SIFT と距離濃淡画像を用いた柔軟な誤対応除去による 幾何モデルとカラー画像の高精度なレジストレーション

猪股 亮^{†a)} 寺林 賢司^{††} 梅田 和昇^{††b)} ギー ゴダン^{†††}

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

Ryo INOMATA†a), Kenji TERABAYASHI††, Kazunori UMEDA††b), and Guy GODIN†††

あらまし 現実感の高いモデルの生成には、三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。しかし、正確なテクスチャマッピングを行うには、三次元幾何モデルとカラー画像の正確なレジストレーション(位置合せ)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/3D 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/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導出している。更に、視点変化が大きい場合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組み合わせることで、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、三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っている。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している。

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. まえがき

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一つとして,レンジセンサ等により測定された実物体の三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三次元幾何モデルとカラー画像は、レンジファインダとディ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、三次元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。

2D/3D レジストレーションの一つのアプローチとして、距離画像から得られる三次元エッジとカメラ画像から得られる二次元エッジを直接比較する手法が提案されている $[4]\sim[6]$. 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せを行っている。しかし、自由曲面を多く含む場合、三次元幾何

- †中央大学大学院理工学研究科精密工学専攻,東京都 Course of Precision Engineering, Graduate School of Sci
 - ence and Engineering, Chuo University, 1–13–27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo, 112–8551 Japan
- †† 中央大学理工学部精密機械工学科,東京都
 - Department of Precision Mechanics, Faculty of Science and Engineering, Chuo University, 1–13–27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo, 112–8551 Japan
- ††† カナダ国立研究所視覚情報技術グループ,カナダ
 - Visual Information Technology Group, National Research Council, 1200 Montreal Road, Ottawa, Ontario K1A 0R6, Canada
- a) E-mail: inomata@sensor.mech.chuo-u.ac.jp
- b) E-mail: umeda@mech.chuo-u.ac.jp





(a) Range intensity image

(b) Color image

図 1 同一物体の距離濃淡画像とカラー画像 Fig. 1 Range intensity image and color image.

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せ手法も提案されている $[7]\sim[10]$. Lensch [7] は、まず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排他的論理和をとることで類似度を評価し、次に Downhill Simplex 法を利用して、二次元画像と幾何モデルの位置合せ誤差を収束させている. Neugebauer [5] 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.

テクスチャ画像を三次元幾何モデルに逆投影して位置合せを行う手法も提案されている. 椛島ら [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、二次元画像内の小さな平面領域に対して三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(リフレクタンス画像とも呼ばれる)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、カラー画像に近い特性をもつため、2D/3Dレジストレーションに有効であると考えられる。以下の

研究では,距離濃淡画像と二次元画像との類似性を利用している.Boughorbel ら [13] は, χ^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,距離濃淡画像と二次元画像のこう配拘束を利用した,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.

他に距離濃淡画像と特徴量を用いてレジストレーションを実現している研究もある。Kurazume ら [15] 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せする手法を提案している。また Elstrom ら [16] は,まず距離濃淡画像とカラー画像からそれぞれコーナーを抽出し,コーナー点近傍の相関係数を計算すること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を求め,それと距離画像から得られる奥行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 [17] は、マッチングを行う特徴量の抽出に SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) [18] を利用している。SIFT 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、SIFT を用いて距離濃淡画像とカラー画像の対応付け後、得られる対応関係から剛体変形を計算し、位置合せを行っている。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ため、内部パラメータを別に求める必要がある。

本研究[19] では、SIFT を利用して、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推定することで, より 正確なレジストレーションを行う. また, 距離濃淡画 像とカラー画像の対応点マッチングにおいて、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 去手法を複数組み合わせることで, 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. 更に、 誤対応を低減する前処理として, GrabCut を用いる. これらの処理を行うことにより、視点変化が大きい場 合においても高精度なレジストレーションを行う. 提 案手法では、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。

本手法の構成は以下のとおりである. 2. で提案手法の概要を述べ, 3. で 2D/3D レジストレーションのための拘束式を導出する. また, 4. で誤対応を低減するための前処理, 5. で柔軟な誤対応除去を示す. そして, 6. で提案手法を用いたレジストレーション実験を示し, 7. で結論と今後の展望を示す.

2. レジストレーション手法の概要

距離濃淡画像・距離画像をもつ三次元幾何モデルとカラー画像が与えられているとする。三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、三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よい。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、二つのパラメータを合わせて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初期値を与

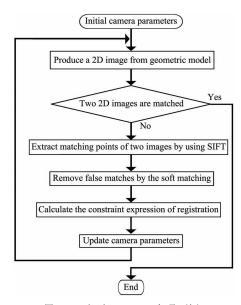


図 2 レジストレーション処理の流れ Fig. 2 Flow of registration.

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,距離画像がもつ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と歪曲収差を修正する.

このときの両画像の一致度の評価には、相関係数と 投影誤差を用いる。相関係数を算出する際、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。また 本論文では、投影誤差を、距離濃淡画像をカラー画像 平面に投影した際の両画像のシルエットが重複してい ない画素数と定義する。投影誤差を算出するための、 カラー画像のシルエットは、マニュアルで事前に作成 する。距離濃淡画像のシルエットは、距離画像がもつ 3D 座標を用いて、パラメータ更新前に生成する。

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)、式 (2) が成り立つ.

$$u = \frac{\alpha_u X + sY}{Z} + u_0 \tag{1}$$

$$v = \frac{\alpha_v Y}{Z} + v_0 \tag{2}$$

 α_u , α_v はディジタルカメラのズームレンズの焦点距

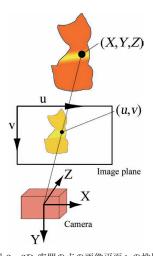


図 3 3D 空間の点の画像平面への投影 Fig. 3 Projection of a 3D point on an image plane.

離の値を CCD の 1 ピクセルの推定寸法で割った値,s はスキュー, u_0 , v_0 は画像中心である.これら五つのパラメータが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

本節では、カメラの内部パラメータを定数として扱う. この場合、式(1)、式(2)を微分すると、それぞれ式(3)、式(4) になる.

$$\dot{u} = \frac{\alpha_u}{Z}\dot{X} + \frac{s}{Z}\dot{Y} - \frac{\alpha_u X + sY}{Z^2}\dot{Z}$$
 (3)

$$\dot{v} = \frac{\alpha_v \dot{Y} - \frac{\alpha_v Y}{Z^2} \dot{Z} \tag{4}$$

ここで、本手法では、カラー画像のレーザ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。つまり、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。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 空間中での速度ベクトル $\dot{\mathbf{x}}=[\dot{\mathbf{x}},\dot{\mathbf{y}},\dot{\mathbf{z}}]^T$ は、カメラの並進速度ベクトル $\mathbf{v}=[v_x,v_y,v_z]^T$ と、角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}=[\omega_x,\omega_y,\omega_z]^T$ を用いて

$$\dot{\mathbf{X}} = -\mathbf{v} - \omega \times \mathbf{X} \tag{5}$$

と表すことができる. 式 (5) を式 (3), 式 (4) に代入 することにより, 式 (6), 式 (7) が導出される.

$$\dot{u} = -a_1 v_x - b_1 v_y - c_1 v_z - (c_1 Y - b_1 Z) \omega_{\mathbf{x}}$$

$$- (a_1 Z - c_1 X) \omega_{\mathbf{y}} - (b_1 X - a_1 Y) \omega_{\mathbf{z}} \qquad (6)$$

$$\dot{v} = -d_1 v_y - e_1 v_z - (e_1 Y - d_1 Z) \omega_{\mathbf{x}}$$

$$+ e_1 X \omega_{\mathbf{y}} - d_1 X \omega_{\mathbf{z}} \qquad (7)$$

 a_1, b_1, c_1, d_1, e_1 は以下のとおりである.

$$a_1 = \frac{\alpha_u}{Z}, b_1 = \frac{s}{Z}, c_1 = -\frac{\alpha_u X + sY}{Z^2},$$

$$d_1 = \frac{\alpha_v}{Z}, e_1 = -\frac{\alpha_v Y}{Z^2}$$

式 (6), 式 (7) を 3 点以上で求め、線形最小二乗法を適用することで、6 個の運動パラメータを得ることができる。

式 (5) 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, 三次元の並進ベクトル $\mathbf{t} = [t_x, t_y, t_z]^T$) は式 (5) 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 内部パラメータレンズの歪曲収差への拘束

以上のアプローチを、内部パラメータが既知でない場合における、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)、式 (2) は、式 (8)、式 (9) に書き直される。

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

$$+ s \frac{Y}{Z} \left(1 + k \frac{X^2 + Y^2}{Z^2} \right) + u_0$$

$$v = \alpha_v \frac{Y}{Z} \left(1 + k \frac{X^2 + Y^2}{Z^2} \right) + v_0$$
(9)

3.1 の手順と同様にして,式(6),式(7) にカメラの内部パラメータとkを加えた式(10),式(11) が導出できる.

$$\dot{u} = -a_2 v_x - b_2 v_y - c_2 v_z - (c_2 Y - b_2 Z) \omega_{\mathbf{x}}
- (a_2 Z - c_2 X) \omega_{\mathbf{y}} - (b_2 X - a_2 Y) \omega_{\mathbf{z}}
+ d_2 \dot{\alpha}_u + e_2 \dot{s} + \dot{u}_0 + f_2 \dot{k}$$
(10)
$$\dot{v} = -g_2 v_x - h_2 v_y - i_2 v_z - (i_2 Y - h_2 Z) \omega_{\mathbf{x}}
- (g_2 Z - i_2 X) \omega_{\mathbf{y}} - (h_2 X - g_2 Y) \omega_{\mathbf{z}}
+ e_2 \dot{\alpha}_v + \dot{v}_0 + \dot{j}_2 \dot{k}$$
(11)

 $a_2,b_2,c_2,d_2,e_2,f_2,g_2,h_2,i_2,j_2$ は以下のとおりである。

$$\begin{split} a_2 &= \frac{\alpha_u}{Z} + \frac{k\alpha_u(3X^2 + Y^2) + 2ksXY}{Z^3}, \\ b_2 &= \frac{s}{Z} + \frac{ks(X^2 + 3Y^2) + 2k\alpha_uXY}{Z^3}, \\ c_2 &= -\frac{\alpha_uX + sY}{Z^2} - \frac{3k(X^2 + Y^2)(\alpha_uX + sY)}{Z^4}, \\ d_2 &= \frac{X}{Z} + \frac{kX(X^2 + Y^2)}{Z^3}, \\ e_2 &= \frac{Y}{Z} + \frac{kY(X^2 + Y^2)}{Z^3}, \\ f_2 &= \frac{(X^2 + Y^2)(\alpha_uX + sY)}{Z^3}, g_2 = \frac{2k\alpha_vXY}{Z^3}, \\ h_2 &= \frac{\alpha_v}{Z} + \frac{k\alpha_v(X^2 + 3Y^2)}{Z^3}, \end{split}$$

$$i_{2} = -\frac{\alpha_{v}Y}{Z^{2}} - \frac{3k\alpha_{v}Y(X^{2} + Y^{2})}{Z^{4}}$$

$$j_{2} = \frac{\alpha_{v}Y(X^{2} + Y^{2})}{Z^{3}}$$

式(10),式(11)を6点以上で求め、線形最小二乗法を適用することで、カメラパラメータと歪曲収差の修正量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/3D 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 1~3 で行う。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、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を更新する。ステージ 3 では、カメラパラメータと歪曲収差のパラメータを更新する。

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、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ないこと
- 距離濃淡画像の SN 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。多くの研究では、距離濃淡画像とカラー画像の類似性を高くするために、距離濃淡画像に対してのみ前処理を行っている [14], [15], [17]. 本研究では、カラー画像に対しても、両画像の類似性を高くするための前処理を行う。

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,境界部分で背景がないことにより,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ない状態にそろえてから 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 [20] により提案された GrabCut を使用する.GrabCut は,対象を方形領域で指定し,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





(a) 元画像

(b) セグメンテーション後

図 4 GrabCut を適用した例 Fig. 4 An example of applying GrabCut.

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 4(a) に GrabCut を適用した結果を図 4(b) に示す. 図 4(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ばらつきが大きいため、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[22]の手法を用いて輝度補正を行った距離濃淡画像を用いる。

5. 柔軟な誤対応除去

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、M推定やRANSACなどが用いられている[15],[17].しかし、M推定では、誤対応による影響を低減するだけであるため、事前に除去しておく方が望ましい.ただし、RANSACを用いる場合は、誤対応を除去するのと同時に、正しい対応点も多く削除してしまうことが多い.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組み合わせることで、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、三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、しきい値を緩くして RANSAC を適用 する。

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、以下のしきい値処理により誤対応除去を行う。

$$\begin{cases} if \quad |d'| < \mu_{d'} - k_{d'} * \sigma_{d'} : Correct \\ else : False \end{cases}$$
 (12)

d' は対応点間のスケールの差, $\mu_{d'}$, $\sigma_{d'}$ はそれぞれ |d'| の平均値,標準偏差である.なお, $k_{d'}$ は実験的に 算出する.

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(13)の Bhattacharyya 距離を利用して、濃淡情報の類似度を定義する。

$$S = \sum_{u=1}^{m} \sqrt{p_u q_u} \tag{13}$$

m はビン数, p_u , q_u は二つの正規化色特徴ヒストグラムをそれぞれ p, q としたときの各ビンである. 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 (14) の P で定義し、類似度 S が大きいほどマッチング信頼度が高くなるようにする.

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(1-S)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{14}$$

上式は平均 1,分散 σ^2 の正規分布である. なお, σ は S 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う.そこで,SIFT 特徴量のスケール情報 s' 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*s') の範囲で類似度 S を算出する。また,(3.0*s') 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 (13) より類似度 S を求める。次に、式 (14) より対応点間のマッチング信頼度 P を算出する。そして、以下のしきい値処理により誤対応を除去する。

$$\begin{cases} if \quad P > \mu_P - k_p * \sigma_P : Correct \\ else : \qquad False \end{cases}$$
 (15)

 μ_P , σ_P は、それぞれマッチング信頼度 P の平均値、標準偏差である。なお、 k_P は実験的に 1.0 とした。

以上の柔軟な誤対応除去を行った後,しきい値を緩くして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.なお,それぞれの誤対応除去手法は処理が速いため,処理時間は短い.

6. レジストレーション実験

本章では、相関係数と投影誤差によるレジストレーションの定量的評価を行う.まず、6.3 に、提案手法と外部パラメータのみ更新時によるレジストレーション結果を示す.これは、SIFTと距離濃淡画像を用いて外部パラメータのみ推定している、Bohmら[17]の手法と比較するために行った.なお、2.に示したとおり、外部パラメータのみ更新したレジストレーション結果は、ステージ1終了後の収束結果である.また、6.4に、提案手法と従来手法[14]を同一物体で実験したときの結果を示し、提案手法の有用性や特徴を示す.そして、6.5 に、誤対応除去の組合せを変えて実験したときの結果を示し、柔軟な誤対応除去の有用性を示す.

6.1 実験装置と各種設定

距離画像及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 [23] を使用した. 撮影風景を図 5 に示す. 本センサは赤色 (波長 670 nm)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。

カラー画像の取得には Nikon 製のディジタルカメラ 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



図 5 ShapeGrabber を用いている撮影風景 Fig. 5 Scanning scene by ShapeGrabber.





(a) back lateral

(b) top lateral

図 6 対象物体:cat Fig. 6 Object: cat.

いた. カラー画像の画素数は 3008×2000 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 は二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、 $70.0\,\mathrm{mm}/7.9\,\mu\,\mathrm{m}$ で求めた、 $70.0\,\mathrm{mm}$ は実験で用いたディジタルカメラのズームレンズの最長の焦点距離の値、 $7.9\,\mu\,\mathrm{m}$ 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t

手法の実装には、Intel 社製 Core i7 (2.93 GHz) を搭載した PC と、NVIDIA 社製 GPU (GeForce GTX580) を使用した.

6.2 濃淡情報をもつ全方位幾何モデルの生成

モデル化する対象物体を猫の置物(図 1, 図 6),光 沢感のある鶴の置物(図 7)とし,複数枚の距離画像及 び補正後の距離濃淡画像を統合した全方位幾何モデル を図 8, 図 9 に示す.また,それぞれの全方位幾何モデルにおける,取得枚数と計測点の数を,表 1 に示す.統合処理は InnovMETRIC 社製の PolyWorks [24] を 用いて行った.対象物の大きさは,猫の置物が $w59\,\mathrm{mm} \times h112\,\mathrm{mm} \times d32\,\mathrm{mm}$ で,光沢感のある鶴の置物が $w44\,\mathrm{mm} \times h175\,\mathrm{mm} \times d64\,\mathrm{mm}$ である.





(a) front lateral

(b) back lateral

図 7 対象物体: shiny crane Fig. 7 Object: shiny crane.





図 8 距離濃淡画像をもつ幾何モデル:cat Fig. 8 Geometric model with inetensity information: cat.





図 9 距離濃淡画像をもつ幾何モデル:shiny crane Fig. 9 Geometric model with inetensity information: shiny crane.

表 1 全方位幾何モデル Table 1 Omnidirectional geometric models.

対象モデル	取得枚数	計測点
cat	15	183016
shiny crane	87	409057

6.3 外部パラメータのみ更新時との比較

提案手法と外部パラメータのみ更新時によるレジストレーション結果を,表 2,表 3 に示す.また, 2.で示したように,収束の判定には両画像の相関係数を用

表 2 提案手法を用いたレジストレーション結果 Table 2 Registration result using proposal method.

			0	
カラー画像	処理時間 [s]	反復回数	相関係数	投影誤差 [pixel]
図 1 (b)	28.0	10	0.8131	14321
図 6 (a)	32.0	11	0.7554	9962
図 6 (b)	31.2	13	0.7847	12512
図 7 (a)	29.2	11	0.7815	12506
図 7(b)	27.5	8	0.6354	13893

表 3 外部パラメータのみ更新したレジストレーション 結果

Table 3 Registration result updating only extrinsic parameter.

カラー画像	処理時間 [s]	反復回数	相関係数	投影誤差 [pixel]
図 1(b)	15.7	4	0.8027	15855
図 6 (a)	15.3	4	0.7437	12572
図 6 (b)	16.8	4	0.7393	16911
図 7 (a)	17.8	5	0.7671	22737
図 7(b)	14.7	4	0.5846	40646

表 4 従来手法[14]を用いたレジストレーション結果 Table 4 Registration result using other method [14].

カラー画像	処理時間 [s]	反復回数	相関係数	投影誤差 [pixel]
図 1 (b)	232.6	37	0.7617	15529
図 6 (a)	170.4	30	0.7109	11165
図 6 (b)	-	-	-	-
図 7 (a)	162.9	29	0.5704	13432
図 7(b)	141.4	26	0.5695	11363

いており、適当な反復回数以降でこの値が減少に転じたときに、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.

表 2,表 3 より,外部パラメータのみ更新時よりも、提案手法の方が相関係数は高く、投影誤差は小さくなっていることが分かる。ここで、Bohmら[17]の手法では、反復演算を用いずに外部パラメータのみ推定している。また、距離濃淡画像に対してのみ誤対応低減のための前処理を行っており、誤対応除去においてもRANSACのみ用いている。よって、本手法の方がBohmら[17]の手法よりも、高精度なレジストレーションを行うことができると思われる。

6.4 従来手法[14] との比較

提案手法と従来手法 [14] によるレジストレーション結果を、表 2、表 4 に示す。また、対象物体を猫の置物(図 1 (b)、図 6 (a))としたときのレジストレーション結果を、それぞれ図 10~図 12 と図 13~図 15 に示す。収束後の投影画面では、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、投影誤差では、白色部分が、両



(a) Image plane

(b) Projection error

図 10 初期投影時:cat Fig. 10 Initial state: cat.



(a) Image plane

(b) Projection error

図 11 提案手法を用いたレジストレーション結果: cat Fig. 11 Registration result (proposal method): cat.



(a) Image plane

(b) Projection error

図 12 従来手法 [14] を用いたレジストレーション結果: cat

 $\label{eq:Fig.12} \mbox{ Registration result (other method [14]): cat.}$

画像が重複していない画素を表している.

次に、対象物体を猫の置物(図 1 (b)、図 6 (a))としたときの視点変化に応じたレジストレーション結果を、それぞれ図 16、図 17 に示す。図 16、図 17 では、最終的に収束したときの (a) 相関係数、(b) 投影誤差、(c) 処理時間、(d) 反復回数を示している。ただし、初期投影時から 1 回も収束しなかった場合、解が

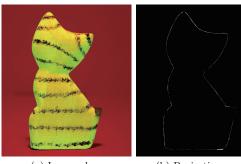




(a) Image plane

(b) Projection error

図 13 初期投影時:cat (back lateral) Fig. 13 Initial state: cat (back lateral).



(a) Image plane

(b) Projection error

図 14 提案手法を用いたレジストレーション結果: cat (back lateral)

Fig. 14 Registration result (proposal method): cat (back lateral).



(a) Image plane

(b) Projection error

図 15 従来手法 [14] を用いたレジストレーション結果: cat (back lateral)

Fig. 15 Registration result (other method [14]): cat (back lateral).

発散した場合には、グラフに表記しない.

まず、表 2、表 4 より、提案手法の方が、処理時間が短く、反復回数も少ないことが分かる。また、相関係数も高く、投影誤差が少ないことが多い。しかし、

図 7(b)では、従来手法[14]の方が、投影誤差が小さくなった。これは、図 7(b)では、SIFT特徴量を抽出できるテクスチャ内部において、鏡面反射が強く出てしまったことが原因であると考えられる。そのため、正しい対応点が減少し、投影誤差が大きくなったと思われる。ただし、図 6(b)においては、従来手法[14]を用いた場合には、レジストレーションが収束しなかった。これは、テンプレートマッチングによる初期位置合せが失敗し、こう配拘束による拘束式が計算できなかったためである。よって、テクスチャが少なくなるモデルでは、従来手法[14]の方が精度が高くなる場合もあるが、提案手法の方が安定して高精度なレジストレーションを行うことができる。

次に、収束率について述べる。表 2,表 4 より、従来手法 [14] と比較し、本手法では、3 分の 1 以下の 反復回数で収束していることが分かる。また、図 16、図 17 より、視点変化の大きさによって、従来手法 [14] では反復回数が大幅に増減している。一方、本手法では、視点変化が大きくなった場合においても、反復回数はほとんど変化していないことが分かる。以上より、本論文で定式化した拘束式は、梅田ら [14] が定式化した拘束式よりも、安定して収束性が高い解が取得でき、より少ない反復回数でレジストレーションが収束できると思われる。

続いて, 視点変化に応じたレジストレーション結果 について述べる. 図 16 より, 図 1(b) では, 従来手 法[14] だと 20 [deg] までしか収束しなかったが、提案 手法だと 35 [deg] まで収束した. また, 図 17 より, 図 6(a) では、従来手法 [14] だと 25 [deg] までしか収 束しなかったが、提案手法だと 40 [deg] まで収束した. これらの結果から, 提案手法の方が視点変化に対する ロバスト性が良いことが分かる. これは、SIFT が視 点変化に対して 30 [deg] まで頑健であることが挙げら れる. 更に, 誤対応低減のための前処理や柔軟な誤対 応除去を行うことで、正しい対応点をより多く取得す ることができるようになり、視点変化に対するロバス ト性が向上したと考えられる.一方,従来手法[14]で は, 視点変化が大きくなるにつれて, 初期位置合せの 精度が低下し、こう配拘束により収束しなくなったと 思われる. また, 従来手法[14]では, ロバスト推定を 行わず, 全投影点に対してこう配拘束を用いているた め,収束が不安定であった.

以上より,提案手法の方が精度が高く,かつ処理時間が短く,更に視点変化に対するロバスト性が良いこ

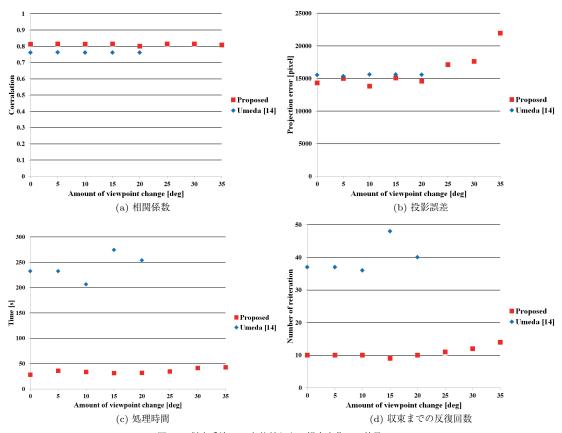


図 16 従来手法[14] と比較した、視点変化への効果:cat Fig. 16 Effect of viewpoint change compared with method [14]: cat.

とが分かる.

6.5 RANSAC との比較

本節では、誤対応除去手法の組合せを変えて実験を行った。対象物体を猫の置物(図 1 (b))としたときの、提案手法、RANSACのレジストレーション結果を図 18 に示す。図 18 では、「Proposed」が柔軟な誤対応除去を用いており、「RANSAC」が RANSACのみ用いており、「Scale and RANSAC」が 5.1 に述べた誤対応除去を行った後に RANSACを適用した結果である。6.4 と同様に、初期投影時から 1 回も収束しなかった場合、解が発散した場合には、グラフに表記しない。なお、5.1 の誤対応除去を行っていない場合には、マッチング信頼度を用いた誤対応除去の精度が低くなるため、マッチング信頼度と RANSAC の組合せによる誤対応除去による実験は行っていない。

図 18 より、「RANSAC」だと 25 [deg] までしか収束 せず、「Scale and RANSAC」だと 30 [deg] までしか 収束なかったが、柔軟な誤対応除去だと35[deg]まで収束した.これらの結果から、柔軟な誤対応除去を用いた場合が、視点変化へのロバスト性が最も高くなったことが分かる.RANSACを用いる場合には、正しい対応点が最も大きいグループである必要がある[25].「RANSAC」や「Scale and RANSAC」においては、視点変化が大きい場合、誤対応のグループが大きくなりすぎたため、RANSACを適用するには不十分だった.一方、柔軟な誤対応除去では、RANSAC適用前に5.1と5.2の誤対応除去を行っているめ、より視点変化が大きい場合においても、RANSACが適用できたと考えられる.この結果より、精度や視点変化へのロバスト性に対して、柔軟な誤対応除去が最も有用性が高いことを示している.

7. t t t

本論文では、SIFT と距離濃淡画像を利用した

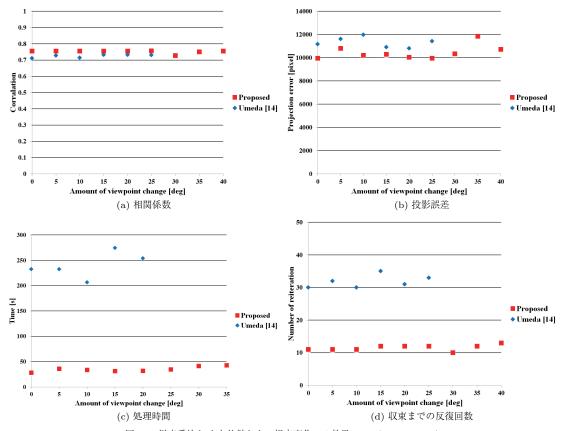


図 17 従来手法[14] と比較した、視点変化への効果:cat (back lateral) Fig. 17 Effect of viewpoint change compared with method [14]: cat (back lateral).

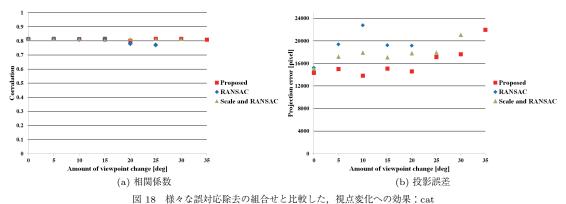


図 18 様々な誤判心味去り報告をこれ取した。税無変につり効果 . cat Fig. 18 Effect of viewpoint change compared with each methods of removing false matches: cat.

2D/3D レジストレーション手法を提案した. 2D/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. この拘束式を解くことで, 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/3Dレジストレーションのためのパラメータを算出可能である。また,柔軟な誤対応除去を提案し,高精度なレジストレーションを実現した。

文 献

- 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] 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. 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.
- [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] 桃島祐樹,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-II, no.5, pp.1380-1392, May 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 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,

Aug. 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," Proc. 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," 8th Conf. on Optical 3D Measurement Techniques, 2007.
- [18] D.G. Lowe, "Distinctive image features from scaleinvariant keypoints," Int. J. Comput. Vis., vol.60, no.2, pp.91–110, 2004.
- [19] 猪股 亮, 寺林賢司, 梅田和昇, ギー ゴダン, "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," 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2011), pp.1508-1515, 2011.
- [20] C. Rother, V. Kolmogorov, and A. Blake, ""Grab-Cut": Interactive foreground extraction using iterated graph cuts," ACM Trans. Graphics. (SIG-GRAPH'04), vol.23, no.3, pp.309-314, 2004.
- [21] M.A. Fischler and R.C. Bolles, "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," Commun. ACM, vol.16, no.24, pp.381–395, 1981.
- [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. Image Understand., vol.113, no.11, pp.1170– 1179, 2009.
- $[23] \quad {\rm Shape Grabber,\ ``http://www.shape grabber.com''}$
- [24] PolyWorks, "http://www.innovmetric.com"
- [25] 伊藤吉弘, 金澤 靖, "画像から求めた複数のゆう度分布に よる重みを用いた RANSAC による画像間の対応付け," 信 学論(D), vol.J89-D, no.12, pp.2710-2720, Dec. 2006. (平成 23 年 10 月 12 日受付, 24 年 2 月 20 日再受付)



猪股 亮

2010 中大・理工・精密機械卒. 2012 同 大大学院理工学研究科精密工学専攻修士課 程了. 現在, オリンパス (株) 勤務.



寺林 賢司

2002 北大・エ・システム卒. 2004 同大学院システム情報工学専攻修士課程了. 2008東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程了,博士(工学).同年,中央大学理工学部精密機械工学科助教. 2012より静岡大学工学部機械工学科助教,現在

に至る。ヒューマンインタフェース,ロボットビジョン等の研究 に従事、精密工学会、日本ロボット学会、日本機械学会、IEEE 等各会員。



梅田 和昇 (正員)

1989 東大・工・精密機械卒, 1994 同 大大学院博士課程了. 同年中央大学理工 学部精密機械工学科専任講師, 1998 よ り同助教授, 2006 より同教授, 現在に 至る. 2003~2004 カナダ NRC Visiting Worker, 2007~2009 文部科学省学術調査

官. ロボットビジョン,画像処理の研究に従事.画像の認識・理解シンポジウム 2004 MIRU 長尾賞受賞.博士(工学).日本ロボット学会,日本機械学会,精密工学会,IEEE 等各会員.



Guy Godin

He is a senior researcher with the Visual Information Technology Group of the National Research Council of Canada. His research interests include 3D computer vision and image analysis, shape and reflectance modeling,

and interactive visualization and similuation. He is a cofounder of the International Conference on 3D Imaging and Modeling (3DIM). He holds degrees in Electrical Engineering from École Polytechnique de Montréal and McGill University. He is a member of IEEE and ACM.