromら [14] は、まず距離濃淡画像とカラー画像からそれぞれ特徴点を抽出し、類似度計算によりそれらの対応関係を決定する。そしてステレオ視の原理により対応点の奥行きを求め、それと距離画像から得られる奥行きが一致するように両センサの相対位置姿勢を推定している。

Bohmら [15] は、マッチングを行う特徴量の抽出に、Loweによって提案されたSIFT (Scale-Invariant Feature Transform) [16], [17] を利用している。SIFTは画像の拡大縮小、傾き、オクルージョン、照明変化に対してロバストな特徴量の記述を行うため、高精度なマッチングを行うことができる。この手法では、まず距離濃淡画像にヒストグラム平滑化を適用し、通常の濃淡画像のように扱えるようにする。そして、SIFTを用いて距離濃淡画像とカラー画像の対応付けを行う。このとき、距離濃淡画像とカラー画像が異なる画像であるため、誤対応が多数生じてしまうので、RANSACを用いて誤対応除去を行う。最後に、得られる対応関係から剛体変形を計算し、位置合わせを行っている。しかし、この手法ではカメラの外部パラメータしか推定していない。

本研究では、SIFTを利用して、2Dと3Dのレジストレーションのためのパラメータに関する線形拘束式を導出する。本拘束式では、カメラの外部パラメータだけでなく、カメラの内部パラメータ、レンズの歪曲収差のパラメータも同時に算出可能であるため、より正確なレジストレーションを行うことができる。また上記の理由により生じる誤対応は、投票処理により除去する。本論文では、まず位相限定相関法 (POC) を用いた後、SIFTを利用して距離濃淡画像とカラー画像のマッチングを行う。次に、投票処理により誤対応の除去を行い、2Dと3Dのレジストレーションの拘束式を解く。そして、得られる修正量を用いてカメラパラメータを更新する。

## 2. レジストレーション手法の概要

距離濃淡画像・距離画像を持つ幾何モデルとカラー画

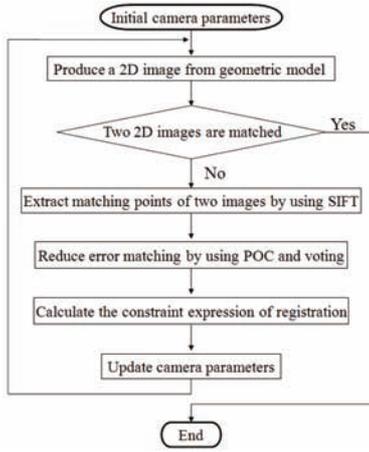


図2 レジストレーション処理の流れ  
Fig. 2 Flow of registration.

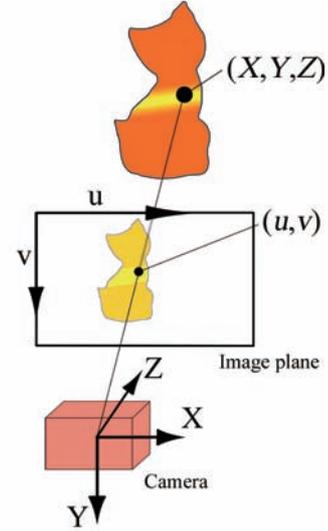


図3 3D空間の点の画像平面への投影  
Fig. 3 Projection of a 3D point on an image plane.

像とが与えられているとする．幾何モデルとカラー画像とのレジストレーションを行うには，幾何モデルを記述している座標系での，カラー画像を取得したカメラのパラメータを求めれば良い．正確なパラメータが得られれば，カラー画像と画像平面に投影された距離濃淡画像とは一致する．カメラのパラメータは内部パラメータと外部パラメータから構成される[18]．また，正確なレジストレーションを実現するには，カメラのレンズの歪曲収差も考慮する必要がある．

これらのパラメータを得るために，本論文ではSIFTを利用する．図2に，レジストレーション処理の流れを示す．まずカメラパラメータの初期値を与える．このパラメータ値を用いて，距離濃淡画像をカメラの画像平面に投影し，2D画像を生成する．このときの投影は，距離画像が持つ3D座標に対して適用される．投影された距離濃淡画像をカラー画像と比較し，両画像の一致が十分でなければ，提案手法を適用し，得られる修正量を用いてカメラパラメータを修正する．このときの両画像の一致度の評価には，単純に相関係数を用いる．

また，距離濃淡画像との比較には，カラー画像のうちのレーザー光の波長に近い色成分を利用する．これにより，距離濃淡画像と最も類似した画像が得られると考えられる．

### 3. レジストレーションの定式化

図3に示すように3Dの点 $(X, Y, Z)$ が2D画像平面上の点 $(u, v)$ に投影されているとすると，式(1)が成り立つ．

$$u = \frac{\alpha_u X + sY}{Z} + u_0, \quad v = \frac{\alpha_v Y}{Z} + v_0 \quad (1)$$

ここで， $\alpha_u, \alpha_v, s, u_0, v_0$ はカメラの内部パラメータである．

#### 3.1 外部パラメータに対する拘束

まず，カメラの内部パラメータが既知とする．この場

合，式(1)を微分すると，式(2)，式(3)になる．

$$\dot{u} = \frac{\alpha_u}{Z} \dot{X} + \frac{s}{Z} \dot{Y} - \frac{\alpha_u X + sY}{Z^2} \dot{Z} \quad (2)$$

$$\dot{v} = \frac{\alpha_v}{Z} \dot{Y} - \frac{\alpha_v Y}{Z^2} \dot{Z} \quad (3)$$

ここで，本手法では，カラー画像のレーザー光の波長に近い色成分と投影された距離濃淡画像との差を微分とみなす．これは，距離濃淡画像がカラー画像に単位時間に仮想的に移動したとみなすことに相当する．よって，SIFTを用いて得られる距離濃淡画像からカラー画像への移動量は，上式の $\dot{u}, \dot{v}$ に対応する．

また，カメラの運動により生じる対象点の3D空間中の速度ベクトル $\dot{\mathbf{X}} = [\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}]^T$ は，式(4)と表すことができる．

$$\dot{\mathbf{X}} = -\mathbf{v}_0 - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{X} \quad (4)$$

ここで， $\mathbf{v}_0 = [v_{0x}, v_{0y}, v_{0z}]^T$ はカメラの並進速度ベクトル， $\boldsymbol{\omega} = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ は角速度ベクトルである．式(4)を式(2)，式(3)に代入することにより，式(5)，式(6)が導出される．

$$\begin{cases} \dot{u} = -a v_x - b v_y - c v_z - (cY - bZ)\omega_x \\ -(aZ - cX)\omega_y - (bX - aY)\omega_z \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{v} = -d v_y - e v_z - (eY - dZ)\omega_x \\ + eX\omega_y - dX\omega_z \end{cases} \quad (6)$$

ただし，

$$a = \frac{\alpha_u}{Z}, b = \frac{s}{Z}, c = -\frac{\alpha_u X + sY}{Z^2}$$

$$d = \frac{\alpha_v}{Z}, e = -\frac{\alpha_v Y}{Z^2}$$

である．

この式は6個の運動パラメータに関する線形の式である。よって、本式を3点以上で求め、線形最小二乗法を適用することで、これらの運動パラメータを得ることができる。

式(4)の運動パラメータは速度成分であるため、実際には微小変位が用いられる。カメラの外部パラメータ(3×3の回転行列  $R$ , 3次元の並進ベクトル  $\mathbf{t} = [t_x, t_y, t_z]^T$ )は式(4)を用いて得られる微小変位から直接計算することができる。また、微小変位に関する式であるので、一般に外部パラメータの正しい値は一度の計算では得られず、図2に示すように両画像が一致するまで反復演算を適用し、収束値を最終的な解とする。

### 3.2 内部パラメータに対する拘束

以上の手法を、内部パラメータが既知でない場合に拡張する。この場合、式(1)の微分は、式(7)、式(8)になる。

$$\dot{u} = \frac{\alpha_u}{Z} \dot{X} + \frac{s}{Z} \dot{Y} - \frac{\alpha_u X + sY}{Z^2} \dot{Z} + \frac{X}{Z} \dot{\alpha}_u + \frac{Y}{Z} \dot{s} \quad (7)$$

$$\dot{v} = \frac{\alpha_v}{Z} \dot{Y} - \frac{\alpha_v Y}{Z^2} \dot{Z} + \frac{Y}{Z} \dot{\alpha}_v \quad (8)$$

前節の手順と同様にして、3.1節の式に3個の内部パラメータを加えた線形の式が導出できる。よって、本式を5点以上で求め、線形最小二乗法を適用することで、内部パラメータ、外部パラメータの微小変位を得ることができる。

### 3.3 レンズの歪曲収差への拘束

以上のアプローチを歪曲収差への拘束まで拡張する。ここでは画像中心からの距離の3乗に比例して歪曲収差が発生するモデルを考えると、式(1)は、式(9)、式(10)に書き直される。

$$u = \alpha_u \frac{X}{Z} \left( 1 + k \frac{X^2 + Y^2}{Z^2} \right) + s \frac{Y}{Z} \left( 1 + k \frac{X^2 + Y^2}{Z^2} \right) + u_0 \quad (9)$$

$$v = \alpha_v \frac{Y}{Z} \left( 1 + k \frac{X^2 + Y^2}{Z^2} \right) + v_0 \quad (10)$$

ここで、 $k$ は歪曲収差の大きさを表す比例定数である。前節の手順と同様にして、3.2節の式に $k$ を加えた線形の式が導出できる。よって、本式を5点以上で求め、線形最小二乗法を適用することで、カメラパラメータに加えて歪曲収差のパラメータを求めることができる。

以上で述べたように、本研究で提案した線形拘束式は、内部パラメータ未知・既知の場合、歪曲収差未知・既知の場合、それぞれで2Dと3Dのレジストレーションのためのパラメータを求めることができる。これを利用して、反復演算はステージ1~4で行った。ステージ1では外部

パラメータのみ更新した。ステージ2では、回転速度ベクトルを0に固定し、並進速度ベクトルと内部パラメータの $\alpha_u, \alpha_v, s$ を更新した。ステージ3では、外部パラメータと内部パラメータの $\alpha_u, \alpha_v, s$ を更新した。ステージ4では、外部パラメータと内部パラメータの $\alpha_u, \alpha_v, s$ と歪曲収差のパラメータを更新した。なお、 $u_0, v_0$ は更新していない。

## 4. SIFT適用の問題点への対処

SIFT特徴量を用いた距離濃淡画像とカラー画像の対応付けは、ユークリッド距離が最も短い特徴ベクトル間で行われる。このとき、距離濃淡画像とカラー画像は異なる画像であるため、SIFT特徴量の誤対応が多数生じてしまう。この問題に対して、単純なロバスト推定、例えば、RANSAC[19]を適用する場合には、誤差基準に対して固定された閾値を設定しなければならないため、本アルゴリズムのような繰り返し設計には適していない。

そこで本研究では、SIFT適用の前に位相限定相関法[20]を用いて、おおよその位置合わせを行った後、両画像の対応付けを行う。そして、投票処理によりSIFT特徴量の対応の良否を評価する。ただし、両画像間の変位が大きい場合には、上記の処理だけでは誤対応が残ってしまう。そこで、投票処理による誤対応除去後に、誤対応に対するロバスト推定を行うことで収束させる。

### 4.1 初期位置合わせ

まず位相限定相関法を用いて、距離濃淡画像からカラー画像への移動量 $\dot{u}, \dot{v}$ を求める。図3の投影モデルを仮定しているとき、以下の式が得られる。

$$\dot{x}_c = \frac{Z}{f} \dot{u} \delta_u, \quad \dot{y}_c = \frac{Z}{f} \dot{v} \delta_v \quad (11)$$

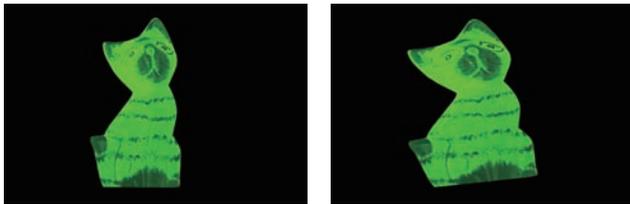
$\dot{x}_c, \dot{y}_c$ はカメラ座標における3Dモデルの微小変位、 $Z$ はカメラから3Dモデルまでの距離、 $f$ は焦点距離、 $\delta_u, \delta_v$ は1ピクセルの物理的間隔である。なお、 $Z$ は代表距離として、3Dモデルの重心の $Z$ 成分の値を用いている。式(11)を用いて、外部パラメータを更新し、おおよその位置合わせを行う。

次に、両画像の特徴量の位置の差が閾値以内である場合に限定してSIFT特徴量の対応付けを行うことで、誤対応の除去を行う。なお、このときの閾値は、両画像間の変位が大きい場合には緩くし、小さくなるに従い厳しくしている。

### 4.2 投票処理による誤対応除去

前節で述べた手法により誤対応を除去することができるが、閾値以内で記述された対応点の中に誤対応が含まれている。そこで前節の手法を適用後、投票処理を行う。

手順としては、まず対応点の中からランダムに3点抽出し、距離濃淡画像にアフィン変換を行う。このとき、SIFT特徴量が正しく対応していれば、アフィン変換前



(a) correct matching (b) wrong matching

図 4 アフィン変換の例

Fig. 4 An example of affine transformation.

と後の距離濃淡画像はほとんど変化しないため、カラー画像との相関係数もほとんど変化しない。図 4 にアフィン変換した画像の例を示す。そこで、アフィン変換後の距離濃淡画像とカラー画像の相関係数が、閾値以上の場合は positive に投票する。この投票を繰り返し行い、positive に投票されていない SIFT 特徴量を除去することで、誤対応を除去することができる。なお、ランダムに抽出する回数、positive 判定のための相関係数の閾値は、両画像間の変位の大小により変える。

### 4.3 誤対応に対するロバスト推定

両画像間の変位が大きい場合には、4.1 節、4.2 節で述べた手法を用いても誤対応が残ってしまう。誤対応を含んだまま線形最小二乗法を解いても、収束する解が得られない。

そこで本手法では、図 2 における「カメラパラメータの更新」処理の際に、以下の処理を行う。

- (1) 対応点をランダムに選択
- (2) 選択した対応点の数だけ、拘束式を立てる
- (3) 線形最小二乗法を適用し、パラメータの修正量を取得
- (4) 得られた解からパラメータを更新し、距離濃淡画像とカラー画像の相関係数を算出
- (5) 1~4 を適当な回数繰り返す
- (6) 相関係数が最も高いときの解を採用

上記の処理を行うことによって、誤対応が残っている場合でも収束する解が得られる。

## 5. レジストレーション実験

以上で提案した手法の有効性を実験により示す。

### 5.1 実験装置と各種設定

距離画像および距離濃淡画像の取得には、ShapeGrabber 製のレーザレンジファインダ SG-102 と走査レール PLM300 からなるシステム [21] を使用した。撮影風景を図 5 に示す。本センサは赤色 (波長 670nm) のレーザスリット光を照射するプロジェクタと CCD カメラから構成され、三角測量の原理を用いて距離値を計測すると同時に、レーザの反射光強度を濃淡値として取得する。

このとき、観測された距離濃淡画像は、センサ特性に



図 5 撮影風景

Fig. 5 Scanning scene by ShapeGrabber.



図 6 濃淡情報を持つ全方位幾何モデル

Fig. 6 Geometric model with intensity information.

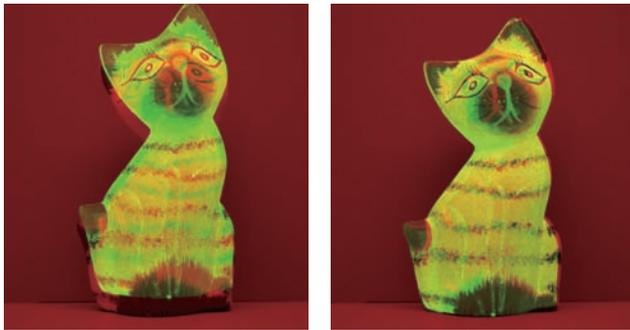
由来する以下の要因により、その輝度値に影響を受ける。

- センサと各測定点との距離
- 測定点における表面法線ベクトル方向
- センサに固有の特性

上記の影響により、生の距離濃淡画像は通常のカラー画像よりも輝度値のバラつきが大きい。そのまま使用すると誤対応を生じさせる SIFT 特徴量が抽出されてしまう。そこで本研究では、距離濃淡画像とカラー画像の類似性を高くするために、生の距離濃淡画像ではなく、Shinozaki ら [22] の手法を用いて補正した距離濃淡画像を用いている。

カラー画像の取得には Nikon 製のデジタルカメラ D70 を用い、RAW 形式で取得した。上記センサのレーザの色が赤であるので、カラー画像の R 成分を用いた。カラー画像の画素数は  $3008 \times 2000$  で、レジストレーション時には  $1504 \times 1000$  に圧縮して用いた。

パラメータの初期値は以下のように定めた。回転行列  $R$  は単位行列とした。 $t_x, t_y$  は距離画像の重心と同じ値とし、 $t_z$  は 2 つの画像のサイズがおおよそ等しくなるよう、適当に定めた。 $a_u, a_v$  は 4430 とした。この値は、 $70.0\text{mm} / (7.9\mu\text{m} \times 2)$  で求めた。 $70.0\text{mm}$  は実験で用いたデジタルカメラのズームレンズの最長の焦点距離の値、 $7.9\mu\text{m}$  は CCD の 1 ピクセルの推定寸法、また 2 は上記の画像の圧縮率である。 $s$  は 1 とした。 $u_0, v_0$  はそれぞれ 752, 500 すなわち画像の中心に設定した。



(a)Initial state

(b)After POC



(c)Final result in 2D

図7 レジストレーションの結果: cat  
Fig.7 Registration result: cat



(a)Initial state

(b)After POC



(c)Final result in 2D

図8 レジストレーションの結果: cat (right lateral)  
Fig.8 Registration result: cat (right lateral)

## 5.2 濃淡情報を持つ全方位幾何モデルの生成

モデル化する対象物体は図1の猫の置物とし、計15枚取得した。この例では、対象物の大きさは  $w59mm \times h112mm \times d32mm$  である。取得した複数枚の距離画像および補正した距離濃淡画像を統合した全方位幾何モデルを図6に示す。統合処理は InnovMETRIC 社製の PolyWorks [23] を用いて行っており、生成した幾何モデルは 183016 点の計測点から構成されている。

## 5.3 レジストレーション結果

図7にレジストレーションの結果を示す。明るい(緑)画像と暗い(赤)画像がそれぞれ距離濃淡画像とカラー画像を表している。また、得られたカメラパラメータを以下に示す。

$$R = \begin{bmatrix} 0.969 & -0.005 & -0.247 \\ 0.005 & 1.000 & -0.001 \\ 0.247 & -0.000 & 0.969 \end{bmatrix}, \mathbf{t} = \begin{bmatrix} 105.0 \\ -5.2 \\ -186.4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_u & \alpha_v & s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4168.7 & 4209.0 & 10.6 \end{bmatrix}$$

$$k = 0.4130$$

処理時間は、Core i7 (2.93GHz) を搭載した PC で、位相限定相関法が約 4 秒、レジストレーションが約 13 分であった。また、2. で示したように、両画像の相関係数を収束の判定に用い、適当な反復回数以降でこの値が減

少に転じた時に、そのステージで最高の相関係数を得たフレームでのパラメータ値を採用して次のステージに進んでいる。全ステージでの反復回数は 23 回で、両画像の相関係数は 0.7978 で収束した。図7と同一物体で、別の角度から撮影したカラー画像とのレジストレーション結果を図8、図9に示す。これらの図から様々な角度においても正確なレジストレーションを行うことができていることが分かる。

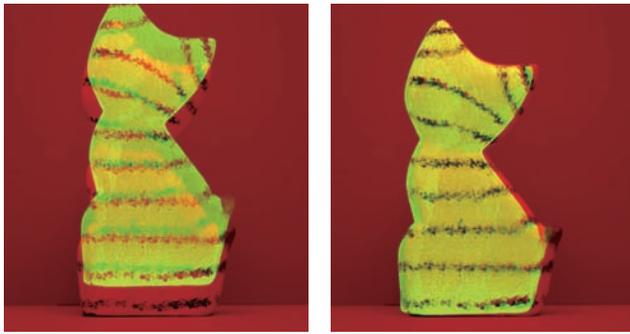
図10に他の物体の例を示す。この例では、対象物(鯉のぼりの置物)の大きさは  $w111mm \times h112mm \times d32mm$  である。距離画像および距離濃淡画像は計 31 枚取得した。それらを統合した結果を図11に示す。生成した幾何モデルは 339749 点の計測点から構成されている。図12にレジストレーションの結果を示す。また、得られたカメラパラメータを以下に示す。

$$R = \begin{bmatrix} 0.998 & -0.007 & 0.047 \\ 0.010 & 0.998 & -0.062 \\ -0.047 & 0.062 & 0.997 \end{bmatrix}, \mathbf{t} = \begin{bmatrix} -171.9 \\ 41.0 \\ -255.7 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_u & \alpha_v & s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4440.1 & 4453.1 & 8.5 \end{bmatrix}$$

$$k = 0.0000$$

処理時間は、位相限定相関法が約 4 秒、レジストレーションが約 9 分であった。また、全ステージでの反復回



(a)Initial state (b)After POC



(c)Final result in 2D

図 9 レジストレーションの結果: cat (back lateral)  
Fig.9 Registration result: cat (back lateral)

数は 18 回で、両画像の相関係数は 0.7608 で収束した。続いて、図 7 ~ 図 9 に、側面 1 枚、上面 1 枚を加えた、計 5 枚のカラー画像のマッピングを行った。マッピングした結果を図 13 に示す。図 13 より、正確なレジストレーションができていることが分かる。

## 6. おわりに

本論文では、SIFT と距離濃淡画像を利用した 2D と 3D のレジストレーション手法を提案した。2D と 3D のレジストレーションに必要なカメラの外部、内部パラメータ、歪曲収差のパラメータの修正量に関する線形拘束式を導出した。この拘束式は、カメラの内部パラメータも同時に得られることから、内部パラメータが未知のカメラで撮像されたカラー画像もレジストレーションに利用可能である。また、レンズの歪曲収差のパラメータも同時に算出可能であることから、より正確なレジストレーションを実現することができる。

今後の課題として、次元圧縮を行うことで特徴量を記述する PCA-SIFT [24] を用いることで対応点マッチングの高速化を図ることが考えられる。また、収束性、精度などに関する更なる定量的な評価が必要であると考えられる。

## 文 献

[1] M. Levoy, K. Pulli, B. Curless, S. Rusinkiewicz,



(a)Range intensity image (b)Color image

図 10 距離濃淡画像とカラー画像

Fig. 10 Range intensity image and color image.

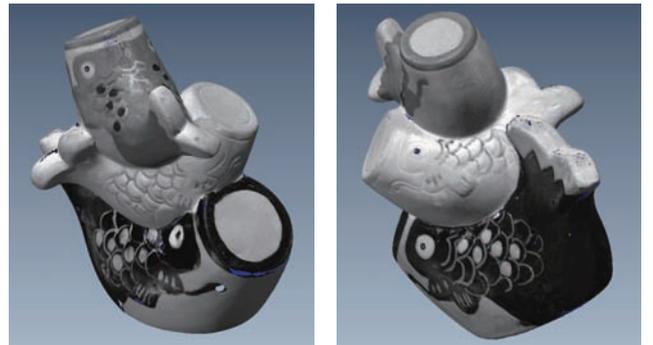


図 11 濃淡情報を持つ全方位幾何モデル

Fig. 11 Geometric model with inetensity information.



(a)Initial state (b)After POC



(c)Final result in 2D

図 12 レジストレーションの結果: flying carp  
Fig. 12 Registration result: flying carp

D. Koller, L. Pereira, M. Ginzton, S. Anderson, J. davis, J. Ginsberg, J. Shade and D. Fulk, "The digital Michelangelo project:3D scanning of large statues," SIGGRAPH2000, pp.131-144, 2000.

[2] 池内 克史, 倉爪 亮, 西野 恒, 佐川 立昌, 大石 岳史, 高瀬 裕, "The great buddha project 一大規模



図 13 色情報を持つ三次元モデル: cat  
Fig.13 3D model with color information.

- 文化遺産のデジタルコンテンツ化-”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.7, no.1, pp.103-113, 2002.
- [3] K. Yoshida and H. Saito, “Registration of Range Image Using Texture of High-Resolution Color Images,” IAPR Workshop on Machine Vision Applications (MVA02), pp.150-153, 2002.
- [4] P. Viola and W.M. Well, “Alignment by maximization of mutual information,” Int. J. Comput. Vis., vol.24, no.2, pp.137-154, 1997.
- [5] I. Stamos and P.K. Allen, “Integration of range and image sensing for photorealistic 3D modeling,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1435-1440, 2000.
- [6] H.P.A. Lensch, W. Heidrich and H.P. Seidel, “Automated texture registration and stitching for real world models,” Proc. Pacific Graphics 2000, pp.317-326, 2000.
- [7] Y. Iwakiri and T. Kaneko, “Pc-based realtime texture painting on real world objects,” Proc. Eurographics 2001, vol.20, pp.105-113, 2001.
- [8] S. Lavallee and R. Szeliski, “Recovering the position and orientation of free -form objects from image contours using 3D distance maps,” IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.17, no.4, pp.378-390, 1995.
- [9] P.J. Neugebauer and K. Klein, “Texturing 3D models of real world objects from multiple unregistered photographic views,” Proc. Eurographics’99, pp.245-256, 1999.
- [10] F. Boughorbel, D. Page, C. Dumont and M.A. Abidi, “Registration and integration of multi-sensor data for photo-realistic scene reconstruction,” Proc. Applied Imagery Pattern Recognition, pp.74-84, 1999.
- [11] 梅田 和昇, G. Godin, M. Rioux, “こう配拘束と距離濃淡画像を用いた距離画像とカラー画像のレジストレーション”, 信学論 (D-II), vol.J88-D-II, no.8, pp.1469-1479, 2005.
- [12] R. Kurazume, K. Nishino, Z. Zhang and K. Ikeuchi, “Simultaneous 2D images and 3D geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute,” Proc. Fifth ACCV, pp.99-106, 2002.
- [13] 倉爪 亮, 西野 恒, M.D. Wheeler, 池内克史, “リフレクタンスエッジと濃淡エッジを用いたテクスチャのライメント”, 信学論 (D-II), vol.J85-D-II, no.6, pp.1038-1046, 2002.
- [14] M.D. Elstrom and P.W. Smith, “Stereo-based registration of multi-sensor imagery for enhanced visualization of remote environments,” In Proc. of the 1999 Int. Conf. on Robotics Automation, pp.1948-1953, 1999.
- [15] J. Bohm and S. Becker, “Automatic Marker-Free Registration of Terrestrial Laser Scans using Reflectance Features,” In 8th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, 2007.
- [16] D. G. Lowe, “Distinctive image features from scale-invariant keypoints,” Int. J. Comput. Vis., vol.60, no.2, pp.91-110, 2004.
- [17] 藤吉弘巨, “Gradient ベースの特徴抽出-SIFT と HOG-”, 情報処理学会研究報告 CVIM 160, pp.211-224, 2007.
- [18] 佐藤 淳, コンピュータビジョン-視界の幾何学, コロナ社, 1999.
- [19] M.A. Fischler and R.C. Bolles, “Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography,” Communications of the ACM, vol.16, no.24, pp.381-395, 1981.
- [20] 青木孝文, 伊藤康一, 柴原琢磨, 長嶋聖, “位相限定相関法に基づく高精度マシンビジョン-ピクセル分解能の壁を超える画像センシング技術を目指して-”, IEICE Fundamentals Review, vol.1, no.1, pp.30-40, 2007.
- [21] ShapeGrabber: “<http://www.shapegrabber.com>”.
- [22] M. Shinozaki, M. Kusanagi, K. Umeda, G. Godin and M. Rioux, “Correction of color information of a 3D model using a range intensity image,” Comput. Vis. and Image Understanding, vol.113, no.11, pp.1170-1179, 2009.
- [23] PolyWorks: “<http://www.innovmetric.com>”
- [24] Y. Ke and R. Sukthankar, “PCA-SIFT: A text retrieval approach to object matching in videos,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Comput. Vis. (ICCV), vol.2, pp.1470-1477, 2003.