論文

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

梅田 和昇^{†a)} ギー ゴダン^{††} マーク リュウ^{††}

Registration of Range and Color Images Using Gradient Constraints and Range Intensity Images

Kazunori UMEDA^{$\dagger a$}, Guy GODIN^{$\dagger \dagger$}, and Marc RIOUX^{$\dagger \dagger$}

あらまし 距離画像とカラー画像のレジストレーションは、テクスチャをもつ三次元モデルを構築するために 重要である、本論文では距離濃淡画像を利用したレジストレーションの一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た距離画像取得時に反射光強度の配列として得られる一種の濃淡画像である、距離濃 淡画像とカラー画像とのこう配拘束を利用し、レジストレーションのためのパラメータ~カメラの外部・内部パ ラメータの微小変位~に関する線形拘束式を導出している、本拘束式を用いることで、特徴の対応付けを陽に行 うことなく、線形演算のみで正確なレジストレーションを実現できる、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利用可能である、また、カメラのレンズ の歪曲収差のパラメータも本手法の枠組みで算出可能である、微分画像の利用、Coarse-to-fine アプローチの適 用によりロバストに手法を実装し、実験により提案手法の有効性を示している、

キーワード 距離画像,カラー画像,レジストレーション,距離濃淡画像,こう配拘束

1. まえがき

距離画像とカラー画像のレジストレーションは,物 体あるいは環境の,テクスチャをもつ三次元モデルを 構築するために重要である.一般に,このレジスト レーションは,両画像から特徴点を抽出し,特徴点間 の対応を手作業で求め,両画像間の変換行列を求める ことにより実現されている[1].本論文では,この処理 を自動化することを目標とする.

これまでに,レジストレーションの自動化に関連す る研究がいくつか行われている.一つのアプローチ は,距離画像に限らず異なった種類の画像間でレジス トレーションを行う,汎用的な枠組みを構築すること である [2] ~ [4] . このうち Viola ら [2] は異なる二つの 画像間の類似度を相互情報量で評価してレジストレー ションを行う枠組みを構築し,三次元モデルと濃淡画 像とのレジストレーションにも応用している.

本論文のように対象を距離画像とカラー画像とのレ ジストレーションに特化する場合には,距離画像の性 質を陽に考慮した手法を構築することができる.こ のように距離画像とカラー画像(あるいは濃淡画像) とに特化して手法を構築する研究も多く行われてい る [5] ~ [15]. Lavallée ら [5], Banks ら [6] は, 医用画 像を対象に,二次元画像内の物体の三次元位置・姿勢 を求めるために,三次元モデル及び二次元画像から得 られる輪郭を対応づけている.Neugebauerら[7]は, 三次元モデルと二次元画像の特徴点を手作業で対応 づけて大まかにパラメータを同定した後,輪郭や,複 数の二次元画像の類似度などを利用して詳細にレジ ストレーションを行う手法を提案している.Stamos ら [8] は両画像から得られるエッジを手作業で対応づ けてレジストレーションを実現している.Lensch [9] は三次元モデルと二次元画像のシルエットの比較によ

[†] 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

^{††} カナダ国立研究所情報技術部視覚情報技術グループ,カナダ Visual Information Technology, Institute for Information Technology, National Research Council, 1200 Montreal Road, Ottawa, Ontario K1A 0R6, Canada

a) E-mail: umeda@mech.chuo-u.ac.jp

る手法を提案している. Robertson ら [10] はキャリブ レーション用のターゲットを両画像で観測してレジス トレーションを簡便に行う手法を提案している.

一方,いくつかの研究では,距離画像取得時に同時 に得られる"濃淡画像"を利用している[11]~[15].能 動型の距離画像センサは照明(レーザあるいはインコ ヒーレント光)を照射し,対象からの反射光を用いて距 離を計測している(三角測量あるいは time-of-flight). このとき,反射光の強度は計測点の反射率に関連して いるので、反射光強度の配列が、距離画像の幾何的な データと全く同じサンプリングで,一種の濃淡画像を 生成する.一般に,この画像は距離濃淡画像(range intensity image)やリフレクタンス画像(reflectance image)と呼ばれる.本論文では,距離濃淡画像の呼 称を以下用いる、距離濃淡画像は、通常の二次元画像 に近い特性をもつ画像と考えられるため,距離画像と カラー画像とのレジストレーションに有効であると考 えられる. Boughorbal ら [11] 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.他の距離濃淡画像を利用した研究では,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 . Smith ら [12] はコーナー を用いている.また, 倉爪ら [13], [14] はエッジを抽出 し, ロバスト推定により対応付けの安定化を行ってい る. Dias ら [15] はエッジとコーナーとを併用してい る.しかしながら,画像間の類似度評価を生で利用し た最適化では,反復処理に時間がかかると考えられ, 一方,特徴抽出を行う手法では,特徴間のマッチング の必要があり,また明らかな特徴が抽出しづらい物体 では対応づけられる特徴の数が少なくなってしまう.

本論文では,距離濃淡画像を利用して距離画像とカ ラー画像とのレジストレーションを行う新しい手法を 提案する(以下,カラー画像は濃淡画像も含むとす る).特徴抽出や画像間の類似度評価を利用するのでは なく,距離濃淡画像とカラー画像とのこう配拘束を利 用し,レジストレーションのためのパラメータ~カメ ラの外部パラメータ及び内部パラメータの微小変位~ に関する線形拘束式を導出する.この拘束式をもとに レジストレーションを実装する、本手法は、こう配拘 束を用いることで,特徴を陽に求めてマッチングを行 う必要がなく,また画像中の多くの点で拘束式を立て られるため, 収束の安定化に有効であると考える.

2. レジストレーション手法の概要

距離濃淡画像をもつ距離画像とカラー画像とが与え られているとする、距離画像とカラー画像とのレジス トレーションを行うには,距離画像を記述している座 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,力 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、図1にこの概念図を示す(理想的な)力 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[16].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,本論文ではこう 配拘束を利用する.画像平面に投影された距離濃淡画 像とカラー画像とで重複している領域で、よく知られ ているオプティカルフローの拘束[17] が近似的に満た されると仮定する(図2参照).以下の章で示すよう に,この拘束を利用してカメラパラメータを修正し, レジストレーションを実現する.図3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,こう 配拘束に基づいた提案手法を適用し,得られる修正量 を用いてカメラパラメータを修正する.

以上の処理は両画像の類似性を仮定していることに なるが,両画像をなるべく類似させるために,重複領 域での画素値の平均・標準偏差や最大値・最小値を利



Fig. 1 Parameters to obtain for registration.



図 2 カラー画像と投影された距離濃淡画像との関係 Fig. 2 Relation between the color image and the projected range intensity image.



図 3 レジストレーション処理の流れ Fig. 3 Flow of registration.

用したスケール合せなどの前処理を行っておく.また, カメラパラメータの初期値が実際の値と大きく違わな いことも,両画像の間でオプティカルフローの拘束が 成り立つために必要である.

また,距離濃淡画像との比較には,カラー画像のうちのある色成分を利用する.能動型の距離画像センサがレーザ光を利用している場合には,その波長に近い 色成分を用いれば,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.白色光を利用している場合 には,カラー画像から輝度画像(例えばYUV 色空間 のY画像)を得て利用するのが適切と考えられる.あ るいは複数の色成分に対して処理を行い異なる結果を 得た場合は,4.で示す画像の一致度を最大とする結 果を選択すればよい.

こう配拘束の定式化

図 4 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,



図 4 3D 空間の点の画像平面への投影 Fig. 4 Projection on an image plane.

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

が成り立つ.ここで, α_u , α_v ,s, u_0 , v_0 は五つの内 部パラメータである.

オプティカルフロー拘束は,以下で与えられる.

$$\begin{split} I_u \dot{u} + I_v \dot{v} &= -I_t \\ I_u &= \frac{\partial I}{\partial u}, \quad I_v = \frac{\partial I}{\partial v}, \quad I_t = \frac{\partial I}{\partial t} \end{split}$$

ただし, I は画像の輝度値である.ここで,本論文で は,カラー画像のある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, It は,カラー画像のある色成分 と投影された距離濃淡画像との差そのものであり,ま た, \dot{u} , \dot{v} は距離濃淡画像からカラー画像への移動量 に対応する.

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であるとする. これはキャリブレーション済みのカメラを用いること に相当する.このとき,式(1)を微分することにより,

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

となる.式(3)を式(2)に代入することにより,以下 の式が得られる.

$$I_{u}\frac{\alpha_{u}}{Z}\dot{X} + \left(I_{u}\frac{s}{Z} + I_{v}\frac{\alpha_{v}}{Z}\right)\dot{Y} - \left(I_{u}\frac{\alpha_{u}X + sY}{Z^{2}} + I_{v}\frac{\alpha_{v}Y}{Z^{2}}\right)\dot{Z} = -I_{t}.$$
 (4)

1471

(2)

 $\dot{\mathbf{X}} = [\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}]^T$, すなわち対象点の 3D 空間中での速 度ベクトルは,カメラの運動により生じ,カメラの並 進速度ベクトル $\mathbf{v_0} = [v_{0x}, v_{0y}, v_{0z}]^T$,角速度ベクト ル $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ を用いて

$$\dot{\mathbf{X}} = -\mathbf{v_0} - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{X} \tag{5}$$

と表すことができる.この関係を式 (4) に代入するこ とにより,以下の式が導出される.

$$-av_{0x} - bv_{0y} - cv_{0z}$$

$$+(bZ - cY)\omega_x$$

$$+(cX - aZ)\omega_y + (aY - bX)\omega_z = -I_t \qquad (6)$$

$$a = I_u \frac{\alpha_u}{Z}, \quad b = I_u \frac{s}{Z} + I_v \frac{\alpha_v}{Z},$$

$$c = -\left(I_u \frac{\alpha_u X + sY}{Z^2} + I_v \frac{\alpha_v Y}{Z^2}\right)$$

この式は 6 成分からなる運動パラメータ vo 及び ω に関する線形の式である.よって,本式を 6 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 動パラメータを容易に得ることができる.なお,ここ までの式の導出は三次元運動の解析の研究で行われて いるものと同様であり既知である[18].式(6)は,山 本[19],Horn ら[20]が提案している式とほぼ同じで ある.山本[19]は正射影を仮定し,奥行方向の並進 を除く 5 成分に関する拘束式を導出している.また, Horn ら[20]は 6 成分に関する拘束式を導出している.

式(6)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 タは 3×3 の回転行列Rと三次元の並進ベクトル $\mathbf{t} = [t_x, t_y, t_z]^T$ で表すことができる.これらは上式を 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,速度成分(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3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,

$$\begin{cases} \dot{u} = \frac{\alpha_u}{Z} \dot{X} + \frac{s}{Z} \dot{Y} - \frac{\alpha_u X + sY}{Z^2} \dot{Z} \\ + \frac{X}{Z} \dot{\alpha}_u + \frac{Y}{Z} \dot{s} + \dot{u}_0 \\ \dot{v} = \frac{\alpha_v}{Z} \dot{Y} - \frac{\alpha_v Y}{Z^2} \dot{Z} + \frac{Y}{Z} \dot{\alpha}_v + \dot{v}_0 \end{cases}$$
(7)

となる.内部パラメータが既知の前節の場合と同様の 手順により,以下の式が導出される.

$$-av_{0x} - bv_{0y} - cv_{0z} + (bZ - cY)\omega_x$$
$$+(cX - aZ)\omega_y + (aY - bX)\omega_z + I_u \frac{X}{Z}\dot{\alpha}_u \quad (8)$$
$$+I_v \frac{Y}{Z}\dot{\alpha}_v + I_u \frac{Y}{Z}\dot{s} + I_u \dot{u}_0 + I_v \dot{v}_0 = -I_t$$

a, b, c は式(6)と同じものである.この式は11個 のパラメータ,すなわち6個の運動パラメータと5個 の内部パラメータの微分値に関する線形の式である. よって,本式を11点以上で求め,線形最小二乗法を 適用することで,これらのパラメータ,すなわち内部 パラメータ・外部パラメータの微分値(微小変位)を 容易に得ることができる.

3.3 レンズの歪曲収差への拘束

以上のアプローチを拡張することにより,レンズの 歪曲収差も同様に扱うことができ,線形の拘束式を得 ることができる.ここでは最も単純なモデル,すなわ ち画像中心からの距離の2乗に比例して歪曲収差が発 生するモデルを考える.

このとき,式(1)は

$$\begin{pmatrix}
u = \alpha_u \frac{X}{Z} \left(1 + k \frac{X^2 + Y^2}{Z^2} \right) \\
+ s \frac{Y}{Z} \left(1 + k \frac{X^2 + Y^2}{Z^2} \right) + u_0 \quad (9) \\
v = \alpha_v \frac{Y}{Z} \left(1 + k \frac{X^2 + Y^2}{Z^2} \right) + v_0
\end{cases}$$

と書き直される.ここで k は歪曲収差の大きさを表す 比例定数である.上記の手順と同様にこの式を微分し て式 (2) に代入し,更に式 (5) を代入することで,前 節に k を加えた 12 個のパラメータの微分値に関する 線形の式 (A·1) が導出される(付録参照).よって,本 式を 12 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,外部パラメータに加えて歪曲 収差のパラメータを求めることができる.

4. レジストレーション手法の実装

本章では,上式を用いたレジストレーション手法を 実装するために行った処理について述べる.

(1) 画像の空間微分 本手法は,距離濃淡画像 とカラー画像とが似ているという前提で構築されている.両画像は実際にある程度似ているが,照明環境, 波長,カメラの特性,視点の違いから,異なったもの となる.この2種の画像の差違の影響を小さくするた めに,両画像を空間微分することが有効である[3].本 研究では,両画像に対して Prewitt オペレータを適用 し,水平方向,垂直方向の空間微分画像を得,これら の微分画像に対して前節の手法を適用する.

(2) Coarse-to-fine $\mathcal{P}\mathcal{J}\mathsf{D}-\mathcal{F}$ 本手法は、オプ ティカルフローの拘束に基づいているため,本質的に 微小な変位に対して適用される.具体的には,式(2) の画素値の空間微分 I_u , I_v が両画像間で原則として 変わらない必要がある.そこで,両画像間の変位が大 きい場合には,低解像度化された画像を用いて広い範 囲で空間微分を得て大まかな変位の算出・補正を行い, 両画像間の変位が小さくなってから高解像度の画像を 用いて処理を行う, Coarse-to-fine アプローチを用い る.画像の低解像度化,及び異なった σ (標準偏差) のガウスフィルタの利用により,画像の解像度を制御 する.その結果,図3の手順は異なる解像度に対して 反復されることになる.低解像度(Coarse)の段階で は外部パラメータのみを更新し,高解像度(Fine)の 段階ではすべてのパラメータを更新することとする. また,内部パラメータの更新を始める際は,まず外部 パラメータのうち並進速度ベクトルのみと同時に更新 することが,特に内部パラメータの初期値と実際の値 との差が大きい場合, 収束性の向上に有効であること が,予備実験により示されている.

(3) 画像の一致度 距離濃淡画像とカラー画像 との一致度の評価には,本研究では単純に相関係数を 用いることとする.2種の画像を低解像度化し,ガウ スフィルタを適用し,微分して,相関係数を計算する. この一致度を用いてレジストレーションの収束を判定 する.

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検証した.

5.1 実験装置と各種設定

距離画像の取得には ShapeGrabber 製のセンサ PLM300(センサヘッド SG-100)[21]を使用した. またカラー画像は,ニコン製のディジタルカメラ COOLPIX5000を用い,RAW 形式で取得した.上 記センサのレーザの色が赤(波長 670 nm)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 2560 × 1920 で,レジストレーション時には 1280 × 960 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,その後二次元でのテンプレートマッ チングを行っておおよその位置合せをした.また tz 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. α_u , α_v は 3147 とした.この値は, 21.4 mm/(3.4 µm × 2) で求めた . 21.4 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公称 の焦点距離, 3.4 µm 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 0, すなわち スキューなしとした . u_0 , v_0 はそれぞれ 640 , 480 す なわち画像の中心に設定した.画像の低解像度化の比 率並びにガウスフィルタの標準偏差 σ を (4, 2.0), (4, 2.0)1.0), (2, 1.0), (1, 0.0) と変化させ, Coarse-to-fine を実現した.以降,これらを順にステージ1~4と呼 ぶ.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とを更新した.ステー ジ3,4では,歪曲収差のパラメータを含むすべての パラメータの更新を行った.

5.2 レジストレーション結果

図 5 に実験で用いた距離濃淡画像とカラー画像の ペアの一つを示す.対象物(カモの置物)の寸法は 148×69×h110mm³である.取得した距離画像は 312730点の計測点から構成されている.また,距離 画像の重心位置は[-153.2mm,16.0mm,264.7mm]^T である.図6に処理に用いた画像,すなわち距離濃淡 画像とカラー画像のR成分を低解像度化し,ガウス フィルタを適用し,微分した画像を示す.

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 とカラー画像のR成分を表している.また,得られた カメラパラメータを以下に示す.

| | 0.967 | -0.048 | 0.249 | | | |
|---|----------------|------------|-----------|-----|--|--|
| R = | 0.142 | 0.914 | -0.379 | | | |
| | -0.209 | 0.402 | 0.891 | | | |
| $\mathbf{t} = \begin{bmatrix} -237.3, 133.3, -40.5 \end{bmatrix}^T$ | | | | | | |
| $[\alpha_u, \alpha]$ | [v, s] = [254] | 42.0, 2544 | .0, -2.3] | | | |
| $[u_0, v_0]$ | [] = [706.8] | ,469.8], | k = -0.06 | 607 | | |

処理時間は, Pentium 4 (2.66 GHz)を搭載した PC で, 2D のテンプレートマッチングが約 15 秒, レジス トレーションが約 3 分であった.また, レジストレー ションに要する時間の約半分は最高解像度での処理 (上記のステージ4)であり, この段階での収束量は画

電子情報通信学会論文誌 2005/8 Vol. J88-D-II No.8





(a) Range intensity image
 (b) Color image
 図 5 距離濃淡画像とカラー画像: duck
 Fig. 5 Range intensity image and color image: duck.





(a) Coarsest
 (b) Finest
 図 6 レジストレーションに用いた微分画像
 Fig. 6 Differentiated images for registration.

像全域にわたって1 画素未満の微小量であった.

図 8, 図 9 に他の例を示す.この例では,対象物 (花瓶の置物)の大きさは ϕ 80 mm × h102 mm で,距 離画像の計測点数は 197494 である.また,距離画像 の重心位置は $[0.9 \text{ mm}, -153.3 \text{ mm}, 264.6 \text{ mm}]^T$ であ る.得られたパラメータを以下に示す.

| | 0.969 | -0.028 | -0.246 |] | | | |
|--|---------------|------------|-------------|-------|--|--|--|
| R = | 0.077 | 0.978 | 0.194 | | | | |
| | 0.236 | -0.207 | 0.950 | | | | |
| $\mathbf{t} = [93.6, -222.5, -29.9]^T$ | | | | | | | |
| $[\alpha_u, \alpha]$ | [v, s] = [2] | 628.8, 262 | 29.1, -2.2] | | | | |
| $[u_0, v_0]$ | [673] = [673] | 6,477.1], | k = -0. | .0618 | | | |

以上の実験結果より,カラー画像の背景が複雑でパ ラメータの初期値が真値から大きくはずれている場 合でも,正確なレジストレーションを実現することが できていることが示されている.特に,姿勢に関して は,本実験で得られた二つの回転行列から等価回転角 を求めると,それぞれ 27.6 deg,18.5 deg であり,大 きな角度ずれを本手法で修正できているといえる.し かもこのとき同時に,それぞれ 24%,20% の内部パ ラメータ (α_u, α_v)のずれも修正できている.

図 10 は距離濃淡画像及びレジストレーション後の 画像を拡大したものである.この図からレジストレー ションの正確さが見てとれる.





(a) Initial state

(b) After template matching



(c) Final result in 2D



(d) Registered images in 3D
 図 7 レジストレーションの結果: duck
 Fig. 7 Registration result: duck.

5.3 パラメータの収束結果

図 7 のレジストレーションにおける各パラメータの 収束結果を示す.

まず,図 11 に,微分画像並びに微分を行う前の画像(ともに低解像度化しガウスフィルタを適用後)に関して,距離濃淡画像とカラー画像との相関係数の収束を示す.4.に示したように,微分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ときに,そのステージで最高の相関係数を





(a)Range intensity image

(b)Color image 図 8 距離濃淡画像とカラー画像:vase

Fig. 8 Range intensity image and color image: vase.



(a)Final result in 2D



(b)Registered images in 3D 図 9 レジストレーションの結果:vase Fig. 9 Registration result: vase.

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.この例では,ステージ4では2回反 復後の3番目,そのほかではステージ切換の直前の相 関係数が最大であった.各ステージで求められた拘束 式の数は,平均で順に6825,6610,23260,61325点 と多い.現状ではこれらの点数で得られる式をすべて 用いて線形最小二乗法を行っている.また,全ステー ジでの反復回数は図 11 に示すように 36 回であった.



(a)Range intensity image



(b)Registered images 図 10 レジストレーション結果の拡大 Fig. 10 Magnified results.

次に,各パラメータの収束の様子を図 12 に示す. (a),(b) はカメラの外部パラメータの,それぞれ並進 速度ベクトル,角速度ベクトルの結果である.なお, グラフ範囲を超えている値は, (a) の z の 2 点の値は, 129.6, -35.7, (b)の x の値は 0.154 である.(c), (d) はカメラの内部パラメータの,前者は α_u , α_v 並 びにスキュー s を -100 倍したもの,後者は画像の主 点 u_0 , v_0 の結果である. sは α_u , α_v の 1/1000 程 度と十分小さな値であることが分かる.また,(e)は 歪曲収差のパラメータ kの結果である. 各図で, グラ フが3個所とぎれている個所がステージの切り換わり



を示す.

以上の結果より,次のことがいえる.まず,図11よ り,ステージ1で大きな変位を大まかに収束した後は, 各ステージでの収束は速いことが分かる.また,距離 濃淡画像とカラー画像の微分画像が比較的高い相関係 数をもっている.更に,微分を行わない画像の相関係 数は,収束が進むのに対して相関をもたない挙動をし ており,変化量も小さく,微分を行わない画像を本手 法に用いることの不適切さが示唆される.実際,微分 を行わない画像を用いて本手法を適用した結果,ほと んど収束しなかった.

また,ステージ2では,速度成分の z成分(奥行 方向の成分)が大きく変動しながら,内部パラメータ の特に α_u , α_v が調整されていることが示されてい る.これは,対象までの距離と焦点距離との間の相関 による.

また,相関係数が安定に収束しているわりには,各 パラメータが必ずしも一定値に収束せず,変動を続け ている様子も観測される.これは,レジストレーショ ンを実現する上で複数のパラメータの誤差が打ち消し 合う効果があるためと考えられる.実際,5.2 で述べ たように,例えばステージ4を通しての画像のずれ量 は,全画素で1画素未満と小さい値である.本論文の 目的が各パラメータの正しい推定値の算出ではなくあ くまで正確なレジストレーションの実現であることを 考えれば,この現象は問題ないと考える.

また,図 13 に図 9 のレジストレーションにおける 相関係数の収束を示す.図 11 とほぼ同様の傾向が見 られる.なお,この例では,ステージ2以外でステー ジ切換(ステージ4 では処理終了)の直前の相関係数 が最大であった.また,全ステージでの反復回数は42







図 13 図 9 における相関係数の収束

Fig. 13 Convergence of correlation coefficient for Fig. 9.



(a)With correction



(b)Without correction(α_u, α_v double)



(c)Without correction $(\alpha_u, \alpha_v \text{ half})$

図 14 内部パラメータの更新の効果(拡大図) Fig.14 Effect of correcting intrinsic parameters (magnified).

回であった.

5.4 内部パラメータ更新の効果

図 14 に本手法における内部パラメータの更新の効 果を示す.この実験では,内部パラメータの更新の効 響を強調するため, α_u , α_v の初期値を 5.1 の設定の 2 倍及び半分にしてある.手前にあるくちばしの部分 で影響が顕著に見られる. α_u , α_v が 2 倍の (b) では 望遠レンズ,半分の (c) では広角レンズを用いたこと に相当する効果が出ており,それぞれ透視効果が実際 より不足,過剰となっている.この結果から,内部パ





(a)Color image

(b)Registration result



(c)With correction (magnified)



(d)Without correction (magnified)
 図 15 歪曲収差の補正の効果
 Fig. 15 Effect of correcting distortion parameters.

ラメータの更新の重要性が明らかである.

5.5 歪曲収差補正の効果

図 15 に歪曲収差の補正の効果を示す.この例では, 歪曲収差の発生を大きくするため,ズームレンズの焦 点距離を最短の 7.1 mm (公称値)とし,かつ対象物 に近づいて撮像した.画像の外縁部にあるくちばしの 先の部分で影響が見られ,図 15 の (d) では歪曲収差 によるレジストレーションのずれが観察されているが, (c) に示すように,kの補正も伴うことにより,正確な レジストレーションを実現することができており,提 案手法による歪曲収差の補正の有効性が示されている. なお,この例では α_u , α_v の初期値が 5.1 の設定の ままでは,実際の値との差が大きすぎて本手法では収 束せず,3分の1の値とした.収束した値は,1101.9, 1101.3 であった.

6. む す び

本論文では,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の一手法を提案した. 距離濃淡画像とカラー画像との間のこう配拘束に着目 し,レジストレーションに必要なカメラの外部・内部 パラメータの修正量に関する線形拘束式を導出した. この式を用いることにより,線形の連立方程式を(反 復して)解くだけでレジストレーションを実現するこ とができる.カメラの外部パラメータだけでなく内部 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,カメラレンズの 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.ロバスト性の向上のため,微分画像を利用 し,Coarse-to-fine アプローチを適用した.実験によ り,本手法の有効性を示し,収束性の評価も行った.

今後の課題として, 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ている.また, ラ ンダムサンプリング手法やロバスト推定を導入するこ とで, 収束の安定化や処理時間の高速化を行うことも 有効であると考えている.

謝辞 本研究の一部は,科学研究費補助金・若手研 究(B)16700191の補助により行われた.

文 献

- 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, Nara, Dec. 2002.
- [2] P. Viola and W.M. Wells III, "Alignment by maximization of mutual information," Int. J. Comput. Vis., vol.24, no.2, pp.137–154, 1997.
- [3] M. Irani and P. Anandan, "Robust multi-sensor image alignment," Proc. ICCV98, pp.959–966, 1998.
- [4] Y. Keller and A. Averbuch, "Implicit similarity: A new approach to multi-sensor image registration," Proc. CVPR2003, pp.543-548, 2003.
- [5] 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.
- [6] S.A. Banks and W.A. Hodge, "Accurate measurement of three-dimensional knee replacement kinematics using single-plane fluoroscopy," IEEE Trans. Biomed. Eng., vol.43, no.6, pp.638–648, 1996.
- [7] P.J. Neugebauer and K. Klein, "Texturing 3D models of real world objects from multiple unregistered photographic views," Eurographics'99, pp.245–256, 1999.
- [8] 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.

- [9] H. Lensch, W. Heidrich, and H.-P. Seidel, "A silhouette-based algorithm for texture registration and stitching," Graphical Models, vol.63, no.4, pp.245-262, 2001.
- [10] C. Robertson and R.B. Fisher, "Empirical calibration method for adding colour to range images," Proc. 3DPVT, pp.558–561, 2002.
- [11] 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.
- [12] P.W. Smith and M.D. Elstrom, "Stereo-based registration of range and projective imagery for data fusion and visualization," Opt. Eng., vol.40, no.3, pp.352-361, 2001.
- [13] 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.
- [14] 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アライ ンメント",信学論(D-II), vol.J85-D-II, no.6, pp.1038– 1046, June 2002.
- [15] P. Dias, V. Sequeira, J.G.M. Goncalves, and F. Vaz, "Automatic registration of laser reflectance and colour intensity images for 3D reconstruction," Robotics and Autonomous Systems, vol.39, no.3–4, pp.157–168, 2002.
- [16] 佐藤 淳,コンピュータビジョン―視覚の幾何学,コロナ 社,1999.
- [17] B.K.P. Horn and B.G. Schunck, "Determining optical flow," Artif. Intell., vol.16, no.1–3, pp.185–203, 1981.
- [18] 武川直樹,宮島耕治,"時系列画像からの3次元運動と形 状解析"コンピュータビジョン技術評論と将来展望,松山 隆司,久野義徳,井宮 淳(編),第9章,pp.138-148, 新技術コミュニケーション,1998.
- [19] 山本正信,"動画像と距離情報の併用による3次元運動パ ラメータの直接的推定法",信学論(D),vol.J68-D, no.4, pp.562-569, April 1985.
- [20] B.K.P. Horn and E.J. Weldon, "Direct methods for recovering motion," Int. J. Comput. Vis., vol.2, pp.51–76, 1988.
- [21] ShapeGrabber, "http://www.shapegrabber.com"

付 録

レンズの歪曲収差も含む拘束式は,以下で与えられる.

$$-av_{0x} - bv_{0y} - cv_{0z} + (bZ - cY)\omega_x$$
$$+ (cX - aZ)\omega_y + (aY - bX)\omega_z$$

$$\begin{split} + &I_{u}\left(\frac{X}{Z} + \frac{k_{1}X(X^{2} + Y^{2})}{Z^{3}}\right)\dot{\alpha}_{u} \\ + &I_{v}\left(\frac{Y}{Z} + \frac{k_{1}Y(X^{2} + Y^{2})}{Z^{3}}\right)\dot{\alpha}_{v} \\ + &I_{u}\left(\frac{Y}{Z} + \frac{k_{1}Y(X^{2} + Y^{2})}{Z^{3}}\right)\dot{s} \\ + &I_{u}\dot{u}_{0} + &I_{v}\dot{v}_{0} \\ + &\left\{I_{u}\frac{(\alpha_{u}X + sY)(X^{2} + Y^{2})}{Z^{3}} + &I_{v}\frac{\alpha_{v}Y(X^{2} + Y^{2})}{Z^{3}}\right\}\dot{k}_{1} \\ &= &-I_{t} \end{split}$$
(A·1)

ただし,

$$\begin{split} a &= I_u \left(\frac{\alpha_u}{Z} + k_1 \frac{\alpha_u (3X^2 + Y^2) + 2sXY}{Z^3} \right) \\ &+ I_v k_1 \frac{2\alpha_v XY}{Z^3}, \\ b &= I_u \left\{ \frac{s}{Z} + k_1 \frac{s(X^2 + 3Y^2) + 2\alpha_u XY}{Z^3} \right\} \\ &+ I_v \left(\frac{\alpha_v}{Z} + k_1 \frac{\alpha_v (X^2 + 3Y^2)}{Z^3} \right), \\ c &= -I_u \left\{ \frac{\alpha_u X + sY}{Z^2} + k_1 \frac{3(\alpha_u X + sY)(X^2 + Y^2)}{Z^4} \right\} \\ &- I_v \left\{ \frac{\alpha_v Y}{Z^2} + k_1 \frac{3\alpha_v Y (X^2 + Y^2)}{Z^4} \right\} \end{split}$$

である.

(平成 16 年 10 月 8 日受付, 17 年 2 月 7 日再受付)



梅田和昇(正員)

1989 東大・工・精密機械卒,1994 同大 大学院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 学科専任講師,1998 より同助教授,現在 に至る.ロボットビジョン,距離画像処理, ヒューマン・インタフェースの研究に従事.

画像の認識・理解シンポジウム 2004 MIRU 長尾賞受賞.日本 ロボット学会,精密工学会,日本機械学会,IEEE 等各会員.



Guy Godin

Guy Godin is a senior researcher with the Visual Information Technology Group of the Institute for Information Technology at the National Research Council of Canada. His research interests include 3D computer vision

and image analysis, shape and reflectance modeling, and interactive visualization. He was program co-chair of the Fourth International Conference on 3D Imaging and Modeling in 2003. He holds degrees in electrical engineering from École Polytechnique de Montréal and McGill University. He is a member of IEEE and ACM.



Marc Rioux

Marc Rioux is a Pricipal Research Officer of the Institute for Information Technology at the National Research Council Canada. His present interests are in the development of threedimensional digitizing, modeling and

display for machine vision, optical dimensional inspection and visual communication in the Visual Information Technology Group. He received his bachelor's degree in engineering physics in 1971 and a master's degree in physics in 1976, both from Laval University. He worked five years on CO_2 laser development and applications and two years in infrared holography and joined the National Research Council in 1978 to work on 3D digitizing.