

照明変動を伴う多視点画像に基づく反射成分の分離

武智 鴻生^{1,a)} 岡部 孝弘^{2,b)}

概要：物体表面で観察される反射光は、拡散反射成分と鏡面反射成分からなる。鏡面反射成分は、古典的照度差ステレオにおいては除去すべきノイズである一方で、未較正照度差ステレオにおいては形状復元の不定性を解決する手掛かりとして重要である。本稿では、ライトフィールドカメラを用いた照度差ステレオのために、照明変動を伴う多視点画像に基づいた反射成分の分離について議論する。具体的には、まず、拡散反射成分の明るさが視線方向に依らず、かつ、光源方向と法線に関して双線形であることから、画像を物体表面上の位置・光源方向・視線方向を軸とした3階テンソルとして表現したときの構造を明らかにする。次に、この構造に基づいて、外れ値を考慮した高次特異値分解を用いた低ランク近似により反射成分を分離する手法を提案する。実画像を用いた実験を行い、提案手法の有効性を確認した。

キーワード：照度差ステレオ、反射成分分離、ライトフィールド、高次特異値分解

1. まえがき

光源方向の変化に伴う反射光強度の変化を手掛かりにして物体表面の法線を推定する技術は、照度差ステレオと呼ばれる。画素ごとに法線を推定する照度差ステレオには、疎な対応点の奥行きを推定する多視点ステレオと比較して、密な形状を復元できるという特長がある。

物体表面で観察される反射光は、一般に、拡散反射成分と鏡面反射成分からなる。Lambertモデルと既知の光源方向・明るさを仮定した古典的照度差ステレオ [16] においては、鏡面反射成分は除去すべきノイズである。一方、Lambertモデルと未知の光源方向・明るさを仮定した未較正照度差ステレオにおいては、鏡面反射成分は形状復元の不定性 [1], [5] を解決する手掛かりとして有用であることが知られている [3], [4]。したがって、光源方向の変化を伴う画像を拡散反射成分と鏡面反射成分に分離することは、重要な研究課題である。

本稿では、ライトフィールドカメラ [7] を用いた照度差ステレオのための反射成分の分離について議論する。ライトフィールドカメラではワンショットの画像から多視点情報を得ることができるため、照明変動を伴う多視点画像に基づいた反射成分の分離について考える。

具体的には、まず、照明変動を伴う多視点画像を、物体表面上の位置・光源方向・視線方向を軸とした3階テンソ

ルとして表現する。次に、Lambertモデルに従う拡散反射成分の明るさが視線方向に依らず、かつ、光源方向と法線の内積で表現されること、つまり、光源方向と法線に関して双線形であることから、3階テンソルが低ランク構造を持つことを明らかにする。提案手法では、この低ランク構造に基づいて、特異値分解を多モードに拡張した高次特異値分解を用いた低ランク近似 [14] により反射成分を分離する。さらに、低ランク近似の際に鏡面反射成分や陰などの外れ値を考慮することで [11]、これらに頑健な手法を実現する。

提案手法の有効性を示すために、実画像を用いた実験を行った。照明変動に伴う見えの変化と視線変動に伴う見えの変化の両方を考慮した提案手法が、どちらか一方のみを考慮した従来手法などよりもうまく働くことを確認した。

2. 関連研究

拡散反射成分と鏡面反射成分の分離には、視線変動に基づくアプローチ、照明変動に基づくアプローチ、偏光に基づくアプローチ、および、色に基づくアプローチの4つがある。

視線変動に基づくアプローチでは、物体表面上で観察される反射光が拡散反射成分と鏡面反射成分の和であること、および、拡散反射成分の明るさが視線方向に依存しない（視線変動に関して直流成分になる）ことを利用する。つまり、物体表面上のある点を多視点から観察したときに、最小の画素値を拡散反射成分であるとみなす [8]。視線変動に基づく反射成分の分離は、ライトフィールドカメラを

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) k.takechi@pluto.ai.kyutech.ac.jp

b) okabe@ai.kyutech.ac.jp

用いて撮影された単一画像からの奥行き推定でも利用されているが、照明変動は考慮されていない [13]. これらの従来手法に対して、視線変動だけでなく照明変動も考慮することが提案手法の特徴である。

照明変動に基づくアプローチでは、任意の単一平行光線下の拡散反射物体の画像が3枚の画像の線形結合で表現できることを利用する [10]. 照明変動に基づく反射成分の分離は、照明変動を伴う画像を入力とする照度差ステレオで用いられ、低ランク行列のあてはめなどの様々な手法が提案されている [17]. これらの従来手法に対して、照明変動だけでなく視線変動も考慮することが提案手法の特徴である。

偏光に基づくアプローチでは、直線偏光板を通して物体を照明したときに、鏡面反射成分が偏光したままであるのに対して、拡散反射成分が非偏光であることを利用する [15]. 具体的には、光源とカメラの前にそれぞれ直線偏光板を設置し、一方の直線偏光板を回転させたときに、明るさが最小となる画像を拡散反射成分であるとみなす。偏光に基づく反射成分の分離では、偏光板を設置したり、偏光板を回転させながら撮影したりする必要がある。

色に基づくアプローチでは、二色性反射モデル [9], つまり、鏡面反射成分の色が光源色に等しいのに対して、拡散反射成分の色が物体に依存することを利用する。色に基づく反射成分の分離には、単一画像にも適用できるという利点がある。一方で、彩度の低い色を持つ物体や狭帯域のLEDに照らされた物体においては、鏡面反射成分と拡散反射成分は類似の色を持つために、反射成分の分離は困難である。

提案手法の特長は、視線変動による手掛かりと照明変動による手掛かりの両方を考慮することで、反射成分を頑健に分離することにある。また、本研究には、リフォーカス [7], 奥行き推定 [12], [13], および、物体認識 [6] などのライトフィールドに関する研究が盛んになる中で、ライトフィールドカメラの新たな応用としての意義もある。

3. 提案手法

3.1 ライトフィールドカメラ原画像

本研究では、図1のように、撮像素子の直上にマイクロレンズを並べたマイクロレンズアレイ方式のライトフィールドカメラ [7] で撮影された画像を対象とする。提案手法では、被写体に焦点が合っていること、つまり、被写体から放たれた光線がマイクロレンズ上で結像していることを仮定する。このとき、各マイクロレンズ直下の画素には、シーンの同一の点を異なる視線方向から観察したときの画素値が記録される。図2に示すように、ライトフィールドカメラで撮影した原画像を拡大すると、マイクロレンズが並んでいる様子が分かる。

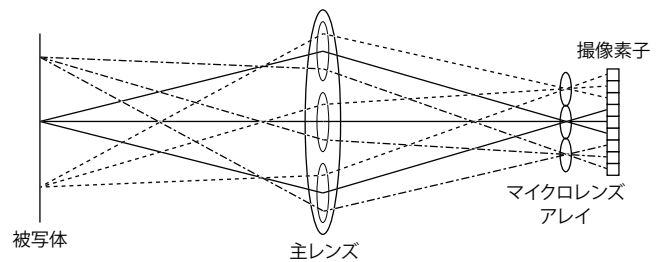


図1 ライトフィールドカメラによる光線の記録.

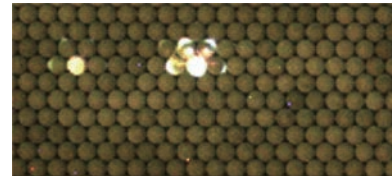


図2 原画像を拡大したもの.

3.2 テンソル表現と低ランク構造

ライトフィールドカメラと被写体を固定して、光源方向のみを変化させて撮影した画像を考える。ここで、 l 番目 ($l = 1, 2, 3, \dots, L$) の光源方向の下で撮影された画像の m 番目 ($m = 1, 2, 3, \dots, M$) のマイクロレンズ内の v 番目の画素 ($v = 1, 2, 3, \dots, V$), つまり、 v 番目の視線方向から見たときの画素値を i_{mlv} とする。提案手法では、この画素値の集合を、マイクロレンズ (物体表面上の位置) ・光源方向 ・視線方向を軸とする3階のテンソル \mathcal{I} で表現する。

図3のように、上記の3階テンソル \mathcal{I} をそれぞれの軸で展開して得られる3つの行列 $\mathcal{I}_{(\text{mlens})}$, $\mathcal{I}_{(\text{light})}$, および、 $\mathcal{I}_{(\text{view})}$ を考える。行列の大きさはそれぞれ、 $M \times (LV)$, $L \times (VM)$, および、 $V \times (ML)$ である。以下では、画像が Lambert モデルに従う拡散反射成分のみで構成されるときに、これらの行列が低ランク構造を持つことを明らかにする。

まず、図3上段の行列 $\mathcal{I}_{(\text{mlens})}$ について考える。この行列は、 $M \times L$ のブロックを横に V 個並べたものである。Lambert モデルより、1 個目のブロックの l 列目の画素値は、

$$\begin{pmatrix} \rho_1 \mathbf{n}_1^\top \\ \vdots \\ \rho_M \mathbf{n}_M^\top \end{pmatrix} \mathbf{s}_l \quad (1)$$

のように記述される。ここで、 ρ_m と \mathbf{n}_m は m 番目 ($m = 1, 2, 3, \dots, M$) のマイクロレンズに対応する物体表面上の位置における拡散反射率と法線、 \mathbf{s}_l は l 番目 ($l = 1, 2, 3, \dots, L$) の光源の方向を表す単位ベクトルに明るさを掛けた光源ベクトルである。一般に、光源ベクトルの自由度は3であることから*1, 1 個目のブロックのランクは3である。さらに、拡散反射成分の明るさが視線方向に依らないため、2 個目以降のブロックは1 個目のブロック

*1 光源ベクトルが同一直線上や同一平面上にないことを仮定する。

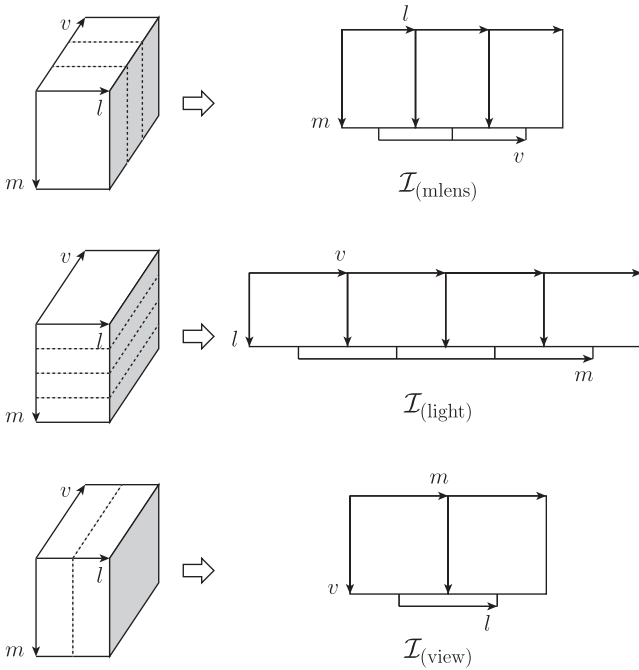


図 3 3 階テンソルの行列への展開. $M = 4, L = 2, V = 3$ のときの例.

と同じであることから, 行列 $\mathcal{I}_{(\text{mlens})}$ のランクは 3 となる. これは, 任意の単一平行光線下の拡散反射物体の画像が, 3 枚の画像の線形結合で表現できる [10] ことを意味する.

次に, 図 3 中段の行列 $\mathcal{I}_{(\text{light})}$ について考える. この行列は $L \times V$ のブロックを横に M 個並べたものであるが, 拡散反射成分の明るさが視線方向に依らないため, 各ブロックのランクは 1 である. Lambert モデルより, m 番目のブロックの任意の列の画素値は,

$$\begin{pmatrix} \mathbf{s}_1^\top \\ \vdots \\ \mathbf{s}_L^\top \end{pmatrix} \rho_m \mathbf{n}_m \quad (2)$$

のように記述される. 一般に, 拡散反射率と法線の積で表されるベクトルの自由度は 3 であることから^{*2}, 行列 $\mathcal{I}_{(\text{light})}$ のランクは 3 となる.

最後に, 図 3 下段の行列 $\mathcal{I}_{(\text{view})}$ について考える. 拡散反射成分の明るさは視線方向に依存しないことから, 行列 $\mathcal{I}_{(\text{view})}$ のランクは明らかに 1 である. 以上のことから, 照明変動に伴う多視点画像を 3 階テンソルで表現したときに, 各々の軸で展開して得られる行列が低ランク構造を持つことが明らかになった.

3.3 高次特異値分解による低ランク近似

提案手法では, 上述の低ランク構造に基づいて, 高次特異値分解を用いた低ランク近似 [14] により反射成分を分離する. 具体的には, まず, 行列 $\mathcal{I}_{(\text{mlens})}$ を

$$\mathcal{I}_{(\text{mlens})} = U_{(\text{mlens})} \Sigma_{(\text{mlens})} V_{(\text{mlens})}^\top \quad (3)$$

^{*2} 平面や円柱などの特殊な形状を除く.

のように特異値分解する. 行列 $\mathcal{I}_{(\text{mlens})}$ のランクが 3 であることから, 直交行列 $U_{(\text{mlens})}$ の大きい方から 3 個の特異値に対応する特異ベクトルからなる $M \times 3$ の行列 $\hat{U}_{(\text{mlens})}$ を得る. 同様にして, $L \times 3$ の行列 $\hat{U}_{(\text{light})}$ と $V \times 1$ の行列 $\hat{U}_{(\text{view})}$ を得る.

次に, これらの行列と 3 階テンソル \mathcal{I} から,

$$\hat{\mathcal{Z}} = \mathcal{I} \times_1 \hat{U}_{(\text{mlens})}^\top \times_2 \hat{U}_{(\text{light})}^\top \times_3 \hat{U}_{(\text{view})}^\top \quad (4)$$

のようにして, コアテンソル $\hat{\mathcal{Z}}$ を計算する. ここで \times_n は n 番目 ($n = 1, 2, 3$) のモードに関する積である. 最後に, 低ランク構造を持つ 3 階テンソルを

$$\hat{\mathcal{I}} = \hat{\mathcal{Z}} \times_1 \hat{U}_{(\text{mlens})} \times_2 \hat{U}_{(\text{light})} \times_3 \hat{U}_{(\text{view})} \quad (5)$$

のように計算して, これを拡散反射成分とみなす.

3.4 外れ値を考慮した高次特異値分解

実際の画像には, 拡散反射成分だけでなく鏡面反射成分, 陰 (attached shadow), および, 影 (cast shadow) なども含まれる. そのため, 行列 $\mathcal{I}_{(\text{mlens})}$, $\mathcal{I}_{(\text{light})}$, および, $\mathcal{I}_{(\text{view})}$ は, 3.2 節で示したランクを持つとは限らない. したがって, これらの行列を特異値分解して得られる低ランク行列 $\hat{U}_{(\text{mlens})}$, $\hat{U}_{(\text{light})}$, および, $\hat{U}_{(\text{view})}$ は正確ではない.

そこで提案手法では, 外れ値を考慮した特異値分解 [11] を用いて低ランク行列 $\hat{U}_{(\text{mlens})}$, $\hat{U}_{(\text{light})}$, および, $\hat{U}_{(\text{view})}$ を求める. 具体的には, l 番目 ($l = 1, 2, 3, \dots, L$) の光源方向の下で撮影された画像の m 番目 ($m = 1, 2, 3, \dots, M$) のマイクロレンズ内の v 番目の画素 ($v = 1, 2, 3, \dots, V$) の重みを $w_{mlv} = \{1, 0\}$ とする. そして, 以下のようにして重みを更新しながら, 重みが 1 の画素の画素値のみを用いて低ランク行列を求めて, 拡散反射成分 $\hat{\mathcal{I}}$ を更新する.

- (1) 画素値が閾値 t_h 以上の (鏡面反射のために) 飽和している画素と, 画素値が閾値 t_l 以下の陰・影の画素の重みを 0 にする.

$$w_{mlv} = \begin{cases} 0 & (i_{mlv} \geq t_h \text{ or } i_{mlv} \leq t_l) \\ 1 & (\text{otherwise}). \end{cases} \quad (6)$$

- (2) 重みが 1 の画素の画素値のみを用いて, 最小二乗法により低ランク行列 $\hat{U}_{(\text{mlens})}$, $\hat{U}_{(\text{light})}$, および, $\hat{U}_{(\text{view})}$ を求める^{*3}.
- (3) これらを式 (4) に代入して, コアテンソル $\hat{\mathcal{Z}}$ を計算する^{*4}.
- (4) コアテンソルと低ランク行列を式 (5) に代入して, 拡散反射成分 $\hat{\mathcal{I}}$ を計算する.
- (5) 入力画像 \mathcal{I} の画素値 i_{mlv} と拡散反射成分 $\hat{\mathcal{I}}$ の画素値 \hat{i}_{mlv} の差が閾値 t_s よりも大きければ, その画素は鏡面

^{*3} 以下の計算のために, 各々の行列を直交化しておく.

^{*4} ただし, 入力画像に含まれる鏡面反射や陰・影の影響を除去するために, \mathcal{I} の代わりに, 最新の $\hat{\mathcal{I}}$ を用いる.

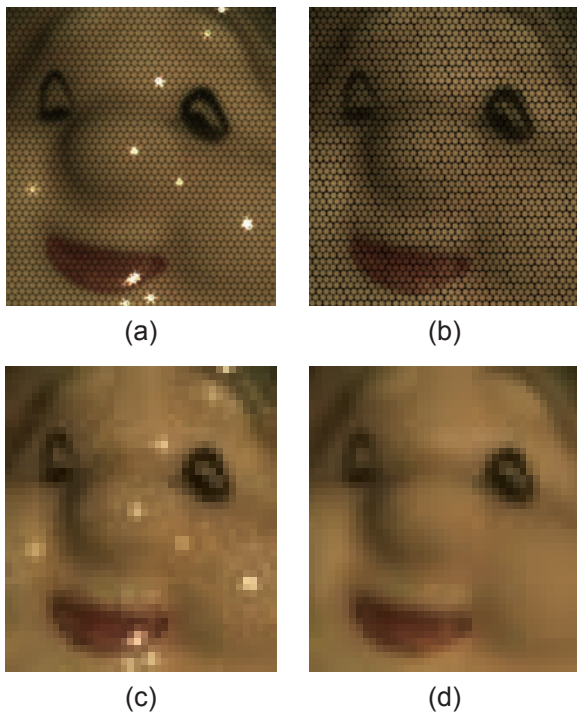


図 4 実験結果 1: (a) 入力原画像, (b) 提案手法の結果画像, および, (c) 入力原画像と (d) 提案手法の結果画像のそれぞれを元にして, 中心視点方向からの見えをレンダリングした画像.

反射とみなして重みを更新する.

$$w_{mlv} = \begin{cases} 0 & (i_{mlv} \geq t_h \text{ or } i_{mlv} \leq t_l \\ & \text{or } i_{mlv} - \hat{i}_{mlv} \geq t_s) \\ 1 & (\text{otherwise}). \end{cases} \quad (7)$$

(6) 重みが更新されなくなるまで, もしくは, 予め指定した繰り返し回数に達するまで (2) から (5) を繰り返す.

4. 実験

4.1 実画像実験

実画像を用いた実験を行った. 画像の撮影には, マイクロレンズアレイ方式のライトフィールドカメラである Lytro Illum を使用した. 実験では, カメラと被写体を固定して, 光源方向 (実際には遠方光源の位置) のみを変化させて撮影した 10 枚 ($L = 10$) の画像を入力とした. また, 3.4 節で述べた繰り返し回数は, 経験的に 10 回とした. なお, 原画像における各マイクロレンズの中心座標の較正には, Bok [2] らのライブラリを用いた.

図 4 上段に, ある光源方向における (a) 入力原画像と (b) 提案手法の結果画像^{*5}を示す. 入力原画像の白とびしている画素やその周囲の画素では鏡面反射が観察されていると考えられるが, 提案手法の結果画像ではこれらが除去されていることが分かる.

図 4 下段の (c) と (d) はそれぞれ, (a) と (b) を元にして, 中心視点方向からの見えをレンダリングした画像であ

^{*5} 各マイクロレンズの中心から半径 6 画素以内の画素のみを処理対象として, それ以外の画素は黒く塗りつぶしている.

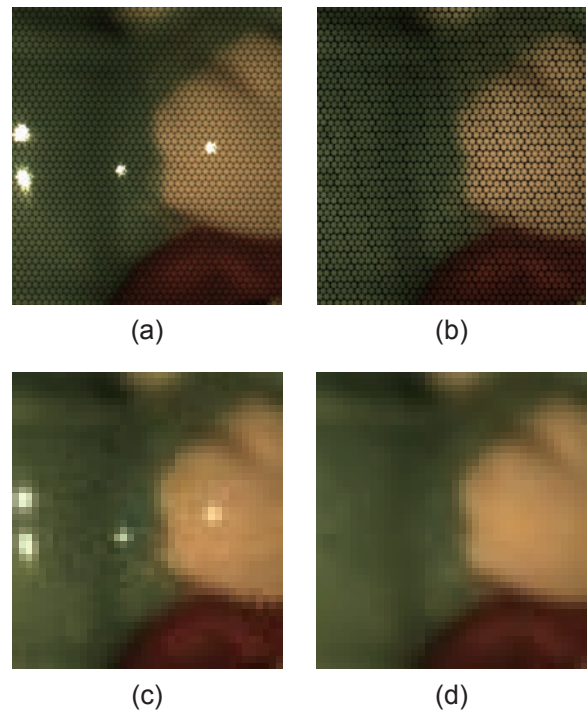


図 5 実験結果 2: (a) 入力原画像, (b) 提案手法の結果画像, および, (c) 入力原画像と (d) 提案手法の結果画像のそれぞれを元にして, 中心視点方向からの見えをレンダリングした画像.

る. これらの画像からも, 提案手法により鏡面反射成分を除去できていることが分かる. また, 提案手法により滑らかな画像が得られることも分かる. これは, 多視点から観察した明るさを特異値分解することで, 画素値に含まれるノイズ^{*6}が相殺されるためであると考えられる. なお, 図 5 に示した例でも, 同様の結果が得られている.

4.2 従来手法との比較

提案手法の有効性を確認するために, 以下の 4 つの手法との比較を行った.

- **高次特異値分解による低ランク近似**
3.3 節で述べたとおりである. 提案手法と異なり, 鏡面反射成分, 陰, および, 影などの外れ値を考慮せずに低ランク近似を行う.
- **視線変動に基づく手法**
物体表面上で観察される反射光が拡散反射成分と鏡面反射成分の和であること, および, 拡散反射成分の明るさが視線方向に依存しないことを利用する. 具体的には, ライトフィールドカメラで撮影した原画像において, 各マイクロレンズ内で最小の画素値を, そのマイクロレンズに対応する物体表面上の位置における拡散反射成分の明るさとみなす.
- **照明変動に基づく手法**
任意の単一平行光線下の拡散反射物体の画像が 3 枚の画像の線形結合で表現できることを利用する [10]. 具

^{*6} 例えば平均が 0 のガウスノイズなど.

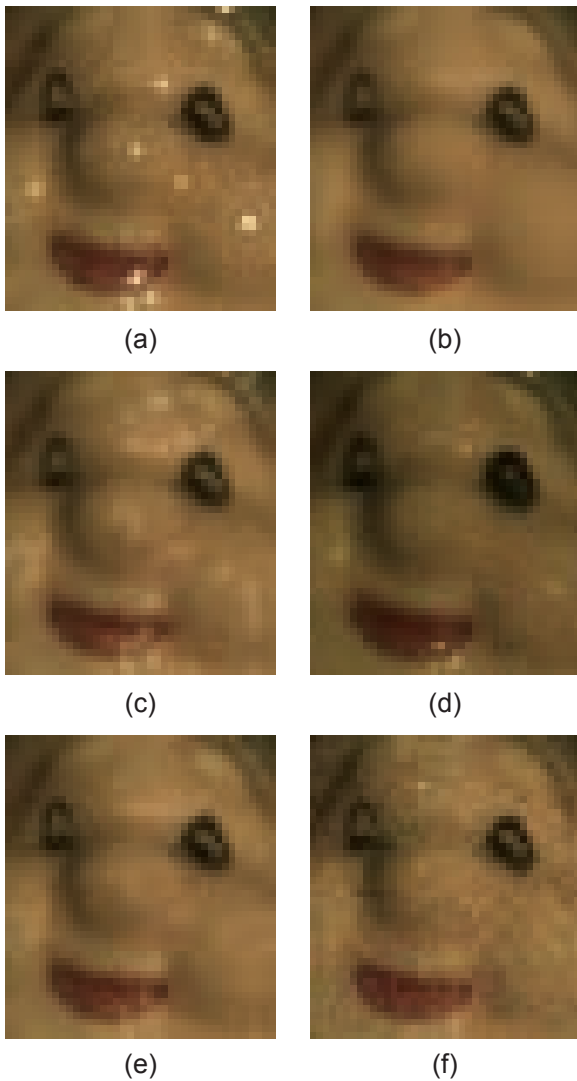


図 6 他の手法との比較 1 : (a) 入力画像, および, (b) 提案手法, (c) 高次特異値分解による低ランク近似, (d) 視線変動に基づく手法, (e) 照明変動に基づく手法, (f) 偏光に基づく手法の結果画像.

体的には, ライトフィールドカメラで撮影した原画像を元に, 中心視点方向からの見えをレンダリングした画像を入力として, 外れ値を考慮した特異値分解により低ランク近似を行う.

● 偏光に基づく手法

直線偏光板を通して物体を照明したときに, 鏡面反射成分が偏光したままであるのに対して, 拡散反射成分が非偏光であることを利用する [15]. 具体的には, 光源とライトフィールドカメラの前にそれぞれ直線偏光板を置き, 光源の前の直線偏光板を回転させたときに, 明るさが最小となる画像を拡散反射成分であるとみなす.

図 6 に, ある光源方向における (a) 入力画像, および, (b) 提案手法, (c) 高次特異値分解による低ランク近似, (d) 視線変動に基づく手法, (e) 照明変動に基づく手法, (f) 偏

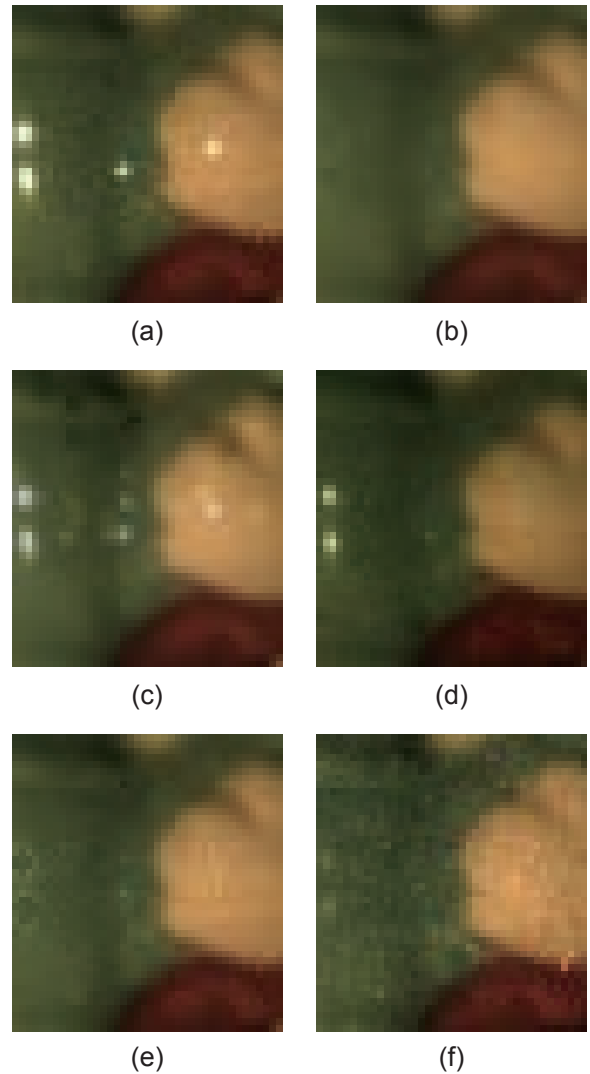


図 7 他の手法との比較 2 : (a) 入力画像, および, (b) 提案手法, (c) 高次特異値分解による低ランク近似, (d) 視線変動に基づく手法, (e) 照明変動に基づく手法, (f) 偏光に基づく手法の結果画像.

光に基づく手法^{*7}の結果画像を示す. (b) の提案手法がうまく働いていることは, 4.1 節で確認したとおりである.

(c) の高次特異値分解による低ランク近似では, 外れ値を考慮せずに低ランク近似を行っているために, 鏡面反射成分を除去できていないことが分かる. 特に, 同一光源方向における鏡面反射だけでなく, 異なる光源方向における鏡面反射の影響も受けていることが分かる.

(d) の視線変動に基づく手法では, どの視線方向から見ても観察されるような鏡面反射成分を除去できていないことが分かる. また, 各マイクロレンズ内で最小の画素値を拡散反射成分の明るさとみなすために, ノイズに敏感で, 暗くてざらついた画像が得られている.

(e) の照明変動に基づく手法では, 鏡面反射成分をある

^{*7} 直線偏光板の透過率を 1/2 とすると, 他の手法に比べて 1/4 の明るさになるため, 提案手法の結果と明るさが揃うように画素値を定数倍している.

程度除去できているものの、提案手法よりも劣ることが分かる。また、中心視点方向からの見えをレンダリングした画像を入力としているために、ノイズにやや敏感で、ややざらついた画像が得られている。

(f)の偏光に基づく手法では、概ね鏡面反射成分を除去できていることが分かる。しかしながら、中心視点方向からの見えをレンダリングした画像を入力としていること、ならびに、2枚の直線偏光板を透過する際に光量が減少することから、ノイズに敏感で、ざらついた画像が得られている。

なお、図7に示した例でも、同様の結果が得られている。以上のことから、定性的には、上記の4つの手法よりも、視線変動と照明変動の両方を考慮した提案手法が有効であることが分かる。定量的な比較は今後の課題である。

5. むすび

本稿では、ライトフィールドカメラを用いた照度差ステレオのために、照明変動を伴う多視点画像に基づいた反射成分の分離法を提案した。提案手法では、画像を物体表面上の位置・光源方向・視線方向を軸とした3階テンソルで表現したときの構造に基づいて、外れ値を考慮した高次特異値分解を用いた低ランク近似により反射成分を分離した。また、実画像を用いた実験を行い、提案手法の有効性を確認した。

定量的な評価や計算コストの削減は今後の課題である。また、古典的照度差ステレオや未較正照度差ステレオへの応用にも取り組みたい。

参考文献

- [1] P. Belhumeur, D. Kriegman, and A. Yuille, “The bas-relief ambiguity”, In Proc. IEEE CVPR1997, pp.1060–1066, 1997.
- [2] Y. Bok, H.-G. Jeon, and I. S. Kweon, “Geometric calibration of micro-lens-based light-field cameras using line features”, In Proc. ECCV2014 (LNCS8694), pp.47–61, 2014.
- [3] O. Drbohlav and M. Chantler, “Can two specular pixels calibrate photometric stereo?”, In Proc. IEEE ICCV2005, pp.II-1850–1857, 2005.
- [4] A. Georghades. “Incorporating the Torrance and Sparrow model of reflectance in uncalibrated photometric stereo”, In Proc. IEEE ICCV2003, pp.816–823, 2003.
- [5] H. Hayakawa, “Photometric stereo under a light source with arbitrary motion”, JOSA A, 11(11), pp.3079–3089, 1994.
- [6] K. Maeno, H. Nagahara, A. Shimada, and R. Taniguchi, “Light field distortion feature for transparent object recognition”, In Proc. IEEE CVPR2013, pp.2786–2793, 2013.
- [7] R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan “Light field photography with a hand-held plenoptic camera,” Stanford Tech Report CTSR 2005-02, 2005.
- [8] K. Nishino, Z. Zhang and K. Ikeuchi, “Determining re-

- flectance parameters and illumination distribution from a sparse set of images for view-dependent image synthesis”, In Proc. IEEE ICCV2001, pp.599–606, 2001.
- [9] S. Shafer, “Using color to separate reflection components”, Color Research & Application, 10(4), pp.210–218, 1985.
- [10] A. Shashua, “On photometric issues in 3D visual recognition from a single 2D image”, IJCV, 21(1/2), pp.99–122, 1997.
- [11] H.-Y. Shum, K. Ikeuchi, and R. Reddy, “Principal component analysis with missing data and its application to polyhedral object modeling”, IEEE Trans. PAMI, 17(9), pp.854–867, 1995.
- [12] M. Tao, S. Hadap, J. Malik, and R. Ramamoorthi, “Depth from combining defocus and correspondence using light-field cameras”, In Proc. IEEE ICCV2013, pp.673–680, 2013.
- [13] M. Tao, J.-C. Su, T.-C. Wang, J. Malik, and R. Ramamoorthi, “Depth estimation and specular removal for glossy surfaces using point and line consistency with light-field cameras”, IEEE Trans. PAMI, 38(6), pp.1155–1169, 2016.
- [14] M. Vasilescu and D. Terzopoulos, “Multilinear analysis of image ensembles: tensorfaces”, In Proc. ECCV2002 (LNCS2350), pp.447–460, 2002.
- [15] L. Wolff and T. Boult, “Constraining object features using a polarization reflectance model”, IEEE Trans. PAMI, 13(7), pp.635–657, 1991.
- [16] R. Woodham, “Photometric method for determining surface orientation from multiple images”, Optical Engineering, 19(1), pp.139–144, 1980.
- [17] L. Wu, A. Ganes, B. Shi, Y. Matsushita, Y. Wang, and Y. Ma, “Robust photometric stereo via low-rank matrix completion and recovery”, In Proc. ACCV2010, Part III, pp.703–717, 2010.