

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

石川 雅浩[†] 川崎 洋[†] 古川 亮^{††}

[†] 埼玉大学工学部 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

^{††} 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: †{ishikawa,kawasaki}@cgv.ics.saitama-u.ac.jp, ††ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp

あらまし 物体の全周形状の獲得手法として、カメラで全周を撮影し Structure from motion により 3次元復元する手法が良く知られている。しかし、石膏像のようなテクスチャのない物体の場合、安定した特徴点が得られず、高密度・高精度な復元が難しい。一方で、レンジセンサを用いて複数方向から物体を計測し、位置あわせして全周形状を得る手法がある。しかし、レンジセンサが誤差を含む場合、形状に歪みが残り、完全な位置あわせが困難となる。また、詳細な位置あわせは ICP など多くの手法が知られているが、初期位置合わせは未だ容易ではない。そこで、本論文では、高精度な全周形状を獲得するために、プロジェクタ・カメラ方式のレンジセンサを対象とし、センサ誤差を軽減する手法、および、形状特徴を用いた初期位置あ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

Precise entire shape reconstruction method using moving projector and camera system

Masahiro ISHIKAWA[†], Hiroshi KAWASAKI[†], and Ryo FURUKAWA^{††}

[†] Faculty of Engineering, Saitama University SimoOkubo 255, Sakura district, Saitama City, 338-8570 Japan

^{††} Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University Ootuka Higashi 3-4-1, AsaMinami district, Hiroshima-shi, 731-3194 Japan

E-mail: †{ishikawa,kawasaki}@cgv.ics.saitama-u.ac.jp, ††ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp

Abstract In the field of Computer Vision (CV), several solutions are proposed multi view stereo and shape from motion (SfM). However the former technique requires precise calibration, and the latter needs precise feature tracking which is difficult for textureless objects such as plaster figures. Since scanned shapes are inevitably distorted by errors of range sensors, gaps between overlapped surfaces remain even after registration. In this paper, we propose a new method to capture an entire shape with high precision using an active stereo range scanner which consists of a projector and a camera. In addition, we propose the method of initial registration technique by shape-feature information.

Key words 3D Information Processing, Image processing, 3D Rotation Fitting

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、初期位置あわせが十分でない場合、適切な収束解が求まらない。さらに詳細な位置あわせに関してもレンジセンサ自身が誤差を含む場合、全周を位置あわせしようとしても、形状が歪んでいることから、誤差が残ることになる。この時、オーバーラップする領域では、複数の表面が、ギャップを持って重なり合った状態になり、この結果、統合アルゴリズムの失敗や、得られるモデルの精度低下を引き起こす。そこで、ICP に用いるための初期位置あわせとして、形状特徴と SIFT を用いた距離画像の対応点探索法と SfM を用いたギャップの解消法を提案する。

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台づ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)。

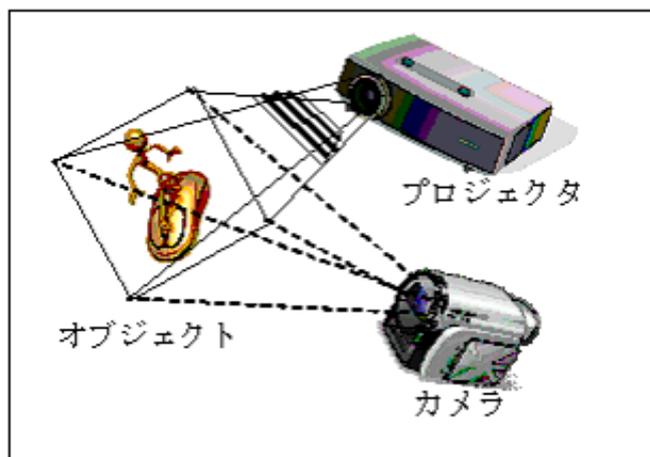


図1 プロジェクタ・カメラシステム

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。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[10]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. 初期位置合わせ

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あ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。

初期位置あわせについては、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あわせを行う手法[3],[4]や Spin Image 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あわせについては[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、対応点が既知の場合は[2]の特異値分解(SVD)を用いた手法が知られている。ただし、この場合は非常に精度の良い対応点が必要となる。

一方で、テクスチャなどの情報が利用可能な場合、画像特徴により位置あわせが可能である。近年、David Lowe[7]によって提案された Scale Invariant Feature Transform (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。そこで本論文では、形状特徴と SIFT 特徴量を組み合わせて効率良く距離画像間の対応点を探索し、初期位置あわせを与える手法について述べる。

3.1 SIFT を用いた初期位置あわせ

プロジェクタ・カメラ方式で形状を獲得した場合、テクスチャも同時に獲得することができテクスチャ情報が信頼できる場合、それを用いて位置あわせするのは容易である。例えば、本棚を計測した図2はテクスチャの輝度や信頼も高いため、図2に対応関係を示した通り、SIFT により十分な精度で対応点を探索することができる。単純に形状復元だけでは図3や図4のように正しい位置関係にはならない。図2で発見された対応点を用いて初期位置あわせを行った結果を図5と図6に示す。この際、採用する対応点の決定には RANSAC を用いている。特に、上からの視点で本棚の奥行きが正しく位置あわせされていることが確認できる。これは、初期位置あわせとしては十分な結果である。

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 で発見した対応点を式1のように SVD し、 \mathbf{R} を式2、 \mathbf{t} を式3により求める。

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

$$\mathbf{R} = \mathbf{U} \text{diag}(1, 1, \det(\mathbf{UV}^T)) \mathbf{V}^T \quad (2)$$

$$\mathbf{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i - \mathbf{R} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i' \quad (3)$$

この時、 p_i は SIFT で求めた剛体変換したい特徴点、 p_i' は変換先の対応点である。

しかし、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、光源の影響や撮影環境の変化によって安定した特徴点が得られず SIFT の対応点検出の信頼性が低下するため、厳密な対応点を必要とする位置あわせには適していない。この



図 2 本棚のテクスチャ



図 3 本棚正面復元結果

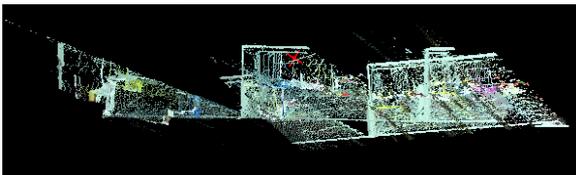


図 4 本棚上部復元結果

ため、テクスチャのないオブジェクトに対しては形状に基づく特徴量を用いた対応点探索が有効と考えられる。

3.2 テクスチャのないオブジェクトの初期位置合わせ

テクスチャのない計測データとして図 7 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本棚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。

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、曲面の変化比



図 5 本棚正面 SIFT を用いた初期位置合わせ結果

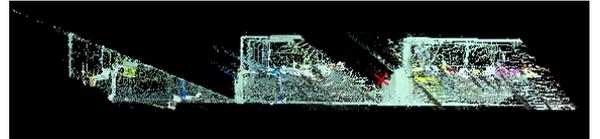


図 6 本棚上部 SIFT を用いた初期位置合わせ結果



図 7 石膏像

を求める際には、shape index がよく用いられている。本研究では、主曲率は 2 次元面当てはめにより求めることとした。当てはめる 2 次元曲面を、式 4 のような 2 次多項式で表す。

$$h(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 \quad (4)$$

この時 \mathbf{a} は 2 次元曲面を定めるパラメータである。最適な \mathbf{a} は式 5 によって求まる。

$$\mathbf{a} = (\mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{h} \quad (5)$$

この時、 $\mathbf{a}, \mathbf{h}, \mathbf{X}$ は、それぞれ式 6、式 7、式 8 のようになる。

$$\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_6)^T \quad (6)$$

$$\mathbf{h} = (h_1, \dots, h_6)^T \quad (7)$$

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_N & y_N & x_N^2 & x_N y_N & y_N^2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

この時、 \mathbf{h} は距離値ベクトルになる。

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 [9] 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、十分な精度が期待される 2 次元 SIFT を扱うため、2 次元 SIFT

で用いる際に曲面変化が詳細に分かり、画像としても扱いやすい shape index を用いる事とした。shape index の計算には式 9 を用いた。

$$S_I = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} * \arctan \frac{k_{max}(i) + k_{min}(i)}{k_{max}(i) - k_{min}(i)} \quad (9)$$

この時、 i は対象の点で、 k_{max} は最大曲率、 k_{min} は最小曲率を表す。また、 S_I は $[0,1]$ の範囲で求められ、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。

3.2.1 SIFT 特徴量と対応点の決定

SIFT 特徴量は 1 つの特徴点に対して 128 次元の特徴量が得られる。最もシンプルな一致点の探索としてユークリッド距離比較による方法が挙げられる。SVD を用いた位置合わせ法は 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 R と t が求まる。従って、ユークリッド距離の小さい順から 3 点が候補として考えられるが、必ずしもその 3 点が最良の対応点とは言えない。従って、多めに対応点を探索しその中から最適な対応点を選択する必要がある。しかし、SIFT 特徴量のユークリッド距離による比較では対応点として適当ではないアウトライヤも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、各対応点からランダムに 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する。

3.2.2 ICP 残差を用いた位置合わせ

位置合わせする距離画像に重なりがあり、視点変化が少ない場合は shape index 画像に SIFT を適用し、LMedS によりアウトライヤを外すことで対応点の決定が可能である。しかし、重なりが非常に少ない場合や視点変化が激しい場合は、shape index 画像にも影響がでるため、この際の対応点探索は非常に困難な問題となる。この場合、RANSAC や LMedS の正しい対応点の方が多く含まれているという前提が満たされない場合も発生する。そこで、本研究では SIFT 対応点に含まれる正しい対応点が少ない場合には LMedS 計算時に得られる候補点に対して、ICP を用いて残差を計算し残差の少ない剛体変換パラメータを採用することとした。これにより、SIFT によって求めた対応点の信頼性が低くても、正しい対応点が含まれていれば初期位置合わせに十分な剛体変換パラメータが求まることが期待される。

4. SfM を用いた精度向上法

プロジェクタ・カメラシステムによる本計測ではプロジェ



図 8 形状誤差による位置合わせのずれ

クタ、カメラ間の外部パラメータや焦点距離などの内部パラメータの校正が必須である。これには事前に校正を行っておく方法や、計測データから自己校正により推定を行う方法などがある。しかし、ノイズや量子化誤差などにより、厳密に校正を行うことは一般に難しく、特に計測対象と校正儀 (キャリブレーションボックス等) との大きさが異なる場合、カメラ画像上での校正した領域と計測に使用した領域が異なることから結果の信頼性が著しく乏しくなる。一方で、ステレオで獲得できる 3 次元形状は、プロジェクタ・カメラから見える視点方向のみであり、物体の全周を一度に計測することは出来ない。そのため、全周形状を獲得するためには、対象物を複数回計測し、それらの形状を統合する必要がある。ところが、プロジェクタ・カメラ間の外部パラメータや内部パラメータに誤差がある場合、復元された形状が歪んでしまい、詳細な位置合わせをしても、図 8 のようにそれらを正確に合わせることは出来ないという状況が生じる。

このため、複数の計測結果を用いて、ずれの無い全周形状を生成するためには、位置合わせの剛体変換パラメータの推定に加えて、プロジェクタ・カメラの内部・外部パラメータも同時に再推定し、補正する必要がある。そこで本研究では、計測形状値のギャップを最小化するように、プロジェクタ・カメラ間の外部パラメータを再推定することで精度向上を図る手法を適用する [8]。具体的には、まず初期形状として、プロジェクタ・カメラシステムによるアクティブステレオ方式による 3 次元形状復元を複数回行い、複数の形状を獲得し、それらの複数形状に対して同時位置合わせ処理を行う。その後、位置合わせの結果から、各形状の重なり合う領域について、形状の頂点を複数サンプリングし、それらの点を各プロジェクタ・カメラ画像上へ投影し、画面上での距離誤差の自乗和を最小化するように、プロジェクタ・カメラの校正パラメータの推定を行う。

距離誤差の自乗和を最小化する誤差関数として、サンプリングした頂点 P_i をプロジェクタ j へ投影した点は式 10 となる。

$$\mathbf{u}_{i,j}^P(\mathbf{x}) = Proj_j^P(\mathbf{R}_j^E(R_j^C P_i + t_j^C) + t_j^E) \quad (10)$$

この時、 $Proj_j^P$ はプロジェクタ j の投影である。

これに基づいて、誤差ベクトル関数 $f(\mathbf{x})$ と誤差関数 $E(\mathbf{x})$ を式 11,12 のように定義する。

$$\mathbf{f}_{i,j}(\mathbf{x}) := \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{i,j}^C(\mathbf{x}) \\ \mathbf{u}_{i,j}^P(\mathbf{x}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{i,j}^C \\ \mathbf{v}_{i,j}^P \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$E(\mathbf{x}) := \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^K |\mathbf{f}_{i,j}(\mathbf{x})|^2 \quad (12)$$

ここで、 $\mathbf{v}_{i,j}^C$ と $\mathbf{v}_{i,j}^P$ は $\mathbf{u}_{i,j}^C(\mathbf{x})$ と $\mathbf{u}_{i,j}^P(\mathbf{x})$ に対応する画面上の座標である。

5. 実 験

初期位置合わせには図7のような石膏像を対象とし、位置合わせする距離画像の状態を考慮してLMedSを用いた手法とLMedSとICP残差を用いた実験を行った。また、石膏像は4視点(90度ずつ)と上下の全8視点撮影したものをを用いる。

5.1 LMedSを用いた初期位置合わせ

LMedsを用いる場合、視点変化が少なく、重なりのある明確な環境が適している。そこで計測した上下の距離画像を用いて初期位置合わせを行った。実験に用いた距離画像の石膏像正面の場合を図9に示す。また、初期位置合わせ前の状態を図10に示す。

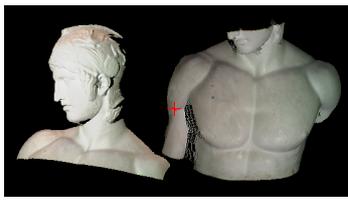


図9 石膏像上部(左)と下部(右)



図10 計測時の位置

図9のshape indexを計算し,SIFTによって対応点を探索した結果を図11に示す。図11を用いて位置合わせした結果を図12に示す。

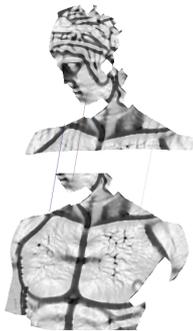


図11 LMedSを用いた対応点結果



図12 石膏像の初期位置合わせ結果

同様に、計測した上部と下部画像の位置合わせを行った。全4視点の内、一視点の位置合わせに失敗した。失敗した計測画像を図13に示し,SIFT結果を図14に示す。これは、図14を見ると重なりが少なく適切な対応点が発見できなかったことによるものと考えられる。実際には十分な重なりのあるもののようにして計測を行うことでこの問題は解消されることが考えられる。

5.2 LMedSとICP残差を用いた初期位置合わせ

ICP残差を用いる場合、視点変化があり,SIFTによる対応点の探索が難しい場合に適している。そこで,LMedSで位置合わせした4視点上部,下部に隣接する距離画像の位置合わせに適用した。マルス像の正面上部と右側面上部の初期位置合わせ結果を図15に示し,ICPアルゴリズムにかけた結果を図16に示す。本手法ではICPの残差が小さくなる初期位置を優先するため,人の目から見て適当な初期位置に見えないが,この場合はICPアルゴリズムを適用することで図16のように期待される

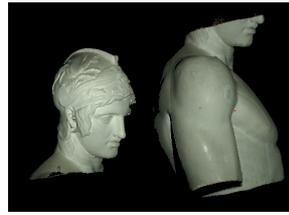


図13 別視点の石膏像上部(左)と下部(右)

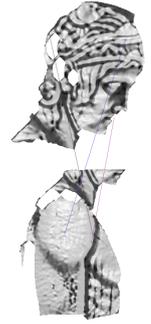


図14 LMedSによる対応点探索結果

位置合わせ結果が得られた。これにLMedSで得られた下部の位置合わせ結果を加えてICPアルゴリズムで位置合わせした結果を図17に示す。



図15 LMedSとICP残差を用いた初期位置合わせ結果



図16 ICPアルゴリズムによる位置合わせ結果



図17 石膏像正面・右側面(上部,下部)の位置合わせ結果

その他の視点変化部分の位置合わせについては良好な結果が得られなかった。これは、撮影角度が4視点だったため角度変化が激しすぎて対応点の探索が難しすぎたためと考えられる。

5.3 SfMを用いた精度向上法の適用

SfMを用いた位置合わせを行うには全周形状獲得できた状態で適用する必要がある。そこで、本研究では初期位置合わせに失敗した視点については手動で初期位置合わせすることとし,ICPを用いて最終的な位置合わせ結果を獲得した。得られた結果を図18に示す.SfMを用いた精度向上法を図19に示す。

全体的に、ギャップが解消されているが、特に鼻、あご、頭部の改善が顕著であった。それらの拡大画像を図20に示す。多少のギャップが残っているものの大幅に改善されており、良好な結果が得られたことが分かる。頭部の模様部分と後頭部のギャップも同様に改善されたことが確認できる。



図 18 ICP を用いた位置合わせ結果

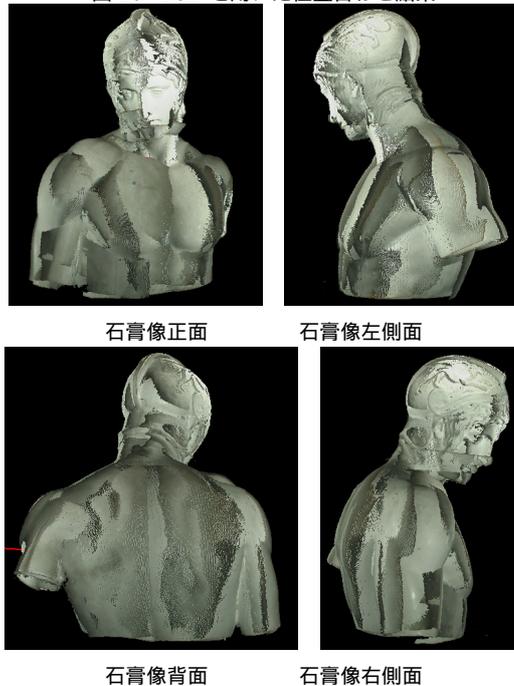
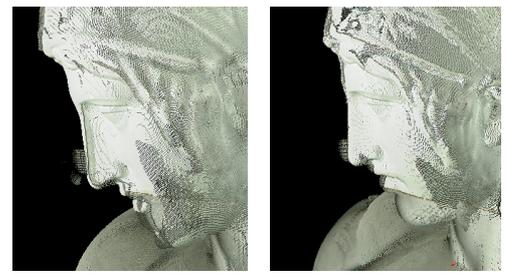


図 19 SfM を用いた精度改善法適用結果

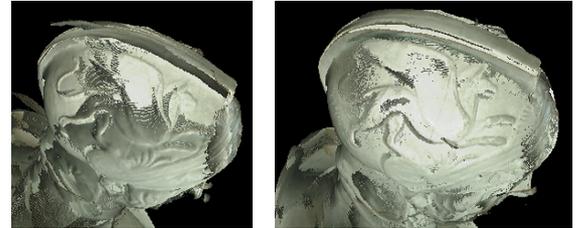
6. 結 論

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 画像と LMedS を用いて SIFT 対応点を絞り込む手法を提案した。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 を用いて対応点が検出できることを示し、一定の重なりのある場合に精度良く初期位置合わせ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が変化した場合に対して、LMedS と ICP 残差を組み合わせることで初期位置合わせを与える手法を提案した。石膏像の正面上部と右側面上部の初期位置合わせを行い ICP で期待される収束結果が得られることを示した。今後の課題は、視点の重なりが少ない部分でも可能な位置合



手法適用前の鼻・あご

手法適用後の鼻・あご



手法適用前の頭部

手法適用後の頭部

図 20 SfM を用いた精度改善法適用結果

せ法とより精度の良い対応点探索である。

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) 若手 ICT 研究者育成型研究開発 (072103013) および科研費 (19700098, 19700157) 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 scaleinvariant features ", Proc. of IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), pp 1150-1157, 1999.
- [8] 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.
- [9] Kehtarnavaz. N, and Mohan. S, "A framework for estimation of motion parameters from range images", Computer Vision, Graphics and Image processing, volume45, pp 88-105, 1989.
- [10] 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.