

偏光プロジェクタを用いた動的シーンの成分分離

新坂 祐人^{1,a)} 岡部 孝弘^{2,b)} 天野 敏之³

概要：本稿では、プロジェクタ-カメラシステムにより、動的シーンにおける鏡面反射成分・拡散反射成分・大域成分を分離する手法を提案する。静的シーンでは、高周波パターン光の投影による直接・大域成分の分離、および、偏光を用いた鏡面反射成分・拡散反射成分の分離が可能である。ところが、これらを組合わせて動的シーンに適用するには、照明の空間的パターンと偏光状態の両方を高速に切り替える必要がある。そこで提案手法では、DLP プロジェクタのカラーホイールを直線偏光板で置き換えた偏光プロジェクタと高速度カメラを用いて撮影した画像に基づいて、動的シーンにおける成分分離を実現する。試作機を用いた実験を行い、提案手法の有効性を示す。

キーワード：プロジェクタ-カメラシステム、偏光、鏡面反射、拡散反射、大域成分

1. はじめに

シーン中の光は、直接成分と大域成分で構成される。直接成分は、光源から出た光が直接物体表面で反射したもので、鏡面反射や拡散反射による成分が含まれる。大域成分は、光源からの光が他の物質を介して間接的に物体を照らすことにより生じるもので、相互反射や表面下散乱による成分が含まれる。このように、シーン中には様々な成分が混在しているが、画像解析手法の多くは特定の成分を仮定している。そのため、仮定した成分を分離する手法が提案されている。

静的シーンでは、反射光の偏光状態の違いを手掛りとした鏡面反射成分・拡散反射成分の分離 [1]、および、一般に大域成分が低周波成分であることに基づいて、高周波パターン光の投影による直接・大域成分の分離 [3] が可能である。ところが、これらを動的シーンに適用するには、照明の空間的パターンと偏光状態の両方を高速に切り替える必要がある。

そこで本研究では、偏光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試作し、偏光プロジェクタで照明したシーンを直線偏光板を通して高速度カメラで観測することで、動的シーンの鏡面反射成分・拡散反射成分・大域成分の3成分への分離を実現する。これにより、動的シーンにおける散乱・屈折・鏡面反射などの光

学成分の解析や質感編集などが可能になる。

2. 関連研究

Wolff ら [1] は、鏡面反射光が偏光しているのに対し拡散反射光は非偏光であることから、カメラの前で直線偏光板を回して撮影した静的シーンの画像から、鏡面反射成分と拡散反射成分の分離する手法を提案している。Kurita ら [5] は、撮像素子上に 0° , 45° , 90° , 135° の4方向の偏光子を配置した偏光イメージセンサを用いて、ワンショットの画像から鏡面反射成分・拡散反射成分の分離を行っている。

Nayar ら [3] は、大域成分が低周波成分であることに基づいて、高周波パターンをシーンへ投影することで静的シーンの直接・大域成分の分離を行っている。また、Narasimhan ら [2] は、動的シーンに DLP プロジェクタでチェッカーパターンを投影して高速度カメラで撮影した際の明るさの変動から、動的シーンの直接・大域成分の分離を提案している。さらに、Torii ら [4] は、明るさの変動に加え、DLP プロジェクタのカラーホイールによる光源色の変動から、光源色ごとの直接・大域成分の分離を提案している。

我々の研究では、動的シーンにおける鏡面反射・拡散反射・大域成分への分離を目的とする。今回は、偏光プロジェクタでチェッカーパターンを投影したシーンを高速度カメラで撮影を行い分離を行う。

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

³ 和歌山大学 システム工学研究科

a) nisaka.yuto735@mail.kyutech.jp

b) okabe@ai.kyutech.ac.jp

3. 提案手法

3.1 偏光プロジェクタの利用

静的シーンでは、照明の空間的パターンを変化させることで、2枚以上の画像から直接・大域成分の分離が可能である。また、偏光カメラを用いたり、照明の偏光状態を変化させた4枚以上の画像を用いたりすることで、鏡面反射・拡散反射成分の分離が可能である。したがって、これらを併用して鏡面反射・拡散反射・大域成分の分離が行える。しかし、動的シーンにおいては、例えば偏光カメラを用いて30fpsで撮影を行うと、空間的パターンの異なる2枚の画像を撮影する間(15fps)に動きぶれが生じる。また、カメラとプロジェクタの同期も必要になる。

そこで本研究では、図1(a)のような仕組みの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ることで、図1(b)のような仕組みの偏光プロジェクタを作成する。試作機では、直線偏光板が1周するに約1/60秒かかることから、投影光の偏光状態は約1/120秒の周期で変動する。また、プロジェクタの3Dモード機能を用いることで、投影パターンを約1/120秒ごとに切り替えることができる。これにより、照明の偏光状態と空間的パターンを高速に変化させることができるため、偏光プロジェクタで投影したシーンを直線偏光板を取り付けた高速度カメラで撮影することにより、高フレームレートの分離が可能となる。

3.2 鏡面反射・拡散反射・大域成分の分離

偏光プロジェクタの3Dモード機能を用いて画素値が255と0のチェッカーパターンならびにその反転パターンを投影したシーンを、高速度カメラで直線偏光板越しに撮影する。分離画像の1フレームに対応する時間(例えば1/120秒)の間は被写体は静止しているという仮定のもと、これらの撮影画像から、画素ごとに分離を行う。チェッカーパターンの画素値255で照らされたときの画素値を L^+ 、画素値0で照らされたときの画素値を L^- とすると、 n 枚目の撮影画像($n = 1, 2, 3, \dots, N$)のある画素値は

$$\begin{aligned} L_n^+ &= a_n P(\theta) L_s + a_n L_d + \frac{1}{2}(a_n + b_n) L_g, \\ L_n^- &= b_n P(\theta) L_s + b_n L_d + \frac{1}{2}(a_n + b_n) L_g \end{aligned} \quad (1)$$

で表せる。ここで、 L_s は鏡面反射成分、 L_d は拡散反射成分、 L_g は大域成分を表し、パラメータ a 、 b は投影されたチェッカーパターンの明るさ($a > b$)、 $P(\theta)$ は入射面と光源の偏光がなす角 $\theta(0 \leq \theta \leq \pi)$ の関数である。

まず、 L_d と L_g を求めるために、鏡面反射の観測されない画素を利用する。具体的には $b = 0$ と仮定のもと L_n^+/a_n が最小値となるときの L_m^-/a_m が最小値となるときの画素値を使用する。このようにしてチェッカーパターンごとに

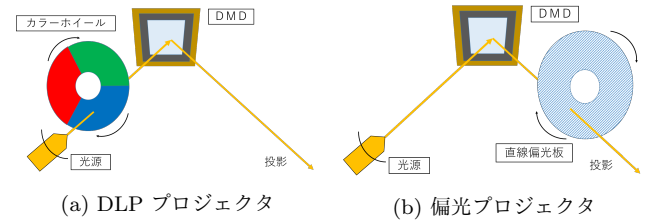


図 1: プロジェクタの仕組み

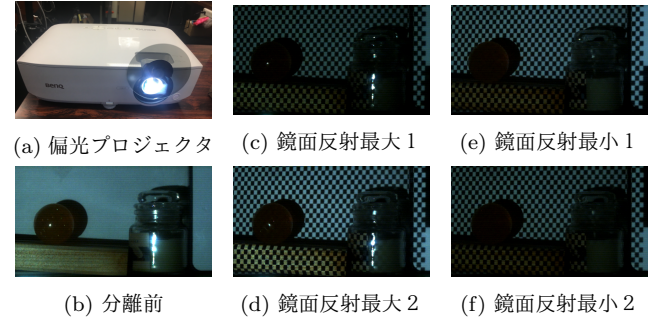


図 2: 偏光プロジェクタと撮影画像

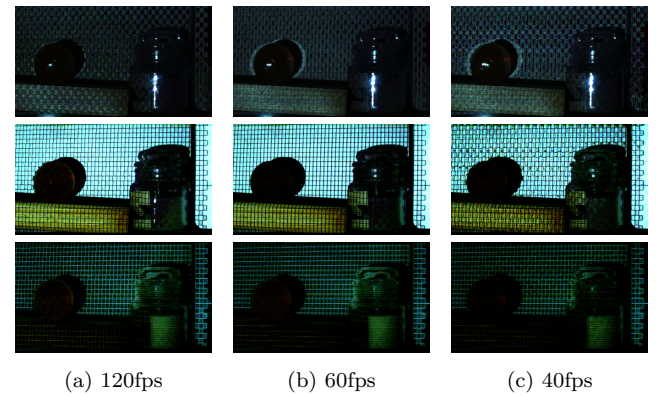


図 3: フレームレートごとの分離

求めた画素値、使用した画像の a 、 b を用いて $P(\theta) = 0$ として式(1)の連立方程式を解くと L_d と L_g が求まる。次に、求めた L_d と L_g と撮影画像中で $b = 0$ と仮定のもと L_n^+/a_n が最大値となるときの画素値、使用した画像の a 、 b を用いて $P(\theta) = 1$ として式(1)に代入することで鏡面反射成分 L_s も求まる。よって、鏡面反射・拡散反射・大域成分の分離が可能である。

4. 実験

4.1 動的シーンの分離

実験では、図2(a)に示す偏光プロジェクタの試作機を用いた。成分分離を行うシーンを図2(b)に示す。被写体は、木のレールの上を転がるスーパーボールとろうのに入った瓶を使用した。

まず、偏光プロジェクタでチェッカーパターンを投影した図2(b)のシーンを高速度カメラを用いて10000fps、露光時間0.1msで直線偏光板越しに撮影することで、照明するチェッカーパターンと鏡面反射成分が常に変化していく画像を得た。次に、撮影画像の167枚ごとに、図2(c)(d)のような鏡面反射成分が最も大きく観測される画像と、図

2(e)(f) のような鏡面反射が観測されない画像をチェッカーパターンごとに獲得する。

図 3(b) に提案手法を用いて分離した結果を示す。上から分離した鏡面反射成分、拡散反射成分、大域成分である。なお、大域成分の画素値は 16 倍している。分離結果より、スーパーボール、ろうの入った瓶の表面で観測されるつやが鏡面反射成分で確認でき、ろうの入った瓶のラベル、木のレールなどが拡散反射成分で観測でき、スーパーボール、ろうの入った瓶での表面下散乱や物体の相互反射などが大域成分で観測できたことから、定性的に動的シーンの鏡面反射・拡散反射・大域成分の 3 成分への良好な分離結果が得られた。しかし、このとき各成分の画像にチェッカーパターンの境界に起因する格子状のアーチファクトが見られる。これは、プロジェクタとカメラの性能の限界によるものであり、模様をずらしたチェッカーパターンを投影することでアーチファクトを低減させることができる。

4.2 フレームレートによる比較

入力画像の枚数の違いによる分離結果の比較を行う。偏光プロジェクタによって投影されるチェッカーパターンと偏光状態は約 1/120 秒ごとに変化している。そこで、常に 2 種類のチェッカーパターンのどちらも観測可能なフレームレートのうち、今回は 120fps, 60fps, 40fps の場合で分離を行った。

分離結果を図 3(a)(b)(c) に示す。フレームレートが 40fps の場合、動きのある物体の周囲で白いアーチファクトが観測された。これは、分離を行う際に 1 フレームの間はシーンが止まっていると仮定しているが、実際には動いてしまっていることによって生じたものである。そのため、1 フレームあたりにかかる時間の短い 120fps の場合では、物体が動くことによるアーチファクトはほぼ観測されないことが確認できる。そのかわり、1 フレームあたりの使用画像が少ないため鏡面反射が観測されない画像を獲得できない場合があり、分離精度がやや悪化していることが分かる。

5. むすび

本稿では、偏光プロジェクタの試作機を使用し、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直線偏光板越しに捉えることで、動的シーンの鏡面反射・拡散反射・大域成分への分解を実現する手法を提案した。今後は、分離画像を生成する際のノイズの低減や偏光プロジェクタから照射される光の偏光状態が周期的に変化していることによる鏡面反射成分の周期的な変化の関係に着目した手法について検討したい。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H01766, および、JP18H05011 の助成を受けた。

参考文献

- [1] L. Wolff and T. Boulton : Constraining object features using a polarization reflectance model, IEEE Trans. PAMI 13(6), pp.167-189, 1991.
- [2] S. Narasimhan, S. Koppal, and S. Yamazaki: Temporal dithering of illumination for fast active vision, In Proc. ECCV2008, pp.830-844, 2008.
- [3] S. Nayar, G. Krishnan, M. Grossberg, and R. Raskar: Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination, ACM SIGGRAPH 2006, 25(3), pp.935-944, 2006.
- [4] M. Torii, T. Okabe, and T. Amano: Multispectrum direct-global separation of dynamic scene, In Proc. IEEE WACV2019, pp.1923-1931, 2019.
- [5] 栗田哲平, 海津 俊, 平澤 康孝, 近藤 雄飛, 村山 淳, 秋山 健太郎, 上坂 祐介, 丸山 康, 山崎 知洋: 裏面照射型 4 方向 CMOS イメージセンサを利用したリアルタイム反射成分分離・応用信号処理技術, 第 24 回画像センシングシンポジウム (SSII2018), IS1-31, 2019.