

鏡によるパターン光の多重照射を考慮した 仮想多視点アクティブステレオ

田原 都夢^{1,a)} 川原 僚¹ 延原 章平¹ 松山 隆司¹

概要：複合鏡を備えた仮想的な多視点アクティブステレオによる物体の全周囲3次元形状計測を目的として、空間符号化光の物体表面上での多重照射領域における復号誤りを抑制する新たな符号化法を提案する。提案手法では実一仮想プロジェクタ間のエピポーラ幾何を考慮することにより、物体の形状が未知であっても互いに多重照射を生じうるプロジェクタ画素を特定し、それらに同一の符号を割り当てることで符号衝突を原理的に回避する。シミュレーション及び実画像を用いた実験により提案手法の有効性を示した。

1. はじめに

コンピュータビジョンにおける物体の全周囲3次元形状計測では、物体表面全体を多視点から撮影した画像を用いる必要がある。よって、通常は計測物体を取り囲むように複数のカメラを配置する [1]、1台のカメラを移動させながら撮影する、などの何らかの方法で多視点撮影環境を構築する。また、このようにして得られた撮影画像から形状を復元するには、多視点画像間で対応点を得る必要があるが、特に静止物体を対象とした場合は、構造化光を用いた手法が高精度な形状計測を実現する対応付け手法として知られている [2]。

本研究では、カメラの配置が1視点に限定される環境下での計測を想定する。この場合、上に述べたようなカメラ配置を用いることができないため、計測物体の背後に鏡を配置して仮想的な多視点撮影を行うアプローチを採り、この鏡による仮想多視点環境において構造化光を用いることで高精度な全周囲3次元形状計測の実現を目指す。

すなわち、カメラと同一の方向に配置したプロジェクタによってアクティブステレオシステムを構成し、プロジェクタから投影したパターン光を被写体表面上に直接、また同時に鏡を介して間接的に投影し、投影されたパターン光をカメラで撮影することでカメラプロジェクタ間で一意な対応付けを取得して三角測量により全周囲3次元形状を得る。

このような鏡を用いた仮想多視点アクティブステレオによる物体の3次元形状計測で問題となるのは、物体表面上でのパターン光の多重照射である。これは対象表面上のあ

る点が、あるプロジェクタ画素により直接照射され、かつ別のプロジェクタ画素によっても鏡を介した反射光によって照射されることにより、1つのカメラ画素に複数の符号が同時に照射されてしまうという状況のことである。この状況下では符号を正しく復号することが単純にはできないため、多重照射箇所では対象の3次元形状を得ることが困難となる。

本研究ではこの問題を解決するために、たとえ未知の形状をもつ対象表面上で多重照射が生じたとしても、符号の衝突が原理的に生じえないパターン光の投影方法を提案する。具体的には、鏡を配置することで定まる実一仮想プロジェクタ間のエピポーラ幾何を考慮することで、撮影対象とは無関係に、互いに多重照射の関係になりうるプロジェクタ画素群を一意に同定することが可能であることを示し、各プロジェクタ画素群毎に同一符号を割り当てれば、原理的に符号の衝突が起こりえないことを示す。

2. 関連研究

鏡を用いた単一視点による全周囲3次元形状計測として、Forbesら [3] は shape-from-silhouette に基づいた手法を提案している。この研究ではカメラのキャリブレーション問題も同時に解いているが、一方で被写体の visual hull しか得られないために正確な形状計測は原理的に実現できない。

これに対して鏡とアクティブステレオを用いた全周囲3次元形状計測として Lanmanら [4] は正射影プロジェクタにより、水平方向のグレイコード [5] を投影する手法を提案している。この手法ではプロジェクタと計測物体の間にフレネルレンズを配置し、プロジェクタからの入射光を平

¹ 京都大学大学院情報学研究科

^{a)} tahara@vision.kuee.kyoto-u.ac.jp

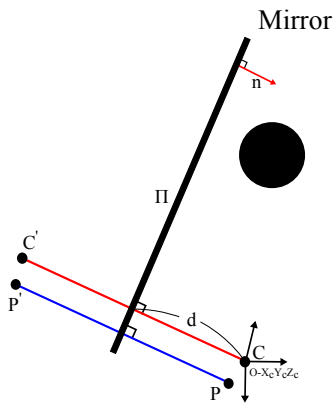


図 1 計測モデル

行化して正射影光学系を構成する。このとき、平行化された光線がなす平行平面群とプロジェクタの各スキャンラインが一致するように装置を構成することで、水平方向のグレイコードにより多重照射領域についても一意な符号化が可能となる。しかしこの手法はレンズとプロジェクタの正確な位置合わせに要する手間や、フレネルレンズの分解能に起因する低解像度などが問題となってしまう。

また柏野ら [6] は ToF カメラを鏡と組み合わせた全周囲 3 次元形状計測を提案している。この手法では対象の 3 次元形状をワンショットで得ることができるが、多重照射についてはその影響を無視している。

これらの研究に対して、本研究では通常の透視投影プロジェクタから投影する符号画像を工夫することで、多重照射の問題を解決する。一方でカメラ・プロジェクタ・鏡のキャリブレーションは事前に行われているものと仮定し、また 3 次元形状計測には複数枚の画像投影・計測を要する。

なお上記の単一視点からの 3 次元形状計測を行う上では、カメラ [7]、プロジェクタ [8], [9]、鏡 [10] をそれぞれキャリブレーションしなくてはならないが、本研究では後述のように簡便な手法で初期値を推定し、対応点から推定された 3 次元点の再投影誤差を最小化することでキャリブレーションを行った。

3. 計測モデル

本研究では図 1 のようにプロジェクタ P の上方にカメラ C を、両者の正面方向に計測対象を配置する。また以降特に断りが無い限りはカメラ座標系を世界座標系とする。

対象物体の背後には距離 d 、法線方向 n の平面鏡 Π が存在し、カメラ C とプロジェクタ P は対象を直接的にも、鏡 Π を介して間接的にも計測することができる。この鏡 Π によってつくられるカメラ C とプロジェクタ P の鏡像を仮想カメラ C' 及び仮想プロジェクタ P' と定義する。

カメラ C の内部パラメータ A_c はチェスボードを用いて Zhang[7] の手法に基づき求める。またプロジェクタの内部パラメータ A_p 及び外部パラメータ R_p, t_p は、内部パラ

メータが既知となったカメラ C を用いて、チェスボード上にプロジェクタからチェスパターンを重畳表示することで求める [8]。鏡の位置・姿勢を表すパラメータ d, n は、チェスパターンの実像と鏡像をカメラで同時に計測してそれぞれから格子点を検出し、それらの 3 次元位置の中点を計算することで推定する。

4. 多重照射に頑健な符号化パターンの生成法

4.1 多重照射と符号衝突

グレイコードのような 2 値パターン ('0' or '1') を投影することを考えると、多重照射箇所が生じる状況には

場合 1 同一の符号が異なるプロジェクタ画素から多重に照射される ('0' or '1' 同士)

場合 2 異なる符号が異なるプロジェクタ画素から多重に照射される ('1' と '0' の符号衝突)

の 2 通りが考えられる。場合 1 では、直接光に対応するプロジェクタ画素と反射光に対応するプロジェクタ画素に割り当てられる符号がこの bit では一致していることを表している。これに対して、場合 2 では照射箇所に異なる符号が二重に割り当てられる。前者は復号に影響しないが、後者は符号衝突が生じているため、該当 bit に対応する符号を一意に決定できず、正確な復号が困難となる。

本研究における多重照射を考慮した照射パターンとは、場合 2 の状況が原理的に生じ得ない照射パターンのことである。すなわち、多重照射が生じても常に直接光に対応する画素と反射光に対応する画素との符号が一致していて、一意に復号が可能な照射パターンを指す。以下、実プロジェクタ P とその鏡像である仮想プロジェクタ P' の間のエピポーラ幾何を利用する具体的な生成手法を示すとともに、これが物体の 3 次元形状とは独立であり、未知の 3 次元形状に対して適用可能であることを示す。

4.2 実プロジェクター仮想プロジェクタ間のエピポーラ幾何

図 2 のように、プロジェクタ P とその鏡像である仮想プロジェクタ P' において、 P の画素 p から出る光が物体に直接照射される状況を考える。このとき P の投影中心 o 、 P' の投影中心 o' 、画素 p の 3 点を通るエピポーラ平面 (図 2 赤三角形) と、 P' の画像平面の交差として、仮想プロジェクタ画像平面上にエピポーラ線 l' が得られる。

このことは p から出た光がどれだけ進んで計測物体表面へと到達したかに応じて、 l' 上のいずれかの画素が多重照射 p と多重照射の関係になることを示しており、したがって任意の実プロジェクタ画素 p に対して、対応するエピポーラ線 l' 上の仮想プロジェクタ画素集合に割り当てられた符号が常に同一であれば、たとえ多重照射が生じたとしても、符号の衝突が生じえない。

逆に実プロジェクタ画素 p の鏡像である仮想プロジェク

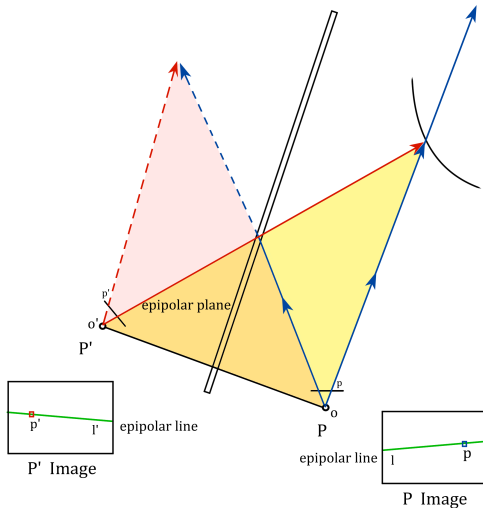


図 2 $P - P'$ 間のエピポーラ幾何

タ画素 p' が、実プロジェクタ P の画像平面上で形成するエピポーラ線 l を考える。ここで 3 点 o, o', p により定まるエピポーラ平面 (図 2 黄三角形) と、3 点 o, o', p' により定まるエピポーラ平面 (図 2 赤三角形) は、 p と p' 、及び o と o' が鏡像の関係であることから同一の平面であり、 P と P' の画像平面もまた鏡像の関係であるため、 l と l' は鏡像の関係となり、もとの画素 p はエピポーラ線 l 上に存在することがわかる。すなわち実プロジェクタ画素 p と多重照射の関係になることができる実プロジェクタ画素は、 p を通過するエピポーラ線 l 上の画素のみであるといえる。

これに加えて、ある実プロジェクタ画素 p によって決まるエピポーラ線 l 上の、 p 以外の実プロジェクタ画素 q を考えると、 q もまた同一のエピポーラ平面上に存在していることには変わりがないため、やはり同じエピポーラ線 l 上の画素とのみ多重照射の関係になることができる。

以上より、

- 実プロジェクタでエピポーラ線 l 上の画素は、それぞれ互いに同じエピポーラ線 l 上の画素とのみ多重照射の関係となりえること、
- エピポーラ線 l は仮想プロジェクタの位置・姿勢を決定する鏡の位置・姿勢のみに依存し、計測対象の形状とは無関係に決まるため、対象形状が未知であっても、鏡の位置・姿勢が既知であれば常に上記の関係が成り立つこと

がわかる。

したがって、エピポーラ線 l に沿って同一の符号を割り当てるように照射するパターンを生成すれば、対象の 3 次元形状に関係なく異符号の衝突は原理的に生じえず、多重照射箇所においても一意に復号することが可能であるといえる。

4.3 多重照射に頑健な符号化パターン

これまでに述べたように、各プロジェクタ画素 p に対して仮想プロジェクタ P' の画像平面上のそれぞれのエピポーラ線 l' に沿って同一の符号を割り当てるパターンを生成することは、鏡像の関係より P の画像平面上のエピポーラ線 l に沿って同一の符号を割り当てるパターンを生成することと等価である。

具体的には $o - o'$ を結ぶベースラインと、実プロジェクタ P の画像平面との交点であるエピポール e を中心とする極座標画像座標系 (r, θ) を考え、 θ を符号化すればよい。すなわち

- (1) プロジェクタ P に対する相対的な鏡の位置・姿勢を入力として、エピポール e を求める。
 - (2) プロジェクタの各画素 (u, v) を、 e を中心とする極座標 (r, θ) で表す。
 - (3) $\theta \in [-\pi, \pi]$ を適切な分解能 N ビットで離散化して $[0 : 2^N - 1]$ の 2 値符号 $b(u, v)$ 、さらにグレイコード $g(u, v)$ へと変換する。
 - (4) グレイコード $g(u, v)$ の各ビットについて画像生成し、計 N 枚のパターン画像を得る。
- とする。

4.4 実プロジェクタ-カメラ間エピポーラ線を利用した画素対応付け

これまでに定義した符号化パターン画像では、極座標系の θ のみを符号化したため、X 方向・Y 方向を符号化したパターン画像を撮影する一般的な計測方法のように、撮影画像から復号するだけでは一意にカメラ-プロジェクタ間で画素の一意な対応付けを決定することができないが、以下に述べるように実プロジェクタと実カメラの間のエピポーラ拘束を考えることで一意な対応付けを得ることが可能である。

$P - P'$ 間のエピポーラ線に沿ったパターンを P から投影してカメラ C で撮影するとき、 C の画素 x が P 上のどの $P - P'$ エピポーラ線に対応しているかが一意に定まる (図 3)。このエピポーラ線を $l_{p'}(x)$ とする。一方 $C - P$ 間でのエピポーラ拘束を考慮すると C の画素 x に対応し得る P の画素は $C - P$ エピポーラ線上にのみ存在し得る (図 4)。このエピポーラ線を $l_c(x)$ とする。すなわち、カメラ画素 x に対応する P 画像中の点 y は $l_{p'}(x)$ と $l_c(x)$ の上に存在しなくてはならない。したがってそれらの実プロジェクタ上の 2 直線の交点、カメラ画素 x との対応点となる。

なおこのような $l_{p'}(x)$ と $l_c(x)$ の交点が存在するためには、両者は平行であってはならない。すなわち仮想プロジェクタ、実プロジェクタ、カメラの 3 者が同一直線上に並ぶ配置では本手法を用いることができない。これはエピポーラ拘束からパターン画像を生成するうえでの制約で

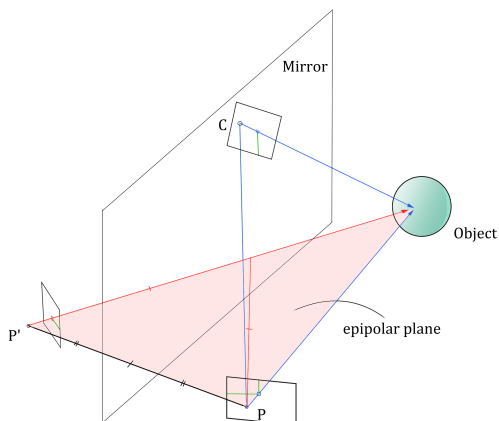


図 3 $P - P'$ 間エピポーラ線との対応

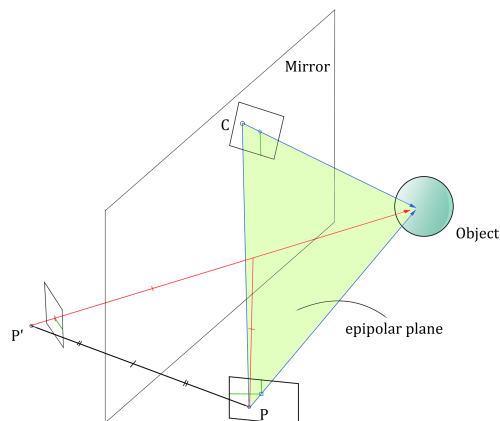


図 4 $P - C$ 間エピポーラ線との対応

ある。

具体的には、カメラ C - 実プロジェクタ P 間のエピポーラ線 $l_c(x)$ を表す式は、キャリブレーションにより各種パラメータが既知であるとしているため、 F 行列によって表現できる。すなわち、同次座標表現されたカメラ画像座標 $(u_c, v_c, 1)$ とプロジェクタ画像座標 $(u_p, v_p, 1)$ が対応しているとき

$$(u_p, v_p, 1)F(u_c, v_c, 1)^T = 0 \quad (1)$$

の関係が成り立つことから、あるカメラ画素 (u_c, v_c) を選んだときに

$$(a, b, c)^T = F(u_c, v_c, 1)^T \quad (2)$$

とおくことで、プロジェクタ画像へと伸びるエピポーラ線を

$$l_c(x) : au_p + bv_p + c = 0 \quad (3)$$

として表せる。

一方で実プロジェクタ P - 仮想プロジェクタ P' 間のエピポーラ線を表す式 $l_{p'}(x)$ は、復号された符号がエピポール $e = (u_e, v_e)$ を通過するエピポーラ線の傾き θ を直接表現しているため、

$$l_{p'}(x) : (v_p - v_e) \cos \theta = (u_p - u_e) \sin \theta \quad (4)$$

として得られる。

こうしてカメラ画素とプロジェクタ画素の対応付けが得られると、三角測量により物体表面上の対応点の3次元位置を計測することができるため、各対応点について計測を行うことで物体の3次元形状を得ることができる。

5. アルゴリズム

ここまで述べた原理に基づいた本研究での提案手法全体のアルゴリズムは次に示す通りである。

- (1) カメラ、プロジェクタ、鏡のキャリブレーションを行う。

- (2) 実-仮想プロジェクタ間のエピポーラ幾何に基づいて投影パターン画像を生成する。
- (3) 生成したパターン画像を計測対象に投影したものを撮影する。
- (4) 撮影画像から各カメラ画素の符号を復号する。
- (5) 各カメラ画素の符号からエピポーラ線 $l_{p'}$ を計算し、これともう一方のエピポーラ線 l_c との交点をもってその画素の対応点とする。
- (6) 三角測量により計測対象の3次元形状を復元・出力する。このとき画像中の直接像からは対象の正面部分が実像として、反射像からは側面部分が鏡像として得られる。
- (7) 三角測量により得られた点が、鏡に対して正負どちらの方向に存在するかによって、その点が実像であったか、鏡像であったかを判定する。鏡像を鏡平面に対して鏡映変換し、実像と統合することで全周囲3次元形状を得る。

なお本研究では、具体的にはカメラ・プロジェクタ・鏡のキャリブレーションを次のような手順で行った。

- (1) チェスボードを用いたカメラの内部キャリブレーション
- (2) カメラを用いたプロジェクタの内部・外部キャリブレーション
- (3) チェスボードの実像と鏡像を撮影することによる鏡の位置・姿勢キャリブレーション
- (4) 再投影誤差の非線形最小化によるパラメータ最適化

6. 評価実験

本節では、提案手法の有効性をシミュレーションにより定量的に評価した後に、実環境で実際にその有効性を確認する。

6.1 シミュレーションによる評価

図 5 の装置構成を模擬したシミュレーション環境におい

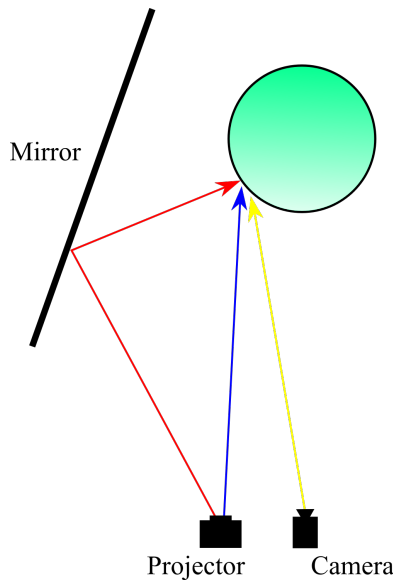


図 5 シミュレーション環境

て、通常のグレイコードパターンを投影した場合と提案手法による生成パターンを投影した場合に、多重照射箇所ではどの程度の異符号衝突が生じるのか検証する。

6.1.1 評価方法

シミュレーションにおいてはプロジェクタ、カメラ及び鏡が全てキャリブレーション済みであるとして各種パラメータの真値を

$$A_c = A_p = \begin{pmatrix} 320 & 0 & 320 \\ 0 & 320 & 240 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$R_p = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, t_p = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$n = \begin{pmatrix} 0.9701 \\ 0 \\ -0.2425 \end{pmatrix}, d = 5.0932, \quad (7)$$

として予め与える。計測対象として設定した半径 $R = 2.0$ の球 S を $(0, 0, 5)$ に配置し、直接光によるカメラ画像と、反射光によるカメラ画像を、レイトレーシングによって別々に生成した。なお簡単のため環境光はなく、プロジェクタによって 0 の符号が投影されれば黒（輝度値 0）、1 の符号が投影されれば白（輝度値 255）となるものとした。またレンズ歪は存在しないものとした。図 6 に生成された画像の例を示す。

こうしてグレイコードの各ビットに対して直接光と反射光それぞれ 2 つの画像が生成され、ある画素がこれらの画像で別の符号、つまり相異なる輝度値をもっていれば、その画素では異符号の衝突が生じているといえる。

6.1.2 結果

通常のグレイコードと、提案手法による生成パターンを



図 6 生成された画像の例。左：直接光による像，右：反射光による像。

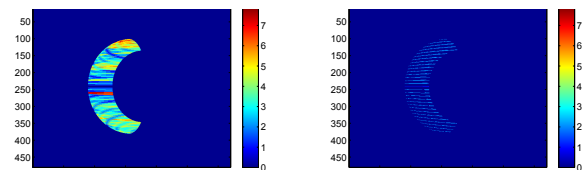


図 7 異符号衝突回数分布（左：従来法，右：提案手法）

いずれも 10 ビット分の画像として投影した場合の異符号衝突回数の分布を図 7 に示す。図中で青は符号衝突が起きなかったことを、赤に近づくほど多くのビットで衝突が生じたことを示している。

図 7 よりグレイコードを用いた場合は多重照射箇所において頻繁な異符号衝突が生じているが、提案手法にて生成したパターンを用いた場合は異符号衝突回数が大幅に減少していることが確認できる。また、一部の符号衝突が生じている箇所については照射パターンの白と黒の境界線近傍に集中している。これは、画像の斜め方向に伸びるエッジポラ線に沿う符号化を行うにあたって生じ得る境界線近傍の量子化誤差であると考えられる。

またキャリブレーション精度が符号衝突に与える影響を評価するために、提案手法によってパターンを生成する際に使用したエッジポールの画像座標に対して、ノイズとして平均 0 の正規乱数を加えた場合の結果を図 8 に示す。横軸は正規乱数の標準偏差（ピクセル）を表し、縦軸は多重照射が生じている領域中で、実際に符号衝突が生じた画素の割合である。図 8 において、通常のグレイコードを 10 ビット分投影した場合の符号衝突割合（赤線）と比較すると、提案手法により生成したパターンを投影したときの符号衝突割合（青線）は、エッジポールの計算に数画素分の誤差が生じていても、その符号衝突割合は格段に減少していることが確認できる。

以上より、提案手法による生成パターンを用いることで、たとえ数画素分のキャリブレーション誤差が存在していたとしても、従来のパターンに比べて多重照射箇所における異符号衝突を大幅に低減させることができ、一意な復号が可能であることが定量的に確認できた。

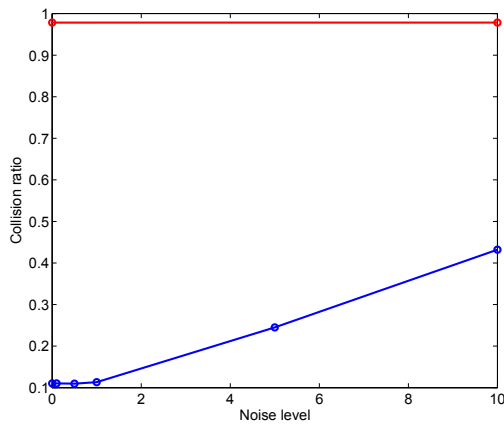


図 8 エピボールの座標値にノイズを与えた際の符号衝突画素割合の変化 (赤: 従来のパターン, 青: 提案手法. 平均 0, 標準偏差 $\sigma = 0, 0.1, 0.5, 1, 5, 10$ とした正規乱数をエピボールの座標値に加えた)



図 9 実験環境

6.2 実環境実験による評価

6.2.1 装置構成

図 9 に本研究で用いた実際の装置構成を示す. カメラは Pointgrey CMLN-13S2C を使用し, 解像度 1280×960 の画像を撮影した. パターン光を照射するプロジェクタは, 直接照射像と鏡による間接照射像が物体上で同時に合焦することを保証するために, レーザプロジェクタ (SHOWWX + Laser Pico Projector) を使用し, 解像度 640×480 の画像を投影した^{*1}. 計測物体は高さ約 20cm の石膏像であり, 物体の側方に表面反射鏡を設置した. その他, 各種キャリブレーションや再投影誤差最小化の過程において必要な画像を撮影するために, チェスパターンが印刷されたボードや白色のボードを使用した.

6.2.2 計測結果

キャリブレーションにより得たパラメータを用いて, 提案手法により生成した図 10 のようなパターンを投影することで, 図 11 のような撮影画像が得られた. また特に多重照射領域の一部を拡大したものを図 12 に示す.

両図左側の画像は, 通常のグレイコードパターンを照射した場合の撮影画像の例であり, 多重照射箇所では符号衝

^{*1} 本来は 848×480 であるが実験上は 4:3 の範囲で使用した.



図 10 実際に生成したパターン画像例 (プロジェクタにはこれを k_p で歪み補正した画像を入力する)

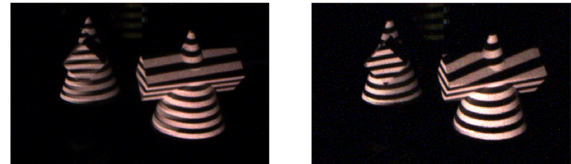


図 11 パターン照射時の撮影画像例 (左: 従来法, 右: 提案手法)



図 12 多重照射領域の拡大図 (左: 従来法, 右: 提案手法)

突が生じて白黒が混ざって中間輝度となっていることが確認できる. これに対して, 両図右側の画像は提案手法による生成パターンを照射した場合であり, 多重照射箇所でも符号衝突が生じておらず, 中間輝度となった画素が少ない. このことは図 13 に示した輝度分布, および図 14 に示した図 12 内の輝度ヒストグラムからも確認でき, 明らかに提案手法の方が安定に復号処理を行うことができる.

次に, 撮影画像を用いて, カメラ C - 実プロジェクタ P 間のエピポーラ線と実プロジェクタ P - 仮想プロジェクタ P' 間のエピポーラ線の交点を求めることにより, カメラ画素とプロジェクタ画素の対応付けを行い, 対応付けが取れた画素を元に計測対象表面上の対応点の 3 次元位置を計測した. 図 15 にその計測結果を示す. 図 15 では計測対象の実像と鏡像それぞれについて三角測量を適用してその 3 次元位置を描画している. この結果から, 提案手法によって現実的なキャリブレーション精度のもとで直接像と鏡映像を同時に利用した 3 次元形状計測が可能であることが確認できた.

6.3 考察

提案手法によって, たとえ理想的なキャリブレーション精度でなくとも, 多重照射による符号衝突を起こすことな

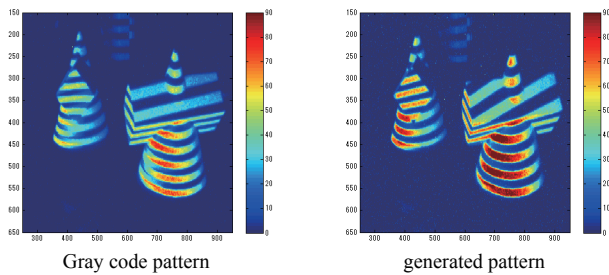


図 13 輝度分布 (左: 従来法, 右: 提案手法)

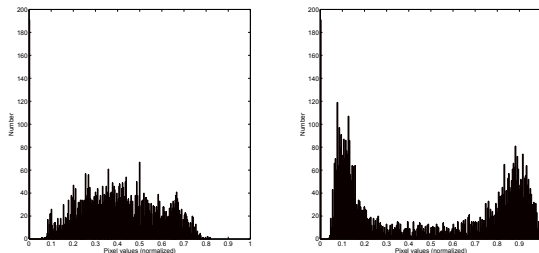


図 14 輝度のヒストグラム (左: 従来法, 右: 提案手法)

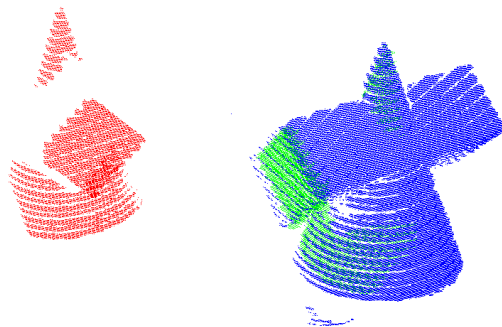


図 15 計測対象の3次元形状 (青: 実像, 赤: 鏡像, 緑: 鏡像を鏡平面に対して折り返したもの)

く、直接像と反射像を同時につかっただ次元形状計測を行うことが可能であることが定量的・定性的に示されたが、図 15 では量子化誤差により符号衝突が生じ、カメラ画素とプロジェクタ画素との対応付けが得られなかった部分が欠損となって復元形状中で筋のようにして現れていることが確認できる。X 軸・Y 軸に沿ったパターン画像生成に比べて、このような量子化誤差が生じる点は本研究の今後の課題である。

また図 15 では鏡映変換によって折り返された鏡像が、実像とわずかながらずれていることが確認できる。本実験でのキャリブレーションはサブピクセルレベルまで再投影誤差を最小化できていたため、この原因は仮想プロジェクタ-実プロジェクタ間のエピポーラ線を検出する際に生じる曖昧さが考えられる。すなわち提案手法によるパターン画像は、いずれもエピポールを中心として扇形に白黒の領域が分割された構造を持つため、エピポールから距離が

離れるにつれて幅が大きくなり、正確には太さ 0 の線とならない。そのためカメラ側の画素に対応しうるプロジェクタ画素は、扇形の幅に応じて複数存在し、それらの中からどの画素を選ぶべきかまでは今回の実装では検討しなかった。結果としてこの数画素分の誤差が、折り返した形状同士的位置ずれとして現れたものと考えられる。この点もまた本研究の今後の課題である。

7. まとめ

本論文では鏡を用いた仮想多視点アクティブステレオのために、鏡による反射光がもたらす物体表面上での直接光との多重照射に対して頑健に復号可能なパターン画像の生成法を提案した。提案手法のポイントは実プロジェクタと仮想プロジェクタ間のエピポーラ幾何に基づいて、物体の 3 次元形状によらず常に異符号の衝突を回避できるパターンを生成する点にあり、実験によって定量的にその有効性を確認することができた。

今後は鏡平面に関して鏡像を折り返した際に生じた実像との誤差を解決するために、今回は照射するパターンとして、グレイコードのような 2 値符号をベースとしたパターンを生成したが、輝度値が正弦波のように連続的に変化するパターン [11] など、より量子化誤差の影響に強いパターンの利用を検討する予定である。

また本論文では直接光と 1 回反射光の間の多重照射のみを扱った。今後は 2 回反射など多重反射光についても検討を行い、より多くのカメラ画素・プロジェクタ画素を活用した高精度な 3 次元形状計測の実現を目指す。

謝辞 本研究は科研費 (課題番号 26240023) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Matsuyama, T., Nobuhara, S., Takai, T. and Tung, T.: *3D Video and Its Applications*, Springer (2012).
- [2] Salvi, J., Pages, J. and Battie, J.: Pattern codification strategies in structured light systems, *Pattern Recognition*, Vol. 37, No. 4, pp. 827-849 (2004).
- [3] Forbes, K., Nicolls, F., Jager, G. D. and Voigt, A.: Shape-from-silhouette with two mirrors and an uncalibrated camera, *Proc. of ECCV* (2006).
- [4] Lanman, D., Crispell, D. and Taubin, G.: Surround structured lighting: 3-D scanning with orthographic illumination, *CVIU*, pp. 1107-1117 (2009).
- [5] 佐藤宏介, 井口征士: 空間コード化による距離画像入力, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J68-D, No. 3, pp. 369-375 (1985).
- [6] 柏野孝士, 延原章平, 松山隆司: 複合鏡を用いた単一深度カメラによる全周囲 3 次元形状計測, 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), Vol. CVIM-192(5) (2014).
- [7] Zhang, Z.: A Flexible New Technique for Camera Calibration, *IEEE TPAMI*, Vol. 22, No. 11, pp. 1330-1334 (2000).
- [8] Kimura, M., Mochimaru, M. and Kanade, T.: Projec-

- tor Calibration using Arbitrary Planes and Calibrated Camera, *Proc. of CVPR*, pp. 1–2 (2007).
- [9] Yamazaki, S., Mochimaru, M. and Kanade, T.: Simultaneous self-calibration of a projector and a camera using structured light, *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, pp. 60–67 (2011).
- [10] Takahashi, K., Nobuhara, S. and Matsuyama, T.: A new mirror-based extrinsic camera calibration using an orthogonality constraint, *Proc. of CVPR*, pp. 1051–1058 (2012).
- [11] Savarese, S., Bouquet, J.-Y. and Perona, P.: 3D Depth Recovery with Grayscale Structured Lighting, Technical report, California Insitute of Technology (1999).