

輝度とイベントに基づく動的シーンにおける反射成分分離

山本 祥太郎 大森 涼平 川原 僚 岡部 孝弘
九州工業大学情報工学部

1 はじめに

光の反射には拡散反射と鏡面反射がある。これらの成分を分離することは形状復元や質感編集など様々な画像処理の前処理として有用である。

反射成分分離の手がかりとして、完全偏光光源に対して鏡面反射光は完全偏光となり、拡散反射光は非偏光となることが利用できる。Wolffら [1] は、カメラの前で偏光板を回転させて撮影した画像から成分分離を行っているが、偏光板を手動で回転させるため時間分解能が低い。これに対し、栗田ら [2] はワンショットで複数の偏光画像が取得できる偏光カメラを利用して成分分離を行っているが、コントラストの高い反射を捉えるためにHDR画像が必要となる。Kunimasuら [3] はイベントベースカメラを用いて、1枚の輝度画像と4つのイベントから高時間分解能かつHDRな成分分離を行っている。しかし、被写体の移動によるイベントと、鏡面反射によるイベントが区別できないという問題点がある。

本稿では、イベントベースカメラ、カラーカメラ、および、直線偏光板からなるシステムを用いた動的シーンにおける反射成分分離手法を提案する。具体的には、回転する直線偏光板を通して観察される鏡面反射輝度は正弦波に従うことに基づき、鏡面反射によるイベントと被写体の移動によるイベントを識別する。鏡面反射していると推定された画素に対して、輝度画像とイベントから最小二乗法を用いて正弦波を推定することで成分分離を行う。

2 提案手法

2.1 計測システム

イベントベースカメラは、画素毎に輝度の対数の変化が一定の閾値 δ を超えたときにイベント $e = [x, y, \pm 1, t]$ が発生する。ここで、 $[x, y]$ はそれぞれイベントが発生した画像座標、 ± 1 は明暗の極性、 t はイベントが発生した時刻を表す。

静的シーンにおいて、図1のようにイベントベースカメラの前で直線偏光板を高速回転させながら撮影すると、鏡面反射している画素の輝度は正弦波に従い変化するため、イベントが発生する。観測されたイベントから正弦波を推定することで、成分分離が可能となる。しかし、イベントベースカメラは相対的な輝度の変化しか分からないの



図1: 撮影装置

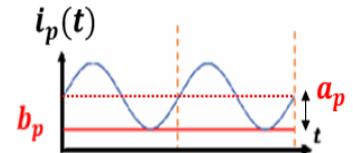


図2: 輝度変化

で、絶対的な輝度の変化を得るために、カラーカメラを併用して輝度の絶対値を少なくとも一つ獲得する。

2.2 反射成分の分離

静的シーンにおいて、まず、鏡面反射している画素 p の時刻 t における絶対輝度 $i_p(t)$ は、回転する偏光板の角周波数 ω 、振幅 a_p 、拡散反射成分 b_p 、位相 ϕ_p を用いて、

$$i_p(t) = a_p \sin(\omega t + \phi_p) + a_p + b_p \quad (1)$$

のように正弦波で表される(図2)。一方で、時刻 t_{n-1} , t_n で連続してイベントが発生したとき、画素 p の時刻 t_n の輝度 $i_p(t_n)$ はイベントを用いて、

$$i_p(t_n) = i_p(t_{n-1}) \times \exp(\delta q_n) \quad (2)$$

と表される。ここで、角周波数 ω と閾値 δ は較正済みとし、 q_n は発生したイベントの極性を表す。

$$E_r = \tilde{i}_p(t_m) - \{a_p \sin(\omega t_m + \phi_p) + a_p + b_p\} \quad (3)$$

$$E_{en} = i_p(t_n) - i_p(t_{n-1}) \times \exp(\delta q_n) \quad (4)$$

まず、1枚の輝度画像とその撮影時刻付近でイベントを観測する。時刻 t_m での観測輝度を $\tilde{i}_p(t_m)$ とすると、式(1)より、 $\tilde{i}_p(t_m)$ と推定した正弦波の誤差は式(3)のように表すことができる。また、式(2)より、発生したイベントの極性の変化から正弦波を推定したときの誤差は、式(4)のように表すことができる。したがって、 $E_r^2 + \sum_n E_{en}^2$ が小さくなるように、輝度画像とイベントから最小二乗法を用いて a_p , b_p , ϕ_p を推定することで、反射成分分離が実現できる。

動的シーンでは被写体の移動によるイベントも発生するため、これを区別する必要がある。ここで、偏光板が1回転する間は、画像中の鏡面反射している画素の位置が移動しないが、被写体の移動によるイベントは発生すると仮定する。このとき、鏡面反射している画素の輝度変化は正弦波に従うが、被写体の移動による輝度変化は正弦波に従わない。

本研究では、撮影された輝度画像を $k \times k$ 画素のブロックに分割して、 a_p, b_p, ϕ_p をブロック毎に最小二乗法により推定する。推定には、1枚の輝度画像と、輝度画像の撮影時刻付近においてブロックで観測されたイベントを利用する。また、 a_p と ϕ_p はブロックで共通の値、拡散反射成分である b_p はブロック内の k^2 画素でそれぞれ異なる値として、合計 $2+k^2$ 個の未知数を推定する。鏡面反射によりイベントが発生した画素の輝度変化は正弦波に従うため、極性が正と負のイベントが周期的に現れるので、推定後の残差が小さいと考えられる。そのため、同じ符号のイベントのみが連続して発生した画素、推定後の正弦波の残差が大きい画素は被写体の移動によりイベントが発生した画素とみなすことで、鏡面反射している画素かどうかを識別することができる。

3 実験

本研究では、イベントと輝度画像を同時に取得可能な DAVIS 346 Color カメラ、1秒間で30回転するモーターを用いる。図1に示すような撮影装置で撮影を行い、 $k=2$ として提案手法を用いた。実験には、輝度画像の撮影時刻前後 1/30 秒間で観測されたイベントを利用した。ブロック内において、式(3)より、輝度画像1枚から4つの式が立式でき、ある画素でイベントが s 個発生したとき式(4)が $s-1$ 個立式できる。ブロック毎の未知数が6個であるため、ブロック内の4画素のうち、少なくとも1画素で3イベント以上発生、または、少なくとも2画素以上で2イベント発生することが正弦波を推定できる条件となる。条件を満たしたブロックに対して提案手法を用いて、最小二乗法により正弦波を推定した。推定後の残差が大きい画素、または、同じ符号のイベントのみが発生した画素を被写体の移動によるイベントとみなして、鏡面反射によりイベントが発生した画素と、被写体の移動によりイベントが発生した画素を識別した。

提案手法を用いて、鏡面反射によりイベントが発生した画素と、被写体の移動によりイベントが発生した画素を識別した結果を図3に、(a)輝度画像、(b)イベントが発生した画素、(c)鏡面反射

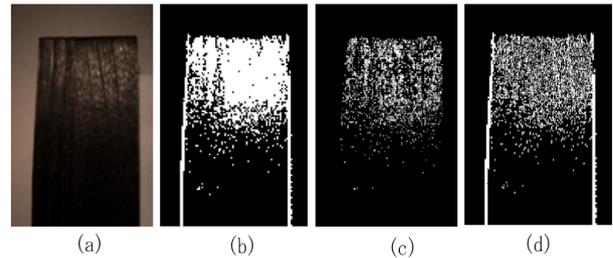


図3: イベント判別結果

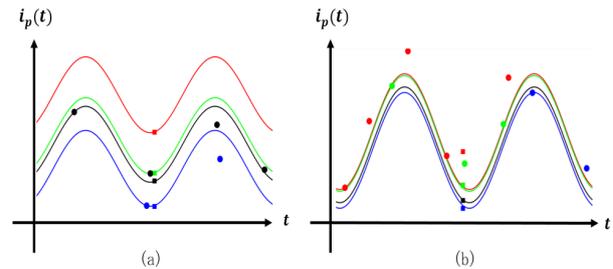


図4: 正弦波推定結果

と推定された画素、(d)被写体の移動と推定された画素として示す。図3より、定性的に2種類のイベントを識別できたといえる。また、推定した正弦波、観測輝度、観測イベントをプロットすることにより正弦波の推定精度を確認した。図3(c)の画素における推定結果を図4(a)に、図3(d)の画素における推定結果を図4(b)に示す。正弦波を実線、観測輝度を四角、観測イベントを丸で表す。図4からも提案手法の有効性が確認できる。

4 むすび

本稿では、鏡面反射と拡散反射の偏光特性の違いを利用して、直線偏光板、カラーカメラ、イベントベースカメラを用いた動的シーンにおける反射成分の分離手法を提案した。輝度とイベントから推定した正弦波の周期性に基づいて、鏡面反射によるイベントと被写体の移動によるイベントを識別した。鏡面反射している画素は移動しないという仮定の緩和が今後の課題である。

謝辞 本研究の一部はJSPS 科研費 JP20H00612, および, JP22K17914 の助成を受けた。

参考文献

- [1] L. Wolff and T. Boult, "Constraining object features using a polarization reflectance model", IEEE Trans. PAMI, 13(6), pp.167–189, 1991.
- [2] 栗田 哲平ほか, "裏面照射型4方向偏光 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", SSII2018 予稿集, IS1-34, 2018.
- [3] R. Kunimasu, R. Kawahara, and T. Okabe, "Event-Based Reflectance Separation", In Proc. IW-FCV 2023, No.361, 2023.