

3次元物体の複数の形状特徴量を用いたグローバル位置合わせ手法

澤井 陽輔[†] 岩村 昂[†] 石川 雅浩^{††} 中島 章博^{†††} 古川 亮^{††††}

小野 智司[†] 中山 茂[†] 川崎 洋[†]

[†] 鹿児島大学院理工学研究科 〒 890-0065 鹿児島市郡元 1 丁目 21-40

^{††} 東京工業大学 学術国際情報センター 〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田 4259-S1-17

^{†††} セイコーエプソン株式会社 機器ソフトウェア企画設計部 〒 399-0785 長野県塩尻市広丘原新田 80

^{††††} 広島市立大学情報科学部 〒 731-3194 広島市安佐南区大塚東 3-4-1

E-mail: †{sc107023,sc106007,ono,shignaka,kawasaki}@ibe.kagoshima-u.ac.jp,

††isikawa@cgv.ics.saitama-u.ac.jp, †††Nakashima.Akihiro@exc.epson.co.jp, ††††ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp

あらまし 近年、3次元形状の計測や取得方法は大幅な進歩を遂げており、3次元オブジェクトの利用は増加の一途にある。一方、レンジセンサを用いた3次元計測は一度に全周形状を取得できないため、計測後は複数のオブジェクトの位置を合わせる必要がある。しかし、石膏像のようなテクスチャのないオブジェクトの場合、安定した特徴点が得られず、位置合わせが困難なため、現状ではそれらオブジェクトの全周形状復元は手作業に頼っている部分が多い。そこで、本論文では高精度な位置合わせを行うために、複数の形状特徴を用いたグローバルな位置合わせ手法を提案する。

キーワード 3次元情報処理、画像処理、初期位置合わせ、スピンイメージ

1. はじめに

デジタルアーカイブやCADのモデリングなどのために、物体の全周形状取得が必要とされる機会が増えてきており、これを簡易かつ高精度に実現する手法が求められている。このような全周形状を簡易に取得する方法として、Computer Visionにおいて多くの研究が行われており、代表的な手法としては、多視点から撮影したキャリブレーション済みの画像群を用いて復元する手法[1]や、ビデオカメラなどで全周を撮影し、SfMにより復元する手法がある。前者は高精度な復元が可能であるが、精度の高いキャリブレーションは未だ困難であり、光源や物体材質の影響により処理が不安定になることがある。後者は、ビデオカメラなどで自由に撮影するだけで済むため計測は簡易となるものの、石膏彫像のようなテクスチャのないオブジェクトの場合には、安定した特徴点が得られず、正しく形状復元することが難しい。また、密な対応点が得られないことから、密な形状復元も困難である。このような理由から、通常このような場合、レンジセンサを用いて複数方向からスキャンし、その後Iterative Closest Point(ICP)などで位置あわせすることが良く行われている。しかし、ICPは十分に近い初期位置が与えられることを前提としており、初期位置合わせが十分でない場合、適切な収束解が求まらない。

そこで、本論文ではICPに用いるための初期位置合わせとして、複数の形状特徴を用いる手法を提言する。具体的にはShape Indexによる曲率ベースのローカル特徴抽出と、そうして抽出された特徴点に関してスピンイ

メージによる特徴量抽出の基づいた対応点探索を行う。提案手法を物体の全周を複数回計測した3次元データに適用したところ正しい初期位置合わせに成功し、引き続きICPによる高精度レジストレーションを行うことで、ほとんどずれのない全周形状を得ることができた。

2. システム構成

本論文では、3次元計測システムとして、プロジェクタとカメラを1台ずつ用いて空間コード化法によるアクティブステレオ方式の計測システムを用いる(図1)。

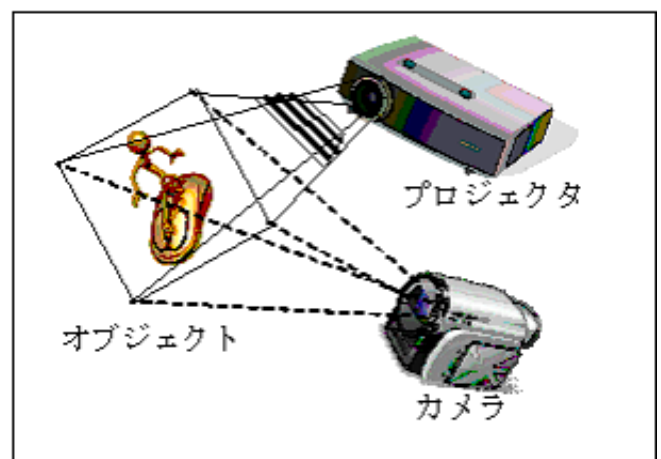


図1 プロジェクタ・カメラシステム

計測には、オブジェクトに対してプロジェクタとカメラを向け、プロジェクタから図1のようにパターンを複数投影しながら、撮影を行う。通常的空間コード化法は、

縦パターンを投影し，エピポーラ拘束によって対応点を探索するが，本論文では，縦パターンに加えて横パターンを投影して撮影することで，密な対応点を獲得し，3次元形状を復元する [16] [17]．また，本論文ではオブジェクトの撮影時にプロジェクタとカメラの配置を自由に変更しながら撮影する．プロジェクタ・カメラ間の校正は自己校正か校正儀を用いてを行う．また，本論文ではより高精度な形状情報を獲得するために空間コード化法と位相シフト法 [11] を併用することとした．位相シフト法を用いることで，サブピクセル精度の対応点が獲得できより高精度な形状情報を獲得することが可能となる．

3. 関連研究

距離画像の位置合わせには，計測時の大きく位置の離れた状態からオブジェクト同士が重なり合う程度まで合わせる初期位置合わせと，その後の精密に位置を合わせる2つの手法に分類される．精密な位置合わせについては，ICP アルゴリズムが良く用いられており高精度な位置合わせが期待できる．しかし，ICP アルゴリズムは十分な精度の初期位置合わせを前提としており，これが不十分な場合，正しい解が得られない．

初期位置合わせについては，不変特徴量によるマッチングが熱心に研究されており，曲率を用いて大まかな位置合わせを行う手法 [3] [4] やスピンイメージを用いた手法 [5] などが挙げられる．これら複数距離データの位置合わせについては [6] が簡潔にまとめられている．これらは全て距離画像間の対応点が不明な場合を対象としているが，計算量やデータサイズが非常に大きかったり安定性に問題がある．対応点が得られれば特異値分解 (SVD) などを用いて剛体変換行列を求めることができる [2] ．

一方で，3次元画像の曲率と Scale Invariant Feature Transform (SIFT) [7] 特徴量を用いた初期位置合わせが提案されている [8] ．SIFT 特徴量はスケール，回転，光源に頑健で強力な特徴量として多くの分野で利用されている．しかし，視点の位置が大きく異なる場合，対応点の探索が困難であるという問題があった．そこで本論文では，曲率と SIFT 特徴量によるローカル特徴量とグローバルな特徴量であるスピンイメージを組み合わせて効率よく距離画像間の対応点を探索し，初期位置合わせを与える手法を提案する．

4. 提案手法

4.1 Shape Index を用いた特徴点抽出

テクスチャのない計測データとして図2のような石膏像を考える．この場合，SIFT によって対応点は検出されるが，テクスチャの多い自然画像のように信頼できる対応点の検出は難しい．このため画像以外の情報を用いる方法が多く提案されており，良く用いられる情報として曲率がある．曲率は局所的な形状情報が得られるため3次元画像では良く用いられる特徴量である．曲率は，

法線や pixel depth よりも雑音の多い距離画像でも比較的信頼性が高い．



図2 石膏像

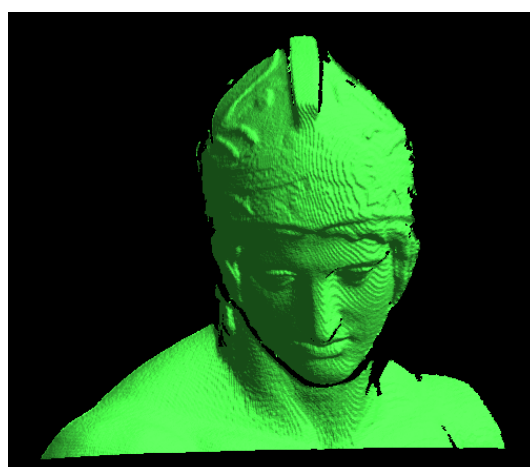


図3 3D オブジェクト



図4 Shape Index 画像

3次元形状の曲率を求める場合，主曲率からガウス曲率や平均曲率を計算し領域分割や特徴点探索を行うが，本論文では曲面の変化比を用いる．また，主曲率の計算は2次元曲面当てはめにより求めることとした．当てはめる2次元曲面は，式(1)のような2次多項式で表される．

$$h(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 \quad (1)$$

この時 \mathbf{a} は 2 次曲面を定めるパラメータである．最適な \mathbf{a} は式 (2) によって求まる．

$$\mathbf{a} = (\mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{h} \quad (2)$$

この時， \mathbf{a} ， \mathbf{h} ， \mathbf{X} は，それぞれ式 (3)，式 (4)，式 (5) のようになる． \mathbf{h} は距離値ベクトルになる．

$$\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_6)^T \quad (3)$$

$$\mathbf{h} = (h_1, \dots, h_6)^T \quad (4)$$

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_N & y_N & x_N^2 & x_N y_N & y_N^2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

主曲率を形状情報として扱う場合，ガウス曲率と平均曲率を用いて領域分割 [10] する手法や平均曲率が 0 であるような曲面を用いる手法 [4] など様々な扱い方が考えられる．本研究では，高い精度で特徴抽出が可能な SIFT を利用すると考え，2 次元画像として曲面変化を詳細に表現できる Shape Index を用いる事とした．Shape Index の計算には式 (6) を用いた．

$$S_I = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} * \arctan \frac{k_{max}(i) + k_{min}(i)}{k_{max}(i) - k_{min}(i)} \quad (6)$$

この時， i は対象の点であり， k_{max} は最大曲率， k_{min} は最小曲率を表す．また， S_I は [0, 1] の範囲で求まり，0.5 が曲率 0 を意味する．これを SIFT 特徴量が計算しやすいように [0, 255] に正規化した画像を Shape Index 画像として用いる．また，主曲率から計算する Shape Index 画像は距離値変化に非常に繊細であり，主な特徴となる曲率変化の特徴的な部分に着目するため距離画像を平滑化してから用いている．3D オブジェクト (図 3) から実際に得られた Shape Index 画像を図 4 に示す．

こうして求めた Shape Index 画像に対して SIFT 特徴量を求める．SIFT は特徴点の位置とディクリプタの両方を出力するが，ディクリプタは視点に依存するため本論文では特徴点の位置のみを用いることとした．

4.2 スピンイメージによるグローバルな対応点の推定と初期位置合わせ

4.1 節で Shape Index と SIFT を用いて特徴点があつまっているため，特徴点同士の対応付けを行い，剛体変換パラメータを推定する．この際の剛体変換パラメータは [2] の手法を用いて求めている．具体的には，SIFT で発見した対応点の 3 次元座標を式 (7) のように SVD し， \mathbf{R} を式 (8)， \mathbf{t} を式 (9) により求める．

$$\sum_{i=1}^n p_i p_i'^T = \mathbf{U} \sum \mathbf{V}^T \quad (7)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{U} \text{diag}(1, 1, \det(\mathbf{U}\mathbf{V}^T)) \mathbf{V}^T \quad (8)$$

$$\mathbf{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i - \mathbf{R} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i' \quad (9)$$

この位置合わせ法では 3 つの対応点が正確に求めれば 2 つのオブジェクト間の剛体変換パラメータ \mathbf{R} と \mathbf{t} が求まる．先行研究 [8] では SIFT の特徴量から 3 点をランダムに選択し，その対応点を元実際に剛体変換し，各対応点の二乗誤差が最小となる 3 点の剛体変換パラメータを用いていた．しかし，SIFT を用いた 2 つのモデルの特徴点の対応付けには，対応点として適当でないアウトライヤが多く含まれるため不安定であった．

一方，ロバストな 3 次元特徴量としてスピニメージが提案されている．スピニメージは，注目点と接平面で定義される 2 次元座標系に，他の頂点を射影することで得られ (図 5)，射影点の密度を輝度値に持つ画像である．スピニメージは法線にのみ依存した座標系を用

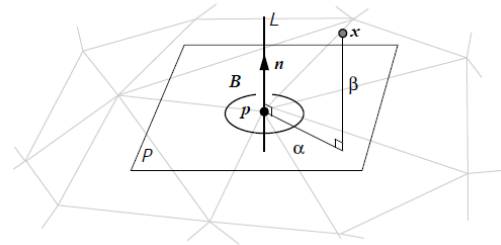


図 5 スピニメージ：注目点を中心とした座標系

いるためモデルの位置姿勢に依存しない．2 次元座標系への射影はスピンマップと呼ばれ式 (10) で定義される．

$$S_o : R^3 \rightarrow R^2$$

$$S_o \rightarrow (\alpha, \beta) = (\sqrt{\|x - p\|^2 - (n \cdot (x - p))^2}, n \cdot (x - p)) \quad (10)$$

P は注目点 o の 3 次元座標， \mathbf{n} は o における法線ベクトルである．ここで得られた $\alpha \beta$ を投票空間の幅であるビンと画像幅により算出し，2 次元配列に投票することによってスピニメージを作成する．

2 枚の距離画像から得られたスピニメージ P, Q の対応付けのために正規化相互相関 R (式 11) を用いてスピニメージ間の類似性を評価する．

$$R(P, Q) = \frac{N \sum p_i q_i - \sum p_i \sum q_i}{\sqrt{(N \sum p_i^2 - (\sum p_i)^2)(N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2)}} \quad (11)$$

ただし， N をスピニメージに含まれるビンの数とし， P, Q どちらのビンも値を持たない場合は R の計算に用いない．これにより二つのスピニメージにおいて重なる領域のみを計算に用いる．

スピニメージを用いた対応点にも適当でないアウトライヤが含まれる可能性がある．そこで，対応点の決定にはロバスト推定を用いることとした．ロバスト推定法

では RANSAC が良く用いられる。しかし、SVD を用いた剛体変換では各対応点が正確に一致することが保障されていない。このため、誤差範囲を求めて閾値処理をする必要があるが、距離画像中の誤差範囲はオブジェクトの大きさや得られた距離画像の情報量によって変化する。そこで、ロバスト推定法の一つである最小メジアン法 (LMedS) を今回は用いることとした。具体的には、各対応点からスピニメージの一致度が高い順に 3 点を選択し、その対応点を元に剛体変換し、各対応点の二乗誤差の中央値が最小となる 3 点の剛体変換パラメータを採用し、初期位置合わせをする。

4.3 ICP による位置合わせ

形状の統合のために、複数の形状を位置合わせするアルゴリズムとして、ICP (Iterative Closest Point) が良く知られている。ICP アルゴリズムは、2 つの形状データが大まかに位置合わせされていることを初期状態とし、形状データの各点間の対応付けと、その対応付けに基づく変換の推定を反復計算することで距離を最小化することにより位置合わせを行う [12]。対応点取得方法を、point-to-point から point-to-plane で行う手法も提案されている [13], [14]。また、2 つの形状からではなく、複数の形状を同時に位置合わせする手法も提案されている [15]。複数の形状を同時に位置合わせする場合、2 形状間を順に位置合わせする手法に比べ、蓄積誤差が発生しないというメリットがある。本論文では、後者による同時位置合わせ手法を用いて高精度位置合わせを行った。

5. 実験

5.1 スピニメージと SIFT による手法 [8] との比較

実験に用いた距離画像の石膏像正面の場合を図 5.1 に示す。また、初期位置合わせ前の状態を図 5.1 に示す。図 5.1 の Shape Index を計算し、スピニメージによって対応点を探索した結果を図 5.1 に示す。図 5.1 を用いて位置合わせした結果を図 5.1 に示す。正しく位置合わせが出来ていることが分かる。



図 6 石膏像上部 (左) と下部 (右)

次に、SIFT 特徴量のみを用いた対応点探索 [8] とスピニメージを用いた対応点探索との比較を行った。それ

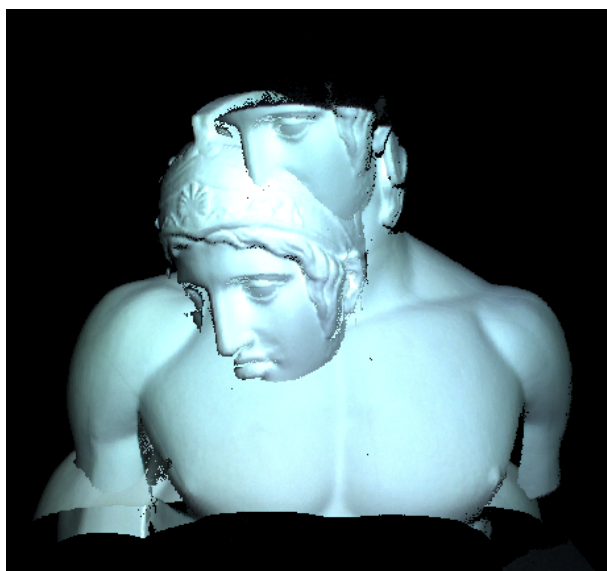


図 7 計測時の位置

ぞれ対応の適応度が高い 10 個体を比較した。SIFT 特徴量のみを用いた対応点の探索結果を図 8 に、スピニメージを用いた対応点の探索結果を図 9 に示す。SIFT 特徴量のみを用いた場合は成功がなかったのに対して、スピニメージを用いた場合 10 個中 7 個正しい対応点が取れている。これは SIFT が 2 次元的な配置に基づく特徴量であるため、視点が変わるとディスクリプタの値が変化してしまうのに対して、スピニメージが形状に基づくグローバルな特徴量のためと考えられる。

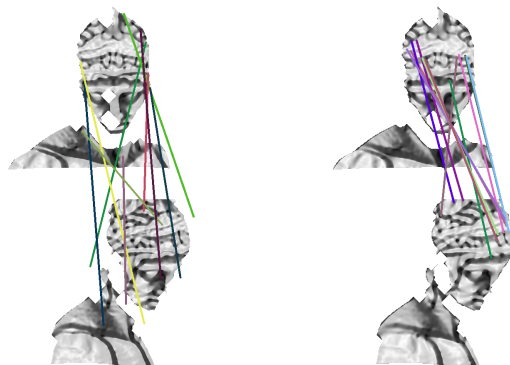


図 8 SIFT 特徴量のみを用いた対応点探索 図 9 スピニメージを用いた対応点探索

5.2 提案手法による全周位置合わせ

最後に提案手法の有効性を確認するために、複数の入力に対してグローバルな位置合わせと、ICP アルゴリズムで高精度な位置合わせを行った。入力には 8 回スキャンを行った。入力データの例を図 12 に示す。提案手法による初期位置合わせ結果を図 13 に示す。また ICP による位置合わせの結果を図 14 に示す。正しく全周形状が得られていることが分かる。

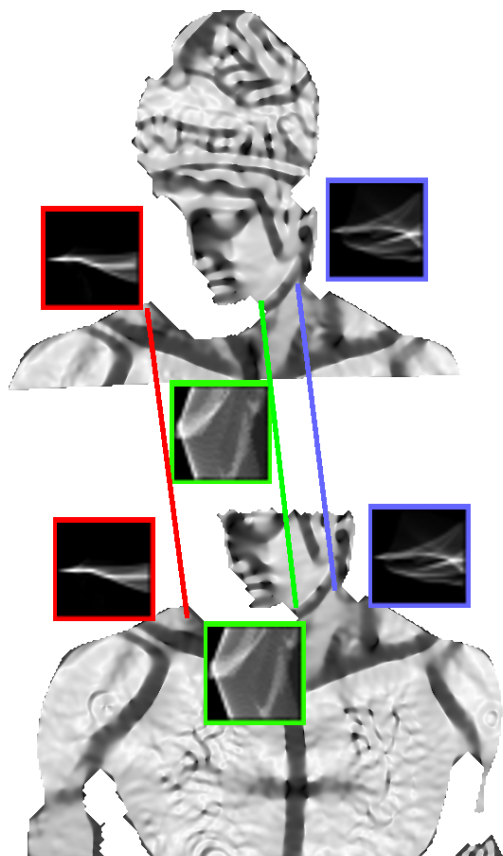


図 10 スピンイメージを用いた対応点結果

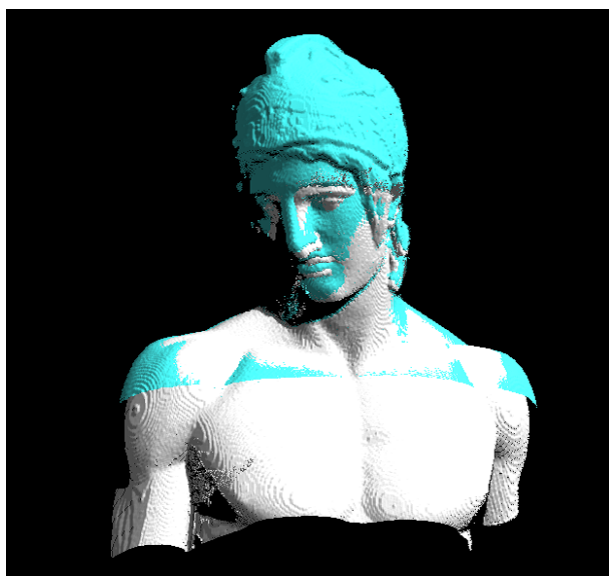


図 11 石膏像の初期位置合わせ結果

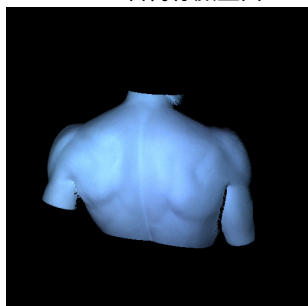
6. 結 論

石膏像のようなテクスチャのない距離画像データの初期位置合わせ法として Shape Index 画像の特徴点をスピンイメージで対応付ける手法を提案した。Shape Index 画像では、石膏像のようにテクスチャのない場合でも SIFT における特徴点が求められる、その点において

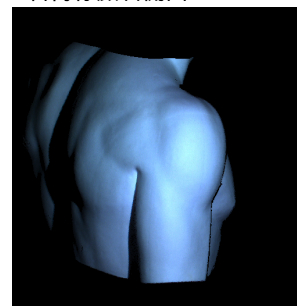


石膏像顔正面

石膏像顔右側面



石膏像背面

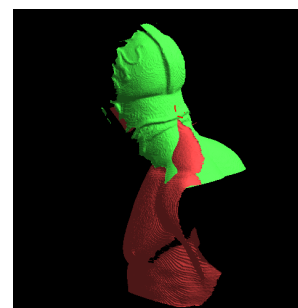


石膏像右側面

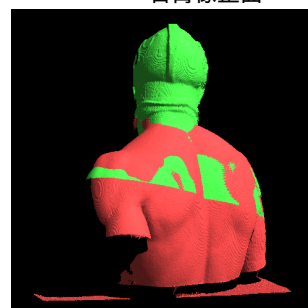
図 12 入力画像



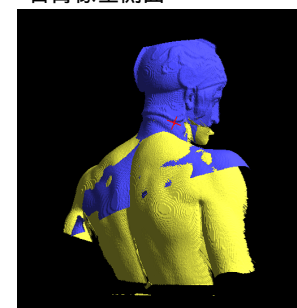
石膏像正面



石膏像左側面



石膏像背面



石膏像右側面

図 13 初期位置合わせ結果

スピンイメージを計算することで高精度な対応付けができることを示した。また、視点変化などによって大きく計測データの見え方が変化した場合に対してもロバストであることを実験により確認した。提案手法を用いて、全周の石膏像の初期位置合わせを行ったところ正しく推定することができ、その結果 ICP により高精度な全周形状を得ることができた。

7. 謝 辞

本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発制度 (SCOPE) ICT イノベーション創出型研究開発

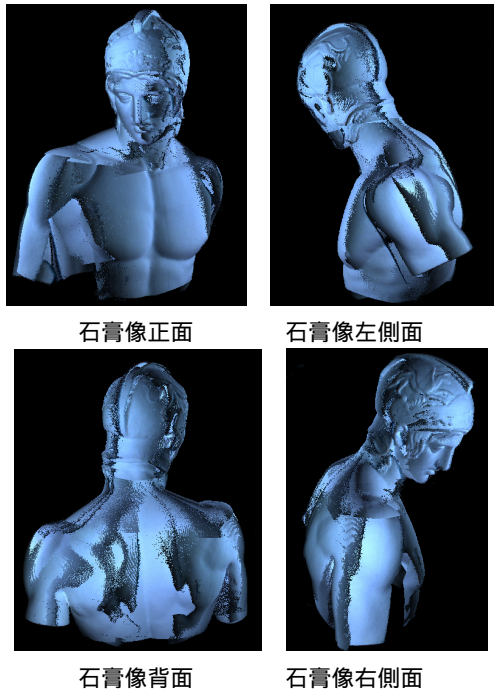


図 14 提案手法による全周形状の位置合わせ結果

(101710002), 文部科学省科学研究費補助金(21200002) および内閣府・最先端・次世代研究開発支援プログラム(LR030)の助成を受けて実施されたものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] Y. Furukawa, J. Ponce, "Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis", IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'07), held in Minneapolis, Minnesota, USA, from June 19th to 21st, 2007.
- [2] Kanatani, K., "Analysis of 3-D rotation fitting", IEEE Transaction of Pattern Analysis and Machine Intelligence, volume 16, pp 543-549.
- [3] Feldmar, J., and Ayache, N., "Rigid, affine and locally affine registration of free-form surfaces", International Journal of Computer Vision, volume 18, number 2, pp 99-119, 1996.
- [4] Krsek, P., Pajdla, T., and Hlavac, V., "Differential invariants as the base of triangulated surface registration", Computer Vision and Image Understanding, volume 87, pages 27-38, 2002.
- [5] Johnson, A. E., and Hebert, M., "Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3d 10 scenes", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, volume 21, number 5, pages 433-449, 1999.
- [6] 増田健, 岡谷(清水)郁子, 佐川立昌, "距離データ処理: 複数距離画像からの形状モデル生成技術", 情報処理学会研究報告(CVIM), pp 105-116, 2004.
- [7] D. G. Lowe, "Object recognition from local scale-invariant features", Proc. of IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), pp 1150-1157, 1999.
- [8] 石川雅浩, 川崎洋, 古川亮, "プロジェクタ・カメラシステムの移動計測による高精度な全周形状復元手法", 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU, パターン認識・メディア理解, 2009.

- [9] 榎本和史, 川崎洋, 古川亮, "プロジェクタ・カメラを用いた3次元計測システムにおける複数形状計測時の誤差最小化による精度向上手法" 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2007), pp. 869-874, 7. 2007.
- [10] Kehtarnavaz, N., and Mohan, S., "A framework for estimation of motion parameters from range images", Computer Vision, Graphics and Image processing, volume 45, pp 88-105, 1989.
- [11] 傳田壮志, 大橋健, 江島俊朗, "位相シフト法を用いた高速な3次元計測手法の提案", 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU, パターン認識・メディア理解, 1999.
- [12] P.J. Besl and N.D. McKay, "A method for registration of 3-d shapes", PAMI, 1992
- [13] Chen, Y. and Medioni, G., "Object modeling by registration of multiple range images", Image and Vision Computing, 1992
- [14] M. Wheeler and Y. Sato and K. Ikeuchi, "Consensus surfaces for modeling 3D objects from multiple range images", Proc. 6th Int. Conf. Comp. Vision, 1998,
- [15] P.J. Neugebauer, "Geometrical Cloning of 3D Objects via Simultaneous Registration of Multiple Range Image" Proc. of the 1997 Int. Conf. on Shape Modeling and Application (SMA '97), 1997
- [16] 古川 亮, 川崎 洋 "Uncalibrated multiple image stereo system with arbitrarily movable camera and projector for wide range scanning" Proceeding of IEEE International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, pp.302-309, 6.2005
- [17] 川崎 洋, 古川 亮, 大澤 裕 "空間コード化法を用いた未校正ステレオシステムによる密な3次元形状復元" 画像の認識・理解シンポジウム予稿集, pp.1268-1275, 7.2005