Vol.2015-CG-161 No.9
Vol.2015-CVIM-199 No.9
2015/11/6

多視点プロジェクタ・カメラの可視判定を用いたロバストな全周3次元メッシュ再構築手法

三鴨 道弘[1,a)]　沖 佳憲[1]　Marco Visentini Scarzanella[1]　川崎 洋[1]　古川 亮[2]　佐川 立昌[3]

概要：本発表では，多視点プロジェクタ・カメラの可視判定を利用することで，ロバストに全周 3 次元メッシュの再構築を行う手法を提案する．具体的には，復元された 3 次元点群を用いて空間をドロネーメッシュ（4 面体）分割し，個々のドロネーメッシュについて，各カメラからの可視判定を行う．これにより計算される可視率を用いて，ドロネーメッシュが物体内部，または，外部にあるか 2 クラス分類する．その結果，物体内部にあると判定されたドロネーメッシュにより，3 次元メッシュを再構築することができる．論文では，提案手法により，少ない頂点数で，既存手法よりも細部まで表現できる 3 次元メッシュの再構築が可能であることを示す．

1. はじめに

本論文では，多視点プロジェクタ・カメラの可視判定を利用することで，ロバストに全周 3 次元メッシュの再構築を行う手法を提案する．近年，3 次元情報は人物の動作や動物の動作を表現するために重要な役割を果たすようになってきた．3 次元情報を得るために，様々な手法が開発されてきた．例えば，モーションキャプチャがある．モーションキャプチャでは人物の動作情報を取得するために，関節にマーカーを装着する．しかし，モーションキャプチャで装着できるマーカーの数は限られるため，人体の表面情報まで得ることができない．

一方で，画像から密な 3 次元情報を得るために，多くの手法が開発されている．それらの中には，Shape-from-Silhouette [1]，Multi-View Stereo (MVS) [2] などがある．Shape-from-Silhouette は動的なシーンを得るために利用される手法であるが，物体表面の詳細を正確に復元することが難しい．一方で，MVS ではそれらの手法よりも物体表面の詳細情報を得ることが可能である．しかし，正確な点群取得と，そこからのメッシュ再構築についてはまだ課題が残っている．

MVS では 3 次元点群を様々な方向から撮影した画像間の対応点から算出する．復元された 3 次元点群はシルエット画像を用いることで，誤対応により 3 次元点が生成されるのを防ぎ，より正確なものになる．シルエット画像とは，対象とする物体の輪郭情報を持ったバイナリ画像である．すなわち，物体の輪郭の内側に 1，外側に 0 が割りふられた画像である．次に，復元された 3 次元点を用いて，メッシュを再構築する．今まで様々なメッシュ再構築手法が開発されているが，それらは得られた 3 次元点が少ない場合，メッシュ再構築に失敗しやすい．

本論文では，既存手法よりもロバストなメッシュ再構築手法を提案する．提案手法では多視点プロジェクタ・カメラシステムによって得られた点群を用いる．その点群から空間をドロネーメッシュ (4 面体) 分割する．特に，提案手法はカメラからメッシュを構成する頂点が見えるかどうかの可視判定により計算される可視率を用いることで，ドロネーメッシュを生成する．その可視率を元にドロネーメッシュが物体内部，外部にあるか 2 クラス分類する．さらに，論文ではメッシュ再構築結果を代表的な既存手法と比較する．提案手法では，疎な点群で生じやすい穴の生成を防ぎ，また，表面をロバストに再現することができることを示す．

本論文は以下の節で構成される．第 2 節では，既存の 3 次元物体とメッシュ再構築方法を紹介する．第 3 節では，カメラによる多方向から撮影した画像とプロジェクタによるパターン投影を用いて 3 次元点群復元を行う，多視点プロジェクタ・カメラシステムの構成を述べる．第 4 節では

[1] 鹿児島大学学術研究院理工学域工学系情報生体システム工学専攻
Department of Information and Biomedical Engineering, Kagoshima University, 1-21-40, Kohrimoto, Kagoshima, 890-0065 Japan
[2] 広島市立大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University, 3-4-1, Otsuka Higashi, Asaminami-ku, Hiroshima, 731-3194 Japan
[3] 産業技術総合開発機構
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Dai2, Tsukuba-chuo, 1-1-1, Umesono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568 Japan
[a)] mikamo@ibe.kagoshima-u.ac.jp

© 2015 Information Processing Society of Japan

Vol.2015-CG-161 No.9
Vol.2015-CVIM-199 No.9
2015/11/6

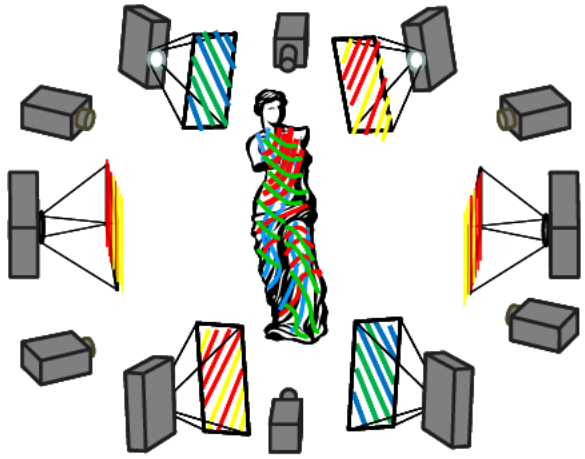


図 1　多視点プロジェクタ・カメラシステムの構成

提案手法の詳細を述べる．第 5 節では，提案手法を実際に物体に適用した結果を示す．そして，第 6 章で全体のまとめを述べる．

2. 関連研究

Multi View Stereo (MVS) を用いて 3 次元形状を復元するための手法は多く研究されている．例えば，Visual Hull を用いて 3 次元復元形状をする手法には文献 [3]，[4]，[5] による手法などがある．Visual Hull はターゲットとする物体を多方向から撮影した画像から，物体とカメラにより生成される錐体が共通する空間を計算することで得られる [3]．多くの手法が Visual Hull を 3 次元形状復元のための初期状態として利用している．しかし，Visual Hull は詳細に表面を復元することができない．そのため，それを改良させた手法も提案されている [4]，[5]．

計測対象の体積を考慮した多視点ステレオ手法では，復元する領域を細分化してゆくことで詳細に形状復元する [6], [7]，[8]．これらの手法は細分化により計算時間が多くかかり，また，最適化の初期値の設定によっては復元に失敗する場合がある．その他にも 3 次元形状を復元するための手法は様々提案されており，それらは Seitz らによる文献 [9] で紹介されている．また，Labatut らは 3 次元再構築手法を様々な観点から分類して紹介している [10]．

表面のメッシュを再構築する手法はコンピュータグラフィクスの分野で発達してきた [11]，[12]，[13]，[14]．それらの手法は前提条件として，表面を再構築するのために点群が十分密に得られているものとしている．しかし，多視点ステレオ手法により得られた点群は常に十分というわけではない．また，場所によって，点群の密度も異なる．これは，計測物体で起こる遮蔽が原因である．

提案手法は多方向からプロジェクタを用いてパターンを投影することで，復元できる点群を増やす効果がある．また，上述した既存手法と比べ，少ない点群または，疎な場合から表面を再構築する手法である．加えて，提案手法は，

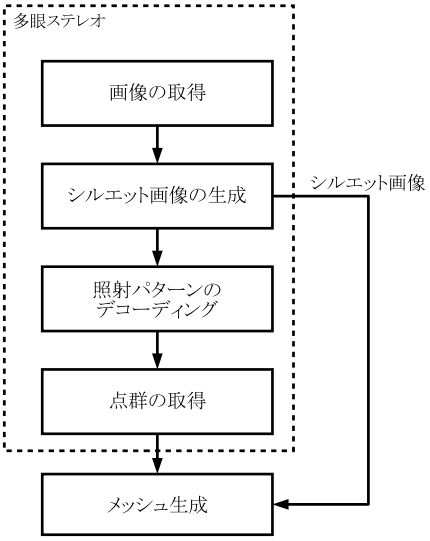


図 2　提案手法の流れ

平滑化を行わずに表面の形状を既存手法よりもロバストに再構築できる手法である．

3. 多視点プロジェクタ・カメラシステム

3.1 システムの構成

提案手法は Furukawa によって提案された多視点プロジェクタ・カメラシステム [15] を使用する．これには，複数のカメラとプロジェクタを交互に，そして，計測対象を囲むように配置する．事前準備として，キャリブレーションを行うことで，レンズ歪みとカメラ，プロジェクタの内部パラメータ，外部パラメータを算出する．システムの構成を図 1 に示す．

3.2 提案手法の流れ

提案手法は次の過程にしたがって，メッシュの再構築を行う (図 2)．

点群を得るまでの過程は従来の多視点プロジェクタ・カメラシステム [15] をベースにした [16] を利用する．まず，プロジェクタにより計測対象にパターンを投影し，それをカメラで撮影する．これは，プロジェクタによりパターンを投影するのは計測対象の幾何形状を取得するためである．カメラはそのパターンを 2 次元のカーブとして取得する．

次に，計測対象の形状から，シルエット画像を作成する．シルエット画像は再構築を行う際，カメラで撮影された画像中の点どうしの誤対応により発生する 3 次元点を防ぐために使用する．シルエット画像を作成するためには，計測対象を除いて撮影した背景画像によるデータベースを準備しておく．この背景画像は照射するプロジェクタを組み合わせて得られたものである [16]．さらに，提案手法では，作成したシルエット画像をメッシュを再構築する際のコスト関数として用いる．これにより，既存手法よりもロバストにメッシュを再構築することができる．

© 2015 Information Processing Society of Japan

次に，投影されたパターンをデコードし対応点を見つける．しかし，計測対象自体の模様によっては，照射パターンは失われてしまう．多くの手法がこれに対処するために開発されているが，提案手法では文献 [17] の手法を用いる．

そして，デコードしたパターンから対応点を見つけ，3 次元点群を算出する．提案手法は多視点プロジェクタ・カメラシステムを利用しているため，プロジェクタ 6 方向からの点群を得ることができる．

最後に，表面のメッシュ再構築を行う．これには，まず，得られた 6 方向分の点群の最適な配置を計算する．ここで我々はシルエット画像を利用する．シルエット画像を利用することで，誤対応により得られた余分な点群からメッシュが生成されることを防ぐ．これにより，精度の高いメッシュ再構築を行う．

提案手法では，復元された 3 次元点群を用いて空間をドロネーメッシュ（4 面体）分割し，個々のドロネーメッシュについて，各カメラからの可視判定を行う．これにより計算される可視率を用いて，ドロネーメッシュが物体内部，または，外部にあるか 2 クラス分類する．その結果，物体内部にあると判定されたドロネーメッシュにより，3 次元メッシュを再構築する．

4. メッシュ構築

本節では提案する点群からメッシュを構築する手法の詳細を述べる．本手法は Labatut ら [10] によるメッシュ作成手法を基に，本研究で用いる複数台のカメラ・プロジェクタシステムで得られる情報を使用し，より精度の高いロバストなメッシュの生成を目的とする．まず，Labatut らの手法を簡単に説明し，その後提案手法の説明を行う．

4.1 3 次元ドロネー図の構築

Delaunay Trianguration は，与えられた各点を幾何学的に三角形結合させるものであり，3 次元上でこれを行うと各点が 4 つの点と結合を持ち，四面体となる．この方法で生成された三角形の外接球の内部には他の点を含まない性質を持ち，近傍点とのメッシュ構築が可能となる．本手法では 3 次元点群から 3 次元ドロネー図の構築を行う．

4.2 Labatut らによるメッシュ再構築手法

Labatut らは，建造物のような大規模なシーンを対象としたメッシュ再構築手法を提案した [10]．MVS で 3 次元点を復元した後，メッシュ作成を 3 次元ドロネー図の構築を行った．そして，構築した四面体に内側，外側のラベリングを行う 2 値ラベリング問題と考え，その異なるラベルを持つ四面体の共通面を抽出することでメッシュ構築を行った．

グラフカットで使用するエネルギー関数を式 1 に示す．

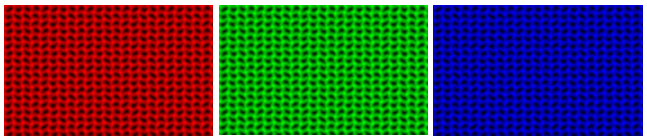


図 3 投影パターン

$$E(S) = E_{vis}(S) + \lambda_{photo} E_{photo}(S) + \lambda_{area} E_{area}(S) \quad (1)$$

ここで，各項について説明する．S は四面体を構成する三角形の集合であり，λ_{photo}，λ_{area} はそれぞれの項の重みである．$E_{vis}(S)$ はカメラから S への可視性を表しており，四面体の各頂点からカメラへの光線を考えた際の通過した他の四面体の総数で表される．すなわち，$E_{vis}(S)$ が小さいほど，四面体を通過する光線は少ない．よって，表面を構成する頂点により構成されるポリゴンであるといえる．$E_{photo}(S)$ は photo-consistency(画像間の一貫性) を表す項である．$E_{area}(S)$ は滑らかさのコストを表す．

最終出力のメッシュは異なるラベルを持つ隣接する四面体の共通面を抽出することで生成される．

提案手法は Labatut らによるメッシュ構築手法を基に，多視点プロジェクタ・カメラシステムから得られた点群を用いる．これにより，Labatut らの手法を用いて，人体のような，より小規模な計測対象のメッシュ再構築が可能である．

4.3 手法概要

本手法では糟屋ら [20] の提案している複数台のカメラ・プロジェクタを用いた多視点プロジェクタ・カメラシステムを用いる．基本的な機器の配置は図 1 と同様であるが，プロジェクタからの投影パターンには図 3 のものを使用する．この方法を使用する利点としては，直線パターンと異なり，独立して 3 次元点群の取得が可能という点である．例えば，図 1 の直線上のパターンを使用する場合，パターン同士の交点情報を必要とするため，プロジェクター・カメラ・プロジェクターの 3 台での復元が最小構成となる．これに対して佐川らのパターンを用いることでプロジェクター・カメラ 2 台での復元が可能となる．また，佐川らのパターンならプロジェクター画像上の 1 点とカメラ画像上の対応点 1 点を確定することが可能である．つまり，3 次元点 1 点を復元したプロジェクター画像上の 1 点で決めることができる．

まず，3 次元点群の最適な配置を算出する (点群のマージ)．これはキャリブレーション誤差にり，生じた 3 次元点群の誤差を減らすために行う処理である．その後，3 次元点群から 3 次元ドロネー図を構築し，グラフカットを行うことでメッシュの構築を行う．

4.4 点群のマージ

ここでは，復元された各点群のマージを行う．本計測

© 2015 Information Processing Society of Japan

システムは 6 台のカメラ・6 台のプロジェクタを交互に並べて配置している (図 1)．よって各カメラ・プロジェクタの組み合わせ (あるプロジェクタを中心に考えた際の左右のカメラ) において 3 次元復元を行う．つまり，最終復元結果は 1 台のプロジェクタあたり 2 個，合計 12 個の点群ファイルとして出力できる．共通のプロジェクタを用いているので，同一のプロジェクタ上の点の復元座標は本来であれば一致するはずである．しかし，キャリブレーションの誤差の影響で完全には一致しない．そこで SBA(Sparse Bundle Adjustment)[21] を用いて最適化処理を行い，3 次元点の最適な配置を決定する．

4.5 可視率をコスト関数に用いた最適化によるメッシュ再構築

Labatut[10] らは問題を二値ラベル付け問題とみなしてメッシュ構築する．すなわち，ドロネー図により作成した四面体に対して，物体表面内部にあるのか，外部にあるのかでラベルを割り当てる．最終的に二値ラベル付け問題の境界にある四面体により構成されるメッシュが，再構築されるメッシュである．提案手法はこの考え方に基づき，さらに，点の誤対応により生成される点群により構築される誤ったメッシュを防ぐためのコスト関数を導入する．この最適化問題は 3 次元のグラフカット問題とみなすことができ，次式で表される．

$$E(S) = E_{vis}(S) + \lambda_{sil}E_{sil}(S) + \lambda_{area}E_{area}(S) + \lambda_{length}E_{length}(S)$$

S は四面体を構成する三角形の集合であり，λ_{sil}，λ_{area}，λ_{length} はそれぞれの項の重みである．$E_{vis}(S)$ はカメラから S への可視率を表しており，四面体の各頂点からカメラへの光線を考えた際の通過した他の四面体の総数で表される．$E_{sil}(S)$ は四面体をシルエット画像上に再投影した際に含まれる白のピクセル数を表す．これにより，シルエット画像に基づいてメッシュ構築を行うことができる．$E_{area}(S)$ は四面体の内の一つの平面の面積，$E_{length}(S)$ は四面体の内の一つの平面の内の辺の長さの和であり，これらは，ドロネー図により作成される四面体の条件である．3 次元ドロネー図の構築には CGAL [19] を用いた．

5. 評価実験

5.1 実験概要

実験には全周計測システムで得られた 3 次元点群を使用する．カメラは Point Grey 社製 1600×1200 ピクセル解像度のものを使用し，プロジェクタは EPSON 社製の WXGA 解像度の液晶ビデオプロジェクタを用いた．カメラ・プロジェクタは各 6 台づつ使用している．

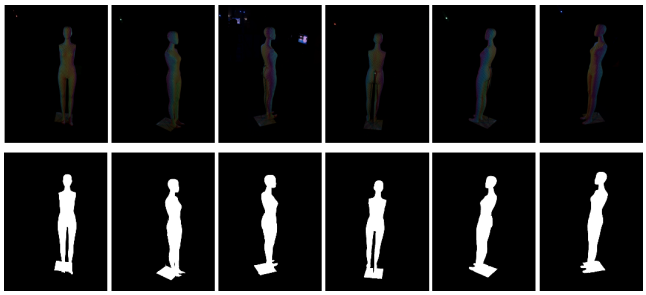
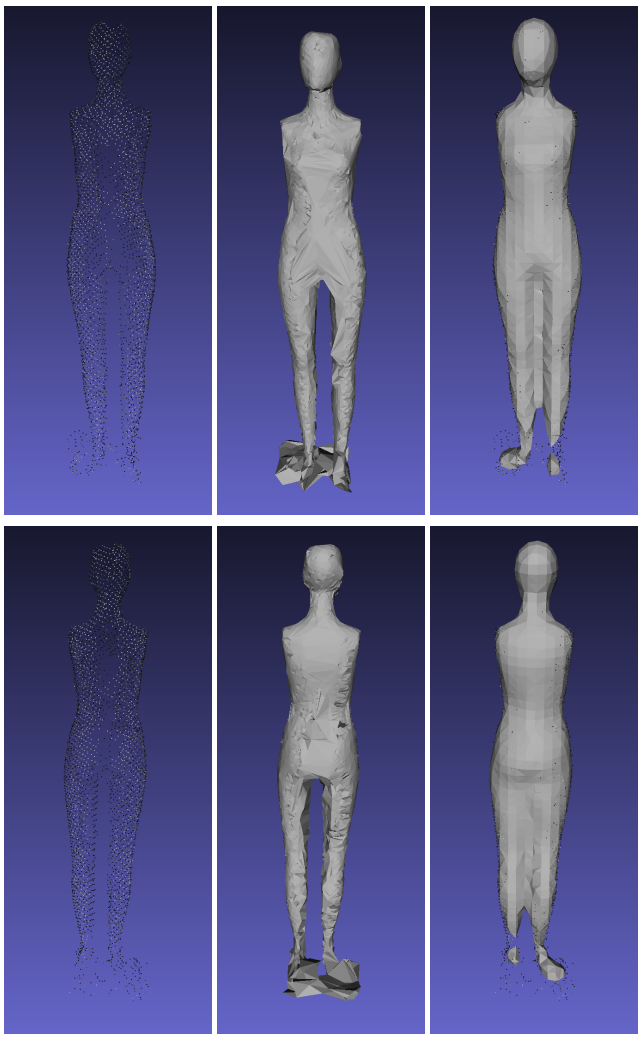


図 4 取得した画像とそれを基に作成したシルエット画像



(a) 得られた点群　(b) 提案手法によるメッシュ再構築結果　(c) 既存手法[14]によるメッシュ再構築結果

図 5 全周計測システムの結果

5.2 実験結果

MVS で取得した画像を図 4 上段に示す．計測対象をマネキンのモデルとし，このモデルに Wave パターンを投影した際の画像である．図 4 の下段には文献 [16] で提案されている手法を用いて得られたシルエット画像を示す．これらの図から，シルエット画像は背景を含まずに得られていることがわかる．

図 5 に提案手法によりえられたメッシュ再構築結果と従来手法によって得られた結果を示す．上段は計測対象

© 2015 Information Processing Society of Japan

のマネキンを前方から見たときの画像，下段はそれを後方から見たときの画像である．図 5(a) には復元した点群を示す．復元された点の数は 4654 である．図 5(b) に示すように，提案手法は少ない点数でも，スムーズなメッシュを生成することができる．図 5(c) は文献 [14] で提案されている手法を用いたメッシュ再構築結果である．これには Meshlab [22] 上に実装されているものを用いた．ここでは，見た目に正しい結果を得るために，様々なパラメータを試し，最終的に得られた結果をのせている．そのときのパラメータは次のとおりである．Octree Depth: 6，Solver Divide: 6，Samples per Node: 1，そして，Surface offsetting: 1 である．

図 5(b) に見られるように，提案手法では計測対象の失われがちな詳細な部分を再構築できていることがわかる．例えば，マネキンの足により隠された部分である．このような部分では点群は疎になっている．図 5(c) で見られるように，そのような点は文献 [14] の手法を用いると，表面が連続的に形成される．さらに，図 5(b) に見られるように，提案手法では点群中に発生しているノイズを除去する効果がある．このようなノイズは図 5(c) ではまだ見ることができる．

しかし，提案手法を適用しても完全には表面を再構築することができてない場所もみられる．すなわち，わずかながら，表面に不自然な凹凸が見られている．これらは，キャリブレーションエラーにより，頂点の対応点がとれず，本来なら同じ位置に存在するはずの点が別々の位置に存在し，それに対してメッシュを構築していることに起因する．

図 6 では，ポーズする人間を計測対象とした．頂点数は 16287 である．図 6(d) は取得した画像を示している．図に見られるように，提案手法は比較的少ない頂点数にもかかわらず，ある程度正確に復元することができる．

6. まとめと今後の課題

本論多視点プロジェクタ・カメラの可視判定を利用することで，ロバストに全周 3 次元メッシュの再構築を行う手法を提案した．各頂点からドロネーメッシュを通過する光線を考慮し，2 クラス分類することで，提案手法は表面の細部を残しながら，メッシュを比較的少ない数の頂点で再構築することができる．特に，代表的な手法と比較して，少ない頂点数でより見た目に正しい結果を得ることができる．

今後の課題として，提案手法のパラメータ設定についての検討が挙げられる．現在，パラメータの設定は経験的に行っているため，そのほかのパラメータを適用し，さらに良い結果が得られるか検証するのが望まれる．

参考文献

[1] Laurentini A.: *The Visual Hull Concept for Silhouette-Based Image Understanding*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 16, no. 2, pp. 150–162, 1994.

[2] Furukawa Y. and Ponce J.: *Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis*, IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, vol. 32, no. 8, pp. 1362–1376, 2010.

[3] Matusik W., Buehler C., Raskar R., Gortler S. J., and McMillan L.: *Image-Based Visual Hulls*, Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'00), pp. 369–374, 2000.

[4] Esteban C. H. and Schmitt F.: *Silhouette and Stereo Fusion for 3D object Modeling*, Computer Vision and Image Understanding, vol. 96, no. 3, pp. 367–392, 2004

[5] Furukawa Y. and Ponce J.: *Carved Visual Hulls for Image-Based Modeling*, International Journal of Computer Vision, vol. 81, no. 1, pp. 53–67, 2009.

[6] Faugeras O. and Keriven R.: *Variational Principles, Surface Evolution, PDES, Level Set Methods, and the Stereo Problem*, IEEE Transactions on Image Processing, vol. 7, no. 3, pp. 336–344, 1998.

[7] Boykov Y., and Lempitsky V.: *From Photohulls to Photoflux optimization.*, British Machine Vision Conference, vol. III, pp. 1149–1158, 2006.

[8] Broadhurst A. Drummond T. W., and Cipolla. R.: *A Probabilistic Framework for Space Carving*, IEEE International Conference on Computer Vision, vol. 1, 2001.

[9] Seitz S., M., Curless B., Diebel J., Scharstein D. and Szeliski R.: A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms, Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, vol. 1, pp. 519–528, 2006.

[10] Labatut P., Pons J.-P., and Keriven R.: *Efficient Multi-View Reconstruction of Large-Scale Scenes using interest Points, Delaunary Triangulation and Graph Cuts*, IEEE 11th Interenational Conference on Computer Vision, pp. 1–8, 2007.

[11] Boissonnat. J., -D.: *Geometric Structures for Three-Dimensional Shape Representation*, ACM Transactions on Graphics, vol. 3, no. 4, pp. 266–286, 1984.

[12] Edelsbrunner H. and Mücke P. E.: *Three-Dimensional alpha Shapes*, ACM Transactions on Graphics, vol.13, no. 1, pp. 43–72, 1994.

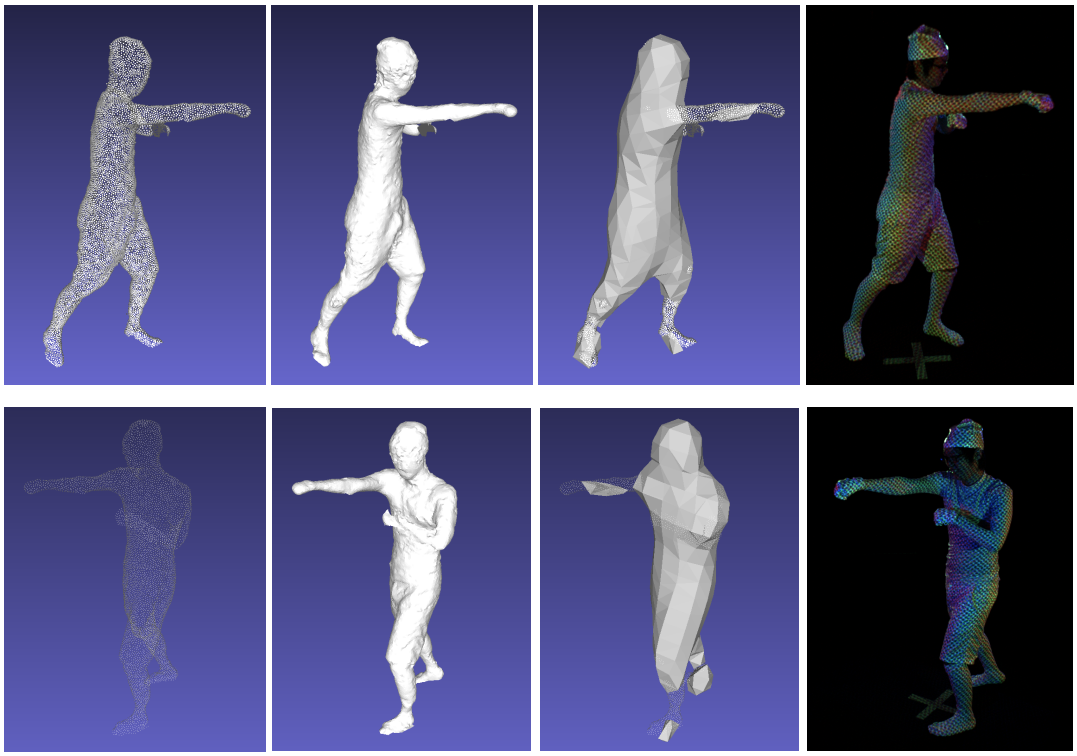
[13] Kolluri R., Shewchuk J. R., and O'Brien J. F.: *Spectral Surface Reconstruction from Noisy Point Clouds*, Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry Processing, pp. 11–21, 2004.

[14] Kazhdan M., Bolitho M., and Hoppe H.: Poisson Surface Reconstruction, Proceedings of the Fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing, pp. 61–70, 2006.

[15] Furukawa, R., Sagawa, R., Delaunoy, A., and Kawasaki, H.: *Multiview Projectors Cameras System for 3D Reconstruction of Dynamic Scenes*, IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, pp. 1602–1609, 2011.

[16] Oki Y., Visentini-Scarzenella M., Wada T., Furukawa R., Kawasaki H.: *Entire Shape Scan System with Multiple Pro-Cams using Texture Information and Accurate Silhouette Creating Technique*, Proceedings of The 14th IAPR International Conference Machine Vision Appli-

© 2015 Information Processing Society of Japan



(a) 得られた点群　(b) 提案手法による メッシュ再構築結果　(c) 既存手法[14]による メッシュ再構築結果　(d) 取得した画像

図 6　複雑な計測対象に対して提案手法を適用した結果

cations, pp 18–21, 2005.

[17] Thibault Y., Kawasaki H., Sagawa R., Furukawa R.: *Exemplar Based Texture Recovery Technique for Active One Shot Scan*, Proceedings of the 13th IAPR Conference on Machine Vision Applications, pp 331–334, 2013.

[18] Yoon K.: *Adaptive support-weight approach for correspondence search*, Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 924–931, 2005.

[19] *The Computational Geometry Algorithms Library*, `http://www.cgal.org/` 2015 年 9 月 29 日アクセス

[20] Kasuya N., Sagawa R., Furukawa R., and Kawasaki H., *One-shot Entire Shape Scanning by Utilizing Multiple Projector-Camera Constraints of Grid Patterns*, 2013 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, pp. 299–306, 2013.

[21] Lourakis M. I. A., and Argyros A. A.: *SBA: A software package for Generic Sparse Bundle Adjustment*, ACM Transactions on Mathematical Software, vol. 36, 2009.

[22] *MeshLab*, *http://meshlab.sourceforge.net/* 2015 年 9 月 29 日アクセス

© 2015 Information Processing Society of Japan