Vol.2021-NL-248 No.42
Vol.2021-CVIM-226 No.42
2021/5/21

偏光イベントベースカメラによる拡散反射と鏡面反射の分離

國益 良太　岡部 孝弘

概要：画像に含まれる拡散反射成分と鏡面反射成分を分離することは，様々な画像処理の前処理として重要である．一般に，鏡面反射と拡散反射のコントラストが高いことから，拡散反射と鏡面反射の分離には高ダイナミックレンジ画像が必要になり，時間分解能の高い分離は容易ではない．本稿では，イベントベースカメラを用いた高時間分解能かつ高ダイナミックレンジな反射成分分離法を提案する．具体的には，拡散反射成分が非偏光であるのに対して鏡面反射成分が偏光していることから，高速回転する偏光板を通して観察したイベントデータを入力として，鏡面反射画像と拡散反射画像を復元する．実画像を用いた実験を行い，提案手法の有効性を確認する．

1. はじめに

画像は拡散反射成分と鏡面反射成分で構成される．画像処理のアルゴリズムでは，どちらかの反射成分のみを仮定したものが多いため，拡散反射成分と鏡面反射成分の分離は，様々な画像処理の前処理として重要である．拡散反射成分と鏡面反射成分を分離する手法として，色情報に基づいて分離を行う手法 [1]，さまざまな光源方向での拡散反射成分の低ランク構造 [2] に基づいて分離を行う手法, 偏光に基づいて分離を行う手法 [3] 等があるが，本稿では偏光に基づいた分離手法を提案する．

偏光に基づいた分離手法として，Wolff ら [4] は，モノクロカメラの前で直線偏光板を回転させることで拡散反射成分と鏡面反射成分を分離する手法を提案している．また，栗田ら [5] は，ワンショットで複数の偏光画像を得られる偏光カメラを提案している．これによって，偏光板を回転させながら撮影することなく，ワンショットで反射成分分離が可能となる．これらの手法の問題点として，Wolff らの手法では偏光板を手動で回転させてから撮影を行うこと，栗田らの手法では HDR 撮影が必要となることから，高時間分解能な撮影が困難になるという問題点がある．

そこで本研究では，直線偏光板とイベントベースカメラ [6] と呼ばれる特殊なカメラを用いた拡散反射成分と鏡面反射成分の分離手法を提案する．イベントベースカメラは，一般的なカメラのようにフレーム毎に輝度値を記録するのではなく，**図 1** のような「イベント」と呼ばれる輝度の変化だけを記録する． また，このカメラは一般的なカメラと比較して，時間分解能とダイナミックレンジが高いという特徴があるため，従来の反射成分分離手法の問題点を解決することが可能となると考えられる．また，本研究はイベントベースカメラの新たな応用でもある．

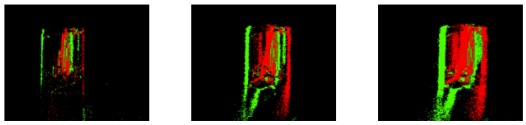


図 1: 左から右へ移動する被写体をイベントカメラで撮影した様子

2. 関連研究

2.1 偏光板を用いた反射成分の分離

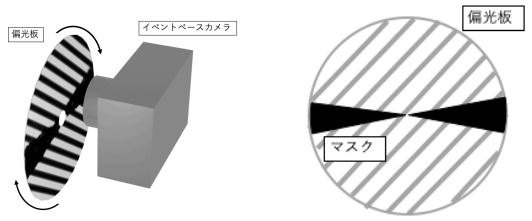
鏡面反射と拡散反射の偏光特性の違いを利用して成分分離を行う手法として， Wolff ら [4] の手法がある．Wolff らは直線偏光版を通して反射成分を観測し, 偏光板を手動で回転させることで鏡面反射成分と拡散反射成分の分離を行った．

また，Nayar ら [7] は，偏光板の手動回転によって偏光画像を獲得した後，拡散反射成分と鏡面反射成分を 3 次元色空間上のベクトルとし，偏光と色の両方の特性に基づいて分離を行う手法を提案している．

偏光板を用いた反射成分分離の応用として，Ghosh ら [8] は，2 台のカメラの前にそれぞれ偏光板を置き，制御可能な偏光照明を用いて撮影することで人物の顔画像から各反射成分毎の反射率を測定し，各反射率と形状をモデル化する手法を提案した．

しかしこれらの手法は，偏光板を回転させながら撮影を行う必要があるため，撮影画像の時間分解能が低くなってしまい，動的シーンへ適用することが困難であることが問題となる．本研究では，イベントベースカメラが高時間分

ⓒ 2021 Information Processing Society of Japan



(a) 偏光イベントベースカメラ　(b) 偏光板の一部を覆った様子

図 2: 撮影装置

解能であるため，偏光板を高速回転させることで高い時間分解能の画像を得ることが可能となる．

2.2 偏光カメラを用いた反射成分の分離

反射成分の分離のためには，複数の偏光画像の獲得が必要となる．Ramella-Roman ら [9] は，2 枚の偏光板と 2 台の CCD カメラを用いることによって水平方向の偏光画像と垂直方向の偏光画像を同時に獲得し，それらの画像を合成することでリアルタイムに複数の偏光画像を得られるカメラシステムを提案した．

偏光板とカメラを 1 台のカメラに統合した手法として，栗田ら [5] は，偏光イメージセンサを用いて信号処理を行うことで，$0°, 45°, 90°, 135°$，の 4 方向の偏光画像をワンショットで取得可能なカメラを提案した．

偏光カメラを利用した応用として，Hosoya ら [10] は，高出力レーザーによる応力波を偏光カメラで撮影して解析を行うことで，非接触で物体表面の傷を検出する手法を提案した．

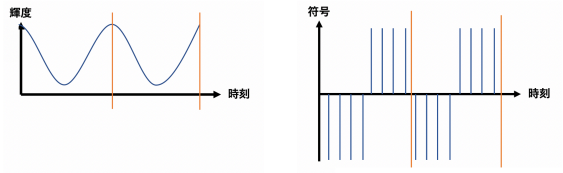
しかし，偏光カメラを用いて分離を行う際の問題点として，一般に鏡面反射と拡散反射が高コントラストとなるため，反射成分の分離を行うためには HDR 撮影を行う必要がある．本研究では，カメラの前で偏光板を回転させる必要はあるが，イベントベースカメラが高ダイナミックレンジであるため，HDR 撮影なしに高ダイナミックレンジな分離が可能となる．

3. 提案手法

3.1 偏光イベントベースカメラ

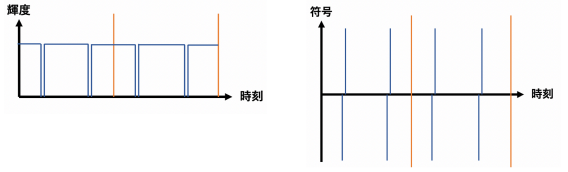
一般的なカメラが全画素の輝度をフレーム毎に記録するのに対して，イベントベースカメラは，各画素の輝度の変化を非同期に記録する．この輝度の変化のことをイベントと呼ぶ．各画素のイベント e は，イベントが発生した画素の位置 $[x, y]$，輝度の変化の符号 $p = \pm 1$，時刻 t を用いて $e = [x, y, p, t]$ と表される．イベントベースカメラは，一般的なカメラと比較して時間分解能とダイナミックレンジが高いという特徴がある．

イベントベースカメラの前に直線偏光板を設置して高速回転させた様子を**図 2(a)** に示す．この装置を偏光イベントベースカメラと呼ぶ．イベントベースカメラは輝度の変化を記録するため，偏光板の回転により輝度が変化した部分を記録することが可能となる．



(a) 輝度　(b) イベント

図 3: 鏡面反射



(a) 輝度　(b) イベント

図 4: 拡散反射

3.2 鏡面反射成分の輝度とイベントの関係

鏡面反射光は一般に偏光しているため，鏡面反射光が直線偏光板を通るとき，鏡面反射光の振動方向が直線偏光板の方向に近ければ近いほど光を透過し，垂直であれば透過しない．したがって，直線偏光板を回転させたとき，鏡面反射の輝度が変化するため，イベントベースカメラで検出することが可能となる．**図 3** に鏡面反射の輝度とイベントの関係を示す．偏向角を θ とすると，鏡面反射の明るさは $\cos\theta$ で変化するため，**図 3(b)** に示すように，偏光板が 1 回転する間にマイナスのイベントとプラスのイベントがまとまって発生する．

3.3 拡散反射成分の輝度とイベントの関係

拡散反射成分は非偏光であるため，偏光板を回転させるだけでは輝度が変化しない．そこで，**図 2(b)** のようにあらかじめ偏光板の一部を黒い紙でマスクした状態で回転させる．このとき，マスクが通過する度に輝度が変化することから，イベントベースカメラによって拡散反射成分を検出することが可能となる．**図 4** に拡散反射の輝度とイベントの関係を示す．図 4 の橙色の線で区切られた範囲は，偏光板の 1 回転分の時間に相当する．マスクの輝度は注目画素の輝度よりも暗いため，**図 4(b)** のようにマイナスのイベントが発生した後にプラスのイベントが発生する．

4. 実験

4.1 撮影環境

図 2(a) の偏光イベントベースカメラを用いて撮影を行った．また，高速度カメラを用いて偏光板の回転速度を計測

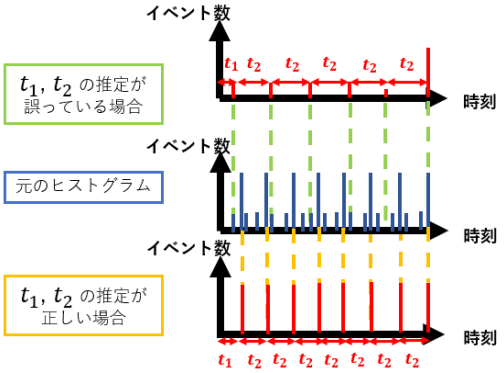
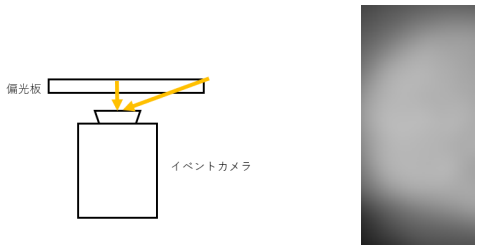


図 5: イベントのヒストグラムと t_1, t_2 によるイベントの獲得



(a) 偏光板の透過率の違いの様子　(b) 補正用のイベントにガウシアンフィルタをかけた様子

図 6: 透過率の補正

したところ，およそ 0.035s で 1 回転していることがわかった． マスクが 2 箇所にあるため，原理的には毎秒 1/0.0175 枚の画像の分離が可能である．実験では, 1s 間のイベントデータを利用し 1fps，3fps，および，10fps で成分分離を行った．

4.2 反射成分の分離

まず，得られたイベントデータを 40 ×40 画素のブロックに分割した．次に各ブロックでマスクが通過した時刻を推定するため，横軸を時間，縦軸をイベント数としたヒストグラムをブロック毎に作成した．各ブロックで，1 回目にマスクがブロックを通過した時間を t_1，2 回目以降マスクがブロックを通過する間隔を t_2 とし， **図 5** のように，t_1 と t_2 から決まるマスクの通過時刻付近のイベント数の総和を求めた． 理想的には，拡散反射のイベントはマスクが通過した付近にのみ発生するため，総和が大きくなるように t_1 と t_2 を選択した．

得られた t_1, t_2 を元に，マスクが通過していない時刻のイベントを鏡面反射のイベントとして取り出した．露光時間（イベントを取り出した時間）を補正した後で，全ての時間のイベントの総和から鏡面反射成分を引いたものを拡散反射成分とした．

図 7: 撮影シーン

4.3 透過率の補正

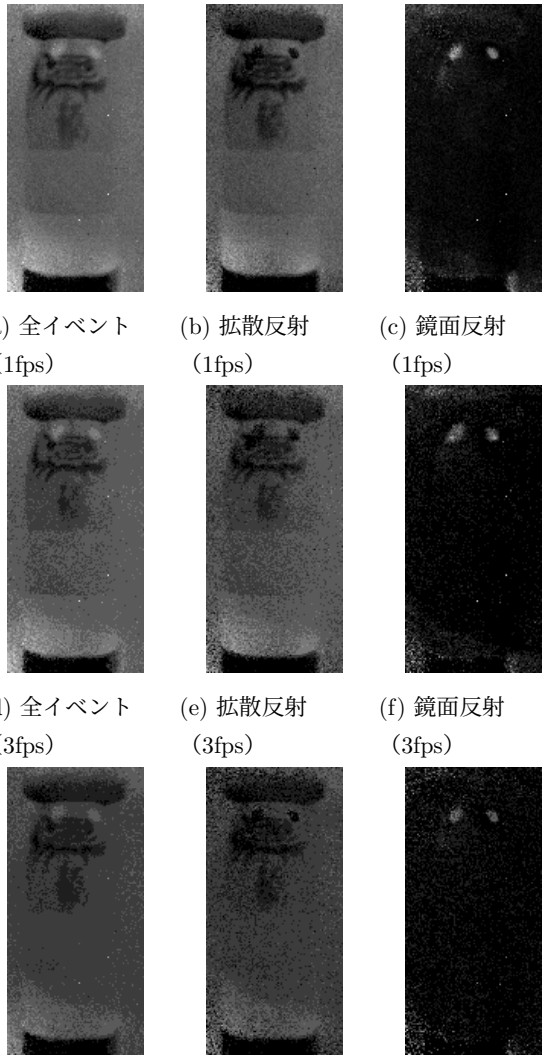
図 6(a) のように，偏光板を通ってカメラに入ってくる光は，光路長が異なるため画素毎に透過率が異なったものとなる．そのため，カメラで撮影したデータは中心の画素が明るく，周囲の画素は暗くなる傾向がある．そのため，図 2(a) の装置を用いて白い紙のみのシーンをイベントカメラで観測し，そのイベントデータを利用して撮影シーンのイベントの透過率の補正を行った．補正用に観測した白い紙のシーンのイベントは，そのまま利用すると画素毎に明るさにむらがあるため，ガウシアンフィルタをかけたものを補正に利用した．**図 6(b)** に補正用のシーンのイベントにガウシアンフィルタをかけたものを示す．

4.4 分離結果

図 7 に撮影したシーンを示す．1fps と 3fps と 10fps の時の全イベント（各フレーム毎にイベントを足し合わせた結果）と, 反射成分を分離した結果を**図 8** に示す．ここで,3fps と 10fps の分離結果は 1 フレーム目のみの画像を掲載している．また，可視化のために各画像の明るさを定数倍している．

鏡面反射画像を見ると，拡散反射成分が一部含まれてはいるが，だるまに表れている鏡面反射成分を分離できていることが確認できる． また，拡散反射画像を見ると，鏡面反射画像で鏡面反射成分とみなされた画素に穴があいているが，それ以外は概ね正しく分離できていることが確認できる．分離精度低下の原因として，鏡面反射のイベントが一定の間隔で発生していることを仮定しているが，実際の鏡面反射の強度は $\cos\theta$ で変化するため，イベントの発生が一定でないことが考えられる．

また, 各フレームレートの全イベントを比較すると，フレームレートが上がった際にダルマの模様のような細かい情報が失われていることが確認できる．これは，イベントベースカメラの時間分解能が 5,000 fps であるのに対して，偏光板の回転速度が約 29 rps であるため，偏光板の回転速度を上げることで改善できると考えられる．



(a) 全イベント（1fps）　(b) 拡散反射（1fps）　(c) 鏡面反射（1fps）

(d) 全イベント（3fps）　(e) 拡散反射（3fps）　(f) 鏡面反射（3fps）

(g) 全イベント（10fps）　(h) 拡散反射（10fps）　(i) 鏡面反射（10fps）

図 8: 分離結果

5. 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，偏光板とイベントベースカメラによる反射成分の分離手法を提案した．具体的には，獲得したイベントデータを解析し，各フレーム毎に鏡面反射成分と拡散反射成分への分離を行った．反射成分分離の精度向上と，時間分解能の向上が今後の課題である．

謝辞　本研究の一部は，JSPS 科研費 JP17H01766，および，JP20H00612 の助成を受けた．

参考文献

[1] S. Shafer, “Using color to separate reflection components.”, Color Research and Applications, 10, pp.210–218, 1985.

[2] A. Shashua, “On photometric issues in 3D visual recognition from a single 2D image”, IJCV, 21(1/2), pp.99–122, 1997.

[3] 宮崎, 池内, “偏光の基礎理論とその応用”, 情報処理学会論文誌コンピュータビジョンとイメージメディア, 1(1), pp.64–72, 2008.

[4] L. Wolff and T. Boult, “Constraining object features using a polarization reflectance model”, IEEE Trans. PAMI, 13(6), pp.167–189, 1991.

[5] 栗田, 海津, 平澤, 近藤, 村山, 秋山, 上坂, 丸山, 山崎, “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.

[6] G. Gallego, T. Delbruck, G. Orchard, C. Bartolozzi, B. Taba , A. Censi, S. Leutenegger, A. Davison, J. Conradt, K. Daniilidis, D. Scaramuzza, “Event-based vision: a survey”, IEEE Trans. PAMI (Early Access), DOI: 10.1109/TPAMI.2020.3008413, 2020.

[7] S. Nayar, X. Fang, T. Boult, “Separation of reflection components using color and polarization”, IJCV, 21(3), pp.163–186 1997.

[8] A. Ghosh, T. Hawkins, P. Peers, S. Frederiksen, P. Debevec, “Practical Modeling and acquisition of layered facial reflectance”, ACM Transaction on Graphics, 27(5), Article No.139, 2008.

[9] J. Ramella–Roman, K. Lee, S. Prahl, S. Jacques, “Polarized light imaging with a hand-held camera”, In Proc. SPIE 5068, Saratov Fall Meeting 2002: Optical Technologies in Biophysics and Medicine IV, pp.284–293, 2002.

[10] N. Hosoya, R. Umino, I. Kajiwara, S. Maeda, A. Mihara, “Damage detection in transparent materials using non–contact laser excitation by nano–second laser ablation and high–speed polarization–imaging camera”, Exp. Mech., 56, pp.339–343, 2016.

ⓒ 2021 Information Processing Society of Japan