

# 柔軟な誤対応除去と距離濃淡画像を用いた 高精度な 2D/3D レジストレーション手法

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

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

あらまし 現実感の高いモデルを生成するには、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が、3次元幾何モデルとカラー画像のレジストレーションが必要となる。本論文では、柔軟な誤対応除去と距離濃淡画像を利用した 2D/3D レジストレーション手法を提案する。柔軟な誤対応除去とは、性能の低い誤対応除去手法を複数用いることで、正しい対応点をなるべく残しつつ誤対応を除去する手法である。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、2D/3D 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解くことで、3次元幾何モデルとカラー画像のレジストレーションを行う。実物体を用いたモデリング実験により、提案手法の有用性を示す。

キーワード 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, GrabCut

## 1. はじめに

近年、情報技術の進歩に伴い、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 3次元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実現するには、レンジセンサとカラーセンサの各視点間の相対位置・姿勢を推定する必要がある。

この問題に対し、特別な光学系を有するレンジセンサを使用してレーザとカメラの視点を一致させる方法や、キャリブレーションによりレンジセンサとカラーセンサの相対位置・姿勢を求める方法がある。しかし、これらの方法では、計測時にレンジセンサとカラーセンサの相対位置関係が既知である必要があるため、任意の位置で取得したカメラ画像などをテクスチャマッピングする場合には用いることができない。そこで、カメラ画像と 3次元幾何モデルを直接比較して、レンジセンサとカラーセンサの相対位置・姿勢を推定する手法が望まれる。

本論文では、猪股ら [3] によって提案された SIFT と距離濃淡画像を用いた手法を拡張し、より高精度な 2D/3D レジストレーションを行う手法を提案する。特に、視点変化が大きい場合や鏡面反射が強いモデルにおいても、高精度なレジストレーションを行うために、柔軟な誤

対応除去を提案する。これは、性能の低い誤対応除去手法を複数用いることで、正しい対応点をなるべく残しつつ誤対応を除去する手法である。また、誤対応を低減する前処理として、GrabCut を用いる。本手法では、まず GrabCut を用いてカラー画像中の背景領域を除去した後、SIFT 特徴量を抽出して両画像の対応点付けを行う。次に、柔軟な誤対応を除去を行い、2D/3D レジストレーションのための拘束式を解く。そして、得られる修正量を用いてカメラパラメータと歪曲収差のパラメータを更新する。なお、距離濃淡画像に SIFT 特徴量を抽出する際には、濃淡情報のみに適用し、距離情報は使用しない。

本手法の構成は以下の通りである。第 2 章では関連するレジストレーション手法について述べ、第 3 章で提案手法の概要、第 4 章で誤対応を低減するための前処理、第 5 章で柔軟な誤対応除去を示す。また、第 6 章で提案手法を用いたレジストレーション実験を示し、第 7 章で結論と今後の展望を示す。

## 2. 関連研究

1つのアプローチとして、距離画像から得られる 3次元エッジとカメラ画像から得られる 2次元エッジを直接比較する手法が提案されている [4]~[6]。これらの手法では、まず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。しかし、自由曲面を多く含む場合、3次元幾何モデルとテクスチャ画像間で正確なエッジの対応を求めることが困難である可能性がある。

また、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 [7]~[10]。Lensch ら [7] は、まず 3



(a) 距離濃淡画像 (b) カラー画像

図 1 同一物体の距離濃淡画像とカラー画像

次元物体の 2 次元投影シルエットと撮影画像のシルエット同士の排他的論理和をとることで類似度を評価する。次に Downhill Simplex 法を利用して、2 次元画像と幾何モデルの位置合わせ誤差を収束させている。Neugebauer ら [10] は、3 次元モデルと 2 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、3 次元形状の 2 次元投影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。

テクスチャ画像を 3 次元幾何モデルに逆投影して位置合わせを行う手法も提案されている。桜島ら [11] は、テクスチャ画像から抽出した稜線と平面領域を幾何モデルへ逆投影している。野田ら [12] は、2 次元画像内の小さな平面領域に対して 3 次元幾何モデルを構成する点の分布を評価し、両者の平面の共起性を最大化するように位置合わせを行っている。しかし、これらの手法は、計測対象に十分多数の平面領域が含まれる場合に限定される。

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を用いる手法も提案されている。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、リフレクタンス画像とも呼ばれる。図 1 に同一物体の距離濃淡画像とカラー画像を示す。距離濃淡画像は、通常の 2 次元画像に近い特性をもつと考えられるため、2D/3D レジストレーションに有効であると考えられる。Boughorbel ら [13] 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 [14] 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、特徴量を用いてレジストレーションを実現している。Kurazume ら [15] はエッジを、Elstrom ら [16] はコーナーを用いている。Bohm ら [17] は、画像の拡大縮小、回転、オクルージョン、照明変化に対してロバストな SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) [18] を利用している。

これに対して猪股ら [3] は、まず位相限定相関法 (POC) を用いて初期位置合わせを行った後、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う。次に、投票処理により誤対応の除去を行い、2D/3D 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。しかし、この手法は、POC を用いているため、視点変化が小さい時に限定されている。また、処理時間が長いことも欠点である。

本論文では、猪股ら [3] によって提案された SIFT と距離濃淡画像を用いた手法を拡張し、視点変化が大きい場合においても、より高精度な 2D/3D レジストレーションを行う手法を提案する。視点変化が大きい場合、距離濃淡画像とカラー画像の対応点マッチングがうまくいかず、誤対応が残ってしまうことが精度が低くなる原因である。そこで、GrabCut [19] を用いて、カラー画像中の背景領域を除去し、距離濃淡画像と同じく、背景領域が無い画像から特徴量を抽出することで、誤対応を低減する。また、正しい対応点をなるべく残しつつ誤対応を除去するために、柔軟な誤対応除去を提案する。これは、性能の低い誤対応除去を複数用いる手法である。柔軟な誤対応除去では、まず SIFT 特徴量のスケール情報を用いる。次に、Bhattacharyya 距離より算出した対応点間のマッチング信頼度を定義し、最後に、閾値を緩くして RANSAC [20] を適用する。そして、猪股ら [3] によって提案された 2D/3D レジストレーションのための拘束式を解き、得られる修正量を用いてカメラパラメータと歪曲収差のパラメータを更新する。なお、距離濃淡画像から SIFT 特徴量を抽出する際には、濃淡情報のみに適用し、距離情報は使用しない。

### 3. レジストレーション手法の概要

距離濃淡画像を持つ 3 次元幾何モデルとカラー画像が与えられているとする。3 次元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、3 次元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 (以下、2 つのパラメータをカメラパラメータとして扱う)。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。レジストレーション処理の流れを図 2 に示す。まずカメラパラメータと歪曲収差の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、両画像の対応点マッチングを行う。次に、猪股ら [3] によって提案された 2D/3D レジストレーションのための拘束式を解く。そし

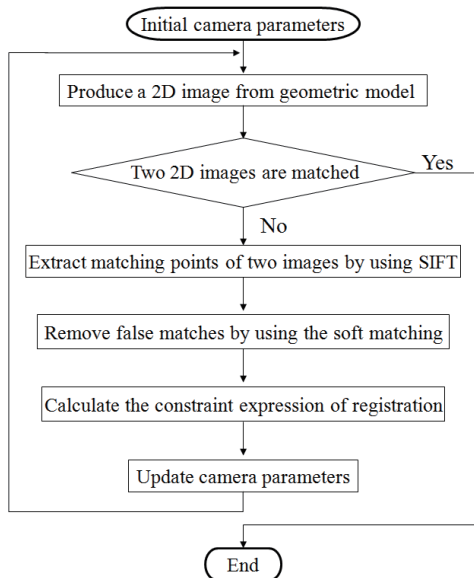


図2 2D/3D レジストレーション手法の流れ

て、得られる修正量を用いてカメラパラメータと歪曲収差の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。

なお、カメラパラメータと歪曲収差のパラメータを修正する際には、ステージ1~3で段階的に更新する。ステージ1では外部パラメータのみ更新する。ステージ2では、外部パラメータと内部パラメータ（アスペクト比  $a_u, a_v$ , スキュー  $s$ , 画像中心  $u_0, v_0$ ）を更新する。ステージ3では、外部パラメータと内部パラメータと歪曲収差のパラメータを更新する。

### 3.1 SIFT 特徴量計算回数の削減

従来手法 [3] では、処理時間が遅いことが欠点であった。その問題点の一つに、SIFT 特徴量の計算時間が重いことが挙げられる。そこで、処理時間を短縮するために、SIFT 特徴量の計算回数を削減する。

まず、投影した距離濃淡画像とカラー画像の対応点マッチングを行う。この時、投影した距離濃淡画像は、距離画像が持つ 3D 座標に対して適用されるため、対応点マッチング後の距離濃淡画像中の座標から、3D 情報を取得することができる。よって、3 次元幾何モデルの 3D 座標と、それに対応するカラー画像の 2D 座標を得ることができる。これを利用することによって、2 回目以降の更新時は、SIFT を計算しなくても、2D/3D レジストレーションのための拘束式を解くことが可能となる。

なお、本研究では、精度を向上させるために、SIFT 特徴量を計 3 回（ステージ 1 で 2 回、ステージ 2 で 1 回）計算している。



(a) 元画像 (b) セグメンテーション後の画像

図3 GrabCut の例

## 4. 誤対応低減のための前処理

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、以下の要因により、誤対応が多数生じてしまう。

- 距離濃淡画像の境界部分の背景が無いこと
- 距離濃淡画像の S/N 比が悪いこと

そこで本研究では、SIFT 特徴量を抽出する前に、誤対応を生じさせる SIFT 特徴量を低減させる処理を行う。

### 4.1 Grabcut を用いたカラー画像中の背景領域の除去

距離濃淡画像を投影して SIFT を計算する場合、境界部分で背景が無いことにより、誤対応の原因となる特徴量が多く抽出されてしまう問題がある。そこで、SIFT を計算する前に、距離濃淡画像と同じく、対応点マッチングを行うカラー画像中の背景領域を除去し、前景領域のみ抽出する。両画像とも背景領域が無い状態に揃えてから SIFT 特徴量を抽出することで、誤対応を低減する。この背景領域を除去するために、Rother ら [19] により提案された GrabCut を使用する。GrabCut は、対象を矩形領域で指定し、そこから、物体と背景の色分布を GMM (Gaussian Mixture Model) にモデル化し、Graph Cuts によりセグメンテーションを行う。得られたセグメンテーション結果から、色分布を再学習することで、高精度なセグメンテーションを実現している。図 3 (a) に GrabCut を適用した結果を図 3 (b) に示す。図 3 (b) のような背景領域を除去したカラー画像と、距離濃淡画像の対応点マッチングを行うことで、誤対応を低減する。

### 4.2 距離濃淡画像の輝度補正

観測された距離濃淡画像は、センサ特性に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、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いため、そのまま使用すると誤対応を生じさせる SIFT 特徴量が多く抽出されてし

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，Shinozaki ら [21] の手法を用いて輝度補正を行った距離濃淡画像を用いている．

## 5. 誤対応除去

前章の手法を適用しても，距離濃淡画像とカラー画像の対応付けには，誤対応は発生する．この問題に対して，単純なロバスト推定，例えば，RANSAC のみ適用する場合には，誤対応を除去すると同時に，正しい対応点も多く削除してしまう．そこで，正しい対応点をなるべく残しつつ誤対応を除去するために，柔軟な誤対応除去を提案する．これは，性能の低い誤対応除去手法を複数用いることで，単純なロバスト推定を用いるよりも正しい対応点を除去しない手法である．本手法では，3つの誤対応除去を行う．まず，SIFT 特徴量のスケール情報を用いる．次に，Bhattacharyya 距離を用いて定義した対応点間のマッチング信頼度を用いる．最後に，閾値を緩くして RANSAC を適用する．また，それぞれの誤対応除去手法は処理が軽いため，処理時間は速い．

### 5.1 SIFT 特徴量のスケール情報

まず，SIFT 特徴量のスケール情報を用いて，誤対応を除去する．両画像の特徴量が正しく対応付けされれば，SIFT 特徴量のスケールの差は小さいと考えられる．そこで，以下の閾値処理により誤対応除去を行う．

$$\begin{cases} \text{Correct} : \text{if } |s| > \mu_s - k_s * \sigma_s \\ \text{False} : \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

$s$  は対応点間のスケールの差， $\mu_s$  は  $s$  の平均値， $\sigma_s$  は標準偏差である．なお， $k_s$  は実験的に 0.8 を用いた．

### 5.2 Bhattacharyya 距離を用いたマッチング信頼度

正しく対応付けされていれば，両特徴点の周辺領域の濃淡情報は類似していると考えられる．そこで，式 (2) の Bhattacharyya 距離を利用して，濃淡情報の類似度を定義する．

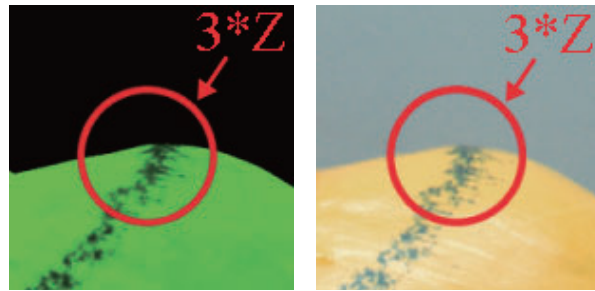
$$S = \sum_{u=1}^m \sqrt{p_u q_u} \quad (2)$$

$m$  はビン数， $p_u, q_u$  は 2 つの正規化色特徴ヒストグラムをそれぞれ  $p, q$  とした時の各ビンである．類似度  $S$  は 0 から 1 の値で算出される．

本研究では，類似度  $S$  を用いて対応点間のマッチング信頼度を定義する．マッチング信頼度は式 (3) の  $P$  で定義し，類似度  $S$  が高いほどマッチング信頼度が高くなるようにする．

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(1-S)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

上式は平均 0，分散  $\sigma^2$  の正規分布である．なお， $\sigma$  は



(a) 距離濃淡画像 (b) カラー画像

図 4 類似度の算出範囲 ( $z$  は SIFT のスケール情報)

の標準偏差を使用する．

このとき，類似度  $S$  を算出する範囲の決定方法が重要となる．算出範囲が広すぎると全対応点のマッチング信頼度が高くなってしまい，逆に狭すぎると低くなってしまふ．そこで，SIFT 特徴量のスケール情報  $z$  を利用する．前節でスケールの差が大きい対応点は除去しているので，両特徴点の算出範囲に差異はほとんどない．SIFT キーポイントを中心として， $(3.0 * z)$  の範囲で類似度  $S$  を算出する (図 4)．また， $(3.0 * z)$  は SIFT 特徴量を記述する領域に設定している．

誤対応除去の手順としては，まず，式 (2) より類似度  $S$  を求める．次に，式 (3) より対応点間のマッチング信頼度  $P$  を算出する．そして，以下の閾値処理により誤対応を除去する．

$$\begin{cases} \text{Correct} : \text{if } P < \mu_P - k_p * \sigma_P \\ \text{False} : \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

$\mu_P$  はマッチング信頼度  $P$  の平均値， $\sigma_P$  は標準偏差である．なお， $k_p$  は実験的に 1.0 を用いた．

以上の誤対応除去を行った後，RANSAC を適用することで，正しい対応点をなるべく残しつつ，誤対応を除去する．

## 6. レジストレーション実験

本章では，まず視点間の変化量が大きい時のレジストレーション結果と，視点間の変化量に応じたレジストレーション精度の変化を示す．また，物体内部にテクスチャが少ない場合や，鏡面反射が強く形状が複雑なモデルの場合におけるレジストレーション結果を示す．次に，提案手法と従来手法 1 [3] 及び従来手法 2 [14] を同一物体で実験した時の結果を示し，提案手法の有用性や特徴を示す．最後に，複数枚のテクスチャマッピングを行い，色情報を持つ三次元モデルを生成した結果を示す．

### 6.1 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 と走査レーザ PLM300 からなるシステム [22] 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

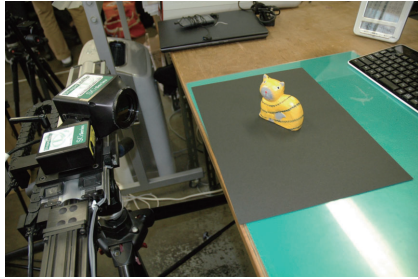


図 5 撮影風景

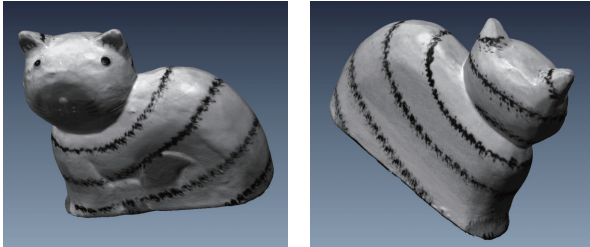


図 6 幾何モデル (猫の置物)



(a) 初期投影時 (b) 収束後

図 7 レジストレーション結果 (猫の置物)

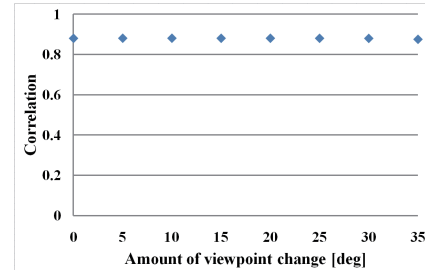


図 8 視点変化に応じた精度の変化

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、距離濃淡画像とカラー画像の類似性を高くするために、Shinozaki ら [21] の手法を用いて輝度補正を行った距離濃淡画像を用いている。また、Intel 社製 Core i7 (2.93GHz) を搭載した PC, NVIDIA 社製 GeForce GTX260 の GPU を使用した。

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、外部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。

内部パラメータの初期値は以下のように定めた。 $a_u, a_v$  は 8861 とした。この値は、 $70.0mm/7.9\mu m$  で求めた。 $70.0mm$  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、 $7.9\mu m$  は CCD の 1 ピクセルの推定寸法である。 $u_0, v_0$  はそれぞれ 1504, 1000 すなわち画像の中心に設定した。スキュー  $s$ , 歪曲収差  $k$  とともに 0 とした。

## 6.2 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、距離画像および距離濃淡画像は、それぞれ 18 枚取得した。この例では、対象物の大きさは  $w89mm \times h86mm \times d29mm$  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 237642 点の計測

点から構成されている。

## 6.3 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と歪曲収差のパラメータを以下に示す。

$$R = \begin{bmatrix} 0.8648 & 0.0426 & -0.500 \\ -0.047 & 0.9989 & 0.029 \\ 0.500 & 0.0213 & 0.866 \end{bmatrix}, t = \begin{bmatrix} 72.7 \\ 28.0 \\ 8.3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_u & \alpha_v & s \\ u_0 & v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6189.0 & 6211.4 & -6.69 \\ 572.5 & 1174.4 \end{bmatrix}, k = 0.1406$$

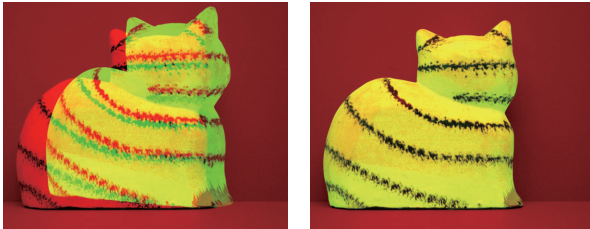
処理時間は約 30.0 秒であった。また、3. で示したように、両画像の相関係数を収束の判定に用い、適当な反復回数以降でこの値が減少に転じた時に、そのステージで最高の相関係数を得たフレームでのパラメータ値を採用して次のステージに進んでいる。全ステージでの反復回数は 13 回で、両画像の相関係数は 0.8755 で収束した。次に、視点間の変化量に応じたレジストレーション精度の変化の結果を図 8 に示す。図 8 より、収束させることができる変化量までにおいては、ほとんど精度に差異はないことが分かる。この結果より、初期投影時の対応点マッチングが成功すれば、ほとんど精度に差異はない手法であるといえる。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 9 ~ 図 11 に示す。これらの結果から、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。この時の両画像の相関係数は、それぞれ 0.8455, 0.8983, 0.4461 で収束した。また、図 11 の相関係数が低いのは、物体内部にテクスチャが少ないからだと考えられる。

図 12 に他の物体の例を示す。この例では、対象物 (光沢感のある鶴の置物) の大きさは  $w44mm \times h175mm \times$



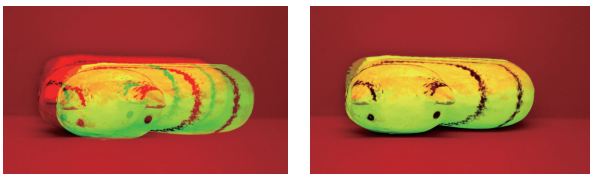
(a) 初期投影時 (b) 収束後

図 9 レジストレーション結果: 猫の置物 (左側面)



(a) 初期投影時 (b) 収束後

図 10 レジストレーション結果: 猫の置物 (背面)



(a) 初期投影時 (b) 収束後

図 11 レジストレーション結果: 猫の置物 (上面)

$d64mm$  である．距離画像および距離濃淡画像は，それぞれ 87 枚取得した．それらを統合した結果を図 13 に示す．生成した幾何モデルは 409057 点の計測点から構成されている図 14 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と歪曲収差のパラメータを以下に示す．

$$R = \begin{bmatrix} 0.990 & 0.032 & -0.137 \\ -0.021 & 0.996 & 0.083 \\ 0.139 & -0.079 & 0.987 \end{bmatrix}, t = \begin{bmatrix} -12.8 \\ -10.6 \\ -627.6 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_u & \alpha_v & s \\ u_0 & v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9479.2 & 9470.6 & -76.7 \\ 1408.1 & 1295.8 \end{bmatrix}, k = 0.000$$

処理時間は約 24.5 秒であった．また，全ステージでの反復回数は 11 回で，両画像の相関係数は 0.7737 で収束した．この結果から，鏡面反射が強く，形状が複雑なモデルにおいても，本手法が適用できることが分かる．

#### 6.4 他手法との比較

対象物体が図 1 の猫の置物とした時の，提案手法，従来手法 1 [3] 及び従来手法 2 [14] のレジストレーション結果を図 15 に示す．また，それぞれのレジストレーション結果 (精度及び処理時間) を表 1 に示す．なお，図 7 とは異なり，視点変化が小さい時の実験結果である．これは，視点変化が小さい時にしか，従来手法 1 [3] が適用できないためである．図 15，表 1 より，従来手法 1 [3] 及び従来手法 2 [14] よりも，精度，処理時間ともに提案手法の



(a) 距離濃淡画像 (b) カラー画像

図 12 同一物体の距離濃淡画像とカラー画像 (光沢感のある鶴の置物)

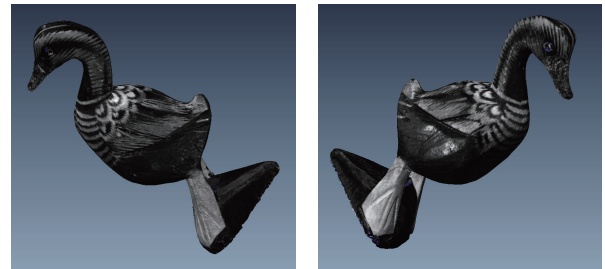
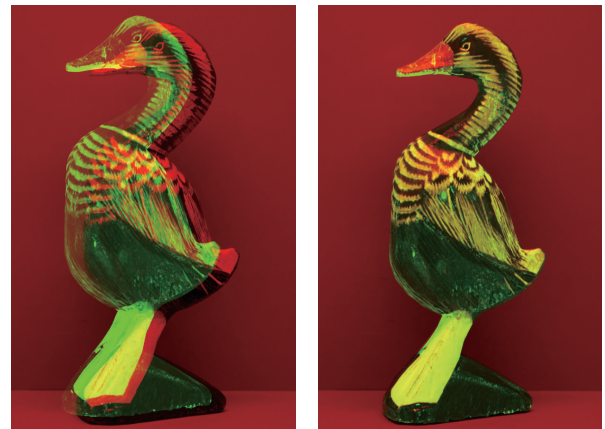


図 13 幾何モデル (光沢感のある鶴の置物)



(a) 初期投影時 (b) 収束後

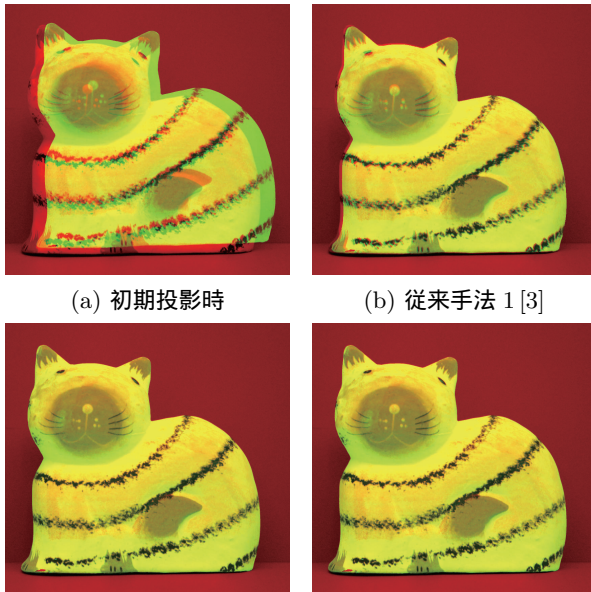
図 14 レジストレーション結果 (光沢感のある鶴の置物)

方が良いことが分かる．

次に，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 16 に示す．また，それぞれのレジストレーション結果 (精度及び処理時間) を表 2 に示す．図 16，表 2 より，提案手法よりも従来手法 2 [14] の方が精度が良くなった．これは，特徴が少ないモデルにおいては，対応付けの時点で正しい対応点が少ないため，柔軟な誤対応除去の効果が小さくなってしまふからだと考えられる．

#### 6.5 3D モデル生成結果

対象物体を図 1 の猫の置物とし，異なる視点から撮影した計 5 枚 (側面 4 枚，上面 1 枚) のカラー画像のマッピングを行った．その結果を図 17 に示す．この時のマッピングは，図 7，図 9～図 11 に示した，レジストレーション結果を使用している．また，対象物体を図 12 の



(a) 初期投影時 (b) 従来手法 1 [3]  
(c) 従来手法 2 [14] (d) 提案手法

図 15 他手法との比較: 猫の置物 (正面)

表 1 他手法との比較 (精度及び処理時間): 猫の置物 (正面)

	精度 (相関係数)	処理時間 [s]
従来手法 1 [3]	0.8123	940
従来手法 2 [14]	0.8084	183
提案手法	0.8807	29

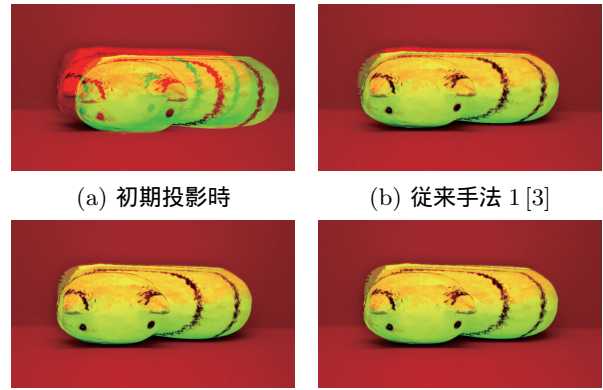
光沢感のある鶴の置物とし、異なる視点から撮影した計 5 枚 (側面 4 枚, 上面 1 枚) のカラー画像のマッピングを行った。その結果を図 18 に示す。図 17, 図 18 より、正確なレジストレーションができていていることが分かる。

## 7. おわりに

本論文では、柔軟な誤対応除去と距離濃淡画像を利用した 2D/3D レジストレーション手法を提案した。本手法では、より正確なレジストレーションを行うために、GrabCut を用いることで、誤対応を低減した。また、対応点間の Bhattacharyya 距離より算出したマッチング信頼度を含む柔軟な誤対応除去を提案した。これにより、正しい対応点をなるべく残しつつ誤対応を除去した。以上の処理により、従来手法よりも正確なレジストレーションを実現することができた。今後の課題として、特徴が少ないモデルの場合でも高精度なレジストレーションを実現するために、対応付けの改善が必要であると考えている。

## 文 献

[1] M. Levoy, K. Pulli, B. Curless, S. Rusinkiewicz, 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 -大規模文化遺産のデジタルコンテンツ化-", 日本バーチャルリ



(a) 初期投影時 (b) 従来手法 1 [3]  
(c) 従来手法 2 [14] (d) 提案手法

図 16 他手法との比較: 猫の置物 (上面)

表 2 他手法との比較 (精度及び処理時間): 猫の置物 (上面)

	精度 (相関係数)	処理時間 [s]
従来手法 1 [3]	0.4052	429
従来手法 2 [14]	0.6375	157
提案手法	0.4466	21

リティ学会論文誌, vol.7, no.1, pp.103-113, 2002.  
[3] 猪股 亮, 寺林 賢司, 梅田 和昇, ギー ゴダン, "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", 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2010), pp.1063-1070, 2010.  
[4] 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.  
[5] I. Stamos and P.K. Allen, "Automatic registration of 2D with 3D imagery in urban environments," Proc. of the Int. Conf. on Comput. Vis., pp.731-737, 2001.  
[6] L. Liu and I. Stamos, "Automatic 3D to 2D Registration for the Photorealistic Rendering of Urban Scenes," IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, vol.2, pp.137-143, 2005  
[7] 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.  
[8] Y. Iwakiri and T. Kaneko, "Pc-based realtime texture painting on real world objects," Proc. Eurographics 2001, vol.20, pp.105-113, 2001.  
[9] S. Lavalley 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.  
[10] 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.  
[11] 椋島 祐樹, 原 健二, 倉爪 亮, 岩下 友美, 諸岡 健一, 内田 誠一, 長谷川 勉, "逆投影と幾何拘束を用いた 2D/3D 位置合わせ", 信学論 (D-II), vol.J91-D-I I, no.5, pp.1380-1392, 2008.  
[12] 野田 祐介, 倉爪 亮, 岩下 友美, 長谷川 勉, "カラー画像の分割領域を用いた 2D/3D レジストレーション", 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2010), pp.832-839, 2010.  
[13] F. Boughorbel, D. Page, C. Dumont and M.A. Abidi, "Registration and integration of multi-sensor data for



図 17 テクスチャマッピング結果 (猫の置物)



図 18 テクスチャマッピング結果 (光沢感のある鶴の置物)

photo-realistic scene reconstruction,” Proc. Applied Imagery Pattern Recognition, pp.74-84, 1999.

- [14] 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.
- [15] R. Kurazume, K. Nishino, Z. Zhang and K. Ikeuchi, “Simutaneous 2D images and 3D geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute,” Proc. Fifth ACCV, pp.99-106, 2002.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] D. G. Lowe, “Distinctive image features from scale-invariant keypoints,” Int. J. Comput. Vis., vol.60, no.2, pp.91-110, 2004.
- [19] C. Rother, V. Kolmogorov and A. Blake, “Grab-Cut”: interactive foreground extraction using iterated graph cuts,” ACM Trans. Graphics. (SIGGRAPH’04), vol.23, no.3, pp.309-314, 2004.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] ShapeGrabber: “<http://www.shapegrabber.com>”.
- [23] PolyWorks: “<http://www.innovmetric.com>”.