SIFT と勾配拘束の組み合わせによる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

猪股 亮† 高浜 徹† 寺林 賢司†† 梅田 和昇†† ギーゴダン†††

┆ 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

†† 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

┼┼┼ 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: *†*{inomata,takahama}@sensor.mech.chuo-u.ac.jp, *††*{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, SIFT と勾配拘束の組み合わせによる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.本研究 では,まず,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.そして, SIFT を用いてレジストレーションが収束した後で,勾配拘束を用いたレジストレーションを行う.このとき,境界 付近は密に,テクスチャ内部は疎に抽出する.この処理により,境界付近における精度を向上させる.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す.

キーワード SIFT,勾配拘束,距離濃淡画像,3次元幾何モデル,カラー画像,レジストレーション

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]~[3]. これらのプロジェ クトでは,高精度かつ解像度の高い三次元モデルが生成 されている.このような現実感の高い三次元モデルを生 成する際に,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よく用いられている.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.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[4] 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1つのアプローチとし て,統計的手法が提案されている.Violaら[5]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ている.Corsini ら[6]は,Violaら[5]の手法を拡張し,相互情報量を最 大化する枠組みにおいて,複数の幾何学的な特性を利用 してレンダリングを行うことで,高速に位置合わせを行 う手法を提案している.

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も提案されている[7]~[9].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[10]~[13].Lenschら[10]は,ま ず3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 3次元幾何モデルの位置合わせ誤差を収束させている. Iwakiriら[13]は,三次元物体の二次元投影シルエットか ら作成したプロファイルを階層的にマッチングすること により,高速に三次元形状に撮影画像をテクスチャとし て与える方法を提案している.しかし,これらの手法は, 幾何形状が単純なモデルの場合,位置合わせが困難とな る可能性がある.

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.椛島ら[14]は,テ クスチャ画像から抽出した稜線と平面領域を3次元幾何 モデルへ逆投影している.野田ら[15]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.



(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

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-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2次元画像との類似性を利用している.Boughorbel ら[16]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[17]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.し かし,この手法では,収束が不安定であり,処理が遅い という問題がある.

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[18]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.またElstrom ら[19]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 [20] 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) [21] を利用している.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った後, RANSAC [22] 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ため,内部パラメータを別に求める 必要がある.

猪股ら [23] 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 歪曲収差に関するパラメータも推定している.この手法 では,まず距離濃淡画像に対して輝度補正[24]を行い, GrabCut [25] を用いてカラー画像中の背景領域を除去す ることで,距離濃淡画像とカラー画像の類似性を高くす る.次に,SIFT 特徴量を抽出して両画像の対応点付け を行った後,柔軟な誤対応除去を行う.そして,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 を更新している.しかし,この手法では鏡面反射が強い モデルを用いた場合や視点変化が大きく外部パラメータ の回転行列が真値から大きくはずれる場合, SIFT によ り得られる正しい対応点が減少し,境界付近における精 度が低下してしまう.テクスチャマッピング後の三次元 モデルの色情報に影響を及ぼすため,境界付近の精度は より高いほうが望ましい.

本論文では,SIFT を用いてレジストレーションが収 束した後に勾配拘束を用いることでさらに高精度なレジ ストレーションを実現する手法を提案する.このとき, SIFT を用いる場合と勾配拘束を用いる場合とで,一致 度の評価関数を変える.また,全投影点ではなく,境界 付近は密に,テクスチャ内部は疎にオプティカルフロー を抽出する.さらに,柔軟な誤対応除去を改良し,より 高速に誤対応除去を行う.以上の処理により,境界付近 における精度を向上させる.

提案手法では,まず距離濃淡画像とカラー画像に対し て誤対応低減のための前処理 [23] を行い,両画像の類似 性を高くする.次に,SIFTを用いて両画像の対応付け を行った後,改良した柔軟な誤対応除去を行う.そして, 猪股らが導出した拘束式[23]を解き,得られる修正量を 用いてカメラの外部パラメータと内部パラメータ(以下, 2 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)と歪曲収差のパラメータを更新する.最後に,境界 付近に重みをつけて勾配拘束を算出し,梅田らが導出 した拘束式[17]を解くことで,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.

本論文の構成は以下の通りである.第2章で提案手法 の概要,第3章で改良した柔軟な誤対応除去について 述べる.また,第4章では,勾配拘束を用いたレジスト レーション手法について述べる.そして,第5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6章で 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

2.1 レジストレーション手法の流れ

距離濃淡画像・距離画像を持つ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



図 2 2D/3D レジストレーション処理の流れ

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における,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.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 と勾配拘束を利用する.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,SIFT または勾配拘束 による手法を適用し,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.

2.2 反復演算時の工夫

本節では,最適化問題を解く上で,カメラパラメータ と歪曲収差のパラメータを収束させるために行った処理 について述べる.猪股らが導出した拘束式[23]では,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 パラメータを算出可能である.また本手法では,最後に 勾配拘束を用いたレジストレーションを行う.これらの ことを利用し,反復演算を行う際にステージ1~4で段 階的に更新する.表1に,ステージ1~4における,拘束 式,更新するパラメータ,収束を判定する一致度を示す.

まず,SIFT を用いて猪股らが導出した拘束式[23] を 解き,段階的にパラメータを更新する(ステージ1~3). 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(デジタルカメラのズームレンズの

表 1 各ステージにおける特徴量と一致度				
ステージ	1	2	3	4
拘束式	SIFT	による	2D/3D 射影拘束	勾配拘束
外部パラメータ				
内部パラメータ	-			
歪曲収差	-	-		
両画像の一致度	NCC	NCC	NCC	投影誤差

焦点距離の値を CCD の 1 ピクセルの推定寸法で割った 値 α_u, α_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,カメラパラメータと歪曲収差のパラメー タを更新する.また,収束の判定には両画像の一致度を 用いており,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一致度を得たフレームで のパラメータ値を採用して次のステージに進む.ステー ジ 1~3 での両画像の一致度の評価には,正規化相互相 関 (NCC)を用いる.このときの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.

次に,勾配拘束を利用して,カメラパラメータと歪曲 収差のパラメータを更新する(ステージ4).この処理に より,SIFTのみ用いている猪股らの手法[23]よりも,境 界付近における精度が向上できる(詳細な説明は4章で 述べる).また,ステージ4での両画像の一致度の評価に は,投影誤差を用いる.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,GrabCut を利用する.1節で述べた通り,誤対応低減の前処理と して,GrabCutを用いてカラー画像中の背景領域を除去 している.これを利用し,カラー画像のシルエットを生 成する.距離濃淡画像のシルエットは,距離画像が持つ 3D 座標を用いて,パラメータ更新前に生成する.

3. 改良した柔軟な誤対応除去

距離濃淡画像とカラー画像の対応付けにおいて,多 くの誤対応が発生する.この問題に対して,M推定や RANSACなどが用いられている[18][20].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.また,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[23]を行う.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.

柔軟な誤対応除去において,猪股ら [23] は RANSAC を用いている.本研究では,RANSACの代わりに,より 処理時間の短縮が可能な PROSAC (Progressive Sample Consensus) [26] を用いる . PROSAC では, マッチング 信頼度 [23] を利用し, サンプリング回数を減らすことに より, 処理時間を短縮する.

本手法では, PROSACを適用する前に, 2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.

3.1 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.SIFT のスケール情報による誤対応除去は 多くの研究で用いられる[27].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 いと考えられるため,閾値処理により誤対応除去を行 う[23].

3.2 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,類似度 が大きいほど,高くなるようなマッチング信頼度を定義 し,そのマッチング信頼度を用いて誤対応の除去を行う.

まず, Bhattacharyya 距離を利用して, 濃淡情報の類 似度 *S* を定義する.次に,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 (1)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.

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

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,SIFT キーポイントを中心として,一辺 (3.0 * s') 画素の矩形領域で類似度 S を算出する.s' は, SIFT 特徴量のスケール情報である.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 Bhattacharyya 距離 を利用して,類似度 S を求める.そして,式(1)より対 応点間のマッチング信頼度 P を算出し,閾値処理により 誤対応を除去する [23].

3.3 PROSAC

3.1 節と 3.2 節の誤対応除去を行った後,猪股ら [23] は RANSAC を用いているが,本手法では RANSAC の代 わりに PROSAC を適用する.

RANSAC では, 文献 [22] の回数のランダムなサンプ リングを行えば, ある一定以上の確率で正しい解を得る ことが保証されている.このとき, 誤対応の割合が増加 するに従い, 取り出すサンプルの数を増やす必要がある. すなわち, 視点変化が大きいなどから正しい対応点の候 補が少ない一方で誤対応の候補が多い場合には,正しい 対応点を得る確率を保証するために,非常に多くの回数 のサンプリングと当てはめ度のチェックが必要となる. ただし,多くのタスクでは,そのタスク固有の事前知識 が存在することが多い[28].

本研究では、サンプリング回数による処理時間が増加す る問題を解決するため、PROSACを用いる.RANSAC では、全く知識のない状態でランダムにサンプルを抜き 出して当てはめ度をチェックしていた.本手法では、3.2 節で算出したマッチング信頼度が高い対応点から取り出 すことにより、サンプリング回数を減らし、処理時間を 短くする.なお、PROSAC は閾値を緩くして適用する.

以上の柔軟な誤対応除去を行うことで,正しい対応点 をなるべく残しつつ,誤対応を除去できる.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.

4. 勾配拘束を用いたレジストレーション

SIFT のみ用いてレジストレーションを行う場合,鏡 面反射が強いモデルや視点変化が大きい場合などにおい て,得られる正しい対応点が減少するため,境界付近に おける精度が低下する.この問題を解決するため,本研 究では,SIFTを用いてレジストレーションが収束した 後,勾配拘束によるレジストレーションを行う.

勾配拘束によるレジストレーション手法の流れは,図 2に示した通り,両画像の一致が十分と判定できるまで, 勾配拘束を算出した後,勾配拘束による拘束式[17]を解 き,カメラパラメータと歪曲収差のパラメータを更新す る.このときの両画像の一致度の評価には,投影誤差を 用いる(表 1).これは,NCCを用いるよりも,両画像の シルエットを比較している投影誤差の方が,境界付近に おける精度向上をより直接的に判定できるからである.

また,勾配拘束の算出には,Lucas-Kanade法[29]を 用いる.このとき,境界付近は密に,テクスチャ内部は 疎に抽出する.境界付近かどうかの判定には,まず距 離濃淡画像のシルエットに対して輪郭追跡を行い,シル エットの境界線を抽出する.そして,この境界線を利用 し,境界付近またはテクスチャ内部かを判定する.

ただし, SIFT を用いてレジストレーションが収束した 後, 勾配拘束によるレジストレーションを行っているため, 梅田ら [17] の手法と異なり, 微分画像や Coarse-to-fine アプローチは用いない.

これらの処理により,処理時間を大幅に増加せずに, 境界付近における精度を向上させることができる.

5. 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,5.3節では,柔軟な 誤対応除去において,RANSACと処理時間の比較を行 い,PROSACの導入による効果を示す.次に,5.4節で





(a) back lateral

eral (b) top lateral 図 3 対象物体: cat





(a) front lateral(b) back lateral図 4 対象物体: shiny crane

は,提案手法を用いて同一物体において実験した結果を 示し,梅田ら[17]の手法と,猪股らの手法[23]との比較 を行い,境界付近における精度への効果を示す.そして, 5.5節では,視点変化に応じたレジストレーション結果 を示し,提案手法の有用性や特徴を示す.

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 [30] を使用した.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.

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 3008×2000 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,70.0mm/7.9 μ mより,8861とした.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 μ 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ともに0とした.

手法の実装には, Intel 社製 Core i7 (2.93GHz) を搭載 した PC と, NVIDIA 社製 GPU (GeForce GTX580) を 使用した.GPUは, SIFT 特徴量の記述と対応づけに用 いた.



図 5 距離濃淡画像を持つ全方位幾何モデル: cat



図 6 距離濃淡画像を持つ全方位幾何モデル: shiny crane

表 2 全方位幾何モデル				
対象モデル	取得枚数	計測点		
cat	15	183016		
shiny crane	87	409057		

表 3	サンプリング回数と処理時間の関係
-----	------------------

誤対応率 [%]	サンプリング回数	処理時間 [ms]
30	17	136.5
40	29	140.1
50	52	148.8
60	105	170.8
70	253	230.2
80	861	477.4

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を猫の置物(図1,図3),光沢感 のある鶴の置物(図4)とし,複数枚の距離画像および補 正後の距離濃淡画像を統合した全方位幾何モデルを図5, 図6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2に示す.統合処理はInnov-METRIC 社製の PolyWorks [31] を用いて行った.対象物 の大きさは,猫の置物が w59mm×h112mm×d32mmで, 光沢感のある鶴の置物が w44mm×h175mm×d64mm である.

5.3 PROSACの導入による処理時間への効果

抜き出すサンプルの個数を3とした時の,99.9%の確率で正しい対応点を得るのに必要なサンプリング回数, 誤対応の割合,処理時間の関係を表3に示す.

表3より, 誤対応率が低い方が, 処理時間を短縮でき

表 4 提案手法を用いたレジストレーション結果

カラー画像	処理時間 [s]	反復回数	NCC	投影誤差 [pixel]
図 1 (b)	74.5	15	0.8016	9263
🕱 3 (a)	52.8	12	0.7495	7044
図 3 (b)	40.4	11	0.7791	8065
🛛 4 (a)	77.4	17	0.7526	11900
図 4 (b)	44.6	12	0.6431	10971

表 5	梅田らの手法	[17]	を用いたレジストレーション結果	

カラー画像	処理時間 [s]	反復回数	NCC	投影誤差 [pixel]
🛛 1 (b)	232.6	37	0.7617	15529
🕱 3 (a)	170.4	30	0.7109	11165
図 3 (b)	-	-	-	-
🗷 4 (a)	162.9	29	0.5704	13432
翠 4 (b)	141.4	26	0.5695	11363

表 6 猪股らの手法 [23] を用いたレジストレーション結果

カラー画像	処理時間 [s]	反復回数	NCC	投影誤差 [pixel]
図1(b)	28.0	10	0.8131	14321
🕱 3 (a)	32.0	11	0.7554	9962
図 3 (b)	31.2	13	0.7847	12512
🛛 4 (a)	29.2	11	0.7815	12506
🛛 4 (b)	27.5	8	0.6354	13893

ることが分かる.視点変化量などにより異なるが,今回の実験では,約20%ほど誤対応率を減らすことができた.そのため,RANSACよりも,効率的にサンプリングを行う PROSAC を用いた方が良いことが分かる.

5.4 レジストレーション実験結果

提案手法,梅田らの手法[17],猪股らの手法[23]によ るレジストレーション結果を,それぞれ表4~6に示 す.なお,実験結果の評価として示している投影誤差は, GrabCut ではなくマニュアルで生成したカラー画像の シルエットと距離濃淡画像のシルエットが重複していな い画素数である.また,図7~10に,対象物体を猫の置 物(図1)とした時の,レジストレーション結果の一例を 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,両画像が重 複していない画素を表している.

まず,NCCと投影誤差について述べる.表4~6より, 提案手法を用いた場合が,最も投影誤差が小さいことが 分かる.NCCについては,梅田らの手法[17]より大き くなっているものの,図4(b)以外は,猪股らの手法[23] の方が大きくなった.

これは,2章で示した通り,両画像の一致度の判定に 投影誤差を用いているからである.ただし,実用上の精 度としては,NCCよりも投影誤差の方が重要であるこ とから,投影誤差が小さい方が良いと考えられる.また, 境界付近における精度が向上しているか判定するには, 投影誤差の方が有効であることが,図7~10より分かる (レジストレーション結果の微小な差が判別できる).さらに,梅田ら[17],猪股ら[23]は,両画像の一致度の判定にNCCのみ用いているが,提案手法では,勾配拘束を使用するステージ(ステージ4)での収束の判定に投影誤差を用いている.

以上より,提案手法の方が,高精度なレジストレーションが実現できていることが分かる.特に,境界付近における精度が向上した.

次に, 収束の安定について述べる.図4(b)では,猪 股らの手法 [23] よりも,梅田らの手法 [17] の方が投影誤 差が小さくなった.これは,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.その結果,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.一方, 提案手法では,SIFTを用いてレジストレーションが収束 - した後で , 勾配拘束によるレジストレーションを行って - いる.そのため,鏡面反射が強く出て,テクスチャが少 ない場合でも,投影誤差が小さくすることができる(表 4~6).また,図3(b)では,梅田らの手法[17]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わせが失 敗し,勾配拘束による拘束式が計算できなかったためで ある.一方,提案手法では,SIFTを用いて高精度な対 応点マッチングを行っているため,上面においても収束 した.

以上より,提案手法は,テクスチャが少ない場合や鏡 面反射が強い場合においても,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.

5.5 視点変化に対する効果

次に,対象物体を猫の置物(図1)とした時の,視点変 化に応じたレジストレーション結果を,図11に示す.図 11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,解が発 散した場合には,グラフに表記しない.





(a) Image plane (b) Pro 図7 初期投影時

(b) Projection error



(a) Image plane (b) Projection error 図 8 提案手法を用いたレジストレーション結果



(b) Projection error

図 9 梅田らの手法 [17] を用いたレジストレーション結果



(a) Image plane (b) Projection error 図 10 猪股らの手法 [23] を用いたレジストレーション結果

図 11 より,梅田らの手法 [17] では 20° までしか収束 しなかったが,猪股らの手法 [23] 及び提案手法では 35° まで収束した.また,全ての視点変化量において,提案 手法を用いた場合が,最も投影誤差が小さくなっている ことが分かる.NCC については,猪股らの手法[23]の 方が高い場合もあるが,5.4節で述べた通り,実用上の 精度としては,投影誤差の方が重要である.

以上より,提案手法が視点変化に対するロバスト性が 高く,視点変化が大きい場合でも高精度なレジストレー ションができることが分かる.

6. おわりに

本論文では, SIFT と勾配拘束を利用した 2D/3D レジ ストレーション手法を提案した.SIFT を用いたレジス トレーションを行った後, 勾配拘束によるレジストレー ションを行うことで,境界付近におけるレジストレー ション精度を向上させた.このとき,SIFTを用いる場 合と勾配拘束を用いる場合とで,一致度の評価関数を変 えた.また,全投影点ではなく,境界付近は密に,テク スチャ内部は疎にオプティカルフローを抽出した.以上 の処理により,視点変化が大きい場合やテクスチャが少 ないモデルにおいても,高精度なレジストレーションを 実現した.今後の課題として,勾配拘束を利用したレジ ストレーション (ステージ4)における,処理時間の短縮 が挙げられる.

> 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.
- 池内 克史, 倉爪 亮, 西野 恒, 佐川 立昌, 大石 岳史, [2]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] F. Bernardini and H. Rushmeier, "The 3D Model Acquisition Pipeline," Proc. of Eurographics 2000.
- [4]K. Yoshida and H. Saito, "Registration of Range Image Using Texture of High-Resolution Color Images," IAPR Workshop on Machine Vis. Applications (MVA02), pp.150-153, 2002.
- [5] P. Viola and W.M. Well, "Alignment by maximization of mutual information," Int. J. Comput. Vis., vol.24, no.2, pp.137-154, 1997.
- [6] M. Corsini, M. Dellepiane, F. Ponchio, R. Scopigno, "Image-to-Geometry Registration: a Mutual Information Method exploiting Illumination-related Geometric Properties," Comput. Graphics Forum, vol.28, no.7, pp.1755-1764, 2009.
- I. Stamos and P.K. Allen, "Integration of range and [7]image sensing for photorealistic 3D modeling," Proc. of ICRA, pp.1435-1440, 2000.
- I. Stamos and P.K. Allen, "Automatic registration of [8] 2D with 3D imagery in urban environments," Proc. of ICCV, pp.731-737, 2001.
- L. Liu and I. Stamos , "Automatic 3D to 2D Reg-[9] istration for the Photorealistic Rendering of Urban Scenes," Proc. of CVPR, vol.2, pp.137-143, 2005
- [10]H.P.A. Lensch, W. Heidrich and H.P. Seidel, "Automated texture registration and stitching for real world models," Proc. of Pacific Graphics 2000, pp.317-326, 2000.
- [11] S. Lavallee and R. Szeliski, "Recovering the position and orientation of free -form objects from image contours using 3D distance maps," IEEE Trans. PAMI, vol.17, no.4, pp.378-390, 1995.
- P.J. Neugebauer and K. Klein, "Texturing 3D models [12]of real world objects from multiple unregistered photographic views," Proc. of Eurographics'99, pp.245-256, 1999.
- [13] Y. Iwakiri and T. Kaneko, "Pc-based realtime texture



図 11 梅田らの手法 [17], 猪股らの手法 [23] と比較した, 視点変化への効果

painting on real world objects," Proc. of Eurographics 2001, vol.20, pp.105-113, 2001.

- [14] 椛島 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, 2008.
- [15] 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.
- [16] F. Boughorbel, D. Page, C. Dumont and M.A. Abidi, "Registration and integration of multi-sensor data for photo-realistic scene reconstruction," Proc. of Applied Imagery Pattern Recognition, pp.74-84, 1999.
- [17] 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.
- [18] R. Kurazume, K. Nishino, Z. Zhang and K. Ikeuchi, "Simutaneous 2D images and 3D geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute," Proc. of Fifth ACCV, pp.99-106, 2002.
- [19] M.D. Elstrom and P.W. Smith, "Stereo-based registration of multi-sensor imagery for enhanced visualization of remote environments," Proc. of ICRA, pp.1948-1953, 1999.
- [20] J. Bohm and S. Becker, "Automatic Marker-Free Registration of Terrestrial Laser Scans using Reflectance Features," Proc. of 8th Conf. on Optical 3D Measurement Techniques, pp.338-344, 2007.
- [21] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scaleinvariant keypoints," Int. J. Comput. Vis., vol.60, no.2, pp.91-110, 2004.
- [22] M.A. Fischler and R.C. Bolles, "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applica-

tions to image analysis and actuomated cartography," Communications of the ACM, vol.16, no.24, pp.381-395, 1981.

- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] O. Chum and J. Matas, "Matching PROSAC Progressive Sample Consensus," Proc. of CVPR, Vol.1, pp.220-226, 2005
- [27] 小川 陽子,島田 伸敬,白井 良明,"ステレオ視と SIFT 特徴点追跡を用いた移動ロボットのための環境地図生 成",日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007 講演論文集,2A2-F08,2007.
- [28] 足立 淳,佐藤 淳, "未校正カメラによる自車両位置推 定",信学論 (D-II), vol.J89-D-II, no.1, pp.74-83, 2006.
- [29] B.D. Lucas and T. Kanade, "An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision," Proc. of DARPA Image Understanding Workshop, pp.121-130, 1981.
- [30] ShapeGrabber: "http://www.shapegrabber.com".
- [31] PolyWorks: "http://www.innovmetric.com".