

複数プロジェクタ・カメラを用いた波線グリッドパターン投影によるワンショット全周計測

糟谷 望^{1,2,a)} 佐川 立昌^{2,b)} 古川 亮^{3,c)} 川崎 洋^{1,d)}

概要: 本稿では、複数のカメラとプロジェクタを用いて動物体の全周形状を復元する手法を提案する。プロジェクタは赤、緑、青のいずれかの1色の静的な波線グリッドパターンを投影する。カメラ画像中のプロジェクタパターンを色ごとに分離することでプロジェクタを識別する。三次元復元のアルゴリズムは、波線グリッドパターンによるワンショット形状計測の拡張である。隣接したデバイス間の相関関係をさらなる制約条件として加えることで形状エラーを削減する。最後に、各視点から推定された複数の形状データを1つのポリゴンに統合する。

1. はじめに

近年、動的な物体を対象とした三次元計測デバイスの発展とともに、人間や生物の動きを三次元形状として獲得する試みが盛んになっている [1]。このような技術の応用としては、これまでジェスチャ認識などが研究されてきたが、今後、精度の向上、範囲、フレームレートなどの改善により、マーカレスモーションキャプチャ、デジタルファッション、運動解析、複数の人間や生物のインタラクションの解析など多様な分野に拡大していくものと考えられる。

このような応用における重要な技術的課題として、全周形状計測があげられる。全周囲計測を実現するため、これまでの主な手法として、大量のカメラを用いてシルエットにより形状復元する手法 [2], [3] や、マルチビューステレオによる手法 [4] などのパッシブな方式が提案され幅広く用いられてきたが、オフライン処理をしなければ精度が低いという問題がある。

上記パッシブ方式の問題の解決策として、アクティブ方式による全周計測が考えられる。しかし、アクティブ方式は光を照射するため、それらが同じ物体を照らすことに

よる干渉が大きな問題となる。これを解決するために、異なる波長を使うことでこれを解消する手法が提案されている [5] が、Furukawa ら [5] はパターンごとに2色用いてため、分離に失敗し形状に穴が空くことがあった。また、個々の装置が独立して形状を復元するため、形状間の不一致が発生することもあった。

そこで、個々のプロジェクタからは単色のパターンを投影し、パターン間の対応を利用することで安定した全周計測を実現するパッシブ方式の計測手法を提案する。我々は、Sagawa ら [6] が提案した波線グリッドパターン投影による手法を拡張して全周形状計測を実現する。提案システムでは、各々のプロジェクタから赤、緑、青のいずれかの単色の波線グリッドパターンを投影し、カメラで撮影する。形状復元は Sagawa らの手法と同様にグリッド点ごとに信念電波法を用いて最適な対応点を探索することで実現されるが、複数のデバイス間の制約を加えることでより安定した計測を実現する。提案手法の貢献は以下のとおりである。

- RGB 各色のグリッドパターンを異なるプロジェクタから照射し、それぞれを分離して線検出することで、プロジェクタ間の分離精度の向上を図った。
- BP によるグリッドベースステレオの段階で、1つのカメラに投影されている異なるプロジェクタからのパターンを対応付け、BP の安定化を図った。
- 全点復元において、異なるプロジェクタ視点から生成されたレンジデータが重なっている部分を対応付け、その差を最小化することで、形状の精度向上を図った。
- 各グリッドパターンでの計測結果から、法線ベクトル情報を推定し、PoissonReconstruction[7] による全周囲ポリゴンメッシュを生成した。

¹ 鹿児島大学
Kagoshima university, Kagoshima, Kagoshima 890-0065, Japan

² 産業技術総合研究所
AIST, Tsukuba, Ibaraki 305-8568, Japan

³ 広島市立大学
Hiroshima city university, Hiroshima, Hiroshima 731-3194, Japan

a) nozomu.kasuya@aist.go.jp

b) ryusuke.sagawa@aist.go.jp

c) ryo-f@hiroshima-cu.ac.jp

d) kawasaki@ibe.kagoshima-u.ac.jp

上記貢献により、システムの構築の複雑性が大幅に改善される他、デバイス間の矛盾が起きないように全体を最適化することが可能となり、さらに、パターンの干渉が少ないことから穴の少ない高密度な復元が可能となる。

2. 関連研究

アクティブ方式による全周計測は様々な提案がなされている。しかし、アクティブ方式は光を照射するため、それらが同じ物体を照らすことによる干渉が大きな問題となる。これまでこの解決方法として、パターン投影を高速に切り替える方式と異なる波長を用いる方式の2つの方法が提案されている。前者では、60fpsで人間の動作を計測した例がある [8], [9] が、本質的には異なる時間に計測された複数の形状を一つに接続するため、用途が限定される。また、大量の光源とカメラを同期することは容易ではないという問題もある。

一方で異なる波長を用いる方式のうち、個々の光源が複数の波長を用いている場合には、それらが重ね合わさってから、再び分離することは容易ではない。このため、実用上個々のシステムで使用する波長を減らすことがポイントになる。例えば、TOFは一般に1波長のみを使用する手法のため、これを複数台並べることが可能である [10]。少ない波長の光源を用いたステレオ方式のアクティブ3次元装置を複数用いる手法も提案されている。例えば、1波長の近赤外光のみを用いる Kinect を複数台用いて全周形状計測手法がある [11]。しかし、同じ波長を用いるため時折パターンどうしの干渉が起きて形状復元が全くできなことがある。また、これらの手法では個々の装置が独立して形状を復元するため、装置間の位置ずれなどにより形状間の不一致が発生する場合がある。

このデバイスごと形状の不一致の問題を解決する方法として、各々独立して計測して統合するのではなく、全周形状を同時に計測する手法が提案されている [2]。この手法では、個々の光源は2色のみからなるラインパターンを投影し、物体上で2台のラインパターンが作る交点を用いて形状復元する。しかし、2色を用いる手法であったため、同波長の重なりが出来てしまい分離に失敗し穴ができることがあった。

そこで、我々はパターンが単色である波線グリッドパターンによるワンショット形状計測 [6] を全周計測に拡張する手法を提案する。

3. 概要

提案するシステムは図 1 に示すように、複数のカメラとプロジェクタからなる。各プロジェクタは [6] で提案された波線グリッドパターンを投影する。カメラは同期をとって撮影するが、投影するパターンが静的なもののため、カメラとプロジェクタ間は同期をとる必要はない。

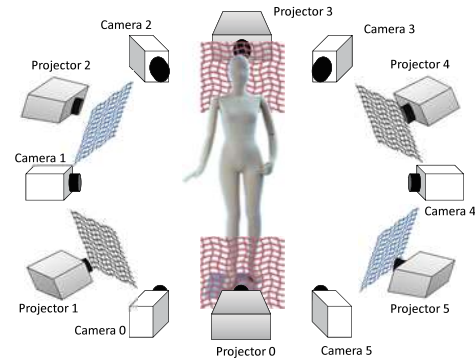


図 1 複数のカメラとプロジェクタを用いた全周形状計測システム
Fig. 1 The proposed system captures entire shape by using multiple cameras and projectors.

提案手法では、隣り合ったカメラとプロジェクタの組から形状を復元する。カメラ画像中には複数のプロジェクタから投影されたパターンが写るため、どのプロジェクタから投影されたパターンなのか識別する必要がある。波線グリッドパターンは単色パターンであるため、それぞれのプロジェクタから異なる色を投影することができる。市販のビデオプロジェクタは RGB 色を投影できるため、図 1 に示すように隣接するプロジェクタが同じ色にならないよう配置する。画像から格子パターンを抽出する方法は 4 章で記述する。

次に、カメラとプロジェクタの格子点の対応を取得する。我々の手法は [6] で提案された手法に、カメラ間、プロジェクタ間の制約を追加することで安定した対応関係の取得を図る。対応点取得の詳細は 5 章で述べる。

格子点の対応関係を初期値として用い、カメラとプロジェクタの全画素の対応関係を最適化することで、高密度な形状を取得する。高密度な形状の取得方法の詳細は 6 章で述べる。

4. 複数プロジェクタからのグリッドパターンの抽出

投影パターンは縦横の波線からなる。この縦横の波線を別々に検出し、その交点を計算することで格子点を抽出する。画像中の波線の検出には Sagawa ら [12] の提案した belief propagation (BP) [13] を用いた手法を用いる。

カメラ画像中には複数のパターンが観測されるため、それぞれがどのプロジェクタから投影されたものなのか識別する必要がある。我々はプロジェクタごとに赤、緑、青の投影する色を分けることで識別を可能にする。カメラとプロジェクタの RGB スペクトルは通常重なりあい、画像中で混ざり合ってしまう。図 2 において、カメラの両隣のプロジェクタから投影されている赤と青のパターンを抽出したい。しかし、単純に赤と青のチャンネルを用いると緑パターンの影響を受けてしまう。図中に白い円で示したよう

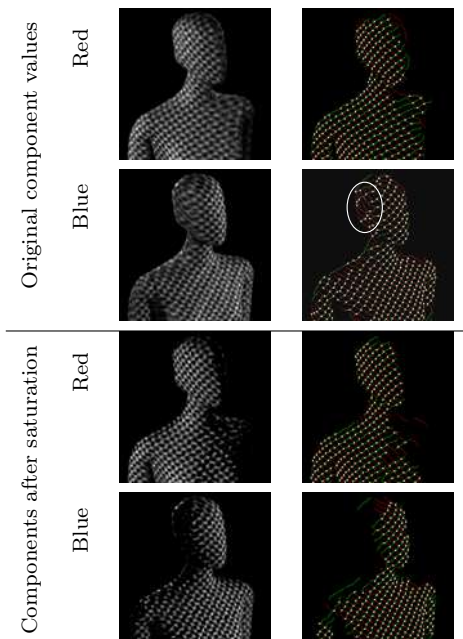


図 2 彩度調整による赤青パターンの抽出結果

Fig. 2 The extraction of red and blue patterns is improved by saturating the colors.

に、青チャンネルの抽出結果の頭部に緑の線の影響が見られる。

そこで、グリッドパターンの抽出の前に彩度を飽和させることでパターンを分離しやすくする。この処理により、図 2 のように青チャンネルへの緑の線の影響を削減できる。

5. グリッドベースの能動マルチビューステレオ

この章では、グリッドベースの能動ステレオについて述べる。本手法は Sagawa ら [6] の手法に基づいている。Sagawa らのシステムは 1 カメラ 1 プロジェクタ (1C1P) であったのに対し、2 カメラに拡張することでカメラ間の制約を導入することで頑健性と精度を向上させる手法が提案されている [14]。本稿では、さらに複数のプロジェクタとカメラを用いるため、さらなる制約条件を加えることを提案する。

5.1 波線グリッドにおけるカメラとプロジェクタ間の対応点探索

システムはキャリブレーションされており、画像中の格子点に対応するプロジェクタ画像のエピポーラ線は計算できる。正解の対応点はこのエピポーラ線付近のプロジェクタ画像中の格子点に限定できる。そこで、まずエピポーラ線に近い格子点を対応候補点として抽出する。カメラ画像中の格子点は波線によって隣接関係が既知であり、格子点をノード、波線をエッジとしたグラフを構成する。各対応候補点から最適なものを探索することでグリッド能動ステレオによる形状計測を実現する。

カメラ i において検出されたグリッドグラフはノード $p_i \in V_i$ と、エッジ $(p_i, q_i) \in U_i$ からなる。ここで、 p_i と q_i は格子点、 V_i は格子点の集合、 U_i はエッジの集合である。格子点 p_i はプロジェクタ画像中との対応候補点 $t_{p_i} \in T_{p_i}$ をもつ。1 C1P システムにおいて、 t_{p_i} を p_i に割り当てるエネルギーは以下のように定義される：

$$E(T_i) = \sum_{p_i \in V_i} D_{p_i}(t_{p_i}) + \sum_{(p_i, q_i) \in U_i} W_{p_i, q_i}(t_{p_i}, t_{q_i}), \quad (1)$$

ここで、 $T_i = \{t_{p_i} | p_i \in V_i\}$ 。 $D_{p_i}(t_{p_i})$ は t_{p_i} を p_i に割り当てた際のデータ項、 $W_{p_i, q_i}(t_{p_i}, t_{q_i})$ は t_{p_i} と t_{q_i} を隣接する格子点 p_i と q_i に割り当てた際の平滑化項である。データ項は格子点周りの SSD で計算され、平滑化項は t_{p_i} と t_{q_i} が同じ線上に点ならば 0、そうでない時にはコストを与える。これについての詳細は [6] で定義されている。このエネルギー最小化計算には BP を用いる。

5.2 カメラ間制約の追加

複数カメラで 1 台のプロジェクタから投影されたパターンを観測した際、前節で述べたプロジェクタ・カメラ間の対応関係は、カメラ間の幾何的な制約も満たすはずである。カメラ間のグラフを幾何関係に基づいてエッジで結ぶことで、この制約を加えることで交点の対応付けを安定させる手法が提案されている [14]。[14] は 2 台カメラ、1 台のプロジェクタを用いたシステム (2C1P) であるが、本稿のシステムにおいても 1 台のプロジェクタから投影されるパターンを用いるカメラは両脇の 2 台のみであり、部分的に 2C1P システムとしてみなすことができる。そこで、同様の手法を用いてカメラ間の制約としてカメラ間エッジを生成し、そのエネルギーを以下のように定義する：

$$X_{p_i p_j}(t_{p_i}, t_{p_j}) = \begin{cases} 0 & t_{p_i} = t_{p_j} \\ \mu & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 μ はユーザが定義する定数である。

5.3 プロジェクタ間制約の追加

提案システムは複数のプロジェクタを用いる。それらの投影領域は互いに重なり合っているため、プロジェクタ間の対応がカメラ画像を用いることで決定できる。図 3 に 2 つのパターンが重なっている際の例を示す。2 つのパターンから同じ画素位置に格子点が投影されている場合、この 2 点は同じ三次元座標となるはずである。2 点が正確に同じ画素に投影されるのは稀であるため、我々はカメラ i 画像上でのプロジェクタ k から投影される交点 $p_{ik} \in V_{ik}$ に対して、次の条件を満たすプロジェクタ l から投影される交点 $p_{il} \in V_{il}$ を対応があるとして探索する。

$$D(p_{ik}, p_{il}) < \phi, \quad (3)$$

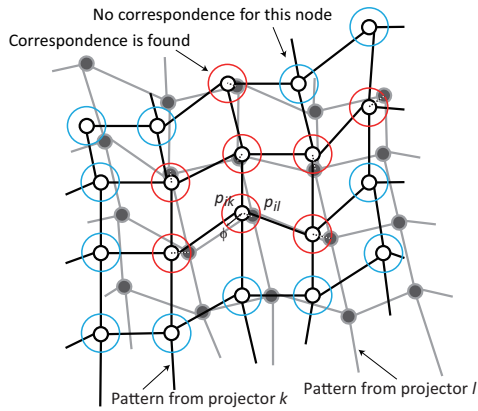


図 3 プロジェクタ間エッジの生成

Fig. 3 The edges between two graphs in a camera image are generated.

ここで、 $D(a, b)$ は a と b の距離、 ϕ は探索半径である。

2つのグラフの対応ノードは図 3 の点線である。これにより 2つのグラフを 1つにでき、カメラ間エッジと同様にエネルギー最小化によって同時に最適化が可能となる。プロジェクト間エッジのエネルギーは以下の通りである：

$$Z_{p_{ik}p_{il}}(t_{p_{ik}}, t_{p_{il}}) = \tau |d_i(P_{3D}(t_{p_{ik}})) - d_i(P_{3D}(t_{p_{il}}))|, \quad (4)$$

ここで、 $d_i(P_{3D})$ はカメラ i 座標系における三次元点 P_{3D} の深度であり、 τ はユーザ定義の定数である。

これらのエッジにより、複数のカメラとプロジェクトからなるグラフはすべて 1つのグラフとして扱え、そのエネルギーは以下のように定義される：

$$E(T) = \sum_i \sum_{k \in A_p(i)} E(T_{ik}) \quad (5)$$

$$+ \sum_k \sum_{i \in A_c(k), j \in A_c(k)} \left(\sum_{(p_{ik}, p_{jk}) \in S_{ijk}} X_{p_{ik}p_{jk}}(t_{p_{ik}}, t_{p_{jk}}) \right)$$

$$+ \sum_i \sum_{k \in A_p(i), l \in A_p(i)} \left(\sum_{(p_{ik}, p_{il}) \in Q_{ikl}} Z_{p_{ik}p_{il}}(t_{p_{ik}}, t_{p_{il}}) \right),$$

ここで $A_p(i)$ はカメラ i と視野を共有するプロジェクト集合、 $A_c(k)$ はプロジェクト k と視野を共有するカメラ集合、 S_{ijk} はプロジェクト k におけるカメラ i と j のエッジの集合、 Q_{ikl} はカメラ i におけるプロジェクト k と l の間のエッジの集合である。

6. 全カメラ・プロジェクトの補間による高密度形状の生成

前章のグリッドステレオで格子点の疎な対応関係が得られる。次のステップでは全画素の密な対応を取得することで密で複雑な 1つの形状を取得する。全てのカメラの情報を統合するために、各三次元点の可視性を確認する必要がある、しかし、提案システムではプロジェクトからの可視性は投影パターンによって与えられるため、この問題

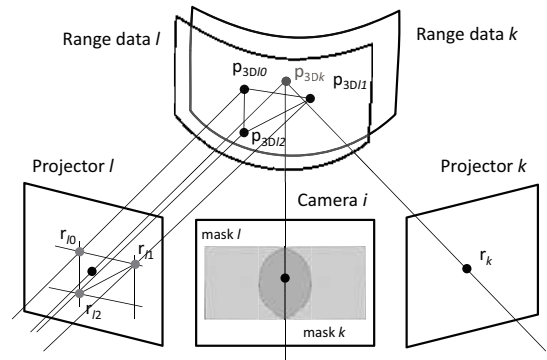


図 4

Fig. 4 The difference between two range data is minimized by finding the correspondence between projectors.

は簡易化できる。

提案する統合処理は 3つのステップからなる。まず、プロジェクト視点からの深度画像を生成する。次にカメラ画像とプロジェクト画像間の相違を最小化するように深度画像の最適化をおこなう。最後に全ての深度画像を 1つのメッシュモデルに統合する。

6.1 各プロジェクトに対する深度画像の生成

能動ステレオによって、1つのプロジェクトから投影されたパターンとは、その両隣のカメラとの間の 2組で疎な対応がとれている。この 2組の能動ステレオの結果は必ずプロジェクトから見えている点であるため、プロジェクト視点からの深度画像として 1つに統合できる。深度画像の生成方法は [14] で提案された手法を用いる。

6.2 複数の深度画像の同時最適化

次に、プロジェクト画像とカメラ画像の輝度値差が最小になるように深度画像を最適化する。最小化エネルギーは、[14] に提案されているように、カメラ画像とプロジェクト画像の輝度差のデータ項と、周囲の頂点との差が大きくなり過ぎないための平滑化項によってなる。さらに、本稿では複数の距離画像があり、重なっている領域が存在するため、さらなる拘束を加えて同時に最適化する。

図 4 はプロジェクト k と l の深度画像が重なりを持つ場合を示している。プロジェクト k の画素 r_k から計算される三次元点 p_{3Dk} が、プロジェクト l のマスク内に投影される場合、この画素は重なりを持つことを示す。その際、 p_{3Dk} をプロジェクト l へ投影した点が r_{l0} , r_{l1} , r_{l2} の三角形の中にある場合、これらの点が対応しているとして制約を加える。

今、繰り返し計算による最適化のため、画素 r の深度が d_r を微小変位 Δd_r を変数として近似する。最適化エネルギーは Δd_r を用いて、以下のように定義される：

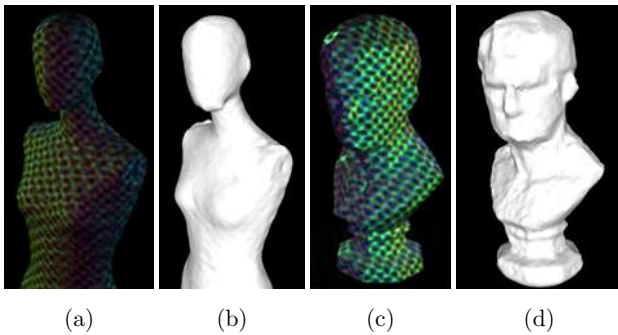


図 5 2つの静的物体の三次元計測: (a)(c) 入力画像, (b)(d) 計測結果

Fig. 5 3D reconstruction of two static objects:(a)(c) input images, (b)(d)reconstructed shapes.

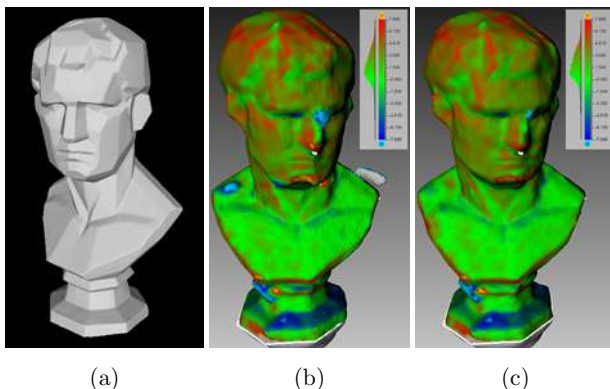


図 6 基本手法 (b) と提案手法 (c) の正解データ (a) との差異

Fig. 6 The differences of the basic method (b) and the proposed method (c) from the reference shape (a) are shown by color.

$$E(\Delta D) = \sum_k E_I + \alpha \sum_k E_S + \beta \sum_i \sum_{k,l \in A_p(i)} E_P, \quad (6)$$

$$E_P = \sum_{r_k} \sum_{r_{l_n} \in G(r_k)} (P_{3Dk}(\Delta d_{r_k}) - P_{3Dl_n}(\Delta d_{r_{l_n}}))^2,$$

ここで、 ΔD は Δd_r の集合、 E_I はデータ項、 E_S は平滑化項であり、詳細は [14] に記載されている。 E_P は深度画像間の制約のための項であり、 $G(r_k)$ は r_k の対応点 r_{l_n} を探索する関数、 $P_{3D}(\Delta d_r)$ は p_{3D} を光線方向に Δd_r 動かした三次元座標である。非線形の最小化手法によって $E(\Delta D)$ を最小化する Δd_r を加えて d_r は繰り返し更新される。

最後に、複数の深度データから 1つのメッシュモデルを生成する、本稿では、Poisson reconstruction [7] を用いて深度データの統合を行った。

7. 実験

提案手法の有効性を確認するために実験を行った。本稿の貢献は、グリッド能動ステレオにさらなる制約条件を加えることによる頑健性と精度の向上と、受動ステレオに比べて非常に処理時間が短く全周形状を計測できることである。実験では、 1600×1200 画素 30fps のカメラと 1024×768 画素の液晶プロジェクタをそれぞれ 6 台用い、物体までの各デバイスからの距離は約 2m である。

表 1 制約条件によるグリッド能動ステレオの誤対応点数の比較:
(a) マネキン, (b) 石膏像

Table 1 The numbers of incorrect correspondences are compared by changing the constraint used in the grid-based stereo: (a) mannequin, (b) plaster figure.

	Total Num.	Incorrect matches			
		Basic	w/ X	w/ Z	w/ X,Z
(a)	4950	271	100	101	69
(b)	2803	308	91	150	75

まず、静的な物体を計測し、頑健性と精度を検証した。

図 5 は 2つの静的な物体の計測結果を示している。(a)(c) が入力画像、(b)(d) がそれぞれに対する計測結果である。

制約条件を使用するかどうかを変えることでの誤対応点数の変化を調べることで、本稿で提案した新たな制約による格子点の対応関係探索の頑健性への影響を評価する。表 1 に図 5 の 2つの静的な物体に対して、(5 式) の $X_{p_{ik}p_{jk}}$ と $Z_{p_{ik}p_{il}}$ の両方の制約を使わない基本手法と、 X だけを使った場合、 Z だけを使った場合、両方を使った場合の 4 つ条件での誤対応点数を示す。提案手法は基本手法に比べ 4 分の 1 程度まで誤対応点数が減っており、提案した制約が頑健性に有効であることがわかる。次に、図 6 の (a) に示す近距離の 3D スキャナで獲得した形状を正解として精度に関する検証を行う。基本手法は (b) に、提案手法は (c) に正解との差を色によって示す。正解データとの差が小さい緑の領域が (b) より (c) の方が少なく、提案手法が精度向上にも貢献しているのがわかる。

Intel Xeon 3.07GHz の CPU と NVIDIA Quadro4000 の GPU 構成の PC で提案手法を用いて三次元形状を計測すると、形状の頂点数は 22,000 と 54,000 の物体ともに 1 フレームの処理が 10 秒未満であり、数分から数時間かかる受動ステレオに比べ非常に高速に処理できている。現在、処理に時間がかかっているのは格子点探索と形状の統合処理である。格子点探索は 12 組のカメラとプロジェクタそれぞれにおいて探索を行っているため時間がかかっているが、さらなる並列化を行うことで高速化できるものと考えられる。形状の統合処理は Kazhdan [7] によって提供されている手法を用いたため GPU を使用しなかったため時間がかかっている。GPU に最適化した統合手法を開発することで高速化が図れると思われる。

最後に、人がジャンプするシーンを計測した例を図 7 に示す。人の全周形状がきちんと計測され、服のしわまで再現できているのがわかる。しかし、誤対応が原因の小さなアーティファクトが目立ってしまっている。これを除去することが今後の課題の 1 つである。

8. まとめ

本稿では、動物体の全周形状を復元するワンショット能動ステレオ手法を提案した。提案システムは複数のプロ

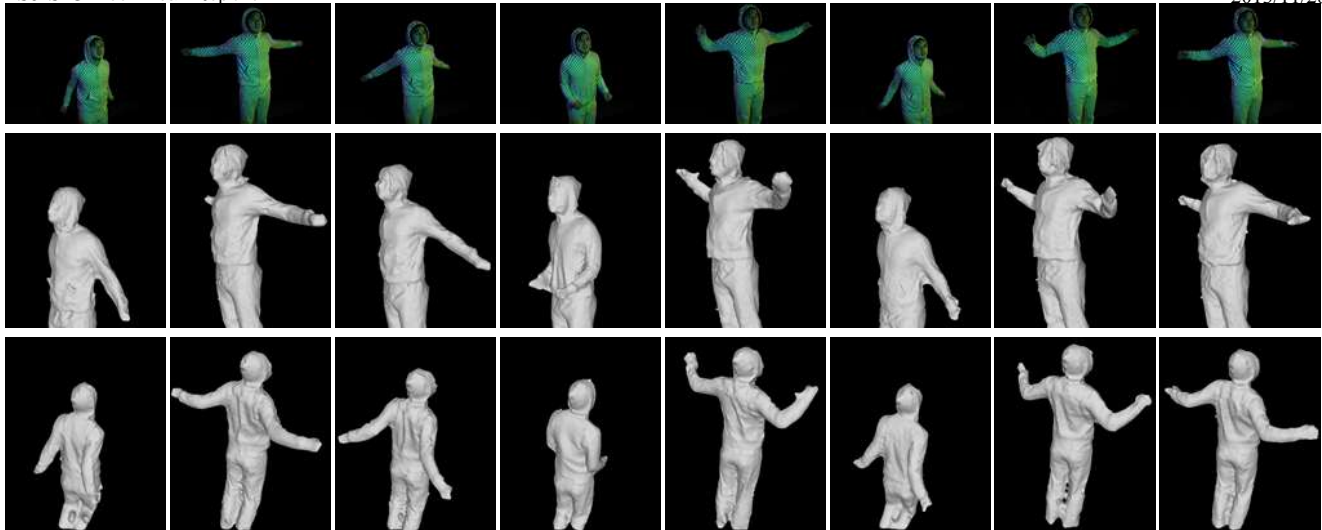


図 7 ジャンプする人の三次元計測結果

Fig. 7 3D reconstruction of a jumping person.

ジェクタからのパターンを投影し、複数のカメラで撮影することで形状を復元する。全てのカメラとプロジェクタの対応関係を同時に最適化することで探索する。我々はプロジェクタからそれぞれ単色のパターンを投影することで、画像上でのパターンの分離を安定で頑健に実現した。さらに、複数のカメラとプロジェクタの対応関係を、BP やグラフカットに適したグラフ構造で効率的に表現した。実験では、各プロジェクタ・カメラの組で独立に形状を復元するのに比べ、ギャップのない形状を復元できることを示した。

今後の課題としては、リアルタイム処理を実現するために更なる高速化を図ることがあげられる。

謝辞 本研究の一部は、内閣府 NEXT(LR030) の助成を受けて実施されたものである。

参考文献

- [1] Gall, J., Stoll, C., de Aguiar, E., Theobalt, C., Rosenhahn, B. and Seidel, H.-P.: Motion Capture Using Joint Skeleton Tracking and Surface Estimation, *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition : CVPR 2009*, Miami, USA, IEEE, pp. 1746–1753 (online), DOI: 10.1109/CVPR.2009.5206755 (2009).
- [2] Cheung, G. K. M., Kanade, T., Bouguet, J.-Y. and Holler, M.: A Real Time System for Robust 3D Voxel Reconstruction of Human Motions, *CVPR'00*, pp. 2714–2720 (2000).
- [3] Matsuyama, T., Wu, X., Takai, T. and Nobuhara, S.: Real-time 3D shape reconstruction, dynamic 3D mesh deformation, and high fidelity visualization for 3D video, *Comput. Vis. Image Underst.*, Vol. 96, No. 3, pp. 393–434 (2004).
- [4] Furukawa, Y. and Ponce, J.: Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 32, No. 8, pp. 1362–1376 (2010).
- [5] Furukawa, R., Sagawa, R., Kawasaki, H., Sakashita, K., Yagi, Y. and Asada, N.: One-shot Entire Shape Acquisition Method Using Multiple Projectors and Cameras, *4th Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology*, IEEE Computer Society, pp. 107–114 (2010).
- [6] Sagawa, R., Sakashita, K., Kasuya, N., Kawasaki, H., Furukawa, R. and Yagi, Y.: Grid-based Active Stereo with Single-colored Wave Pattern for Dense One-shot 3D Scan, *Proc. 2012 Second Joint 3DIM/3DPVT Conference*, Zurich, Switzerland, pp. 363–370 (2012).
- [7] Kazhdan, M., Bolitho, M. and Hoppe, H.: Poisson surface reconstruction, *Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing*, SGP '06, pp. 61–70 (2006).
- [8] Vlastic, D., Peers, P., Baran, I., Debevec, P., Popovi, J., Rusinkiewicz, S. and Matusik, W.: Dynamic Shape Capture using Multi-View Photometric Stereo, *ACM Trans. Graphics (Proc. SIGGRAPH Asia)*, Vol. 28, No. 5 (2009).
- [9] Chenglei Wu, Yebin Liu, Q. D. and Wilburn, B.: Fusing Multiview and Photometric Stereo for 3D Reconstruction under Uncalibrated Illumination, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 17, No. 8, pp. 1082–1095 (2011).
- [10] Kim, Y. M., Chan, D., Theobalt, C. and Thrun, S.: Design and calibration of a multi-view TOF sensor fusion system, *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2008. CVPRW '08. IEEE Computer Society Conference on*, pp. 1–7 (2008).
- [11] Nakazawa, M., Mitsugami, I., Makihara, Y., Nakajima, H., Yamazoe, H., Habe, H. and Yagi, Y.: Dynamic Scene Reconstruction using Asynchronous Multiple Kinects, *The 7th Int. Workshop on Robust Computer Vision (IWRCV2013)* (2013).
- [12] Sagawa, R., Ota, Y., Yagi, Y., Furukawa, R., Asada, N. and Kawasaki, H.: Dense 3D reconstruction method using a single pattern for fast moving object, *ICCV* (2009).
- [13] Felzenszwalb, P. and Huttenlocher, D.: Efficient Belief Propagation for Early Vision, *IJCV*, Vol. 70, pp. 41–54 (2006).
- [14] Kasuya, N., Sagawa, R., Furukawa, R. and Kawasaki, H.: Robust and Accurate One-shot 3D Reconstruction by 2C1P System with Wave Grid Pattern, *Proc. International Conference on 3D Vision*, Seattle, USA (2013).