

多視点プロジェクタ・カメラシステムによる動的シーンの再構成手法

清田祥太[†] 川崎洋[†] 古川亮^{††} 佐川立昌^{†††}

[†] 鹿児島大学大学院 理工学研究科 情報生体システム 〒 890-0065 鹿児島市郡元 1 丁目 21-40

^{††} 広島市立大学大学院 情報科学研究科 知能工学専攻 広島市安佐南区大塚東 3-4-1

^{†††} 産業技術総合研究所 知能システム研究部門 サービスロボティクス研究グループ

〒 305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 つくば中央第 2

E-mail: [†]{sc107016,kawasaki}@ibe.kagoshima-u.ac.jp, ^{††}ryo-f@hiroshima-cu.ac.jp,

^{†††}ryusuke.sagawa@aist.go.jp

あらまし アクティブステレオによる形状計測における問題点として、一視点から観測可能な形状しか計測できないことや静的なシーンしか計測できないことが挙げられる。本論文では、多視点のプロジェクタ・カメラシステムを利用して、動的シーンの形状を全周囲から計測する手法を提案する。高いフレームレートで形状を計測するためには、プロジェクタから照射するパターンを切替えずに静的なパターンを投影することが望ましい。しかし、従来の静的パターンによるアクティブステレオは、複雑なパターンを利用することが多く、パターンの重なりによる相互干渉の問題から、全周囲計測に適用することは難しかった。本研究では、単純な平行線によるパターンを利用し、むしろ干渉から得られる情報を利用して形状を復元する。具体的には、各プロジェクタは一方向の少数 (1 または 2 個) の色を持つ平行線のみを投影し、その直線同士の交点から連立線形方程式を多数構成して解く。我々は、6 台のカメラと 6 台のプロジェクタから成るシステムを実際に構築し、運動する人物の密な 3 次元形状復元に成功した。

キーワード アクティブ形状計測, プロジェクタ・カメラ系, 全周囲形状計測, 多視点画像再構成, 3 次元ビデオ

1. はじめに

物体の全周の 3 次元形状の取得には強いニーズがあり、これまで多くの研究が行われてきた。最近では、動的な物体の形状取得に Shape from Silhouette [1] が多く用いられている。また、Multi-View Stereo (MVS) 法 [2] ~ [4] は、静的なシーンの復元に利用され、大きな成功を収めている。しかし、カメラの台数が少ない時やテクスチャのない場合に、密な形状の再構成は MVS では困難である。また、動的シーンの復元を行う場合、MVS の計算量は大きな問題となる。

一方、アクティブな手段による形状計測は、テクスチャの少ないシーンであっても高精度・高密度な計測ができるため、実用的な場面で多く利用される。アクティブ計測による計測システムを複数並べて、利用することは、シーンの全周囲計測を実現するための有望な手法と考えられるが、実際には、投影されたパターン同士が重なり、互いに干渉してしまうため、実現は容易ではない。パターンの干渉の問題を解決できれば、全周囲の計測を、動的シーンに対して適用でき、利便性の高いシステムを実現できると考えられる。そこで本論文では、複数の固定パターン光源と複数のカメラを組み合わせた、複数視点を利用したアクティブ計測手法を提案する。このようなシステムの実現のために、以下の問題点を解決する。

- パターン同士の干渉による検出の不安定性の問題
- 高密度化に伴う繰返しパターンの増加による曖昧性の問題

我々は、これらの問題を解決するために、逆にパターン同士の重なりを利用する。具体的には、各プロジェクタからは単色が最大二色の平行な直線状のパターンのみを投影することで不安定性の問題を解消し、パターン同士の交点から多数の拘束式を構築しこれを解くことで曖昧性の問題を解決する。我々は実際に 6 台のカメラと 6 台のプロジェクタのみで、高密度に動く対象物体の形状復元を実現するシステムを構築した。実験では、提案手法を用いたシステムにより、ダイナミックな動きをする人物の全周の 3 次元形状を計測した。また、パッシブ MVS により同じデータから形状復元を行い、その結果との比較により手法の有効性を確認した。

本論文における我々の貢献を以下にまとめる。

- (1) アクティブ計測方式による多視点画像からの新しい復元手法の提案
- (2) 直線状パターンによる全周囲復元における、復元結果の最適化手法の提案
- (3) 上記 2 点の結果としての、静的パターン投影による少ない台数による全周囲復元手法の開発

2. 関連研究

全周形状計測は、多視点ステレオ法に基づく手法が多く提案されてきた [2] ~ [4]。多視点ステレオ法には、テクスチャが少ない場合や画像の数が少ない場合に計測される点の密度や精度が低下するという課題があったが、近年それらの問題は徐々に解消されつつある。しかし、動的なシーンの計測では、シルエットに基づいた手

法 [5], [6] が, 安定性や計算量上の利点から多く用いられている. 本論文の提案手法を, 多視点ステレオ法と比較した場合, カメラでプロジェクタを置き換えるため, 少ないカメラ数で安定した形状計測が可能なること, 計算量が少ないことなどが利点としてあげられる. 多数のカメラの同期撮影を行うことには技術的, コスト的困難が伴う場合があるため, 必要カメラ数の少なさは実用上価値がある. シルエットによる方法と比較した場合, 復元形状の精度の高さが利点として挙げられる.

これに対し, 実用的な 3 次元計測では, アクティブ手法が多く利用されてきており, 簡単で効率のよい復元手法として, プロジェクタ・カメラ系によるシステムが多く研究されてきた [7], [8]. プロジェクタ・カメラ系による形状計測システムは, 大きく時間的コード化法と空間的コード化法があるが, 時間的コード化法は複数のパターンを順次投影する必要があるため, 動的シーンの計測には向かない.

一方で, 空間的コード化のみを用いたアクティブステレオでは, 静的な一つのパターンの照射のみで形状を測定でき [9], [10], 動的シーンの計測を行うためには都合がよい. しかし, 空間エンコード手法のパターンは一般に複雑であり, 復元が不安定で精度も低い.

最近, グリッド状パターンを利用して形状計測を行う手法が提案されている [11] ~ [13]. これらの手法は, 投影するパターンが単純であり, 画像処理上の複雑性を緩和することができる. さらに, パターンを単純な平行線とすることで各パターンの分離を簡素化し, 複数台用いて物体の全周を計測する手法も提案されているが [14], デバイスを特殊な位置に置く必要があり, これが満たされない場合には解が不安定になるという問題があった. このため動物体の計測は実現できていない. 今回我々は, 複数カメラによる整合性チェックおよび全システムによるバンドル調整法を提案し前記問題を解消することで, 実際に動く人物の計測を実現した.

また, 最近, 低価格なリアルタイム 3 次元スキャナである Kinect が注目されている [15]. この赤外光源の波長を変えて複数台並べることによる全周形状取得も考えられるが, Kinect はジェスチャ認識などに特化したシステムのため, 原理的に精度向上が難しい. このため, モデリングなどの用途に用いることは難しいと考えられる.

3. 手法の概要

3.1 システム構成

動的シーンを全周囲から計測するために, 複数のプロジェクタとカメラを配置する. 観測された画像から, それぞれのパターンを分離しやすくするため, 各プロジェクタから照射するパターンは, 単純な平行線パターンとする. 固定したパターンを投影するため, カメラとプロジェクタの間での同期の必要は無い. 構成例を図 1 に示す. カメラとプロジェクタは, 内部パラメータ, 外部パ

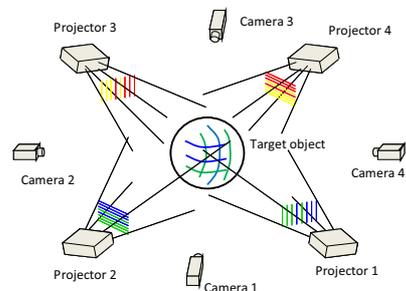


図 1 4 カメラと 4 プロジェクタを利用したシステム.
Fig. 1 An system using 4 projectors and 4 cameras.

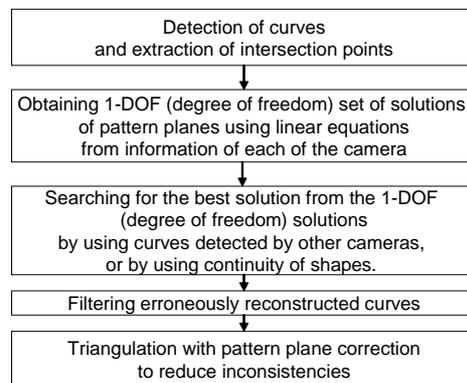


図 2 提案手法の流れ.

Fig. 2 Flow of the proposed algorithm.

ラメータ共に, あらかじめ校正されていると仮定する. 各カメラは, そのカメラの両隣のプロジェクタから照射された平行線パターンを観測できるように配置されている. 本論文では, 6 台のカメラと, 6 台のプロジェクタから成るシステムを用いて実験を行った.

シーン計測は, 各プロジェクタから照射した平行線パターンをカメラで画像上の曲線として撮影する. 提案手法では, パターンに色情報が無くても復元が可能であるが, 復元の安定性と精度を高めるために, de Bruijn 系列による色情報を付加したものを利用している.

3.2 復元アルゴリズム

復元アルゴリズムを図 2 に示す. まず, 単独のカメラの情報から曖昧性を残した復元が行われる. この単独カメラによる復元は, 1 自由度の曖昧性を残した形で解かれるため, 多数の解候補が残る. 次に, 得られた複数の解候補から, そのカメラとは異なるカメラの情報を利用して最適な解が選ばれる. これは, 多視点情報を利用した復元であり, 本論文の貢献の一つである. この処理により, 画像から検出された曲線と, 投影されたパターンとの対応が決定される. また, 校正や曲線検出の誤差により, 再構成結果において, 同一パターンがカメラによって異なる位置に復元される等の矛盾が生じることがある. これらの矛盾を最小化するように誤差補正を行う.

4. 複数のカメラとプロジェクタを利用した 3 次元復元

本節で, 1 自由度を残した解の計算方法について述べる. 仮定として, カメラ 1 から検出された曲線集合があ

るとする．また，各曲線について，それを照射するプロジェクタは特定されているものとする (5. 節参照)．

プロジェクタから投影された直線状のパターンの光は，ある 3 次元平面を掃引する．この平面をパターン平面と呼ぶ．カメラで観測される曲線は，あるパターン平面上にある．本論文では，パターン平面 p を式 $p^T x + 1 = 0$ で表す．このとき，3 次元ベクトル p は，平面のパラメータベクトルであり， x は平面上の点である．

特定のプロジェクタのパターン平面は，一つの直線を共有する．これを，これらのパターン平面の軸と呼ぶことにする．逆に，軸を固定した場合，この軸を含むパターン平面は，軸を中心とした回転のみで表すことができる．よって，その自由度は 1 であり，各平面は 1 パラメータで表すことができる．1 パラメータ表現の一つは， $p = q\mu + r$ である．ただし， μ はパラメータであり， q と r は軸の位置から計算可能な定ベクトルである．

異なるプロジェクタから照射されたパターン平面 A と B の交点が，カメラ 1 から観測されたとする．交点は，カメラ 1 のカメラ座標系で， u の方向ベクトルで表されるとする．パターン平面 A, B のパラメータベクトルは，同じ座標系で， p_A, p_B で表されるとする．この時，文献 [12], [13] より，

$$u^T (p_A - p_B) = 0 \quad (1)$$

である．既に述べた 1 パラメータ表現により $p_A \equiv q_A \mu_A + r_A$, $p_B \equiv q_B \mu_B + r_B$ とおくと，

$$C_A \mu_A - C_B \mu_B + D = 0 \quad (2)$$

を得る．ただし $C_A \equiv u^T q_A$, $C_B \equiv u^T q_B$, $D \equiv u^T (r_A - r_B)$ である．これは，平面パラメータ μ_A と μ_B の間の，交点から得られる関係式である．

N 個の曲線がカメラ 1 で観測されている場合，これらは N 個のパラメータ $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N$ で表される．曲線間に， M 個の交点が観測されているとする．ただし， $M > N$ を仮定する．通常，これは成立する．2 の式から， N 変数の 1 次方程式が M 個できる．これを，行列によって，

$$Cm = d \quad (3)$$

と表現する．ただし， C は $M \times N$ 行列であり， $m \equiv (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N)^T$ である．

方程式 (3) の解は，しばしば不安定である．これは，以下の理由による．仮に， M 個の交点 u_1, u_2, \dots, u_M を表す方向ベクトルが，非常に狭い範囲に分布しているとする (つまり， $u_1 \approx u_2 \approx \dots \approx u_M$)．この時，行列 $(C^T C)^{-1}$ の最小固有値は 0 に近くなり，連立方程式が縮退しているのと同様状況になる．これは，実際の観測でも起こりえる状況であり，この時，線型方程式の解は不安定になる．

逆に，方程式 (3) は，1 自由度を除いては信頼性よく求めることができる．これは，直観的には以下の理由による．仮に，曲線 A のパラメータ μ_1 を，任意に定めたとする (つまり，曲線 A のパターン平面が定められる)．この時，曲線 A の 3 次元形状を再構成することができる．曲線 A 上の交点の 3 次元位置が分かるので，曲線 A と交点のある曲線について，パターン平面を決定できる．これを繰り返すことで，相互に連結された曲線について，パラメータ平面を全て信頼性良く求めることができる．つまり，方程式 (3) は，1 自由度の曖昧性を除けば安定して解くことができる．

本論文では，上記の理由から，3 の式を 1 自由度を残して解く．これは， $m(t) = gt + (C^T C)^{-1} C^T d$ で実現できる．ただし g は $(C^T C)^{-1}$ の最小固有値に対応する固有ベクトルであり， t は解の集合を表現するためのパラメータである． $(C^T C)^{-1}$ が非正則行列に近い時，任意の t について $Cm(t) \approx d$ である．

本論文の形状計測システムでは，カメラとプロジェクタは校正されており，照射される直線パターンの，プロジェクタの画像面上での位置も既知である．よって，パターン平面の候補は計算することができ，かつその数は有限であるので，あらかじめ全てのパターン平面の候補を求めておくことができる．パターン平面の候補が有限集合であるのに対し，ベクトル $m(t)$ は t に関して連続である．そのため， $m(t)$ で表現されるパターン平面の集合の各要素を，法線ベクトル方向が最も近いパターン平面候補に補正する．

また，5. 節で述べるように，それぞれのパターンには色情報で表現された de Bruijn 系列によるラベルが割り当てられる．上記のパターン平面候補への補正の時，ラベル情報も併用する．具体的には，パターン平面候補の色情報と，画像上の曲線の色情報が，一致する平面から補正結果を選ぶ．補正されたパターン平面の集合を， $m'(t)$ で表す．

4.1 解の検証

前節で求められた 1 自由度を残した解は，カメラ 1 で観測された交点に基づく．変数 t で定まるパターン平面集合 $m'(t)$ に光切断法を適用することで，カメラ 1 の曲線が復元される．次にこの結果を，カメラ 2 に投影することで，解 $m'(t)$ の検証を行うことができる．この検証法によって，異なる t による解を比較し，最適な t を決定する (図 3)．

曲線 i を解 $m'(t)$ から復元し，カメラ 2 に投影したものを， $c_i(t)$ とする．この時，解 $m'(t)$ のマッチングスコアを，

$$S_T(t) \equiv \sum_i S_C(c_i(t), K) \quad (4)$$

とする．ただし， $S_C(c, K)$ は，一つの 2 次元曲線 c と，2

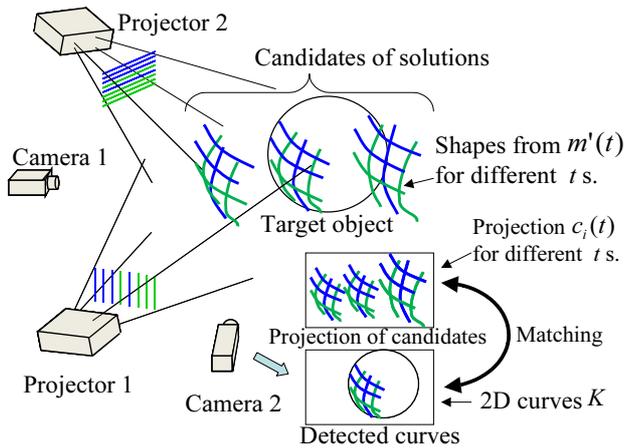


図 3 形状復元の概要: Camera 1 で撮影された連続な曲線群は、 $m'(t)$ で表される対応から復元される。復元結果は t の値によって変化する。各復元結果を Camera 2 に投影した曲線群と、Camera 2 で撮影された曲線群 K とを比較し、最も一致する復元結果を採用する。

Fig. 3 Reconstruction method: If the 3D curves are at true positions, then, the projected curves should coincide with the curves captured by camera 2.

次元曲線の集合 K とのマッチングスコアであり、 $S_T(t)$ は $m'(t)$ から復元された全ての曲線のマッチングスコアの合計である。スコアが小さいほど、解が良い。記号の定義の概念を、図 3 に示す。

異なる t から得られる解候補 $m'(t)$ から、最も良いマッチングスコアが得られるものが選ばれる (図 3 の真ん中の解候補)。これは、 $t^* \equiv \arg \min_t S_T(t)$ として、解 $m'(t^*)$ を選ぶことである。次に、各観測曲線に対応するパターン平面が、 $m'(t^*)$ から推定され、曲線が復元される。

本手法は、カメラ 1 のみでは決めにくい奥行き方向の曖昧性を、カメラ 2 とのマッチングで解消する。その意味で、ステレオ法に似た面を持つ。しかし、通常のステレオ法では、各点が独立に、エピポーラ線に沿ってマッチングが行われるのに対し、本手法では、1 自由度を残した解の変化に沿って探索が行われる。

本手法の別の利点として、多視点ステレオ法と比較した時の効率の高さが上げられる。これは、本手法の探索が、互いに接続された曲線の解の 1 自由度の曖昧性に沿って行われるのに対し、多視点ステレオ法では各点について、それぞれエピポーラ線に沿った探索が行われるからである。

$S_C(c, K)$ の定義について述べる。カメラ 1 で観測された曲線の多くは、カメラ 2 では観測されない。これは、オクルージョンの問題や、検出失敗などがあるためである。このことから、 c と一致する曲線が、 K から見つからない場合に、 $S_C(c, K)$ に正の値を設定すると、式 (4) のスコアに、観測されない曲線による影響が加算され、正しい評価が行われない。

そこで、 c と一致する曲線が、 K から見つからない場合、 $S_C(c, K) = 0$ とし、一致する曲線がある場合には $S_C(c, K) < 0$ になるようにする。具体的には、

$$S_C(c, K) \equiv \sum_{x_c \in c} \min(0, \min_{k \in K} \min_{x_k \in k} (\|x_c - x_k\| - W)) \quad (5)$$

とする。ただし、 x_c は曲線 c に含まれる点、 k は K に含まれる曲線、 x_k は、曲線 k に含まれる点である。また、 W は、曲線 c からの近傍の大きさであり、 W 以下の距離を持つ点が近いと見なされて、スコアに影響を与える。もし、距離 W 以下の点が見つからない場合、最初の \min 関数の働きにより、スコアへの影響が無くなる。

4.2 形状の全体的最適化

4.2.1 誤って復元された曲線の除去

前節までに述べた方法で得られた、検出曲線とパターンとの対応は、誤りを含む可能性がある。これは、接続されていない線が、誤って接続されていると判定されたり、色情報の検出ミスなどによって起きる。

こうした誤りは、4.2.2 節で述べる最適化に悪影響を及ぼすので、このような曲線を取り除いておくことが望ましい。通常、このような曲線は、間違った位置に復元されるので、他の曲線との交点において、復元結果が変わらないことが多い (図 4 を参照)。

このような曲線を検出するために、各曲線の交点について交わる曲線同士の距離をチェックする。曲線が正しいパターンに対応していても、キャリブレーション誤差などによって交点における誤差は生じるので、このチェックでは、ある許容度を超えて大きな誤差を検出する。誤差があると判定された交点の割合が一定値以上の曲線は、復元を取り消される。復元を取り消された曲線同士に交点がある場合には、それらを接続集合として、再度復元を試みる。

このようなフィルタリングの効果を図 5 に示す。フィルタリングを行うことで、孤立した位置に復元される曲線が減っていることが確認できる。

4.2.2 曲線同士の整合性を利用した形状復元

前節の方法で、観測された各曲線について、対応するパターンを決定できる。この対応が正しい場合、システムのキャリブレーション誤差、カメラ及びプロジェクタモデルの誤差、観測された曲線の 2 次元位置の位置決め誤差が無ければ、正しく 3 次元曲線を復元できる。実際のシステムでは、上記の誤差があり、復元された曲線位置に誤差が生じる。

これによる影響として、以下のような問題が生じる場合がある。

Projector-camera-projector (PCP) 配置の不一致: 互いに交点を持つと判定された 2 個の曲線において、交点位置においてカメラからの距離が一致せず、3

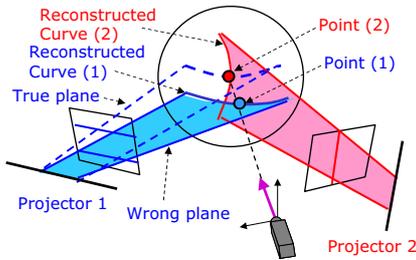


図 4 誤復元除去のアルゴリズム: 交点を持つ 2 曲線の復元結果 (Reconstructed curve(1) と (2)) が交わらない (Point(1) と (2) の距離が数値以上である) 場合, この交点を無効とする. 曲線上の無効な交点の割合が大きい場合, その曲線を除く.

Fig. 4 Filtering algorithm: If the distance between the 3D points (1) and (2) are larger than a tolerance threshold, the points are labeled as invalid. Curves that have many invalid intersection points are rejected from the reconstruction.

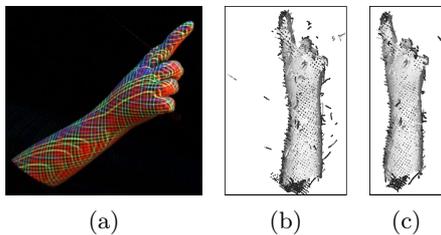


図 5 誤復元の除去例: (a) 元画像, (b) 除去前, (c) 除去後.
Fig. 5 An example of filtering: (a) source image, (b) before filtering, (c) after filtering.

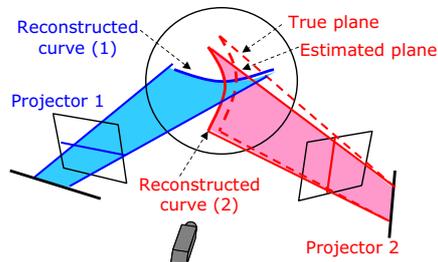


図 6 Projector-camera-projector(PCP) 配置の不一致: 図 4 と似た状況であり, 交点における 2 曲線が交わらないが, 誤差が閾値以下で交点は有効である.

Fig. 6 Projector-camera-projector(PCP) case: As almost same as Fig.4, two curves do not meet at intersection point, but difference is smaller than threshold.

次元的に「ねじれの位置」に復元される.

Camera-projector-camera (CPC) 配置の不一致: 同一パターンの曲線が, 異なるカメラから観測されている場合に, これらの復元結果が一致しない.

PCP case による曲線の不一致の例を図 6 に示す. これらの誤差は, 復元された点群から, 単一の曲面モデルを生成するためには問題となる. この問題に対処するために, 本論文では, 上記の曲線の不一致を, 各平面のパラメータに補正を加えることで軽減する手法を提案する.

復元される各パターン平面を, p_i とおく. p_i は, 各プロジェクタの軸を中心に, 微小な角度 θ_i だけ補正を加え

ることが出来るとする. この時, 全てのパターンの角度を補正して, 上記の (1),(2) の誤差を小さくする.

ある交点 I において, パターン平面 p_i と p_j が交わるとする. p_i, p_j に角度 θ_i, θ_j の補正が加わる時, p_i と視線との交点のカメラからの深さを $f_i(\theta_i)$, p_j との交点のカメラからの深さを $f_j(\theta_j)$ とする. この時, I における (1) の誤差は, $f_i(\theta_i) - f_j(\theta_j)$ と表現できる.

また, 異なるカメラ C_i, C_j から観測された曲線 c_k と c_l が, 共に, プロジェクタ P から投影されるパターン平面 p_m に対応する場合を考える. この時, c_k と c_l は, 曲線の一部を共有する場合がある. これを検出するために, c_k からサンプリングされた点 p_s について, パターン平面 p_i で再構成し, カメラ C_j に投影する. この時, 投影された点と, c_l との最小距離を持つ点 p_t との距離が閾値以下なら, p_s と p_t は同一の点であると判断し, これらの点を一致させるように補正を行う. p_m に角度 θ_m の補正を加えた平面で, p_s と p_t を復元した時, プロジェクタ P からのそれぞれの深さが, $g_s(\theta_m), g_t(\theta_m)$ とすると, この点における (2) の誤差は, $g_s(\theta_m) - g_t(\theta_m)$ と表現できる.

上記 2 種類の誤差の合計を,

$$\sum_{p \in P} \theta_p^2 + W_c \sum_{(i,j) \in C} (f_i(\theta_i) - f_j(\theta_j))^2 + W_s \sum_{(s,t,m) \in S} (g_s(\theta_m) - g_t(\theta_m))^2 \quad (6)$$

と表現できる. 正し, P は補正するパターンの集合, C は観測された交点の集合, S はサンプリングによって同一と見なされた点の集合である.

上記の誤差の最小化を, $\theta_p \approx 0$ の仮定の下で, 線型近似によって解く. これは, 以下の連立線形方程式の最小二乗解として解ける.

$$\theta_p = 0 \quad (p \in P) \quad (7)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial \theta_i} \theta_p - \frac{\partial f_j}{\partial \theta_i} \theta_p = -f_i(0) + f_j(0) \quad ((i,j) \in C) \quad (8)$$

$$\frac{\partial g_s}{\partial \theta_m} \theta_m - \frac{\partial g_t}{\partial \theta_m} \theta_m = -g_s(0) + g_t(0) \quad ((s,t,m) \in S) \quad (9)$$

式の中の定数である偏微分は, 解析的に求めても良いし, 差分近似で求めても良い. 得られた解で, パターン平面を補正して再構築することで, 上記の誤差を軽減することが出来る.

縦パターンと横パターンの交点の位置はサブピクセル精度で計算される. また検出された線の連続性を用いて, 隣接する交点に分かるので, 線検出の結果として, 交点を格子状に接続したグリッドグラフが得られる. この交点座標と, 交点の接続情報であるグリッドグラフにより, 次節で述べる手法により 3 次元復元が実現される.

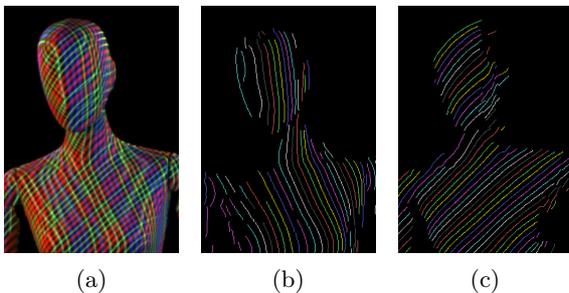


図 7 曲線検出例: (a) 元画像, (b)-(c) 2 個のプロジェクタに対する曲線検出結果. (b),(c) の曲線の色は周期的ラベル値を表す.

Fig.7 An example of curve detection: (a) input image, (b)-(c) the results of curve detection of two projectors. The curve colors in (b) and (c) indicate the periodic labels.

5. 曲線検出

本論文において線抽出の方法は [12] において提案された方法に基づいている. [12] では縦横 2 種類の線を見分ければ良かったが, 全周計測においては, 複数のプロジェクタから 3 方向以上のパターンが投影される. あるカメラから複数の縦パターンが観測される場合があるため, 異なるプロジェクタから投影された縦パターンを識別することが必要である. また [12] において提案された手法は, 横線と区別するためにほぼ縦に近い線を抽出する. しかし, 3 方向以上のパターンが投影される場合, パターン間の相対角は 90 度より小さくなり, パターンの混同が発生する.

そのために, 2 つの方法を用いる. まず 1 つ目の方法は, 同時に観測される可能性がある縦あるいは横パターンは, 異なる色を用いて構成することである. 本論文では, 青・青緑のパターンと赤・黄のパターンを用いて区別した. 色を変えることによって異なるプロジェクタから投影されたパターンの抽出を抑制することができる.

2 つ目の方法は, 特定のプロジェクタの線が抽出しやすいように, 画像を回転させて線抽出をおこなうことである. 例えば, 図 7(a) では 3 つのパターン (1 つの縦パターンと, 2 つの斜めパターン) が投影されている. 縦パターンを検出する場合, 斜めパターンの 1 つは色が同じであるために, 検出される部分がある. そこで提案手法では, 縦パターンを検出しつつ, 斜めパターンの検出を抑制するように, 画像を反時計回りに少し回転して線検出を行う. 後処理 (カラーコード解析, 3 次元形状復元) の前に, 検出された線の位置は逆回転して, 元の位置に戻しておく.

6. 実験

6.1 システム構成

本論文では実験環境として, 全周計測のシステムとして, 6 台のカメラと, 6 台のプロジェクタからなるシステムを構築した. 図 8 は実際のシステムの一部を示して

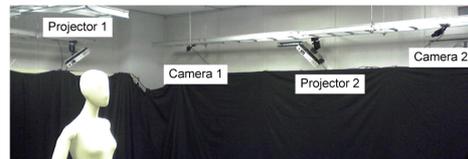


図 8 6 台のカメラと 6 台のプロジェクタによる実システム
Fig.8 An experimental system using 6 cameras and 6 projectors.

表 1 各手法における RMSE(mm).

Table 1 RMSE (mm) values for each method.

A	B	C	D
Initial shape [18]	Active MVS	B + Filtering	Final result
291.4	9.0	8.2	7.6

いる. 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 XGA 解像度の液晶ビデオプロジェクタを用いた. 6 台のカメラは同期しており, 30fps で撮影を行った.

キャリブレーションは, 複数のカメラ, プロジェクタのパラメータを同時に推定するために, バンドル調整法に基づいて行った. バンドル調整には, Snavely によって公開されている Bundler [16] を用いた.

6.2 シミュレーションデータによる評価

最初に提案手法の有効性を確認するために, 合成データを使って実験を行った. データとして Stanford bunny を用いて, カメラ 6 台とプロジェクタ 6 台を仮想的に配置し, 仮想の計測画像 6 枚を POV-Ray を用いたレンダリングにより生成した. 作成した画像例を図 9 (a) に示す. こうして作成した画像を入力として, 提案手法による形状復元を行った. 得られた結果およびカメラ・プロジェクタの位置関係を図 9 (b) に示す. また, 正解形状と提案手法により得られた形状を重ねて表示したものを図 9 (c)(d) に示す. ほぼ正しく復元できていることが分かる. このときの RMSE は, カメラと物体重心との距離を 1 として 0.0023 であった. 比較のために, カメラ画像のみを用いる MVS との比較を行った. PMVS [2] を用いた場合, 視点が少なすぎるため全く形状復元されなかった. 最新の MVS [17] を用いたところ形状復元され, 正解形状と重ねたものが図 9 (e)(f) である. 耳の後ろや顔の横など観測されにくい場所で間違った形状が復元されており, RMSE は 0.0112 となった.

6.3 実データを用いた評価実験

実システムを用いて, 従来手法であるグレイコードを用いた構造化光法による形状計測結果を正解形状とし, 提案手法の計測精度について評価を行った. 対象物体として高さ約 150cm のマネキン像を利用した. 復元結果を図 10 に示す. 図 10(a)-(c) において, 青色が線形解法による初期復元結果, 赤色が MVS による結果, 緑色が精度向上後の最終結果である. 同じシーン内の陰影つき

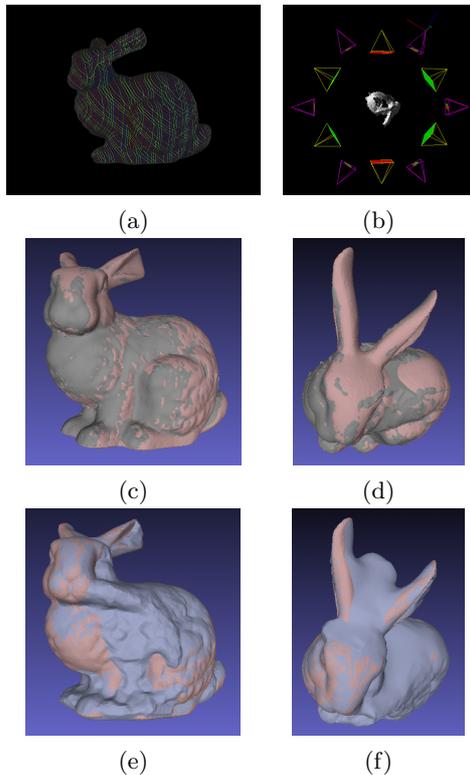


図9 復元結果：(a) 入力画像例，(b) カメラ・プロジェクタの配置および復元結果，(c)-(d) 提案手法による復元結果，(e)(f) パッシブ MVS [17] による復元結果

Fig.9 Reconstruction results: (a) synthesized image (b) configuration of cameras and projectors (c)-(d) recovered shape with our technique, and (e)(f) recovered shape with MVS [17].

ポリゴンモデルがグレイコード法による正解形状である。また，図 10(d),(e) は (b),(c) の拡大図を示している。それぞれの RMSE を表 1 に示す。実験結果より，line ID を用いた精度向上後の形状，および MVS 調整が形状復元の精度向上に貢献していることが確認できる。

6.4 パッシブ全周形状復元との比較

次に，提案手法とパッシブ全周形状復元との比較を行った。シミュレーション実験同様，PMVS [2] では視点数が足りず全く形状復元できなかったものの，最新の MVS 手法 [17] では形状復元することができた。結果を図 11(a)-(f) に示す。それぞれ左がパッシブ復元，右がアクティブ復元（提案手法）の結果である。パッシブ復元の場合はメッシュ生成に際してのスムージング処理が効き，総じて滑らかな復元結果となっているが，一部に大きく誤ったポリゴン復元されていることが分かる。一方，提案手法では大きく誤ったポリゴン復元は見当たらないものの，投影パターンの検出に失敗しているところで細かいノイズの発生していることが分かる。今回の実験では，提案手法を正しく評価するため，一切のテクスチャ情報を用いなかったが，テクスチャ情報の利用は精度向上に大きく寄与すると考えられ，今後の研究テーマの一つである。

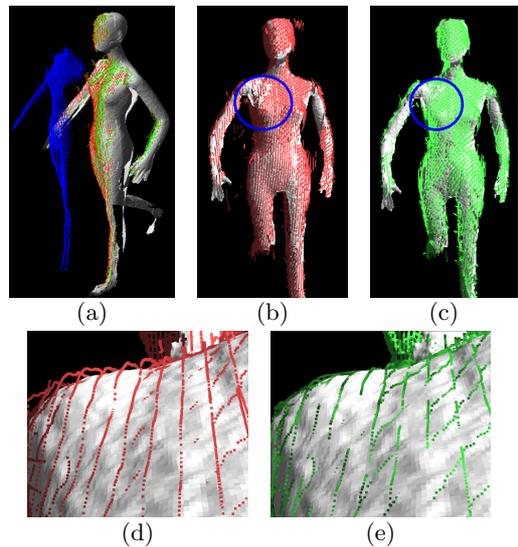


図 10 結果の比較：(a) 青：線形復元結果 (A)，赤：MVS 復元 (B)，緑：最終結果 (D)，陰影ポリゴン：正解形状。(b)(c) 異なる視点からの描画。(d)(e) 拡大画像。

Fig.10 Result of multi-view reconstruction: (a) Blue: result without MVS (result A), red: result after MVS (result B), green: our final result (result D), and shaded model is a ground-truth polygon reconstructed by Gray code. (b) and (c) are results of B and D from different view point, and (d) and (e) are close up view of (b) and (c), respectively.

6.5 動きのある全周形状の取得例

最後に実際に動きのある対象の計測実験を行った。柔道着を着たモデルの動きを計測した入力画像を図 12(a) に，復元結果を図 12(b) に示す。また，スカートを着てダンスしている動きを計測した入力画像を図 12(c) に，復元結果を図 12(d) に示す。柔道着のシーンでは着物の複雑な形状変化により多くのオクルージョンが発生しているにもかかわらず総じて正しい形状を復元できていることが分かる。ダンスシーンに関しても，スカートの微妙なしわなどの形状が正しく復元できていることが分かる。なお，頭部の髪の毛の部分では，曲線の反射が弱くなり検出検出が失敗しやすいので，被験者には帽子を着用してもらった (6.4 節も同様)。このように，色が暗く，細かい形状を持つ部分における曲線検出は，今後の課題である。

7. 結論

本論文では，動的シーンの全周形状を高密度で計測するための，複数のカメラとプロジェクタを用いた形状計測システムを提案した。プロジェクタを複数用いて計測する場合の問題点として，パターン同士が重なり合い，互いに干渉することがあるため，提案手法では，複数のプロジェクタからの投影パターンを容易に分離できるように，各プロジェクタから 1 色か 2 色の静的な平行線パターンを投影する手法を提案した。さらに，校正や曲線検出の誤差による曲線同士の不整合を最小化し，より

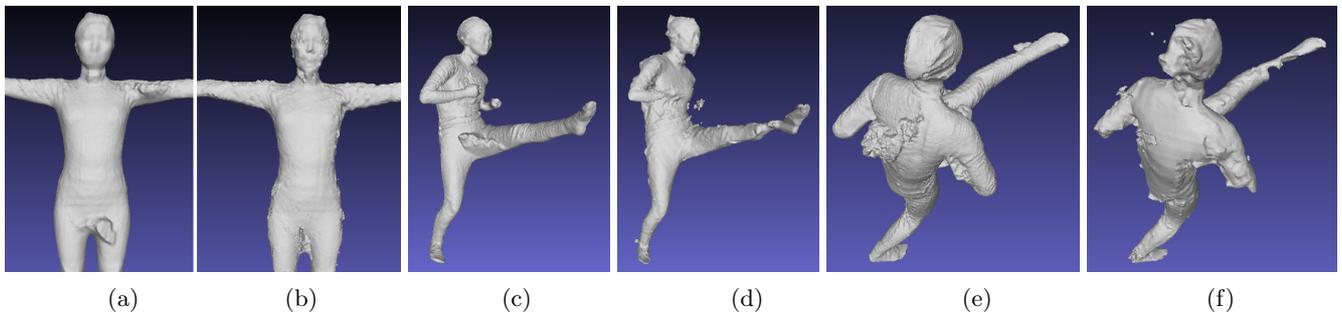


図 11 多視点からの復元結果:(a) (c) (e): パッシブ MVS [17] (b) (d) (f): 提案手法

Fig. 11 Result of multi-view reconstruction: (a) (c) (e): MVS [17] and (b) (d) (f): our results.

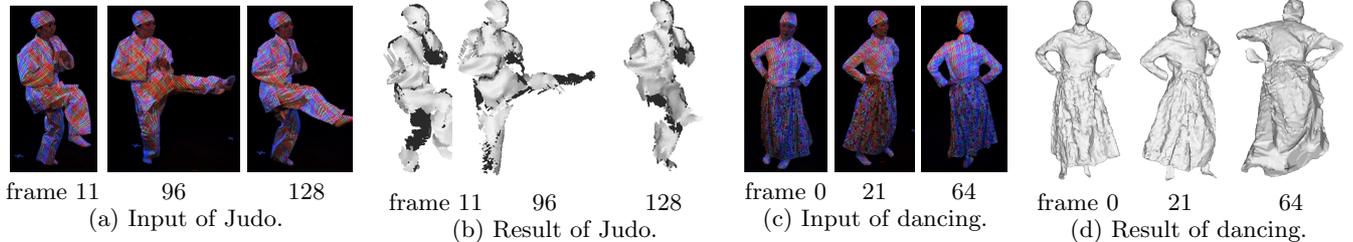


図 12 動きのある映像: (a) 柔道シーンの入力画像, (b) 復元結果, (c) ダンスシーンの入力画像, (d) 復元結果.

Fig. 12 Experiments of dynamic scenes: (a) the input images (Judo), (b) the reconstructed results, (c) the input images (dancing), and (d) reconstructed results.

整合性の高い形状を得る方法を提案した。実験では、実際に 6 台のプロジェクトと 6 台のカメラを用いて、動的シーン的高密度な全周形状をビデオレートで計測した。今後の課題としては、復元の計算の高速化や、テクスチャ情報の利用などが挙げられる。

謝 辞

本研究の一部は、総務省 SCOPE(101710002)、文部科学省科研費(21200002)および内閣府 NEXT プログラム(LR030)の助成を受けて実施されたものである。

文 献

- [1] A. Laurentini: “How far 3d shapes can be understood from 2d silhouettes”, IEEE Trans. on PAMI, **17**, 2, pp. 188–195 (1995).
- [2] Y. Furukawa and J. Ponce: “Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis”, CVPR (2007).
- [3] Y. Furukawa and J. Ponce: “Dense 3D motion capture from synchronized video streams”, CVPR (2008).
- [4] S. M. Seitz, B. Curless, J. Diebel, D. Scharstein and R. Szeliski: “A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms”, CVPR, Vol. 1, pp. 519–528 (2006).
- [5] K. N. Kutulakos and S. M. Seitz: “A theory of shape by space carving”, IJCV, **38**, pp. 307–314 (2000).
- [6] J.-S. Franco and E. Boyer: “Fusion of multi-view silhouette cues using a space occupancy grid”, ICCV, Vol. 2, pp. 1747–1753 (2005).
- [7] M. Young, E. Beeson, J. Davis, S. Rusinkiewicz and R. Ramamoorthi: “Viewpoint-coded structured light”, CVPR (2007).
- [8] J. Battle, E. Mouaddib and J. Salvi: “Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: a survey”, Pattern Recognition, **31**, 7, pp. 963–982 (1998).
- [9] C. Je, S. W. Lee and R.-H. Park: “High-contrast color-stripe pattern for rapid structured-light range imaging”, ECCV, Vol. 1, pp. 95–107 (2004).
- [10] P. Vuytsteke and A. Oosterlinck: “Range image acquisition with a single binary-encoded light pattern”, IEEE Trans. on PAMI, **12**, 2, pp. 148–164 (1990).
- [11] H. Kawasaki, R. Furukawa, R. Sagawa and Y. Yagi: “Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern”, CVPR, pp. 1–8 (2008).
- [12] R. Sagawa, Y. Ota, Y. Yagi, R. Furukawa, N. Asada and H. Kawasaki: “Dense 3d reconstruction method using a single pattern for fast moving object”, ICCV (2009).
- [13] A. O. Ulusoy, F. Calakli and G. Taubin: “One-shot scanning using de bruijn spaced grids”, The 7th IEEE Conf. 3DIM (2009).
- [14] R. Furukawa, R. Sagawa, H. Kawasaki, K. Sakashita, Y. Yagi and N. Asada: “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).
- [15] Microsoft: “Xbox 360 Kinect”. <http://www.xbox.com/en-US/kinect>.
- [16] N. Snavely, S. M. Seitz and R. Szeliski: “Photo tourism: Exploring image collections in 3D”, ACM SIGGRAPH (2006).
- [17] A. Delaunoy and E. Prados: “Gradient flows for optimizing triangular mesh-based surfaces: Applications to 3D reconstruction problems dealing with visibility”, IJCV, pp. 1–24 (2010).
- [18] H. Kawasaki, R. Furukawa, R. Sagawa, Y. Ohta, K. Sakashita, R. Zushi, Y. Yagi and N. Asada: “Linear solution for oneshot active 3d reconstruction using two projectors”, 3DPVT (2010).