Vol.2021-CG-181 No.12
2021/2/16

偏光パターン投影によるシーンの成分分離

新坂　祐人[1]　松岡　諒[2]　天野　敏之[3]　岡部　孝弘[1,a)]

概要：本稿では，偏光プロジェクタ-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．

Separation of Specular, Diffuse, and Global Components via Polarized Pattern Projection

1. はじめに

光源に照らされたシーンの各点で観測される放射輝度値は，直接成分と大域成分の 2 つの成分で構成される [10]．鏡面反射や拡散反射などの直接成分は，光源自体からの直接照明によって引き起こされる．一方，大域成分は，光源からの直接照明ではなく，相互反射，表面下散乱，体積散乱のように，シーン内の他の点から照明されることによって発生する．シーンのこれらの成分を分離することは，形状復元，画像ベースの質感編集，画質の向上など，さまざまな CV および CG 応用にとって重要である [4], [10].

静的なシーンでは，光源の前で回転する直線偏光板と固定された直線偏光板を備えたカメラ [18] または固定された直線偏光板を備えた光源と偏光カメラを使用することにより，偏光に基づいて鏡面反射成分と拡散反射成分を分離できる．これは，鏡面反射成分は偏光しているのに対して，拡散反射成分は非偏光なためである．一方，大域成分は一般に低周波であるため，プロジェクタから空間的に高周波なパターンを投影することにより，直接成分と大域成分を分離することができる [10]．したがって，これらの手法を組み合わせることで，静的シーンの鏡面反射，拡散反射，および大域成分を分離できる．しかしながら，民生用のプロジェクタと偏光カメラのフレームレートは一般にそれほど高くないため，

1　九州工業大学
福岡県飯塚市川津６８０－４
2　北九州市立大学
3　和歌山大学
a)　okabe@ai.kyutech.ac.jp

ⓒ 2021 Information Processing Society of Japan

これらの手法の単純な組み合わせは動的なシーンには適用できない．

本研究では，プロジェクタ - カメラシステム [1], [2], [3], [12] を用いて，動的シーンの鏡面反射，拡散反射，大域成分を高速に分離する方法を提案する．提案手法の鍵となるアイデアは，自作の偏光プロジェクタを使用して，空間パターンだけでなく照明の偏光状態も高速に変化させることである．今回作成した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置き換えたものである．高速度カメラを使用してシーンの動画を撮影することで，シーンに対する高速に変化する照明条件の影響を観察する．

提案手法は，偏光プロジェクタへの入力が単一の高周波パターンである場合のシーンの動画を使用する．単一の入力パターンであっても，回転する直線偏光板と DMD（デジタルミラーデバイス）による時間的ディザリング [9] により，プロジェクタからの出力は偏光状態と強度の両方が高速に変化する．本手法は，参照物体を使用することで，プロジェクタとカメラの時間的同期を必要とせず，動的なシーンでも投影パターンとカメラ画素間の対応を自動的に求める．さらに，分離された画像の品質を向上させるため，ノイズ伝播解析に基づく投影パターンの最適化，投影パターンを高速にシフトするためにプロジェクタの 3D モードの利用，および空間相関を考慮に入れるための画素の重みを導入する．

この研究の主な貢献は次の 3 点である．1 つ目に，自作の偏光プロジェクタによる高速に変化する偏光状態と時間的ディザリングを活用することにより，60 Hz での鏡面反射成分，拡散反射光成分，および大域成分の高速な分離を実現する．2 つ目に，プロジェクタとカメラの時間的同期を必要とせず，投影パターンとカメラの画素の対応を自動で較正するため，実装が容易である．3 つ目に，最適化された投影パターンをシフトして用いること，および，空間相関を考慮することにより，頑健な分離を可能とする．

本論文は，本章を含めた 5 節から構成される．第 2 節では，関連する研究を簡単に要約する．第 3 節では，偏光プロジェクタを紹介し，動的シーンの鏡面反射，拡散反射，および大域成分を高速に分離する方法を提案する．第 4 節で実験結果を示し，第 5 節で本研究についてまとめる．

2. 関連研究

2.1 鏡面反射・拡散反射成分分離

一般的に物体表面で観測される反射光は，拡散反射成分と鏡面反射成分で構成される． Shafer ら [14] は，色の違いに基づいて鏡面反射成分と拡散反射成分に分離を行う手法を提案している．具体的には，二色反射モデルによると鏡面反射成分の色は光源の色と同じであるが，拡散反射成分の色は表面の反射率に依存する．

また，さまざまな光源方向での拡散反射成分の低ランク構造に基づいて，鏡面反射成分と拡散反射成分を分離できる．具体的には，任意の指向性光源の下でのランバート物体の画像は，物体の 3 つの基底画像の線形結合によって表される [15]．低ランク構造は，マルチスペクトルライトステージで撮影された画像の鏡面反射成分と拡散反射成分を分離するために使用される [6]．

さらに，鏡面反射と拡散反射の偏光状態の違いに基づいて，鏡面反射成分と拡散反射成分を分離することもできる．具体的には，偏光で照らされた物体表面からの反射光を観察すると，前者は偏光しているのに対し，後者は非偏光である [18] ため，光源とカメラの前に直線偏光板を配置し，そのうちの 1 つを回転させて撮影した一連の画像から分離する．

本手法は，上記の既存の方法とは対照的に，プロジェクタ-カメラシステムを使用して，シーンの鏡面反射，拡散反射，および大域成分を分離する方法を提案する．空間的に高周波のパターンを投影することにより，直接成分内の鏡面反射成分と拡散反射成分だけでなく，大域成分も分離する．

2.2 直接・大域成分分離

直接と大域成分の分離は，光源から出た光がシーンとどのように相互作用するかを明らかにする． Nayar ら [10] は，大域成分が一般に空間的に低周波数であることに基づいて，プロジェクタから高周波パターンを投影することにより，シーン内の直接成分と大域成分を分離する手法を提案している．

Gu ら [4] は，単一の光源の上記の直接・大域成分の分離を複数の光源の分離に拡張する．具体的には，照明の多重化 [13] に基づいて，SNR（信号対雑音比）の観点から一連の高周波投影パターンを最適化し，シーンの回復に効果的であることを示している．向川ら [8] は，高周波パターンの投影が散乱媒体内の光輸送の研究，特に複数の散乱を散乱回数ごとの成分に分解する場合にも役立つことを示している．

本手法は，上記の既存の方法とは対照的に，シーンの鏡面反射，拡散反射，および大域成分を分離する方法を提案する．言い換えると，偏光に基づいて，直接成分を鏡面反射成分と拡散反射成分にさらに分離するということである．

2.3 DLP プロジェクタを用いたアクティブ照明

Narasimhan ら [9] は，時間的ディザリング，つまり DLP プロジェクタ内の DMD による強度の高速な変化に基づいて，DLP プロジェクタと高速度カメラを使用して動的シーンの直接成分と大域成分を分離する手法を提案している．彼らは，時間的ディザリングが構造化光ベースの距離測定や照度差ステレオなどの高速アクティブビジョンにも役立つことを示している．

一方、Han ら [5] は，カラースイッチに基づいて DLP プロジェクタと高速度カメラを使用することにより，移動する物体の分光反射率を回復する方法を提案している．つまり，DLP プロジェクタのカラーホイールの回転による色の急激な変化を利用している．前田と岡部 [7] は，多原色 DLP プロジェクタのカラースイッチによって高速に変化する照明色と露光時間の短い通常のカメラを利用し，プロジェクタの原色ごとに静的シーンの直接成分と大域成分を分離する手法を提案している．さらに，彼らは非破壊的に原色の SPD を推定する方法も提案している．

鳥居ら [17] は，DLP プロジェクタのカラースイッチと時間的ディザリングの両方を活用し，照明色ごとに動的シーンを直接成分と大域成分にに分離する．彼らの手法は，時間的ディザリング [9] とカラースイッチ [7] に基づく上記の既存の方法の単純な組み合わせではない．特に，ピクセル強度の一貫性に基づいて，投影パターンとカメラの画素対応の自動キャリブレーションを実現する．さらに，ノイズ伝播解析に基づいて高周波投影パターンを最適化するためノイズに対して頑健になる．

本手法では，上記の既存の手法とは対照的に偏光を利用する．具体的には，回転するカラーホイールを回転する直線偏光板に置き換えることで，色ではなく偏光状態の急激な変化を利用して，鏡面反射，拡散反射，大域成分を分離する．

3. 提案手法

3.1 直接・大域成分分離の原理

Nayar ら [10] は，プロジェクタ-カメラシステムを使用して静的シーンを直接成分と大域成分に分離する手法を提案している．これは，大域成分が空間的に低周波な成分であることに基づき，高周波なパターンを投影したシーンの画像を解析することで分離する手法である．最も簡単な方法では 2 つの画像を使用する．それらは，白黒のチェッカーパターンまたはその画素値の大小が反転したパターンがプロジェクタからシーンに投影されたときに撮影される．

チェッカーパターンの白と黒の入力強度に対応するプロジェクタからの 2 つの出力強度を a と b で表す．例えば，$a = 1$，$b = 0$ のようになる．シーンの特定の位置で観測された画素値は，a と b を用いて，

$$I^+ = aL_D + \frac{1}{2}(a+b)L_G, \quad (1)$$

$$I^- = bL_D + \frac{1}{2}(a+b)L_G, \quad (2)$$

と表せる．ここで，L_D と L_G はその位置の直接成分と大域成分のであり，I^+ と I^- は，$a > b$ の場合に観測される画素値の大小である [9], [10]．よって，画素値 I^+，I^-，および投影されたパターンの画素値 a，b が与えられたときに，式 (1) と式 (2) の線形連立方程式を解くことによって直接成分 L_D と大域成分 L_G を求めることができる．

3.2 鏡面反射・拡散反射成分分離の原理

Wolff と Boult[18] は，鏡面反射が偏光しているのに対して拡散反射は非偏光であることに基づき，鏡面反射成分と拡散反射成分を分離する手法を提案している．具体的には，光源の前に回転する直線偏光板と固定された直線偏光板を備えたカメラ，または光源の前に固定された直線偏光板と回転する直線偏光板を備えたカメラを使用して，静的シーンを鏡面反射成分と拡散反射成分に分離する．近年，後者の設定では，カメラと回転する直線偏光板のペアを 1 台の偏光カメラに置き換えることができる．

後者の場合，つまり，光源の前に固定した直線偏光板と回転する直線偏光板と備えたカメラを考える．その場合，シーンの特定の位置で観測された画素値は，

$$I_{max} = L_s + \frac{1}{2}L_d, \quad (3)$$

$$I_{min} = L_s + \frac{1}{2}L_d, \quad (4)$$

と表せる．ここで，L_s，L_d はその位置での鏡面反射成分と拡散反射成分であり，I_{max}，I_{min} は，直線偏光板がカメラの前で回転したときに観測される最大および最小の画素値である．したがって，画素値 I_{max}，I_{min} が与えられたときに，式 (3) と式 (4) の線形連立方程式を解くことで，鏡面反射成分 L_s と拡散反射成分 L_d を求めることができる．

図 1 偏光プロジェクタ

3.3 偏光プロジェクタ

直接成分と大域成分の分離と鏡面反射成分と拡散反射成分の分離の両方の手法を組み合わせるためには，異なる空間パターンと異なる偏光状態で撮影された複数の画像が必要である．偏光カメラを使用している場合でも，異なる空間パターンで複数の画像を撮影する必要がある．しかし，民生用のプロジェクタや偏光カメラのフレームレートは一般にそれほど高くないため，これらの手法の単純な組み合わせは動的なシーンに適用できない．

そこで，提案手法は，自作の偏光プロジェクタを使用することにより，空間パターンだけでなく照明の偏光状態も高速に変化させる．偏光プロジェクタは，DLP プロジェクタに基づいている．シングルチップ DLP プロジェクタでは，分光透過率の異なる 3 つ（またはそれ以上）のカラーフィルタで構成されるカラーホイールが，白色ランプと DMD の間に配置されている．カラーホイールはランプの前で高速回転し，時分割多重化により透過光を異なる SPD（分光分布）と混合することでさまざまな色を生成する．また，DMD は，マイクロミラーの “on” 方向と “off” 方向を高速で切り替える．このディザリングによってカラーホイールからの光の強度を制御する．図 1 に示すように，DLP プロジェクタの回転するカラーホイールを回転する直線偏光板に置き換える．直線偏光板は，プロジェクタランプによる熱損傷を防ぐためにプロジェクタの筐体の外側に取り付けられている．

3.4 鏡面反射・拡散反射・大域成分分離

図 2 は，プロジェクタ-カメラシステムを使用して，鏡面反射，拡散反射光，大域成分を分離するためのセットアップを示している．具体的には，偏光プロジェクタによって照らされたシーンを固定された直線偏光板越しに高速度カメラを使用して撮影する．プロジェクタへの入力は 2 つの強度を持つ単一のチェッカーパターンであるが，プロジェクタからの出力は，回転する直線偏光板と DMD により偏光状態と強度の両方が高速に変化している．

偏光の伝搬は，ストークスベクトルとミュラー行列を使用して計算する．n 番目のフレーム（$n = 1, 2, 3, \ldots, N$）の特定の点が直接 a_n または b_n のチェッカーパターンの出力強度で照らされている場合，観測される画素値 I_n は，

$$I_n = a_n L_s[\cos(2(\chi_n + \phi) + 1) + a_n L_d + \frac{a_n + b_n}{2} L_g \tag{5}$$

または

$$I_n = b_n L_s[\cos(2(\chi_n + \phi) + 1) + b_n L_d + \frac{a_n + b_n}{2} L_g \tag{6}$$

となる．ここで，L_s，L_d，L_G は推定される鏡面反射成分，拡散反射成分，大域成分であり，χ_n，ϕ は投影された光の偏光角および画素単位の偏光角の位相である．

提案手法は，高速度カメラで N 枚の画像を撮影する間（実験では 16ms），シーンがほぼ静止していることを仮定している．出力強度 a_n と b_n，および投影された光の偏光角 χ_n が既知であると仮定する（詳細は 3.5 節を参照）．次に，本手法は，式 (5) または式 (6) の連立方程式を解くことにより，N 枚の画像から鏡面反射成分，拡散反射成分，大域成分，偏光角の位相を推定する．具体的には，偏光角の位相 ϕ を特定の値にし，L_s，L_d，L_G 関して式 (5) または式 (6) の線形連立方程式を最小二乗法で解く．位相の値を粗い間隔で変更し，最小二乗誤差が最小限になる最適な L_s，L_d，L_G，ϕ を求める．

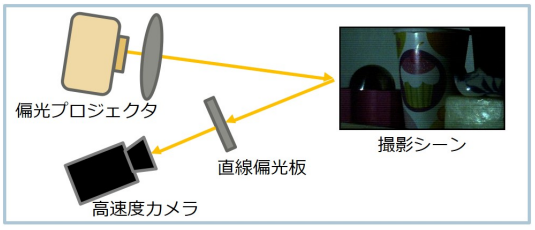

図 2 実験セットアップ

図 3 参照物体

3.5 自動時空間キャリブレーション

提案手法は，シーン中に配置した参照物体も一緒に撮影することで，出力強度 a_n と b_n および偏光角 χ_n を較正する．これは，標準白色板と直線偏光板で構成されており，図 3 のように標準白色板の一部に直線偏光板を配置している．具体的には，標準白色板の画素値から出力強度 a_n と b_n を較正し，直線偏光板がある場合とない場合の標準白色板の画素値から偏光角 χ_n を計算する．したがって，本手法では，その場で撮影された画像から a_n，b_n，χ_n を較正するため，プロジェクタとカメラの時間的同期を必要としない．

また，式 (5) または式 (6) の方程式を解くためには，投影パターンとカメラ間の画素の対応をとる必要がある．言い換えると，出力強度が a_n，b_n であるブロックがシーンのどの点を直接照らしているか明らかにする必要がある．この目的のため，偏光角がほぼ同じ $\chi_n \simeq \chi_m$，プロジェクタの出力強度が $a_n > a_m$，$bn < b_m$ かつ $(a_n + b_n) \simeq (a_m + b_m)$ の場合の I_n と I_m の差分を計算する．なぜなら，$(I_n - I_m)$ は，投影パターンとカメラの画素の対応に応じて $(a_n - a_m)$ または $(b_n - b_m)$ に比例し，$(I_n - I_m)$ の符号から対応を求められるためである．

3.6 投影パターンの最適化

DLP ベースの偏光プロジェクタからの出力強度，つまり時間的ディザリングによって出力強度がどのように変化するかは，プロジェクタへの入力画素値によって異なる．したがって，鏡面反射成分，拡散反射光成分，大域成分を確実に分離するためにチェッカーパターンの 2 つの入力画素値を最適化できる．観測された画素値のノイズを考慮し，ノイズ伝播解析に基づいてそれらの入力強度を最適化する．

具体的には，式 (5) の連立方程式の係数行列

$$\begin{pmatrix} a_1[\cos(2(\chi_1+\phi)+1) & a_1 & (a_1+b_1)/2 \\ a_2[\cos(2(\chi_2+\phi)+1) & a_2 & (a_2+b_2)/2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_N[\cos(2(\chi_N+\phi)+1) & a_N & (a_N+b_N)/2 \end{pmatrix} \tag{7}$$

と式 (6) の連立方程式の係数行列

$$\begin{pmatrix} b_1[\cos(2(\chi_1+\phi)+1) & b_1 & (a_1+b_1)/2 \\ b_2[\cos(2(\chi_2+\phi)+1) & b_2 & (a_2+b_2)/2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ b_N[\cos(2(\chi_N+\phi)+1) & b_N & (a_N+b_N)/2 \end{pmatrix} \tag{8}$$

の条件数 [11] の合計を考える．ここで，N は，作成する動画 1 フレームの鏡面反射成分，拡散反射成分，大域成分を計算する撮影画像の枚数である．条件数は，観測画素値 I_n に対して L_s，L_d，L_G からどの程度のノイズが伝搬しているかの推定量を表す．この条件数をすべての画素値の組み合わせで計算する．入力強度を 8 ビット（0 ∼ 255）で入力し，32,640（$= {}_{256}C_2$）ペアから最適なペアを選択する．条件数が小さいペアほど適したペアである．

3.7 サイドバイサイド方式の 3D モードの使用

3.1 項で説明されている最も単純な直接成分と大域成分の分離では，2 つの投影パターンを使用する．1 つは白黒のチェッカーパターンで，もう 1 つは画素値の大小が反転したパターンである．プロジェクタとカメラの空間解像度が制限されているため，最も単純な方法では，チェッカーパターンのブロック間の境界近くに目に見えるアーティファクトが発生する．Nayar ら [10] は，これらのアーティファクトが空間的にシフトした 3 つ以上の投影パターンを使用することで削減できることを示している．

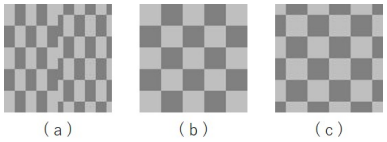

図 4 サイドバイサイド方式の 3D モード

そこで，提案手法では，民生用プロジェクタでも比較的一般的な機能であるサイドバイサイド方式の 3D モードを利用し，空間的にシフトした 2 つのチェッカーパターンを投影する．図 4(a) の 1 枚の画像をプロジェクタに入力し，サイドバイサイドフォーマットの 3D モードで投影すると，プロジェクタは (b) 左目画像と (c) 右目画像を順番に出力する．2 つの空間的にシフトされたチェッカーパターンを参照物体の画素値から区別できるため，3D モードがない場合と同様に空間的にシフトされた投影パターンを使用して，鏡面反射成分，拡散反射成分，大域成分の分離を実現できる．

3.8 空間相関の導入

3.6 項と 3.7 項の高速にシフトされる最適化された投影パターンに加えて，空間相関を考慮することによって分離された画像の品質をさらに改善する．具体的には，注目画素の画素値だけでなく，加重最小二乗法によって周囲の画素で観測された画素値も含めて，式 (5) または式 (6) の連立方程式を解く．

画素ごと，つまり式 (5) または式 (6) の方程式のセットごとに単一の重みを導入する．重みは，3 つのガウス重みの積によって与えられる．1 つ目は画素間の距離に依存し，2 つ目は出力強度がほぼ同じ，つまり $a_n = b_n$ の場合の画素値の差に依存する．したがって，これらの重みの積は，バイラテラルフィルタの重みと同様である [16]．

画素がチェッカーパターンのブロック間の境界に近い/遠い場合，3 番目の重みは小さい/大きい値になる．境界は，差（$I_n - I_m$）のゼロ交差から検出される（詳細は 3.5 節を参照）．

4. 実験

4.1 実験セットアップ

実験には，BenQ の DLP プロジェクタ MH534 と Photron の高速度カメラ Fastcam MiniUX50 をベースにした自作の偏光プロジェクタを使用した．プロジェクタの 3D モードでは，左目と右目の画像が約 8ms（約 120 fps）ですばやく切り替わり，回転する直線偏光板の 1 回転に約 14ms かかる．この直線偏光板の秒間回転数はベースにしたプロジェクタのカラーホイールの回転数より少なくなっている．高速度カメラのフレームレートと露光時間は，それぞれ 10,000fps と 0.1ms に設定した．したがって，提案された方法は，約 60 fps で約 160 枚の画像から鏡面反射成分，拡散反射成分，大域成分の分離を実現する．3.6 節で説明したように，プロジェクタに入力するチェッカーパターンの画素値を最適化し，左目画像は 255 と 203，右目画像は 255 と 210 に設定した．

4.2 静的シーンの実験結果

定量的評価のため，静的シーンで提案手法をテストした．静的シーンでは，空間的に高周波のパターンをいくつか使用することで，鏡面反射成分，拡散反射成分，大域成分の正解画像を取得できる．具体的には，白と黒のチェッカーパターンとその画素値の大小が反転したパターンを水平方向と垂直方向にそれぞれ 5 回ずつスライドした計 50（$= 2 \times 5 \times 5$）枚の投影パターンを使用した．

4.2.1 投影パターンの最適化

まず，最適化された投影パターンの有効性を確認する．図 5 に正解画像（上段）とチェッカーパターンの入力強度が 1 番目に良い画素値のペア（中段），5,000 番目に良い画素値のペア（下段）

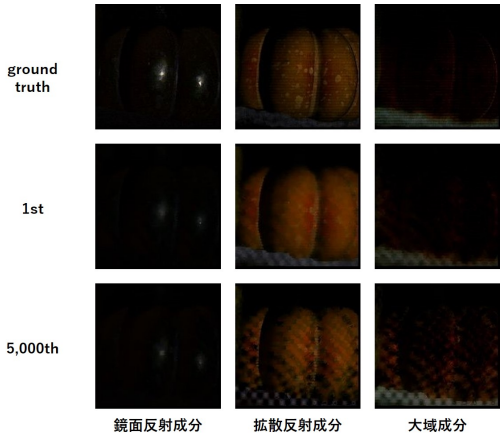

図 5 投影パターン最適化した結果画像

を使用したときの結果画像を示す．このシーンは，鏡面反射成分と拡散反射成分を備えたプラスチック製のカボチャと大域成分を備えた綿で構成されている．5,000 番目に良い画素値のペアは，左目画像が 169 と 45，右目画像が 215 と 156 である．

1 番目の画素値のペアを使用した場合は，5,000 番目の画素値のペアを使用した場合よりも正しく分離できていることが確認できる．ブロック状のアーティファクトは，5,000 番目の画素値のペアを使用したときの結果画像でより目立っている．表 1 の結果画像の PSNR（上段）と SSIM（下段）は，最適化された投影パターンの有効性を定量的に示す．

ここで，5,000 番目の画素値のペアを使用した分離は頑健でないことに注意が必要である．条件数の悪い画素値のペアであるため，式 (5) または式 (6) の連立方程式を解けないことがあり，結果の動画の一部のフレームが欠落することがある．図 6 は，1 番目と 5,000 番目の画素値の組み合わせに対する RGB ごとの出力強度 a_n と b_n を示している．1 番目の出力強度は大幅に変化し，式 (5) または式 (6) においてより良い条件数が得られることがわかる．

4.2.2 パターンをシフトするための 3D モード

次に，投影パターンを高速にシフトするため

表 1　投影パターン最適化した結果画像の PSNR と SSIM

	鏡面反射成分	拡散反射成分	大域成分	平均
ours	**30.29**	26.38	**32.85**	**29.84**
1st	0.733	**0.797**	**0.774**	**0.768**
ours	30.18	**27.41**	26.82	28.14
5000th	**0.749**	0.776	0.608	0.711

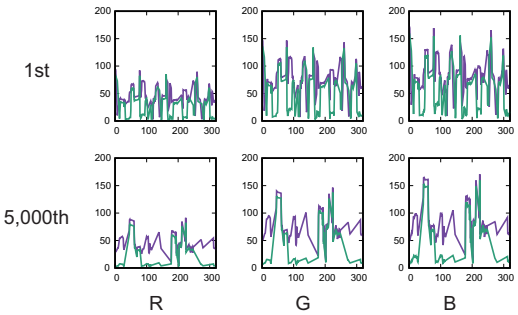

図 6　1 番目と 5,000 番目のディザリング

図 7　シフトパターンまたは重みに関する結果画像

の 3D モードの有効性を確認する．図 7 は，正解画像（1 列目），シフトあり（2 列目）とシフトなし（3 列目）の結果画像を示している．このシーンには，鏡面反射成分を含む鏡面半球，鏡面反射成分と拡散反射成分を含む紙コップ，鏡面反射成分と拡散反射成分を含む陶器の靴，および大域成分を含む石鹸が配置されている．

チェッカーパターンのブロック間の境界に対応する線状のアーティファクトが，シフトありの結果画像で低減されていることがわかる．この結果画像の PSNR（上段）と SSIM（下段）を表 2 で比較すると，投影パターンをシフトするための 3D モードの有効性は定量的に明らかである．

4.2.3　空間相関を組み込むための重み

3 つ目に，空間相関を組み込むための重みの有効性を確認する．図 7 は，正解画像（上の行），空間相関を組み込むための重みがある場合（2 行目）とない場合（4 行目）の結果画像を示している．3.8 節のガウス重みの標準偏差は経験的に設定した．

空間相関を考慮した結果画像は，空間相関を考慮しない結果画像，つまり画素単位の分離よりも滑らかであることがわかる．表 2 は，空間相関を鏡面反射成分，拡散反射成分，大域成分の分離に組み込むことの有効性を定量的に示している．

4.3　動的シーンの実験結果

提案手法は，約 60fps で鏡面反射成分，拡散反射成分，大域成分の高速分離を実現する．高速度カメラを使用して時間的ディザリングの効果を撮影するため，本手法は，単一の投影パターン，つまり実際には 2 つの投影パターン（左目用画像のチェッカーパターンとそれをスライドした右目用画像のチェッカーパターン）のどちらかのみの画像セットで計算を行う．

一方，民生用の偏光カメラは，フレームレートがそれほど高くないため，時間ディザリングの効果を撮影できない．偏光光源と偏光カメラのペアを使用して鏡面反射成分，拡散反射成分，大域成分を分離するには，プロジェクタとカメラの時間同期と 4 つの投影パターンが必要である．各パターンは，白と黒のチェッカーパター

ⓒ 2021 Information Processing Society of Japan

表 2　シフトパターンまたは重みに関する結果画像の PSNR と SSIM

	鏡面反射成分	拡散反射成分	大域成分	平均
ours	22.44	**24.60**	**25.01**	**24.02**
	0.720	**0.703**	**0.498**	**0.640**
w/o	**22.98**	22.61	21.78	22.46
shift	0.718	0.610	0.358	0.562
w/o	22.81	23.02	22.81	22.88
weight	**0.740**	0.688	0.405	0.611

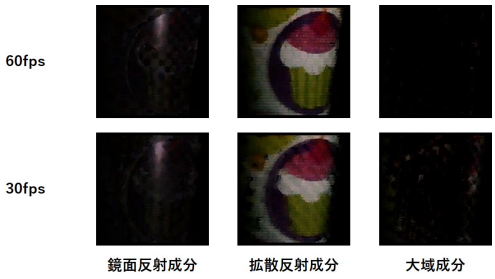

図 8　60fps と 30fps での分離結果

ンとその画素値の大小が反転したパターン，およびそれらがシフトされたパターンである．したがって，プロジェクタのフレームレートが私たちと同じである場合，偏光カメラベースの分離のフレームレートは理論的には提案手法の半分になる．

したがって，時間分解能を変化させた場合の提案手法の性能を比較した．図 8 に 60fps と 30fps の結果画像を示す．後者は，偏光カメラベースの分離のフレームレートに対応する．被写体は動いている紙コップである．30fps の結果画像では，紙コップが動いているためにテクスチャがぼけていることがわかる．この結果は，偏光カメラベースの分離に対する提案手法の利点を示している．

5. まとめ

動的シーンの鏡面反射成分，拡散反射成分，大域成分を分離するために，プロジェクタ-カメラシステムを使用した高速で頑健かつ実装が容易な手法を提案した．具体的には，偏光状態と明るさを高速に変化させることのできる偏光プロジェクタでシーンを照明し，高速度カメラで撮影した画像の変化を解析することで各成分を分離する．また，自作の偏光プロジェクタを用いた実験を行い，投影パターンの最適化，投影パターンを高速にシフトするための 3D モードの使用，空間相関を組み込むための重みなど，手法と各種工夫の有効性を示した．

この研究の発展として，投影パターンの偏光状態と明るさだけでなく，色も変化させることが挙げられる．これは，直線偏光板とカラーフィルタを組み合わせることで，各原色ごとに動的シーンの鏡面反射成分，拡散反射成分，大域成分の分離できるようになり，シーン中の色解析に役立つと考えられる．

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

参考文献

[1] Amano, T.: Shading illusion: a novel way for 3-D representation on the paper media. In: Proc. PROCAMS2012 (2012)
[2] Bimber, O., Iwai, D., Wetzstein, G., Grundhöfer, A.: The visual computing of projector-camera systems. Computer Graphics Forum 27(8), 2219-2245 (2008)
[3] Grossberg, M., Peri, H., Nayar, S., Belhumeur, P.: Making one object look like another: controlling appearance using a projector-camera system. In: Proc. IEEE CVPR2004. pp. I-452-459 (2004)
[4] Gu, J., Kobayashi, T., Gupta, M., Nayar, S.: Multiplexed illumination for scene recovery in the presence of global illumination. In: Proc. IEEE ICCV2011. pp. 691-698 (2011)
[5] Han, S., Sato, I., Okabe, T., Sato, Y.: Fast

ⓒ 2021 Information Processing Society of Japan

spectral reflectance recovery using DLP projector. IJCV 110(2), 172-184 (2014)

[6] Kobayashi, N., Okabe, T.: Separating reflection components in images under multispectral and multidirectional light sources. In: Proc. ICPR2016. pp. 3210-3215 (2016)

[7] Maeda, K., Okabe, T.: Acquiring multispectral light transport using multi-primary DLP projector. In: Proc. IPTA2016. pp. 1-6 (2016)

[8] Mukaigawa, Y., Yagi, Y., Raskar, R.: Analysis of light transport in scattering media. In: Proc. IEEE CVPR2010. pp. 153-160 (2010)

[9] Narasimhan, S., Koppal, S., Yamazaki, S.: Temporal dithering of illumination for fast active vision. In: Proc. ECCV2008. pp. 830-844 (2008)

[10] Nayar, S., Krishnan, G., Grossberg, M., Raskar, R.: Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination. In: Proc. ACM SIGGRAPH 2006. pp. 935-944 (2006)

[11] Press, W., Teukolsky, S., Vetterling, W., Flannery, B.: Numerical Recipes in C 3rd Edition: The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press (2007)

[12] Raskar, R., Welch, G., Low, K.L., Bandyopadhyay, D.: Shader lamps: animating real objects with image-based illumination. In: Proc. EWRT2001. pp. 89-102 (2001)

[13] Schechner, Y., Nayar, S., Belhumeur, P.: A theory of multiplexed illumination. In: Proc. IEEE ICCV2003. pp. 808-815 (2003)

[14] Shafer, S.: Using color to separate reflection components. Color Research & Application 10(4), 210-218 (1985)

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

[16] Tomasi, C., Manduchi, R.: Bilateral fi ltering for gray and color images pp. 839-846 (1998)

[17] Torii, M., Okabe, T., Amano, T.: Multispectral direct-global separation of dynamic scenes. In: Proc. IEEE WACV2019. pp. 1923-1931 (2019)

[18] Wolff, L., Boult, T.: Constraining object features using a polarization reflectance model. IEEE Trans. PAMI 13(6), 167-189 (1991)

ⓒ 2021 Information Processing Society of Japan