

複合鏡を用いた全周囲3次元形状計測のための プロジェクタ・カメラシステム

田原 都夢 川原 僚 延原 章平 松山 隆司
京都大学大学院情報学研究科

1 はじめに

画像を用いて物体の全周囲3次元形状計測を行うには物体表面全体を撮影する必要があることから、物体を取り囲むように複数台のカメラを用意する、1台のカメラを移動させながら撮影する、鏡を用いるなど、何らかの方法で多視点撮影環境を構築する必要がある。ま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、一般に既知の構造化光を用いた手法が高精度な形状計測を実現することが知られている。

本研究では、鏡による仮想多視点環境において、構造化光を用いた高精度な3次元形状計測の実現を目指す。具体的には、プロジェクタ・カメラシステムによるパターン投影と複合鏡を組み合わせる手法を用いる。プロジェクタ・カメラシステムにおいては、プロジェクタ画素を一意的に符号化するパターン光を対象に投影し、これをカメラで撮影して三角測量により物体の3次元形状を得ることができる。

このようなプロジェクタ・カメラシステムを、複合鏡による仮想視点環境に導入するうえでの問題点は物体表面上でのパターン光の多重照射である。すなわち対象表面上のある点が、プロジェクタにより直接照射され、かつ、鏡面で反射した光によっても照射されるとき、1つのカメラ画素に対して複数の符号が同時に照射されることとなり、正しく復号することができない。本研究ではこの問題を解決するために、多重照射の影響を受けずに復号可能な照射パターンを用いる手法を提案する。

2 関連研究

鏡とプロジェクタ・カメラを用いた全周囲3次元形状計測として Lanman ら [1] は正射影プロジェクタを用いた手法を提案している。正射影投影では本質的に多重照射が発生し得ないが、正射影光学系を構成するためのコストが膨大となる。Lanman らはフレネルレンズによって低コスト化を図っているが、その際はフレネルレンズの分解能に起因する精度限界が生じる。これに対して、本研究では透視投影光学系のみで全周囲3次元形状計測を行う。提案手法では、多重照射の発

生を回避するのではなく、多重照射が生じた箇所についても正しく復号できるような照射パターンを生成することで対応付けを取ることを目指す。

3 多重照射に頑健な照射パターン

グレイコードのような2値パターンを投影することを考えるとき、多重照射箇所が生じうる状況には、

1. 同一の符号で多重に照射される (白のみ or 黒のみ)
2. 異なる符号で多重に照射される (白と黒の符号衝突)

の2通りが考えられる。1の場合は、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おり、復号には影響を与えない。これに対して2の場合は、照射箇所異なる符号が二重に割り当てられるために、正確な復号が困難となる。

本研究における多重照射に頑健な照射パターンとは、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。

このような照射パターンの具体的な生成手法として、実プロジェクタとその鏡像である仮想プロジェクタの間のエピポーラ幾何を利用する。図1のように、プロジェクタ P の鏡像である仮想プロジェクタ P' を考える。 P の画素 p から出る光が物体に直接照射されるとする。このとき、 P の投影中心 o 、 P' の投影中心 o' と p を通るエピポーラ平面と、 P' の画像平面の交差として仮想エピポーラ線 l' が得られる。これにより、 p から出た光が計測物体のどの部分に照射されるかに応じた l' が定まる。 p を通る直接光とその他の画素を通り鏡面 Θ で反射した光によって多重照射が生じている場合、仮想プロジェクタの画像平面上で l' 上に存在する仮想画素と p のそれぞれに対応する符号が多重照射箇所に割り当てられることとなる。

ここで p の鏡像である仮想画素 p' が P の画像平面上で形成するエピポーラ線を l とする。 $o-o'-p$ により定まるエピポーラ平面と $o-o'-p'$ により定まるエピポーラ平面は、 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' は鏡像の関係となる。従って l 上の画素のみが Θ での反射により p と多重照射の

A Projector-Camera System for Full 3D Shape Capture using Multiple Mirrors
T. Tahara, R. Kawahara, S. Nobuhara and T. Matsuyama (Kyoto Univ)

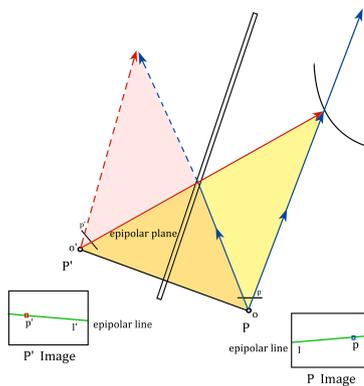


図 1: 実プロジェクタ-仮想プロジェクタ間のエピポーラ幾何



図 2: エピポーラ線に沿う生成パターン例

関係となり得る. さらに, l 上の画素 p 以外の画素 q についても, q の鏡像 q' は l 上に存在し, q' と多重照射の関係となり得る実画素は l 上のみ存在する.

以上のことから, 多重照射箇所照射される光が出ているプロジェクタ画素 p が存在するエピポーラ線に沿って同一の符号を割り当てるような照射するパターンを生成すれば, たとえ多重照射が生じたとしても, 符号の衝突が起きないことが保証できる. これは, 実プロジェクタ側のエピポールを求めて, エピポールから実プロジェクタ画像へ向かって伸ばしたエピポーラ線に沿って符号を与える図 2 のような画像を生成することを意味する.

4 実験

図 3 の環境を模擬したシミュレーション環境において, 通常のグレイコードを照射した場合と前節で生成したパターンを照射した場合のそれぞれの撮影画像及び異符号の衝突回数の分布を図 4, 5 に示す. 同図より通常のグレイコードでは多重照射箇所において異符号

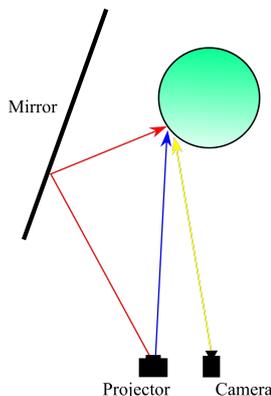


図 3: シミュレーションモデル

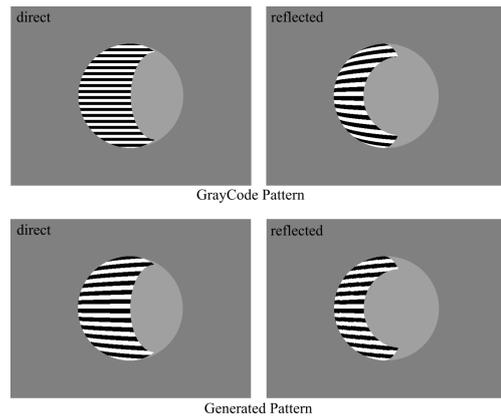


図 4: 各パターン照射時の撮影画像例

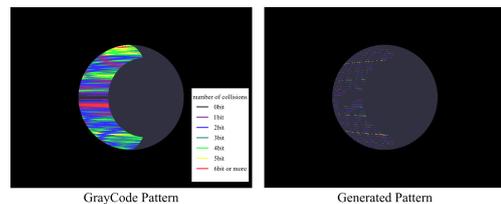


図 5: 異符号の衝突回数の分布 (7bit 分)

衝突が頻繁に生じているのに対し, 提案手法によって生成されたパターンを投影した場合は衝突回数が大幅に減少していることが確認できる. なお衝突が発生している箇所についても, パターンの白と黒の境界面に集中している. これは画像の斜め方向に伸びているエピポーラ線に沿って符号化をするために生じうる, 境界線近傍の量子化誤差であると考えられる.

5 展望

本研究で提案した照射パターンを利用することで, 多重照射箇所における異符号の衝突を回避し, 一意に復号できるようなパターン投影が実現できる. ここでは, 縦方向に対する符号化のみを取り扱ったため, 今後縦方向のみならず横方向についての符号化方法等を考慮して, カメラ画素とプロジェクタ画素の一意的対応付けを得ることを考えていく.

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] D. Lanman, D. Crispell, and G. Taubin. Surround structured lightning: 3-d scanning with orthographic illumination. In *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)*, 2009.
- [2] J. Salvi, J. Pages, and J. Batlle. Pattern codification strategies in structured light systems. *Pattern Recognition*, 37, 2004.
- [3] Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), 2000.