

平行線投影を用いた連続領域の検出による高密度なワンショット形状復元

佐川立昌[†] 川崎洋^{††} 古川亮^{†††} 清田祥太^{††}

[†] 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

^{††} 鹿児島大学大学院 理工学研究科 情報生体システム工学専攻

〒 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

E-mail: †ryusuke.sagawa@aist.go.jp, ††{kawasaki,sc107016}@ibe.kagoshima-u.ac.jp,

†††ryo-f@hiroshima-cu.ac.jp

あらまし 動体の形状計測が実現できれば、マーカーレスモーションキャプチャや、流体の運動や衝突の解析といった様々な応用が考えられる。高精度な形状計測をする方法の 1 つとしてプロジェクタ - カメラシステムがある。特に単一の画像から形状復元するワンショット手法は、高速に動く対象の形状計測に適しており近年盛んに研究されている。本論文では、平行な直線の集合から構成されるグリッドパターンを用いて高密度な形状復元を実現する手法を提案する。提案手法は画像中で疎な線パターンから、密な位相情報を抽出し、その位相情報を用いて、カメラ画像中で連続な領域を検出する。形状復元するために決定すべき自由度は、各連続領域についてたかだか 1 つであり、計測システムの幾何情報 (エピポラ幾何) を用いて線形方程式を解くことにより解を求めることができる。さらに、投影パターンと観測パターンの位相が必ず一致するため、正解の候補は離散的に存在する。この性質を用いて提案手法では、整数最小二乗法により効率よく線形方程式を解く手法を示す。本論文では単一、複数のプロジェクタを用いる場合の両方について定式化し、プロジェクタの台数に関する精度の違いをシミュレーションで比較する。また、実際に動体の密な形状計測実験を行い良好な結果を得た。

キーワード 形状計測, プロジェクタ - カメラシステム, ワンショット, 位相アンラップ

1. はじめに

固定されたパターン光を投影し、1 枚の画像から形状復元を行うアクティブ形状計測法 (ワンショット形状計測) は、他の方法と比べて独自の利点を持っている。すなわち、観測対象が非常に速い動きを持つ場合でも、カメラのフレームレートとシャッタースピードを上げるだけで形状計測が行えるという点である。例えば、ダイナミックに動く流体や、爆発といった非常に速い動きで利用できる可能性がある。このため、これまで多くの研究が行われ、実用化が図られてきた。Kinect [1] は、精度、解像度、価格で良くバランスが取れており、最近の成功例といえる。しかし、Kinect はモーションキャプチャやジェスチャ認識を目的としているため、原理的に精度向上が難しく、検査やモデリングなどの用途には向いていない。同様に、他の多くの手法も精度、解像度、あるいは安定性のいずれかにおいて問題があった。

近年グリッドパターンベースのワンショット形状計測法が提案されている。相互に接続されたグリッド線に位置情報をコード化することにより、精度と安定性において良い結果が得られている。しかし、この手法は、検出されたグリッド線の形状のみを復元する手法のため、そ

の形状の解像度はグリッド線の間隔によって決まり、復元される形状の解像度が低くなるという問題がある。また、グリッド線の接続が少ない場合は正しく復元されないため、最終的に復元される形状も減少する。

本論文では上記の問題を解決し、高密度かつ高速に運動する物体の形状計測を可能にする手法を提案する。提案手法は次の 2 つの要素からなる。

(1) 単一画像から連続な領域を検出するための画像処理

(2) 安定かつ高密度な復元を行うための幾何制約を用いた領域ベースの 3 次元形状復元手法

従来のグリッド線ベースの復元手法ではグリッド線の交点のみを用いて復元の計算を行っていたのに対し、提案手法では連続領域内にある全ての画素を用いて復元することができるため、密度と安定性を向上させることができる。また、縦・横のグリッド線が交点を持たない領域においても、提案手法では連続な領域として検出することができるため、復元可能な領域を大幅に増やすことができ、計算を安定化することが可能となる。

実験においては、単一あるいは複数のプロジェクタと 1 台のカメラからなるシステムに対して、提案手法の定性的・定量的な精度評価および動体の形状計測を行った。

提案手法の貢献は次の通りとなる。

(1) グラフカット, ガボールフィルタ, デブルーイン系列を用いた周期パターンの位相推定と連続領域検出の実現

(2) 幾何制約(エピポーラ拘束)を用いた位相の曖昧性を解決する手法の定式化の提案

(3) 求める解を安定化するための整数解法の導入

(4) 位相シフトなどで問題となる大域的な位相推定の新たな解法としての意味づけ

2. 関連研究

プロジェクタとカメラを用いて形状復元する手法はこれまで広く研究されてきた[2]。プロジェクタ-カメラ形状計測システムにおける主たる問題は、どのように対応点を得るか、ということである。その解決法は大きく分けて時間コード化法と空間コード化法の2つに分けられる。

時間コード化法は、実装が容易、高精度、高密度、安定ということから、これまで良く用いられてきた方法である[3]~[5]。しかし、時間エンコード法は異なるパターンを観測対象に投影する必要があるため、高速に運動する対象の形状計測には向かないという、大きな弱点がある。近年、高速に形状を計測する手法が提案されており、DLP プロジェクタと高速度カメラを用いる手法[6], [7]や、時間・空間エンコードを利用して投影するパターンを削減する方法[8], [9]がある。しかし、これらの方法では、観測対象の動く速度の制限や、剛体であるという仮定がある。

また、プロジェクタを用いてパターンを変えながら観測対象に投影して対象表面にテクスチャを与え、パッシブなステレオ形状計測法によって3次元形状を復元する手法[10], [11]も提案されている。これらの方法は厳密には構造化光投影法ではないが、対応点を一意に決定するために複数のパターンを必要とするため、高速に動く対象の形状計測には適当ではない。

これに対し空間コード化法は単一の画像のみを用いるため、高速に動く対象の計測に適している[12], [13]。一方、この方法では複雑なパターンや多数の色を用いて幾何的な情報をコード化する必要であることが問題となる。空間コード化によって一意に対応点を決めるためには、そのコードのサイズが大きくなる。そのようなパターンはテクスチャや不連続な形状、表面の傾きによるパターンの圧縮などによる影響を受けやすい。従って、パターンの密度が低下することが避けられず、復元される形状が疎になる。

近年、パターンが複雑になるという問題に対し、単純なグリッドパターンを用いる手法が提案されている[14]~[16]。この方法では、線の交点の接続性を用いて幾何情報を埋め込んでいる。しかしこの方法では、投影された線がカメラ画像中で曲線として検出される必要があるた

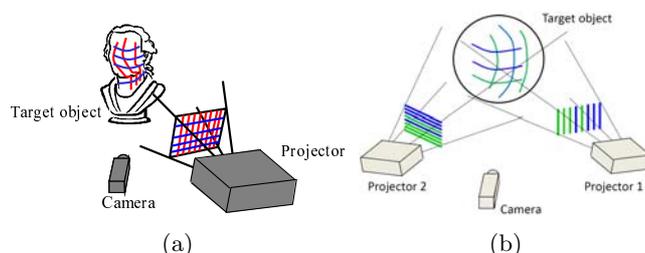


図1 (a) 1カメラ・1プロジェクタのシステム, (b) 1カメラ・2プロジェクタのシステム

め、グリッド線の間隔が画素幅の数倍程度に広くなり、1画素単位での高密度化は難しい。これに対し提案手法では、ガボールフィルタを用いて線間の情報を補間することでこれを実現することができる。

また本論文では、推定した位相の曖昧性を解決する手法を提案する。これは大域的な位相推定[6], [17]の問題に等しい。従来、位相シフトによって形状復元する手法では、繰り返し現れる同じ位相に対して、グレイコードや低周波パターン、ステレオカメラなど追加的な情報を用いていたこれを解決していた。これに対して、提案手法では幾何情報(エピポーラ拘束)を用いて位相の曖昧性を解決する。これにより従来手法では、大域的な位相推定のために複数の画像が必要であったのに対し、提案手法では1枚の画像から2つの位相画像を生成するだけで済み、これは本手法の大きなメリットである。

3. 提案手法の概要

提案手法のシステムは図1に示すように1台のカメラと、1台あるいは複数のプロジェクタから構成される。カメラおよびプロジェクタは校正済みであり、内部・外部パラメータは既知であるとする。また、提案手法は固定パターンをプロジェクタから投影するため、カメラ-プロジェクタ間の同期は不要である。

1台のプロジェクタを用いる場合(図1(a)), プロジェクタは画像の縦・横軸に沿った2種類の平行線パターンを投影する。2台のプロジェクタを用いる場合(図1(b)), それぞれのプロジェクタは、1種類の平行線パターンを投影する。どちらの場合でも、投影されたパターンは観測対象の表面上でグリッドパターンを作り、カメラでそのパターンを撮影することにより、観測対象の形状を復元する。

最初に提案されたグリッドパターンからの形状復元手法[18]は、付加的な情報無しに形状復元可能なアルゴリズムであった。これにデブルーイン系列などの周期的なカラーコード[12], [19]をグリッドパターンに導入することで形状復元の安定性を高める手法が提案されている[15]。本論文でも、デブルーイン系列によるカラーコードを用いるが、本論文では解の安定性向上に加えて、連続領域の高精度な抽出にも利用される。

提案手法は、最初にカラーコードによる連続領域の抽

出を行い，次に抽出された領域ごとにピクセルベースのグリッド復元を行う，という大きく2ステップからなる．それぞれのステップについて以下で詳細を述べる．

4. 色を用いてコード化された平行線パターンからの連続領域の抽出

提案手法では，プロジェクタから色を用いてコード化されたパターンが観測対象に投影される．本節では，撮影されたパターンからカメラ画像中の連続領域を抽出する手法を説明する．その手続きは以下に挙げるステップからなる．

(1) プロジェクタ画像の平行線の投影パターンとなる曲線をカメラ画像から検出する．

(2) 色を用いてコード化された周期パターンをデコードする．

(3) 検出されたコードを補間することにより，周期パターンの位相を各画素について計算する．

(4) 位相が連続となる領域を検出する．

(5) 各連続領域の位相をアンラップする．

図2に画像処理の各ステップの結果を示す．(a)は2種類の平行線パターンが投影されている入力画像である．(b)はその一方の平行線集合に対して曲線検出を行った結果である．(c)では，各線に割り当てられた周期カラーコードのIDが色を使って表されている．そのIDを補間することによって各画素に位相を計算した結果が(d)となる．その位相情報を用いて連続な領域を検出した結果が(e)である．各領域について位相の周期境界において連続するようにアンラップした結果が(f)であり，シフト量の1自由度が残っている．この1自由度の曖昧性は次節で示される手法により解消される．

4.1 プロジェクタから投影された平行線パターンの検出

1台あるいは複数台のプロジェクタから投影されるパターンは複数の平行線集合となる．まず最初に，ある平行線の集合を他の集合と区別して，カメラ画像中の曲線として検出を行う．提案手法では，曲線の方向と色を用いて区別を行う．

曲線検出の方法は[15]で提案されている方法に基づいている．その方法では，画像のX軸あるいはY軸に沿った輝度値の微分に基づいて，各画素を3種類(正，負，ほぼ0)に分類する．曲線の位置は輝度値のピークとなるので，正，負のラベルに分類された境界として検出される．[15]では確率伝搬法(belief propagation)のコスト関数を用いてサブピクセル精度の位置を計算したが，提案手法では後述する曲線の補間によってサブピクセル位置を計算する．従って，本論文では，微分が正(P)と負(N)の2種類の領域に分類し単純化し，エネルギー最小化を以下のように定義し，グラフカットで最小化する．

ここで，カメラ画像中でほぼ縦軸に近い向きの曲線を

検出すると仮定する．他の方向の曲線を検出する場合には，画像を事前に回転する．また，各線は2つの色を使ってコード化されている．例えば，青とシアンの場合，全ての線はRGBのうち青の要素を持つため，カメラ画像の青プレーンを使って線検出を行う．グラフカットのエネルギー関数は次のように定義する．

$$\sum_{p \in V} g(l_p) + \lambda \sum_{(l_p, l_{p'}) \in E} h(l_p, l_{p'}) \quad (1)$$

ここで V は画素の集合であり， E は4近傍の画素の組の集合である． l_p は，画素 p に割り当てられたラベルであり， λ はユーザ定義のパラメータである．データ項 $g(p)$ は次のように定義する．

$$g(l_p) = \begin{cases} -D(p) & l_p = P \text{ の場合} \\ D(p) & l_p = N \text{ の場合} \end{cases} \quad (2)$$

ここで， $D(p)$ は水平軸に沿った輝度値の微分である．不連続コスト $h(l_p, l_{p'})$ は $\vec{pp'}$ の向きに依存し，縦軸と平行な場合，ラベルが等しい場合 $h(l_p, l_{p'}) = 0$ ，そうでなければ $h(l_p, l_{p'}) = 1$ となる．水平軸と平行な場合は，以下のように定義する．

$$h(l_p, l_{p'}) = \begin{cases} -\text{sgn}(D(p)) + \text{sgn}(D(p')) & l_p = P, l_{p'} = N \text{ の場合} \\ \text{sgn}(D(p)) - \text{sgn}(D(p')) & l_p = N, l_{p'} = P \text{ の場合} \\ 0 & \text{上記以外の場合} \end{cases} \quad (3)$$

グラフカットを用いてラベルを決定した後，曲線はラベル P と N の境界として検出される．

4.2 周期カラーパターンのデコード

各線はデブルーイン系列に基づいた周期パターンでコード化されている．この系列は色数 q とコード長 n で定義され，隣接する n 個の曲線の色が決定されれば，周期 q^n のパターンのうちの線が決定することができるものである．本論文では $q = 2, n = 3$ を用いている．

この周期コードを[15]で提案された手法に基づいて検出する．[15]では縦横のパターンを検出して得た，交点情報に基づいてグラフ構造を作り，確率伝搬法を用いて周期コードを決定した．それに対し本論文では，検出した縦方向の曲線と画像の横軸に沿った線でグラフを作り，異なる平行線集合に属する曲線は別々にデコードを行う．従って，平行線集合の数が増えた場合でも手続きを変更することなく適用することができる．

4.3 周期パターンの位相計算

1周期に含まれる線の本数は $q^n = 8$ 本であるので，曲線のIDは0から7に割り当てられる．これらは整数値であり，曲線上の画素に割り当てられる．曲線上にない画素の値は補間によって計算することができ，周期関数の位相であると考えることができる．

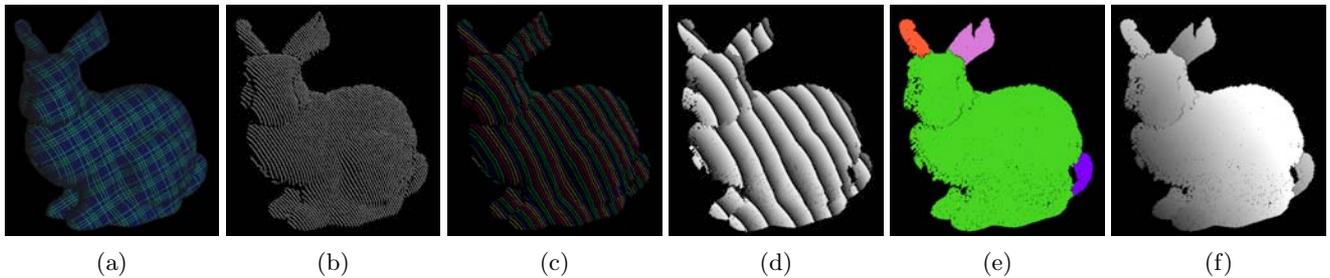


図 2 画像処理の各ステップにおける結果の例：(a) 入力画像，(b) 1つの平行線集合に対して曲線を検出した結果，(c) 周期パターンのデコード結果，(d) 周期コードの補間によって計算した位相，(e) 検出した連続領域，(f) アンラップされた位相．

本論文では，縦方向の曲線集合に対し，横軸に沿った輝度値の変化を見た場合，正弦関数になっていると仮定する．従って，2つの曲線間の位相情報を複素ガボールフィルタを使って計算することができる．2つの曲線間が L 画素である場合，水平軸に沿って波長 L の1次元ガボールフィルタを適用すると，その結果として複素数 z が得られ，その位相 ψ は $\psi = \arctan(\Re z / \Im z)$ として計算することができる．2つの曲線の ID を $k, (k+1) \bmod q^n$ とすると，周期パターンの位相 ϕ は $\phi = k + \psi/2\pi$ となる．この計算は曲線上の点についても行い，曲線位置をサブピクセル精度で計算する．

4.4 連続領域の検出と位相のアンラップ

各画素の位相を計算した後，位相が連続する領域を抽出し領域分割する．4近傍で隣接する2つの画素が次の式を満たす場合，それらの画素の位相は連続していると判断する．

$$\min(|d|, |d + q^n|, |d - q^n|) < \tau \quad (4)$$

ここで $d = \phi_1 - \phi_2$ であり， ϕ_1 と ϕ_2 はそれぞれの画素の位相， τ はユーザ定義の閾値である．領域分割のアルゴリズムは，2パスラベリングアルゴリズムに基づいている．最初のパスでは，式(4)を満たす隣接画素を同じ領域ラベルとして割り当て，異なるラベルが同一のものを表しているかどうかの情報を保持しておく．次のパスでは，ラベルの同一性情報を用いて，ラベルの再割り当てを行う．また，領域分割後の面積が閾値よりも小さい場合，ノイズであると判断し，後の処理を行う対象から取り除く．

連続領域を抽出した後，各領域において位相のアンラップを行う．その結果，各領域の画素は，プロジェクト画像の画素との対応関係を得る．ただし，大域的な位相を決定するためのシフト量が未知数として残っている．そのシフト量を後述する方法で決定すると，対応点が一意に決定でき，三角測量によって3次元位置が復元される．そこで以下では，アンラップされた位相を相対プロジェクト座標と呼ぶことにする．

最後に，相対プロジェクト座標を，プロジェクト座標

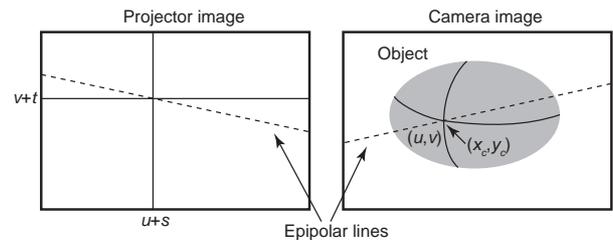


図 3 画像処理により画素 (x_c, y_c) の相対プロジェクト座標が (u, v) であったとすると，エピポーラ拘束により，未知のシフト (s, t) を用いてプロジェクト画像座標 $(u+s, v+t)$ と対応している．

における平行線間の距離を用いてスケーリングする．これにより，相対プロジェクト座標のスケールがプロジェクト画像の座標系と一致する．

5. 連続領域を用いたグリッドベース3次元形状復元の定式化

グリッドベース3次元形状復元では，カメラ画像中の曲線とプロジェクト画像中の直線との対応を推定する．従来法[18]ではそれぞれの曲線についてパラメータを推定するため，推定すべきパラメータ数は曲線の数に等しい．それに対して本論文では，上述の画像処理によってグリッドパターンを用いて連続領域を抽出しているため，未知数は各領域に対してただか1つである．本節では連続領域を用いたパラメータ推定の定式化について説明する．

5.1 1台のプロジェクトを用いる場合の定式化

まず1台のプロジェクトを用いる場合について述べる．この場合，プロジェクト画像の縦，横軸に沿った2種類の平行線集合が投影される．

画像中のある画素で，縦・横のパターンの領域の両方が検出されているとすると，その座標 (x_c, y_c) と検出した相対プロジェクト座標 (u, v) には次のエピポーラ拘束が成り立つ．ここで u と v はそれぞれ縦・横の曲線から計算された相対プロジェクト座標である(図3)．

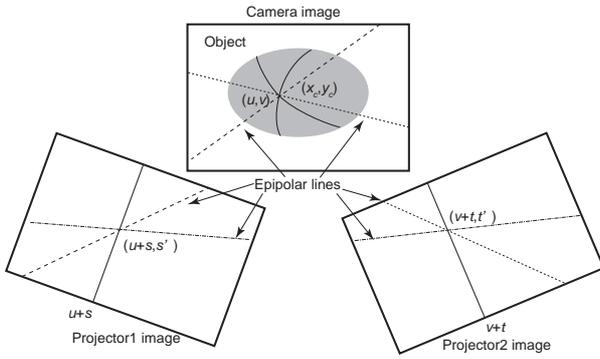


図4 2台のプロジェクタを用いる場合、エピポーラ幾何によって3つの対応点が得られる。 s', t' は、それぞれ s と t の1次式によって表される。

$$[u + s, v + t, 1]F \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} = 0, \quad (5)$$

ここで、 F はカメラとプロジェクタ間の基礎行列、 s, t は縦・横のパターンについてのシフトパラメータである。この式の中で未知変数は s, t のみであるため、式(5)は s, t に関する1次式となる。上述の拘束式は (u, v) が得られた点の数だけ立てられ、パラメータ s, t は同じ領域内では共通となる。縦・横の曲線から計算された領域の数がそれぞれ N_s, N_t の場合、以下の連立方程式が得られる。

$$Ax = b, \quad x = [s_1, \dots, s_{N_s}, t_1, \dots, t_{N_t}]^T, \quad (6)$$

ここで A は係数行列、 b は定数項である。変数の数は $N_s + N_t$ となり、カメラ画像中の曲線の数と比べると非常に小さくなる。

A が非退化であれば、一意に解を求められる。 A の各行はプロジェクタ座標 $(u + s, v + t)$ におけるエピポーラ線であるので、それらが全て平行でなければ A は非退化である。従来の定式化[18]では、線形方程式の解には1自由度が残った。そのため、投影パターンの線間隔をランダムにし、その線間隔が既知であるという知識を使って、投影パターンと推定したパターンのマッチングを行い、残った自由度を決定する、というステップが必要であった。それに対し本論文では、連続領域を検出する際に、投影パターンの間隔が一定という知識を使って位相を計算するため、線形解法のみで一意に解を決定することが可能である。

5.2 複数のプロジェクタを用いる場合の定式化

次に、グリッドベース3次元形状復元のうち、別々のプロジェクタから平行線パターンを投影する手法[20]の場合を考える。以下では2台のプロジェクタを用いた場合について定式化を行う。カメラ座標 (x_c, y_c) に対応するプロジェクタ1, 2の点を $(u + s, s'), (v + t, t')$ とすると、

エピポーラ拘束は次のように表される。

$$[u + s, s', 1]F_1 \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

$$[v + t, t', 1]F_2 \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

$$[u + s, s', 1]F_{12} \begin{bmatrix} v + t \\ t' \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

この定式化では、それぞれのプロジェクタはプロジェクタ画像の縦軸に沿った平行線パターンを投影すると仮定する(図4)。異なる場合は、プロジェクタ画像点の表現を線の向きに合わせて変更する。対応点は3つのエピポーラ線によって定義される。領域検出によって得られた u, v を用いると、 s', t' は式(7)、式(8)から、それぞれ s, t の1次式で表される。それらの1次式を式(9)に代入すると、 s, t の項、および定数項から構成される式となる。

その式(9)は st の項があるため、このままでは線形方程式ではない。そこで新しい変数 $r = st$ を導入することにより、 r, s, t に関する1次連立方程式とする。すると式(6)と同様に r, s, t は全ての点に関する拘束式を用いて求めることができる。

従来法[20]では、線が等間隔であるという拘束条件を追加し、計算を安定化させる方法が提案されていた。それに対し本論文では、領域検出においてこの拘束条件を利用する、という点が異なる。また、従来法ではこの追加条件を利用する際にカメラ配置に制約が存在したが、本論文ではカメラ配置に制約なく、線形方程式によって解を求めることが可能となった。

この定式化は3台以上のプロジェクタからパターンを投影する場合にも拡張することができる。 m 台のプロジェクタを用いる場合、そのうち2つを選んで上記の拘束式を作ることができる。従って、 ${}_m C_2$ 通りの組み合わせから連立方程式を作る。

上記の線形解法では、 $r = st$ という制約を省いて解を求めるが、解がその制約を満たさない場合がある。特に、3つ以上のプロジェクタを用いてパターンを投影する場合にその可能性が高い。そのため、線形方程式の解を初期解として、式(9)の非線形最小化により解を修正することを行う。

5.3 整数最小二乗法を用いた解法

推定したプロジェクタ座標 $(u + s, v + t)$ は領域検出によって計算された周期パターンの位相と一致するはずであるが、カメラ校正や画像処理の検出誤差のため、線形方程式で求めた解と検出された位相は必ずしも一致しな

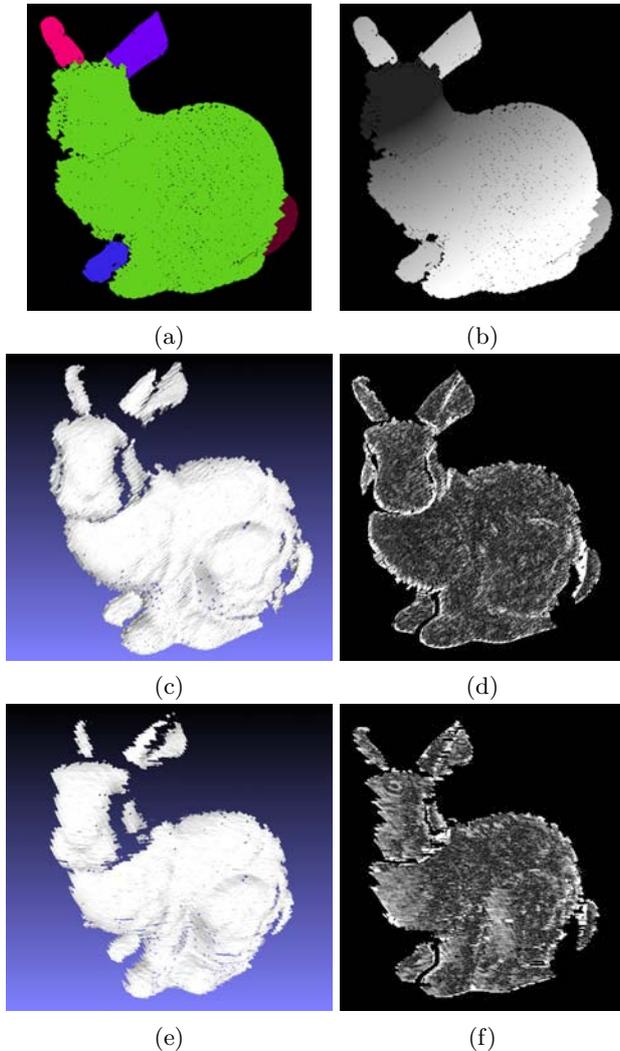


図5 図2(a)のもう一方の平行線集合に対する (a) 領域分割, および (b) 相対プロジェクタ座標の結果. (c) は3次元形状復元の結果. (d) は推定したプロジェクタ座標の誤差. (e),(f) は [15] の線検出法を用い, 線間を線型補間して得た3次元形状復元の結果とプロジェクタ座標の誤差. い. そこで, 推定結果と検出された位相が一致した解を得るために, まず変数を下記のように変換する.

$$s = Lq^n \tilde{s}, \quad t = Lq^n \tilde{t}, \quad (10)$$

ここで, L はプロジェクタ画像上での線間隔であり, 本論文では5または10画素である. 新たな変数 \tilde{s}, \tilde{t} を用いた拘束式では, これらの変数が整数の場合, 位相が一致した解が得られる.

これは解が整数である条件の下で線形方程式を解く, という整数最小二乗法 (integer least square, ILS) の問題とみなすことができる. この問題はGPSの計測において発生する問題 [21] であることが知られている. そこで, 本論文では ILS 解法の1つである MILES [22] を用いて \tilde{s}, \tilde{t} の整数解を求める.

6. 実験

実験ではまず, シミュレーションによって提案手法を評価する. レイトレーシングツールを使い, 観測対象

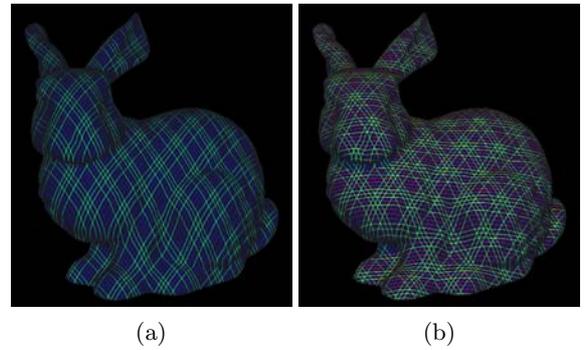


図6 観測対象が複数のプロジェクタからパターン投影されている場合: (a)2台, (b)3台.

と光源をシミュレートし, 仮想的なカメラ画像を生成する. 観測対象としては, スタンフォード大学の形状モデルデータベース [23] にあるウサギのモデルを用いた.

1台のプロジェクタの場合の入力画像は図2(a)であり, プロジェクタの画像軸に沿った2種類の平行線集合が対象に投影されている. 一方の平行線集合に対する領域検出の結果は図2(e)および(f)であり, もう一方の平行線集合に対する結果は図5(a)および(b)である. 検出された領域の数はそれぞれ4と5である. 従って式(6)の変数の数は9となり, ノンパラメトリックな3次元形状の復元における対応点探索問題としては非常に小さい数である. 復元した形状を図5(c)に示す. 提案手法の精度を評価するために, 推定されたプロジェクタ座標と, その真値を比較した. 図5(d)は, その誤差を明るさで表したものであり, 明るい画素ほど誤差が大きいことを示す. これより, オクルーディング境界に近い部分では誤差が大きいことが分かる. 観測対象上の全ての画素を用いた場合, プロジェクタ座標の平方二乗平均誤差 (root-mean-square error, RMS 誤差) は1.02画素となり, オクルーディング境界を除いた場合では, 0.175画素であった. 従って, カラーパターンから位相を計算するために十分表面がカメラとプロジェクタの方を向いている場合, サブピクセル精度で対応の計算が可能であることが確認できた. 図5(e)は [15] において提案された線検出法を用い, 線間を線型補間して得たモデルである. 単純な線型補間では形状が滑らかではないというアーチファクトが見られる. 図5(f)は, プロジェクタ座標の真値との比較であり, カメラから傾いた表面部分では提案手法と比べて, 誤差が大きくなっていることが分かる. RMS 誤差は全ての画素を用いた場合, オクルーディング境界を除いた場合でそれぞれ, 1.09画素, 0.198画素となり, 提案手法が12%程度良い結果となった.

次に複数のプロジェクタを用いた3次元形状復元について評価を行う. 図6(a)および(b)は, それぞれ2台および3台のプロジェクタを用いた場合の入力画像である. その内1つのプロジェクタは, 1台のプロジェクタを用いた場合と共通の配置である. カラーコードが正しく検出された場合, 対応点誤差は主に校正誤差が原因となる.

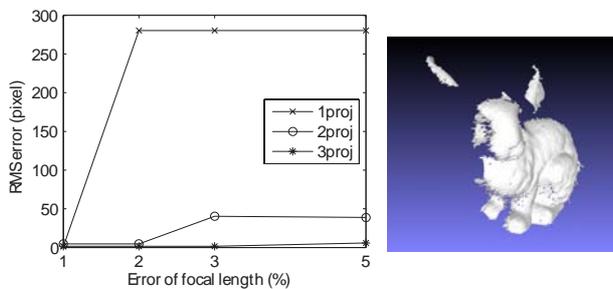


図7 (左) カメラの焦点距離に校正誤差を加えた場合の対応点の誤差の変化を、異なるプロジェクタ数で比較した結果 (右) 焦点距離の校正誤差が5%の場合、1台あるいは2台のプロジェクタを用いた場合では、推定したプロジェクタ座標では位相の周期を間違える部分が発生した。

そこで、校正誤差としてカメラの焦点距離に誤差を加え、対応点の安定性を評価した。

図7は、対応点のRMS誤差を1, 2, 3台のプロジェクタの場合について比較したものである。この実験ではカメラの画角は約56度であり、焦点距離の真値に対して、1, 2, 3, 5%の誤差を加えて評価した。この結果より、3台のプロジェクタを用いた場合、ほとんどの領域について正しく周期が推定されており、最も安定していることが分かる。これは、式(7),(8),(9)を解くために必要な情報が冗長に与えられているためであると考えられる。2台のプロジェクタを用いた場合では、図7(右)に示すように、校正誤差が2%より大きい場合では、周期の推定に誤差が発生する場合があった。同様に1台のプロジェクタを用いた場合、1%よりも焦点距離の校正誤差が大きい場合に周期推定に誤差が発生した。

平行線パターンは、それぞれ3次元空間中で平面をなし、ある1本の直線を軸として共有する[18]。1台と2台のプロジェクタを用いた場合の違いは、その軸が交差するか、ねじれの位置にあるかの違いである。[20]において議論されているように、軸がねじれの位置にある場合、線形解の安定性が改善する。この点が上記の結果において、2台のプロジェクタの場合が良い結果となった理由であると考えられる。この点について、さらに詳しい分析を行うことは今後の課題である。

次に、実際のカメラとプロジェクタを使って提案手法の実験を行う。導入部で述べたように、ワンショット形状計測の利点は、高速に動く対象の形状計測に適しているという点である。この実験では観測対象として、水しぶき、波打つ布、変形する顔の皮膚を選んだ。1台のプロジェクタを用いてパターンを投影し、入力画像はハイスピードカメラを用いて60~250コマ/秒で撮影した。カメラとプロジェクタの画像サイズは、それぞれ1024×1024, 1024×768画素である。

3つのデータについて、入力画像と結果のうち4フレームを図8に示す。水しぶき(a)の場合、白濁した水を用い、表面でパターンが反射するようにした。提案手法によって、ボールが水に落ちた際の水しぶきの形状計

測を行うことに成功した。波打つ布を計測した(b)の場合では、布表面の波および折り目を計測することができた。頬を手で叩いたシーンを観測した(c)の場合、復元した結果からその変形を観測することができる。提案手法の利点は、観測対象の動きが高速でも計測可能であり、また表面にテクスチャがない場合でも適用可能であることである。この実験では計算時間はIntel Xeon 2.4GHzを用いて、それぞれ1フレームあたり5.00, 6.15, 3.15秒であった。

7. おわりに

本論文では、グリッドパターンを投影した観測対象の1枚の画像から高密度な形状復元を行う手法について説明した。提案手法では、周期的なカラーパターンによってコード化された平行線集合を用い、その密な位相情報を計算することによって、連続な領域を検出する。形状復元に必要なパラメータは各領域にただか1つであるため、パラメータ数を非常に小さくすることができる。カメラ-プロジェクタ間の対応を決定する方法は、エピポーラ幾何に基づいた連立方程式に定式化され、整数最小二乗法によって解を求める。この定式化は、大域的な位相推定問題に対する新たな解法と位置づけられる。この定式化を1台および複数のプロジェクタを用いる場合の両方について行い、プロジェクタ台数が対応点の推定精度にどのような影響を与えるかについて評価した。実際のカメラとプロジェクタを用いて観測対象の形状計測を行い、高速に動く物体の高密度な形状計測を実現した。今後の研究においては、実時間復元に向けて計算時間の改善を目指す。

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] Microsoft: "Xbox 360 Kinect". <http://www.xbox.com/en-US/kinect>.
- [2] J. Batlle, 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).
- [3] D. Caspi, N. Kiryati and J. Shamir: "Range imaging with adaptive color structured light", *IEEE Trans. on PAMI*, **20**, 5, pp. 470-480 (1998).
- [4] S. Inokuchi, K. Sato and F. Matsuda: "Range imaging system for 3-D object recognition", *ICPR*, pp. 806-808 (1984).
- [5] K. L. Boyer and A. C. Kak: "Color-encoded structured light for rapid active ranging", *IEEE Trans. on PAMI*, **9**, 1, pp. 14-28 (1987).
- [6] T. Weise, B. Leibe and L. V. Gool: "Fast 3D scanning with automatic motion compensation", *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1-8 (2007).

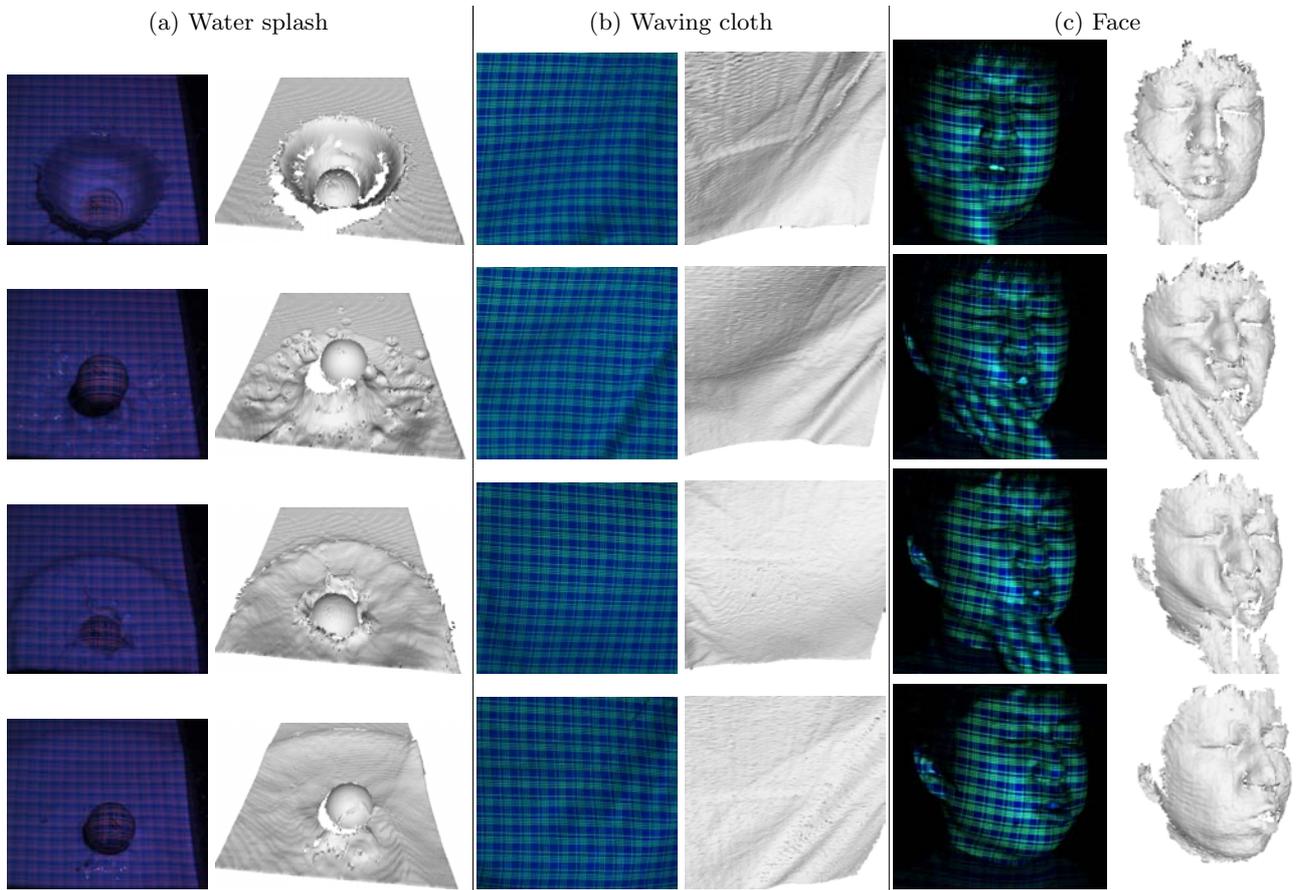


図 8 ハイスピードカメラと 1 台のプロジェクタを用いて運動・変形する観測対象の形状計測を行った結果：(a) ボールによる水しぶき，(b) 波打つ布，(c) 手で叩いた顔の変形。

- [7] S. Narasimhan, S. Koppal and S. Yamazaki: “Temporal dithering of illumination for fast active vision”, European Conference on Computer Vision, Vol. 4, pp. 830–844 (2008).
- [8] O. Hall-Holt and S. Rusinkiewicz: “Stripe boundary codes for real-time structured-light range scanning of moving objects”, ICCV, Vol. 2, pp. 359–366 (2001).
- [9] M. Young, E. Beeson, J. Davis, S. Rusinkiewicz and R. Ramamoorthi: “Viewpoint-coded structured light”, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (2007).
- [10] J. Davis, D. Nehab, R. Ramamoorthi and S. Rusinkiewicz: “Spacetime stereo: A unifying framework for depth from triangulation”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), **27**, 2, pp. 296–302 (2005).
- [11] L. Zhang, N. Snavely, B. Curless and S. M. Seitz: “Spacetime faces: High-resolution capture for modeling and animation”, ACM Annual Conference on Computer Graphics, pp. 548–558 (2004).
- [12] 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).
- [13] P. Vuytsteke and A. Oosterlinck: “Range image acquisition with a single binary-encoded light pattern”, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., **12**, 2, pp. 148–164 (1990).
- [14] H. Kawasaki, R. Furukawa, R. Sagawa and Y. Yagi: “Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern”, CVPR, pp. 1–8 (2008).
- [15] 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).
- [16] A. O. Ulusoy, F. Calakli and G. Taubin: “One-shot scanning using de bruijn spaced grids”, The 7th IEEE Conf. 3DIM (2009).
- [17] J. Gühring: “Dense 3-d surface acquisition by structured light using off-the-shelf components”, Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement, Vol. 4309, pp. 220–231 (2001).
- [18] R. Furukawa, H. Kawasaki, R. Sagawa and Y. Yagi: “Shape from grid pattern based on coplanarity constraints for one-shot scanning”, IPSJ Transaction on Computer Vision and Applications, **1**, pp. 139–157 (2009).
- [19] J. Salvi, J. Battle and E. M. Mouaddib: “A robust-coded pattern projection for dynamic 3D scene measurement”, Pattern Recognition, **19**, 11, pp. 1055–1065 (1998).
- [20] 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).
- [21] P. Teunissen: “The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS ambiguity estimation”, Journal of Geodegy, **70**, pp. 65–82 (1995).
- [22] X.-W. Chang and T. Zhou: “MILES: MATLAB package for solving Mixed Integer LEast Squares problems”, GPS Solutions, **11**, 4, pp. 289–294 (2007).
- [23] “The Stanford 3D Scanning Repository”, <http://www.graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/>.