主成分分析と光学現象の分類に基づく画像の線形化

森　隆浩†　　日浦　慎作††　　佐藤　宏介†

† 大阪大学 大学院基礎工学研究科　〒 560–8531 豊中市待兼山町 1–3
†† 広島市立大学 大学院情報科学研究科　〒 731–3194 広島市安佐南区大塚東 3–4–1
E-mail: †{mori,sato}@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp, ††hiura@hiroshima-cu.ac.jp

あらまし　影や鏡面反射を含む実画像を, 拡散反射のみの画像に変換する画像の線形化手法が提案されている．しかし, 従来の線形化手法 [1], [2] には, 二つの大きな問題がある．一つは 3 枚の基底画像の組み合わせによって, 線形化の精度が大きく左右されてしまうという問題であり, もう一つは計算の過程でランダムサンプリングを用いているため, 入力画像のサイズや枚数が増加すると, 計算時間が指数関数的に増加してしまうという問題である．そこで本論文では, 主成分分析に光学現象の分類を行う手法を組み合わせた, 画像の線形化のための新しい繰り返し計算アルゴリズムを提案する．そして提案手法により, 従来の画像の線形化手法が持つ上記二つの問題を解消でき, 高速かつ高精度な画像の線形化が実現出来ることを示す.

キーワード　画像の線形化, 反射成分の分離

1. はじめに

画像処理アルゴリズムの多くは拡散反射を前提にしている．そのため, 実画像に含まれる鏡面反射・影を除去し, 拡散反射のみを含む画像を得る技術が必要である.

Shashua [4] によると, 平行光源と完全拡散反射面を仮定することで, 光源の異なる 3 枚の画像の線形結合により任意光源方向の画像を表現できる．しかし, 実画像には鏡面反射や影が存在するため, 3 枚の画像の線形結合で画像を完全に表現することはできない．Belhumeur ら [5] は, 照明錐モデルにより拡散反射と attached shadow を表現できることを示している．しかしそのためには, 大量の画像が必要になるため, 実用上の問題から検討課題が残されている．この問題を解決するために, 球面調和関数を用いることで照明錐モデルを近似する研究 [6], [7], [8], [9] も行われている．これらは, 任意光源方向の画像が比較的少ないデータ量で近似表現できるが, 拡散反射成分を忠実に表現できないという問題がある.

実画像に含まれる鏡面反射と拡散反射を分離する手法として, 空間的に高周波な照明パターンをディスプレイ等の上に表示して物体を照明し, それをずらした時の明暗変化を解析する手法 [10], [11], [12] や, 2 色性反射モデルに基づいて拡散反射と鏡面反射の色の違いを利用する手法 [13], [14], [15], [16], 鏡面反射の偏光性を利用する手法 [17], [18], [19] などが提案されている．しかし, これらの手法には, 実画像から鏡面反射は分離できるが, 影は分離できないという共通の限界がある.

向川ら [1] は, シーンの 3 次元形状や反射特性などを復元することなく, 鏡面反射や影が含まれる実画像を,3 枚の画像の線形結合で表現できるように変換する画像の線形化と呼ぶ手法を提案している．石井ら [2] は, 画像の線形化と物体表面に生じる光学現象との関係を明らかにし, 画像の線形化に基づいた拡散反射・鏡面反射・attached shadow・cast shadow の解析法を提案している．しかし, 従来の画像の線形化手法には, 二点の大きな問題がある．一つは 3 枚の基底画像の組み合わせ (入力画像群から選択する) によって, 線形化画像の精度が大きく左右されてしまうという問題である．もう一つは, 計算の過程でランダムサンプリングを用いているため, 入力画像のサイズや枚数が増加すると, 計算時間が指数関数的に増加してしまうという問題である.

Wu ら [3] は, 画像に対して線形性を仮定した手法である照度差ステレオ法を影や鏡面反射を有する物体に適用するために，ロバスト主成分分析を用いることを提案している．具体的には，L1 ノルムを最小化する統計的手法の 1 つである主成分追跡 (Principal Component Pursuit) を用いることで, 単純な最小二乗に基づく方法に比べ外れ値に影響を受けにくい解が得られることを示している．彼らはさらに，入力画像のうち画素値が 0 に近い画素は影領域である可能性が高いことから，この領域をあらかじめ除去することで, 物体表面法線の推定精度の向上につながったと報告している．このことは単純な統計的手法に比べ，画像形成段階における光学現象に関する知識を加えることの有用性を示唆している．しかし彼らの手法では単純に画素値を用いて影領域を除去しているだけであり，後に述べるような鏡面反射が持つ特有の性質は用いていない.

そこで本論文では, 従来の画像の線形化手法の抱えていた上記二つの問題を解消するために, 統計的手法 (「3 枚の基底画像は, 入力画像群を主成分分析して得られる第 1,2,3 主成分とする」, 「係数組を最小二乗法を用いて求める」) に, それぞれの光学現象が持つ性質を考慮し

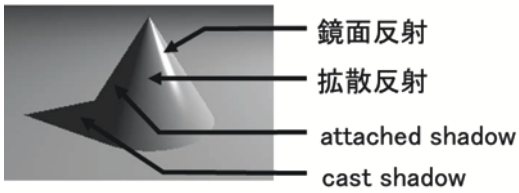


図 1　画像に含まれる光学現象

図 2　2色性反射モデル

た手法 (「入力画像において, 影や鏡面反射を含むと認識された画素値を, 線形化画像の画素値と置き換える」,「鏡面反射のにじみを考慮し, 鏡面反射を含む画素の周辺領域でも入力画像の画素値を線形化画像の画素値に置き換える」) を組み合わせた, 画像の線形化のための新しい繰り返し計算アルゴリズムを提案する. そして, 提案手法により, 高速かつ高精度な画像の線形化が実現出来ることを示す.

2. 関 連 研 究

2.1 物体表面で観測される光学現象

光源方向の変化によって, 物体表面で観測される光学現象は変化する. 図 1 に示すように, 光学現象は反射光と影に分けられる.

反射光は, 2 色性反射モデル (図 2) を仮定すると, 拡散反射と鏡面反射の和で表わされる.

拡散反射成分は, 視線方向に依存せず, あらゆる方向から均一の強度で観測される.

鏡面反射成分は, 正反射方向付近で強く観測される. このとき, 正反射方向で観測される部分 (図 2 で赤色表示した部分) を specular spike といい, その周辺領域で観測される部分 (図 2 で紫色表示した部分) を specular lobe または, 鏡面反射にじみと言う.

影は, 物体表面の法線が光源方向を向いていないために生じる attached shadow と, 他の物体により光が遮られることで生じる cast shadow の二つに分けられる. 環境光・相互反射の影響を受けないと仮定すれば, 両者とも輝度は 0 となる.

2.2 Lambert 反射モデル

Lambert モデルによれば, 拡散反射成分の輝度 i は式 (1) で表される.

$$i = \mathbf{n} \cdot \mathbf{s} \tag{1}$$

ただし,n は物体表面の法線方向単位ベクトルと拡散反射率 (albedo) の積を表す面特性ベクトル, s は光源方向単位ベクトルと光源照度の積を表す光源特性ベクトルを表す. このとき,n と s のなす角が 90 度を超えた時は attached shadow 領域であり, 式 (1) は負の値となるが, 前述のように実画像上では 0 の値となる. また,cast shadow のときは式 (1) は正の値となるが, やはり実画像上では 0 の値となる.

2.3 画像の線形化

Shashua [4] によれば, 平行光源, 完全拡散反射面を仮定することで, 光源方向の異なる 3 枚の基底画像の線形結合により任意光源方向の画像を表現できる. 3 枚の基底画像をベクトルで表現したものを $\hat{I}_1, \hat{I}_2, \hat{I}_3$ (互いに独立である必要がある) とするとき, 任意光源方向の画像 I_k は, 式 2 のように線形結合で表現できる.

$$I_k = c_k^1 \hat{I}_1 + c_k^2 \hat{I}_2 + c_k^3 \hat{I}_3 \tag{2}$$

ここで,$C_k = [c_k^1\ c_k^2\ c_k^3]^T$ を画像 I_k に対する線形結合の係数組とする. しかし, 実画像は影や鏡面反射を含むため, 式 (2) を満たさない. そこで, 式 (2) を満たすように, 拡散反射のみの画像に変換する. この変換処理を画像の線形化と呼ぶ. 式 (2) は, ある 1 枚の画像の輝度を表しているので, m 枚の画像群の輝度は, 式 (3) で表される.

$$\begin{pmatrix} I_1 & I_2 & \cdots & I_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{I}_1 & \hat{I}_2 & \hat{I}_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & \alpha_m \\ \beta_1 & \beta_2 & \cdots & \beta_m \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \cdots & \gamma_m \end{pmatrix} \tag{3}$$

2.4 光学現象の分類

光学現象の分類とは, 入力画像とそれを線形化した画像を比較することで, 各画素を拡散反射, 鏡面反射,attached shadow,cast shadow の 4 種類に分類することを意味する. この分類は,4 種類の光学現象が次のような性質を持つことに基づく.

拡散反射領域　拡散反射領域の画素値は, 線形化後も変化しない. すなわち, 線形化後の画素値を $i^L_{(k,p)}$ で表すと式 (4) の関係が成り立つ.

$$i^L_{(k,p)} = i_{(k,p)} \tag{4}$$

というのも, 画像の線形化は, 鏡面反射や影を含む画像を拡散反射のみを含む画像に変換する手法だからである.

鏡面反射領域　鏡面反射領域の画素値は, 線形化後, 小さくなる. というのも, 線形化することによって, 鏡面反射成分が除去されるからである.

画像に生じるノイズは, 加法ノイズと乗法ノイズに大別される. 加法ノイズとは, どの画素にも一定量加算されるものである. これは, 画素値が小さいときに影響が顕著である. それに対して, 乗法ノイズとは, 画素値に乗算で乗るものである. こちらは, 画素値が大きいほど影響が顕著である. これら加法ノイズと乗法ノイズに対応するため, 次に示す 2 つの式 (5),(6) を組み合わせることにより, ノイズを含んでいるかどうかを区別する.

$$i^L_{(k,p)} < (1 - T_1) i_{(k,p)} \tag{5}$$

$$i^L_{(k,p)} < i_{(k,p)} - T_2 \quad (6)$$

ここで,T_1,T_2 は本来の拡散反射成分からどれだけ離れているかを示す閾値である.

影 (attached shadow・cast shadow) 領域　カメラの暗電流特性, 感度特性, 環境光などの影響により, 実画像の影領域の画素値は 0 にならない. そこで, 閾値 T_s より暗い画素を影領域と判断する. すなわち, 式 (7) を閾値として用いる.

$$i_{(k,p)} < T_s \quad (7)$$

2.1 節でも述べたように, attached shadow 領域では, 線形化後の画素値が負の値となり, cast shadow 領域では, 線形化後の画素値が正の値となる.

撮影環境によって最適な閾値 T_s の値は異なるが, 入力画像における影の画素値は大きく変化せず, 明らかなピークが存在するという性質があることが実験的に確かめられている ([2]) ことから, 本研究でも入力画像中の影領域から画素値を手動で数点サンプリングすることで, 影の閾値 T_s を設定する.

光学現象の分類基準の 2 次元平面表現　光学現象の分類基準を,$i_{(k,p)}$ と $i^L_{(k,p)}$ で張られる 2 次元平面として考えると図 3 のような関係になる. この分類基準では, 入力画像だけでは区別のつかない attached shadow と cast shadow が, 線形化された画像を用いることで容易に区別できる. また, 鏡面反射領域については, 単に線形化画像と入力画像の差の絶対値が大きい領域を用いるのではなく, 線形化画像に対し入力画像の輝度が高くなっている画素のみを鏡面反射であると判定する.

未定義領域について　これらの領域以外の, 図 3 では undefined とされている部分は, 対応する光学現象が存在しない領域である. このような領域に分類された点は, 線形化段階における誤差に起因するものであると考えられる. 例えば, ある鏡面反射領域が正しく除外されていないとき, 線形化画像において, 周囲の拡散反射領域の画素値が上昇することがある. そのため, 未定義領域に分類された画素においては, 線形化画像にノイズが含まれていると考えることができる.

以上で述べたように, 光学現象の分類基準による解析は, 入力画像とそれを線形化した画像の画素値を比較するだけで行われるため, 3 次元形状, 反射特性, 光源方向などを復元する必要がないという大きな利点がある.

2.5　specular lobe 領域の分類

2.1 節で述べたように, specular lobe は裾野に向かうに従い, 拡散反射成分のみによる画素値に近づく. このため, specular lobe の領域を閾値処理のみで正確に除去することは困難である. 例えば閾値を小さくし過ぎると, 画像ノイズや演算時の誤差のために, 拡散反射のみによる部分が誤って外れ値と判定されてしまう. また逆に, 拡散反射を除去するための閾値が大きいと, splecular lobe の部分が除去されず, 線形化画像中にノイズとして現れる. そこで, specular lobe は specular peak の周囲を取り囲むように現れる事を利用して分類を行う. すなわち, 光学現象の分類により specular 領域であると判断された領域に対し, 領域拡張の処理を施し, 周囲に領域を広げることで specular lobe 領域を分類する.

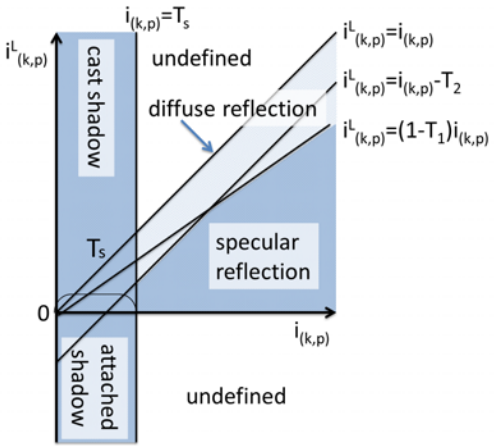


図 3　光学現象の分類基準

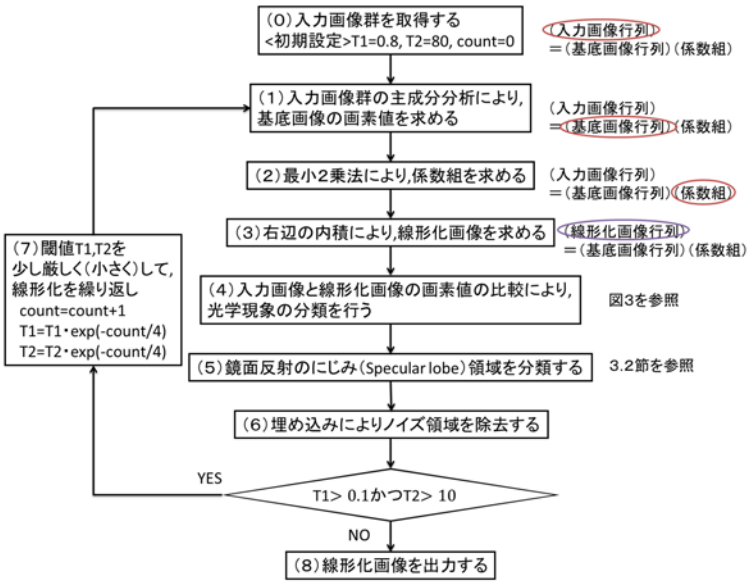


図 4　提案手法のフローチャート

3.　提 案 手 法

3.1　線形化の流れ

画像の線形化では, カメラと対象物体を固定し, 光源方向を変えて撮影した複数枚画像を入力とする. ここで, 対象とするシーンの光源方向,3 次元形状, 反射率は未知である. すなわち, 初期状態における既知情報は, 入力画像群の画素値のみである. このとき, 次の手順で画像を線形化する. 図 4 に提案手法のフローチャートを示す.

(0). 入力画像群を取得する

カメラと対象物体を固定し, 光源方向を変えて撮影した複数枚画像を入力画像群として取得する.

(1). 基底画像の画素値を求める

基底画像群行列 (式 (3) の右辺の左側の行列) を求めるため, 入力画像群行列 A(式 (3) の左辺) の共分散行列 (A^TA) に主成分分析を行い, 第一, 第二, 第三主成分を 3 枚の基底画像とする.

(2). 係数組を求める

最小二乗法により, 係数組 (式 (3) の右辺の右側の行列) を求める.

(3). 線形化画像を求める

基底画像群行列と係数組の内積を計算することにより, 入力画像群を線形化する.

(4). 光学現象を分類する

入力画像の画素値とそれを線形化した画像の画素値を比較して, 各画素において生じている光学現象を分類する.

(5). 鏡面反射のにじみ領域を分類する

鏡面反射のにじみ (specular lobe) を考慮するため, 入力画像において鏡面反射領域であると分類された画素の 8 近傍が鏡面反射領域に分類されている場合は, その画素を中心に 5 ピクセル四方を鏡面反射のにじみ (specular lobe) 領域に分類する.

(6). 埋め込みによりノイズ領域を除去する

鏡面反射・attached shadow・cast shadow・鏡面反射のにじみ (specular lobe) に分類された入力画像の画素に, 線形化画像の画素値を埋め込む.

(7). 閾値を少し厳しくして, 処理を繰り返す

画素値を埋め込むことによって更新された入力画像群行列をもとに, (1). から (6). の過程を繰り返す.

その際, 光学現象の分類に用いる閾値 T_1,T_2 を次第に小さくしていく. というのも, 初期状態では, 入力画像が鏡面反射や影を含んでいるため, 最小二乗法を用いて算出した線形化画像は拡散反射成分のみにはならず, 影や鏡面反射の影響を強く受ける. そこで, 繰り返し回数が少ないうちは, 入力画像と線形化画像の画素値の違いに鈍感に反応させるため, 閾値の設定を緩めておく. また, 繰り返し回数が進むにつれて, 線形化画像が次第に拡散反射成分のみで表されるようになる. そこで, 画素値の違いに敏感に反応するように, 次第に閾値の設定を厳しくしていく. 具体的には,8bit 画像の場合, 閾値 T_1,T_2 を次のように減少させた.

$$T_1 = 0.8 * e^{-i/4} \quad (i = 0, 1, \cdots, 8)$$

$$T_2 = 80 * e^{-i/4} \quad (i = 0, 1, \cdots, 8)$$

よって, 繰り返し回数は 9 回である.

(8). 線形化画像を出力する

図 4 に示すように, 閾値 T_1,T_2 が繰り返しの条件分岐を抜けた場合は、線形化画像を出力し, 処理を終了する.

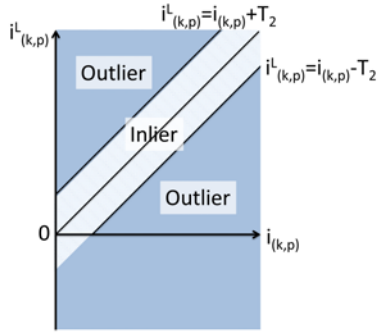


図 5　単純な統計的手法による画像の線形化

3. 2　単純な統計的手法による画像の線形化

提案手法との比較として, 光学現象を考慮しない単純な統計的手法のみを用いて画像の線形化を行う場合を考える. この場合, 図 5 に示すように, 入力画像と線形化画像の画素値の差がある一定の値よりも大きくなった場合に外れ値として埋め込みを行う. すると, 図 3 では未定義領域であると分類されていた画素においても埋め込みが行われることになり, 線形化画像が不自然な画像に陥ってしまうことを防げなくなってしまう.

4.　実　　験

実験では, 主成分分析などの基礎的な数学手法に, 物体表面で生じる反射現象に関する知識 (光学現象の分類) をうまく組み合わせることで, 鏡面反射や影を含む入力画像を, 拡散反射のみを含む線形化画像に短時間で精度よく変換できるようになることを確認する.

提案手法では, 光学現象の分類や鏡面反射にじみの分類を用いて埋め込み画素の判定を行っているが, 比較として, 3. 2 節で考えた, 単純な統計的手法による画像の線形化を行った時の結果を従来手法と呼ぶことにする.

4. 1　シミュレーション実験

結果を数値的に評価できることから, まずシミュレーション画像に対して線形化を行う. 図 6 に示すように, 環境光・相互反射の影響を受けない球と床を対象物体とし, 光源を高さ方向に 3 段階, 水平方向に 7 段階動かして生成した合計 21 枚の画像を入力とした. 床面の一部では, 球によって光が遮られてしまうため, 影が生じている. 画像のサイズは 512 × 384 であり, 図 8(j) に示すように, 計算時間は約 25 秒であった.

入力画像の主成分分析により生成した 3 枚の基底画像 (負の値を持つ画素を赤色で表示している) を図 7 に, 入力画像の 1 枚を提案手法・従来手法により線形化した結果を図 8 に示す. 基底画像では, 提案手法による結果 (図 7 左側) の方が従来手法による結果 (図 7 右側) と比べて滑らかである. そのため, 線形化画像においても, 提案手法による結果 (図 8(a)) の方が従来手法による結果 (図 8(b)) と比べて滑らかになっていることが分かる. 実際,

真値と線形化画像の誤差 (図 8(e),(f),(i),(j)) を見ても, 提案手法の方が誤差が小さく, 物体表面が滑らかに線形化されていることが分かる.

また, 図 8(g) の分類結果 (提案手法) においては, 鏡面反射に分類された領域を赤色, 鏡面反射のにじみを考慮した領域を黄色, attached shadow に分類された領域を緑色, cast shadow に分類された領域を青色で表している. 一方, 図 8(h) の分類結果 (従来手法) においては, 単純な統計的手法により, 外れ値であると見なされた領域を赤色で表している. 分類結果から, 提案手法では, 鏡面反射と影の領域を認識し, 鏡面反射のにじみを考慮することもできていることが分かる.

次に, 図 9 のように, 形状が複雑な StanfordBunny を対象に線形化を行った. 環境光・相互反射の影響を受けない条件下において, 光源を高さ方向に 5 段階, 水平方向に 5 段階動かして生成した合計 25 枚の画像を入力とした. 画像のサイズは 512 × 384 であり, 図 10(j) に示すように, 計算時間は約 30 秒であった.

線形化画像を見比べると, 提案手法による結果 (図 10(a)) の方が従来手法による結果 (図 10(b)) と比べて滑らかであり, 鏡面反射や影がうまく分離できていることが分かる. 実際, 真値と線形化画像の誤差 (図 10(e),(f),(i),(j)) を見ても, 提案手法の方が誤差が小さくなっていることが分かる.

このように, 物体の形状が複雑になった場合でも, 提案手法を用いると, 不自然な画像に陥ることなく, 安定な画像の線形化を実現できることが分かる.

4.2 実画像実験

実環境で撮影する際にも, 外部からの環境光や壁や天井で生じる相互反射の影響を取り除くために, 暗室で撮影を行った. 入力画像は 24 枚, サイズは 752 × 500 であり, 計算時間は 31 秒であった.

図 12(a) に示す入力画像では, 拡散反射だけではなく, 鏡面反射や影を含んでいるが, 線形化画像 (図 12(b),(c)) においては, 鏡面反射が除去できていることが確認できる.

また, 提案手法による線形化の結果 (図 12(b)) の方が, 従来手法による線形化の結果 (図 12(c)) と比較して, コップの取っ手の部分で影が効果的に除去できていることが確認できる.

5. ま と め

本論文では, 単純な統計的手法と, 光学現象の分類を考慮した考え方を組み合わせた, 画像の線形化のための新しい繰り返し計算アルゴリズムを提案した. これは, 単純な統計的手法と, 光学現象に関する知識を組み合わせることによって, 解の近似精度が向上することを利用したものである.

本論文で提案するアルゴリズムを用いることで, 従来の画像の線形化手法が抱えていた二つの問題点を解決することが出来る. 二つの問題点とは, 3 枚の基底画像の組み合わせ (入力画像群から選択する) によって, 線形化画像の精度が大きく左右されてしまうという問題と, 計算の過程でランダムサンプリングを用いているため, 入力画像のサイズや枚数が増加すると, 計算時間が指数関数的に増加してしまうという問題を意味する.

実験では, 提案手法を用いることで, 高速かつ高精度に画像の線形化を実現出来ることを示した. 従来手法では不自然な画像に陥ってしまう場合においても, 提案手法を用いることにより, 安定に画像を線形化できることを確認した. また, 提案手法を用いることで, 誤差を小さく抑えられることも確認した. 提案手法を用いることで, 入力画像のサイズや枚数が増加した場合でも, 並列処理や GPU による処理計算をすることなく, 30〜40 秒以内に計算が終了することを確認している.

文 献

[1] 向川康博, 宮木一, 三橋貞彦, 尺長健: "Photometric Image-Based Rendering による仮想照明画像の生成", 情報処理学会 CVIM 論文誌, Vol.41, pp.19–30 (2000)

[2] 石井育規, 福井孝太郎, 向川康博, 尺長健: "光学現象の分類基準を利用した画像の線形化", 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2002), pp.167–176 (2002)

[3] L.Wu, A.Ganesh, B.Shi, Y.Matsushita, Y.Wang, and Y.Ma: "Robust photometric stereo via low-rank matrix completion and recovery", ACCV2010,pp.703–717(2011)

[4] A.Shashua, "Geometry and photometry in 3D visual recognition", Ph.D thesis, Dept. Brain and Cognitive Science, MIT(1992)

[5] P.N.Belhumeur, and D.J.Kriegman: "What is the set of images of an object under all possible lighting conditions?", Proc.CVPR'96, pp.270–277(1996)

[6] R.Basri, and D.W.Jacobs: "Lambertian reflectance and linear subspaces", Proc. IEEE PAMI 2003, pp.218–233(2003)

[7] R.Ramamoorthi: "Analytic PCA construction for theoretical analysis of lighting variability in images of a Lambertian object", Proc. IEEE PAMI 2002, pp.1322–1333(2002)

[8] R.Ramamoorthi, and P.Hanrahan: "A signal-processing framework for inverse rendering", Proc.ACM SIGGRAPH 2001,pp.117–128(2001)

[9] 岡部孝弘, 佐藤洋一: "双方向反射分布関数の周波数特性に基づく反射成分の分離", 情報処理学会研究報告. CVIM2002, pp.1–8(2002)

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

[11] B.Lamond, pp.Peers and pp.Debevec: "Fast image-based separation of diffuse and specular reflections", ACM SIGGRAPH 2007 sketches, pp.74 (2007)

[12] 森隆浩, 日浦慎作, 佐藤宏介: "鏡面・拡散反射成分分離のための照明パターンの最適化", MIRU2010 画像の認識・理解シンポジウム論文集, pp.232–238 (2010)

[13] S.Shafer: "Using color to separate reflection components", Color Research and Applications, Vol.10, pp.210–218 (1985)

[14] G.Klinker,S.Shafer,and T.Kanade: "The measurement of highlights in color images", IJCV, Vol.2, No.1, pp.7–32 (1988)

[15] Y.Sato, K.Ikeuchi: "Temporal-color space analysis of reflection", JOSA A, Vol.11, No.7, pp.2990–3002 (1994)

[16] Y.Sato, M.Wheeler, and K.Ikeuchi: "Object Shape and Reflectance Modeling from Observation", Proc.SIGGRAPH'97, pp.379–387 (1997)

[17] S.K.Nayar, X.S.Fang, and T.Boult: "Removal of specularities using color and polarization", Proc. CVPR'93, pp.583–590(1993)

[18] 高橋徹, 佐藤洋一, 池内克史: "偏光による反射成分の分離および反射パラメータの決定", 情報処理学会研究報告 CVIM pp.17–24(2000)

[19] 梅山伸二: "確率的独立性を手がかりとした物体の見えからの拡散/鏡面反射成分の分離", PRMU2000, Vol.40 pp.41–48(2000)

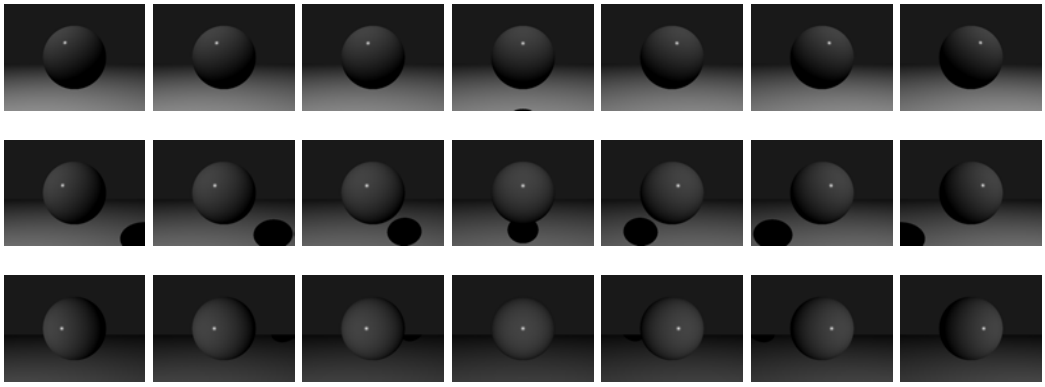
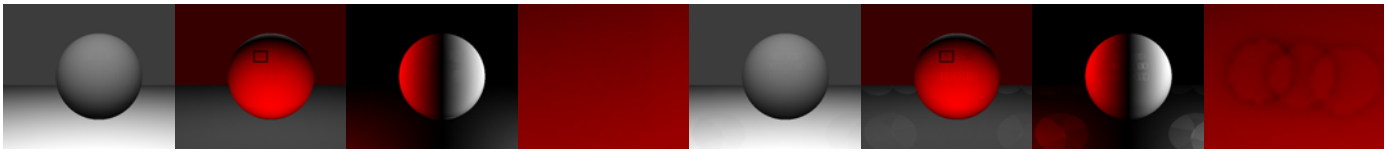


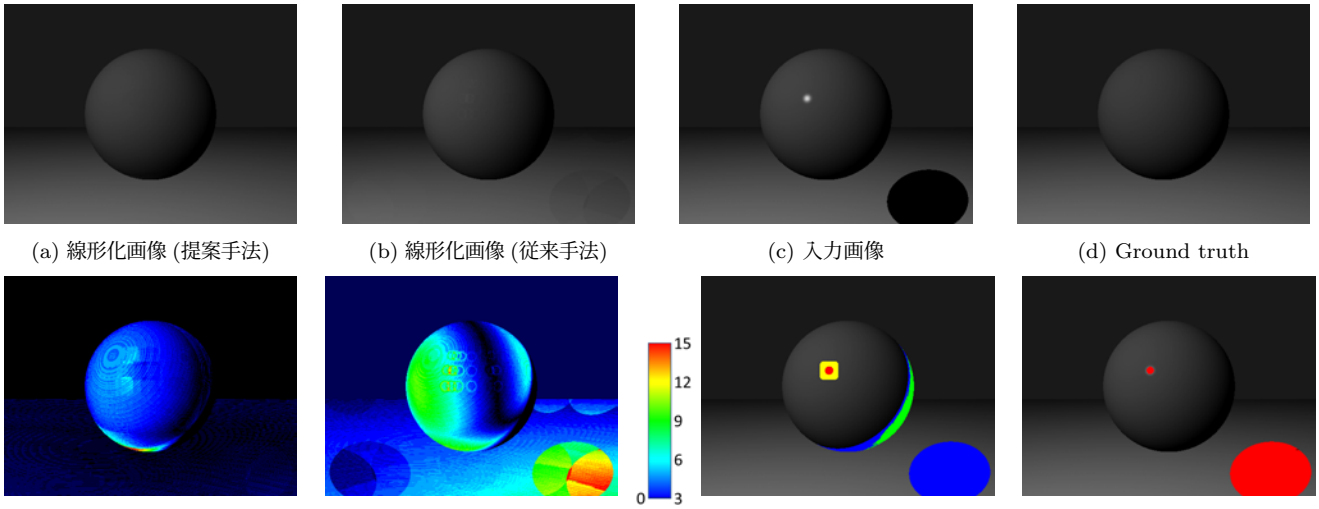
図 6　光源方向を変化させ生成した入力画像 (球と床：21 枚)



(a) 第一主成分 (提案手法)　(b) 第二主成分 (提案手法)　(c) 第三主成分 (提案手法)　(d) 拡大図 (提案手法)　(e) 第一主成分 (従来手法)　(f) 第二主成分 (従来手法)　(g) 第三主成分 (従来手法)　(h) 拡大図 (従来手法)

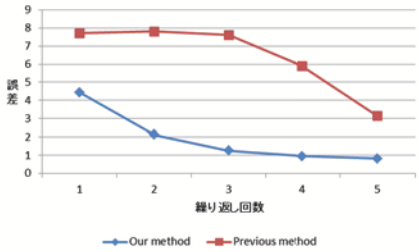
図 7　入力画像の主成分分析による基底画像 (上：提案手法, 下：従来手法)

第二主成分の拡大図 (d),(h) から, 提案手法と比較して, 従来手法では, 基底画像にムラが生じていることが分かる. 各主成分は, 互いに独立であり, 直交する関係であることも確認できる.



(a) 線形化画像 (提案手法)　(b) 線形化画像 (従来手法)　(c) 入力画像　(d) Ground truth

(e) Error map(提案手法)　(f) Error map(従来手法)　(g) 分類結果 (提案手法)　(h) 分類結果 (従来手法)



(i) 誤差平均と繰り返し回数

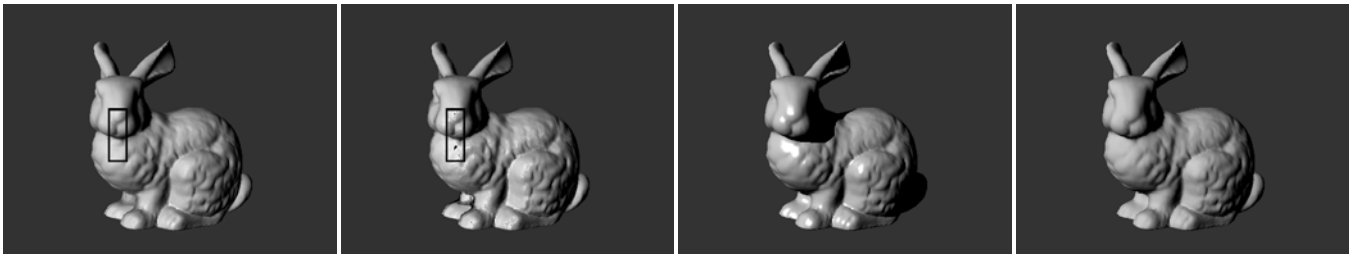
	Mean Error	Var. Error	Max. Error	Cal. Time[s]
Previous method	3.135	8.701	18	23.675
Our method	0.831	1.933	16	24.758

(j) 誤差データ

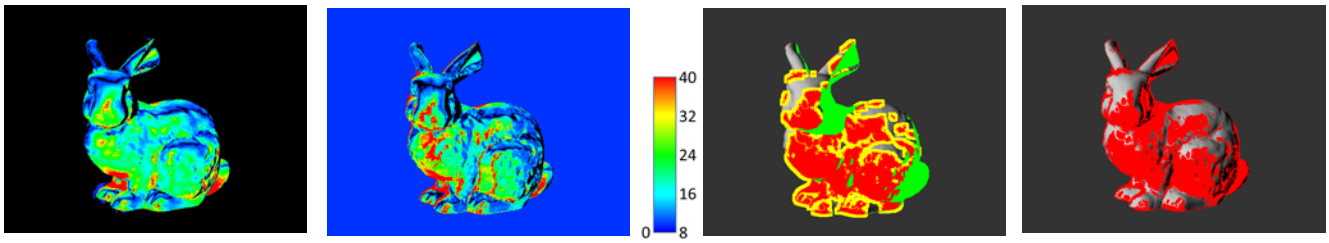
図 8　球と床に対する線形化

入力画像 (c) では, 鏡面反射や影が生じているが, 線形化画像 (a) では, 拡散反射のみを含む画像に変換されていることが分かる. また,(e),(f),(i),(j) により, 従来手法と比べて, 提案手法の方が誤差が小さく, 物体表面が滑らかに線形化されていることが分かる. (g) において, 赤色は鏡面反射領域, 黄色は鏡面反射にじみの領域, 緑色は attached shadow 領域, 青色は cast shadow 領域を表す. (h) において, 赤色は外れ値領域を表す.

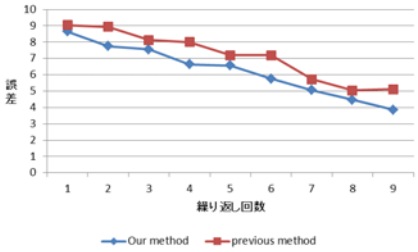
図 9　光源方向を変化させ生成した入力画像 (StanfordBunny：25 枚)



(a) 線形化画像 (提案手法)　(b) 線形化画像 (従来手法)　(c) 入力画像　(d) Ground truth



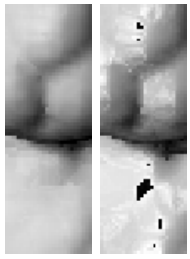
(e) Error map(提案手法)　(f) Error map(従来手法)　(g) 分類結果 (提案手法)　(h) 分類結果 (従来手法)



(i) 誤差平均と繰り返し回数

	Mean Error	Var. Error	Max. Error	Cal. Time[s]
Previous method	5.124	102.144	199	29.870
Our method	3.855	53.230	186	32.598

(j) 誤差データ

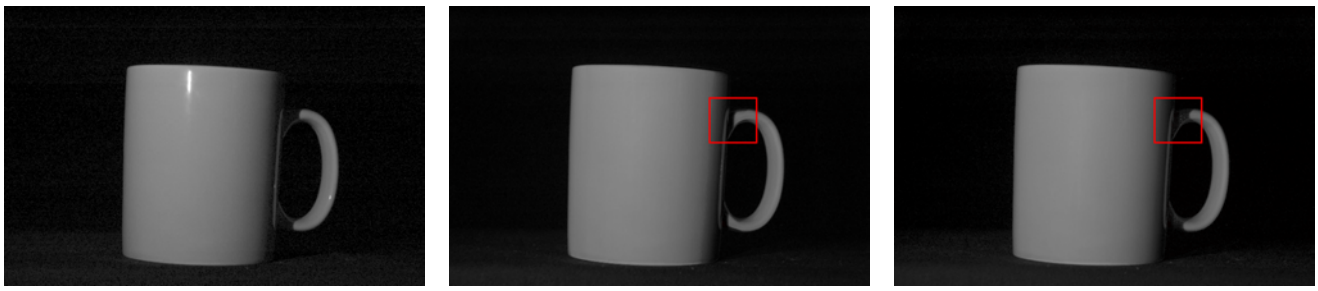


(k) 線形化画像の拡大図
(左：提案手法, 右：従来手法)

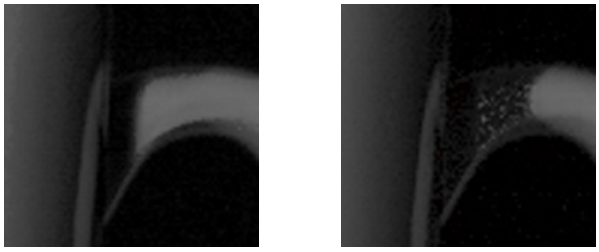
図 10　StanfordBunny に対する線形化

線形化画像の拡大図 (k) より, 提案手法では安定に線形化出来ているが, 従来手法では, 不自然な画像に陥ってしまうことが確認できる．また, 入力画像 (c) では, 鼻先や胸の部分で鏡面反射が生じ, 耳や首元や尻尾の部分で影が生じているが, 線形化画像 (a) では, 拡散反射のみを含む画像に変換されていることが分かる．(e),(f),(i),(j) により, 従来手法と比べて, 提案手法の方が誤差が小さくなっていることが分かる．(g) において, 赤色は鏡面反射領域, 黄色は鏡面反射にじみの領域, 緑色は attached shadow 領域, 青色は cast shadow 領域を表す．(h) において, 赤色は外れ値領域を表す．

図 11　光源方向を変化させ撮影した入力画像 (コップ：24 枚)



(a) 入力画像　(b) 線形化画像 (提案手法)　(c) 線形化画像 (従来手法)



(d) 拡大図 (提案手法)　(e) 拡大図 (従来手法)

図 12　実画像に対する線形化

入力画像 (a) では, 鏡面反射や影が生じているが, 線形化画像 (b) では, 効果的に分離されていることが分かる.
また, 線形化画像の拡大図 (d),(e) より, 提案手法の方が, 影を効果的に除去できていることが確認できる.