

偏光プロジェクタを用いた奥行きと法線方位角の推定

朴 太和^{1,a)} 新坂 祐人^{1,b)} 岡部 孝弘^{2,c)}

概要: 形状復元はコンピュータビジョンの主要な研究課題の一つである。静的シーンにおいては、これまでに、アクティブステレオ法による奥行き推定と偏光に基づく法線推定を組み合わせた手法などの高精細形状復元手法が提案されている。しかし、動的シーンにおいて物体の形状を高精細に復元することは、まだ困難である。そこで本研究では、投影光の偏光状態と空間的パターンの両方を高速に変化させることのできる偏光プロジェクタと高速度カメラを用いて、動的シーンにおいて物体の形状を高精細に復元することを目指す。本稿では、その準備として、偏光プロジェクタを用いた奥行きと法線の方位角の推定に取り組む。

1. はじめに

被写体の2次元画像から3次元形状を復元することはコンピュータビジョンの主要な研究課題の一つであり、数多くの手法が提案されている。形状復元技術は、映画、VR、デジタルアーカイブによる文化財保存などの様々な分野において必要とされている。3次元形状を復元する従来手法としては、ステレオビジョンによる奥行き推定などが挙げられる。

高精細な3次元形状復元のため、奥行き推定と法線推定を組み合わせることが有効であることが知られている。その代表例の一つとして、Kadambiら[1]は奥行きマップと偏光に基づく法線推定を組合わせて、静的シーンの高精細形状復元を行っている。ところが、Kadambiらの研究は動的なシーンには対応できないことに制限がある。

そこで本研究では、投影光の偏光状態と明るさの両方を高速に変化させることのできる偏光プロジェクタを用いて照明したシーンを高速度カメラで観測することで、動的シーンにおいて物体の形状を高精細に復元することを目指す。具体的には、時間的ディザリングに基づく対応点探索による奥行き推定、偏光に基づく法線推定、および、それらを組み合わせることで、高精細な3次元形状復元を目指す。本稿では、その準備として、偏光プロジェクタを用いた奥行きと法線の方位角の推定に取り組む。

2. 関連研究

DLPプロジェクタでシーンを照らし、高速度カメラで撮影すると、画素値の時間的な変動が観測される。この現象は時間的ディザリングと呼ばれる。Narashimanら[2]は、DLPプロジェクタのディザリングを用いて照明パターンと画像間のマッチングを取り、動的シーンの奥行きマップを求めている。

また、Wolffら[3]は、入射光の偏光方向が入射面に対して垂直になるときに鏡面反射の明るさが最大になることから、偏光が形状復元の手掛かりとなることを示している。Kadambiら[1]はKinectで推定した奥行きマップと偏光に基づく法線推定を組合わせて静的シーンの高精細形状復元を行っている。

我々の研究では、偏光プロジェクタを用いて、ディザリングによる奥行きマップと偏光による法線を組み合わせて、動的シーンにおいて物体の形状を高精細に復元することを目指す。Narashimanら[2]の手法に比べ、偏光による法線の情報が増えることで、高精細な形状を復元できる。また、Kadambiら[1]の手法に比べ、偏光プロジェクタと高速度カメラを利用することで、高フレームレートで動的シーンの形状復元ができる。

3. 提案手法

3.1 偏光プロジェクタ

偏光プロジェクタは、DLPプロジェクタのカラーホイールを直線偏光板に付け替えたもので、新坂ら[4]はそれを用いて動的シーンにおける鏡面反射・拡散反射・大域成分の分離を行った。プロジェクタにはDMDと呼ばれるマイクロミラーが内蔵されており、その傾きを高速に制御するこ

¹ 九州工業大学 大学院情報工学府 先端情報工学専攻
² 九州工業大学 大学院情報工学研究院 知能情報工学研究系
^{a)} piao.taihe242@mail.kyutech.jp
^{b)} nisaka.yuto735@mail.kyutech.jp
^{c)} okabe@ai.kyutech.ac.jp

とによって、空間的パターンを高速に変化させることができるため、高速度カメラで撮影すると、高フレームレートの奥行きを測定することができる。それと同時に、プロジェクタで投影したシーンの偏光状態が直線偏光板の高速回転によって周期的に変化しているため、偏光の性質を用いて法線の情報を推定することも可能になる。

3.2 アクティブステレオによる奥行き推定

明るさがランダムな縦線で構成される照明パターンを被写体と参照物体(背景)に投影する。ホモグラフィにより、投影パターンと参照物体における投影パターンの位置関係を取得する。時間的ディザリングにより、参照物体と被写体における投影パターンの対応を求める。これらにより、被写体上の各点(カメラの投影中心を通る直線に拘束)がどの明るさで照らされているのか(プロジェクタの投影中心を通る平面に拘束)を求めることができる。

参照物体(背景)と被写体は材質の違いにより反射率が異なるため、同じ投影パターンで照らされた場合でも、照らされる物体によって、明るさの変化完全に一致しない問題が起きる。この問題を解決するため、被写体におけるフレームごとの画素値を並べたベクトル \mathbf{a} と参照物体におけるフレームごとの画素値を並べたベクトル \mathbf{x} に対し、正規化を行い、反射率による明るさへの影響を除去する。注目画素値の正規化ベクトルを $\tilde{\mathbf{a}}$ 、 n 番目の縦線パターンに照明された参照物体における正規化ベクトルを $\tilde{\mathbf{x}}_n$ とし、注目画素における縦線パターンの順番 m は

$$m = \arg \min_n (\tilde{\mathbf{a}} - \tilde{\mathbf{x}}_n)^2 \quad (1)$$

によって求める。最小二乗法によって注目画素に対応する投影パターンが分かり、三角測量の原理から奥行き推定が可能となる。

3.3 法線方位角の推定

入射光の偏光方向が入射面に対して垂直なときに鏡面反射光は最も明るい性質がある。よって、偏光プロジェクタでパターン光を投影し、被写体を高速度カメラで観測すると、画素の最大輝度値が観測されるときに偏光の方向(偏光角)と直交する方向が方位角となる。^{*1}

偏光角のキャリブレーションのために、水平方向に対して 90° と 45° の偏光板を設置する。偏光プロジェクタの偏光板が設置した偏光板と同じ向きになるとき、投影パターンの最大輝度値が観測される。偏光板の回す角度が 90° と 45° となるフレームが分かると、フレームごとの偏光角を求めることができる。偏光角と方位角の関係(差が 90°)によって、方位角を推定することができる。

^{*1} ここでは鏡面反射を仮定している。拡散反射の反射率も偏光角に依存するため、原理的には、拡散反射光の明るさに基づいて方位角を求めることも可能である。

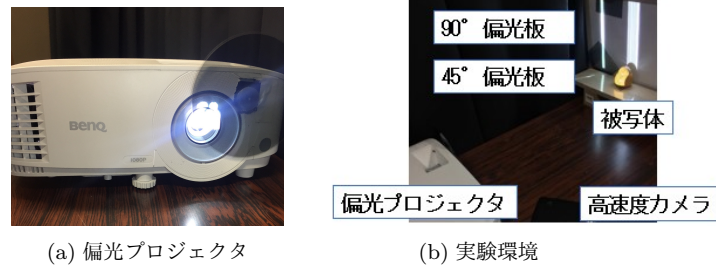


図 1 実験装置と実験環境

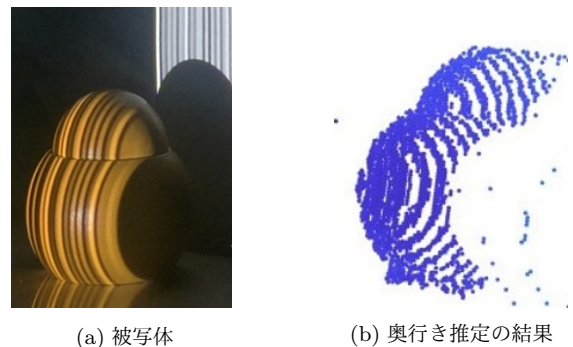


図 2 奥行き推定の結果

4. 実験

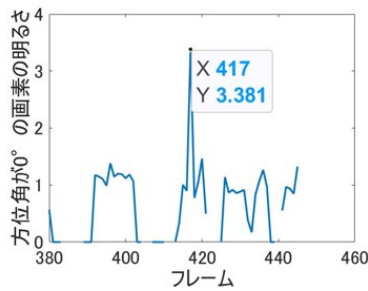
4.1 実験環境

実験では、図 1(a) に示す偏光プロジェクタの試作機とフォトロン製の高速度カメラ FASTCAM Mini UX50 を用いて撮影を行った。明るさの異なる縦線を並べた投影パターンを被写体に投影した。実験環境は 1(b) に示す。被写体の後ろに参考物体(背景)があり、参考物体に 90° 偏光板と 45° 偏光板を固定する。実験を行う前に、高速度カメラと偏光プロジェクタに対してキャリブレーションを行う。今回のキャリブレーションは MATLAB のツールボックス [5] を用いた。キャリブレーションによって、カメラとプロジェクタそれぞれの内部パラメータと外部パラメータを取得する。高速度カメラのフレームレートを 5000fps に設定し、撮影を行った。撮影した画像から 560 枚の写真を用いて、被写体の奥行き推定と各画素の法線の方位角推定を行った。

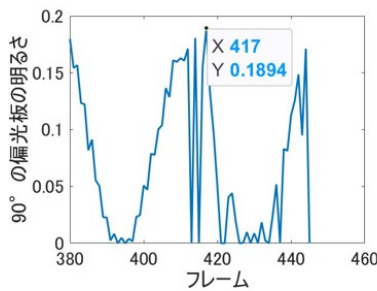
4.2 実験結果

時間的ディザリングに基づく奥行き推定の結果を図 2 に示す。被写体の表面形状に沿った点群が得られていることから、定性的には、パターン光を投影された部分の被写体の形状が推定できていることが確認された。

法線の方位角を検証するため、方位角が水平方向に対して 0° とと思われる画素に注目する。偏光の性質により、ある画素が最大輝度値となる時に、光源の偏光板が回転した角度(偏光角)と方位角の差が 90° となる。よって、偏光角が 90° となるフレームと方位角が 0° とと思われる画素の最大値



(a) 方位角が 0° と思われる画素の明るさの変化



(b) 90° の偏光板を透過する光の明るさ

図 3 方位角推定の検証

が観測されるフレームが一致するかどうかによって方位角が推定できているかどうかを確認する。方位角が 0° と思われる画素の明るさの変化を図 3(a), 90° の偏光板を透過する光の明るさ図 3(b) に示す。

90° の偏光板を通る光が最大となるときに、光源の偏光方向が偏光板と一致するため、図 3(b) の明るさが最大となるフレームが偏光角 90° となるフレームであることが分かる。図 3(a) と図 3(b) が同じフレームで最大値をとることから、偏光に基づいて方位角を推定できていることが確認できる。

5. むすび

本稿では、偏光プロジェクタを使用し、投影光の偏光状態と空間的パターンの変化がシーンに与える影響を高速度カメラを用いて捉えることによって、物体の三次元形状の復元と方位角を推定する手法を提案した。推定した奥行と方位角の情報を統合して、動的シーンの高精細形状復元を行うことは今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H01766 および JP17H00744 の助成を受けた。

参考文献

- [1] A. Kadambi, V. Taamazyan, B. Shi, and R. Raskar, “Polarized 3D: High-Quality Depth Sensing with Polarization Cues”, In Proc. IEEE ICCV2015, pp.3370–3378, 2015.
- [2] S. Narasimhan, S. Koppal, and S. Yamazaki, “Temporal Dithering of Illumination for Fast Active Vision” .

- In Proc. ECCV2008, pp.830–844, 2008.
- [3] L. Wolff and T. Boult, “Constraining object features using a polarization reflectance model, IEEE Trans. PAMI13(6), pp.167–189, 1991.
- [4] 新坂祐人, 岡部孝弘, 天野敏之, “動的シーンにおける鏡面反射成分・拡散反射成分・大域成分の分離”, 情報処理学会, 第 81 回全国大会講演論文集, pp.213-214, 2019.
- [5] G. Falcao, N. Hurtos, J. Massich, and D. Fofi, “Plane-based calibration of a projector-camera system” . VI-BOT master 9.1, pp.1–12, 2008.