社団法人 情報処理学会 研究報告
IPSJ SIG Technical Report

2009－CVIM－166 (49)
2009／3／14

光源位置の高次写像を利用した近接光源画像の線形表現法

藤田悦康　　坂上文彦　　佐藤淳

名古屋工業大学

〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町

fujita@hilbert.elcom.nitech.ac.jp,{sakaue,junsato}@nitech.ac.jp

あらまし: 近接光源画像の輝度モデルは非線形関数で表現されることが知られている．そのため，非線形方程式を解く方法や，画像を領域分割することによって線形化する方法が提案されている．しかし，これらの方法はともに計算コストが大きくなるという問題が存在する．これに対し，非線形関数を線形表現する手法として高次写像がある．本稿では，光源位置を高次写像することによって近接光源画像を線形表現する手法を提案する．また，高次空間での制約や，カメラ行列を考慮することで，より安定に線形表現する方法を提案し，合成画像を用いてその有効性を確認した．

Linear Image Representation under Close Lighting using High Order Mapping of Light Source

Yoshiyasu Fujita　　Fumihiko Sakaue　　Jun Sato

Nagoya Institute of Technology
Gokiso-cho,Showa-ku, Nagoya 466-8555 JAPAN
fujita@hilbert.elcom.nitech.ac.jp,{sakaue,junsato}@nitech.ac.jp

Abstract: In this paper, we propose a method for representing intensity images of objects illuminated by near point light sources linearly. Our image representation model is a linear model, and thus, small computational cost is needed for the image analysis. We introduce an intensity projection matrix, and the matrix realize the linear representation of near light source images. Furthermore, we propose a method estimating of the intensity projection matrices reliably. Experimental results using synthesized images indicate that our proposed method is robust against image noises.

1　はじめに

我々がカメラなどでシーンを撮影することにより得られる画像の多くの光源は，カメラのフラッシュや蛍光灯であり，被写体に対して近い位置に存在する．このような条件で撮影された画像は近接光源画像と呼ばれ，従来の研究で多く用いられてきた無限遠光源画像 [3] と比較して，取り扱いが複雑になる．その反面，近接光源画像は形状および光源に関する情報をより多く含んでいる．そのため，近年ではこのような近接光源画像を対象とした研究が多く行われている [2, 4, 5]．

しかし，近接光源画像の輝度は非線形関数で表現されるため，その解析には非線形最適化が必要となる [2]．非線形最適化には初期値の問題と計算コストの問題が存在しており，解を安定かつ高速に求めることは難しい．

このような非線形性の問題を回避するため，Satoら [5] は近接光源画像を領域分割する方法を提案している．この方法では，分割された領域内では，無

限遠光源と同等の画像が得られると仮定することにより，各領域ごとの近似的な線形表現を実現している．しかし，最適な領域分割には物体や光源を考慮した繰り返し演算が必要となるため，計算コストが大きくなるという問題が存在する．

本稿では，このような画像分割を行うことなく，近接光源画像全体を一つの線形モデルで表現する方法を提案する．そのために，非線形関数として表現される近接光源下での輝度モデルに着目する．このような非線形関数を線形に表現する方法として，高次写像を利用する方法 [1] を用い，光源位置を高次写像することにより，近接光源画像を線形表現する方法を提案する．また，高次空間におけるノイズの影響に関する議論を行い，画像ノイズが含まれるシーンにおいても安定な線形表現を実現する方法を示す．本稿で提案する線形表現により，近接光源画像による光源推定や任意光源画像の生成などにおける計算コストの削減ができる．また，非線形問題で生じる初期値の問題を回避可能であり，安定な系の構築が期待できる．

2 近接光源画像

2.1 近接光源下での画像表現法

まず，近接光源下で撮影された画像が与えられた場合，画像の輝度がどのように表現されるかについて議論する．物体表面の反射モデルがランバートモデルだと仮定すると，近接光源下で撮影された画像の輝度 I は，光源位置 $\mathbf{S}$，物体形状 $\mathbf{X}$ および法線方向 $\mathbf{n}$ を用いて，次式で表現される．

$$I = \frac{1}{||\mathbf{S}-\mathbf{X}||^2} E\rho \frac{\max(\mathbf{n}^\top(\mathbf{S}-\mathbf{X}), 0)}{||\mathbf{S}-\mathbf{X}||} \qquad (1)$$

ここで，$1/||\mathbf{S}-\mathbf{X}||^2$ は減衰項と呼ばれ，光の強さが光源位置 $\mathbf{S}$ と形状 $\mathbf{X}$ の距離の 2 乗に反比例することを意味している．また，$(\mathbf{S}-\mathbf{X})/||\mathbf{S}-\mathbf{X}||$ は，位置 $\mathbf{X}$ によって光源方向が異なることを意味している．そのため，近接光源画像では，無限遠光源下で撮影された画像とは異なり，画像全体をひとつの線形式で表現することができない．したがって，近接光源画像の輝度は非線形関数で表現される．

このような近接光源画像を利用する場合，非線形解法を用いた解析が必要となる．Iwahori ら [2] は，輝度が最も高くなる点の法線方向に光源があると仮定し，形状に関する非線形方程式を解く方法を提案している．しかし，非線形最適化を用いる方法は，使用する画像枚数が少ないという利点がある反面，線形解法と比較して計算コストが大きくなるという問題がある．

2.2 画像の領域分割を利用した近接光源画像の線形表現法

近接光源を取り扱う方法の一つとして，近年，画像を小領域に分割することにより，近接光源画像を線形モデルで近似する方法が提案されている [5, 6]．この方法では，近接光源画像を領域分割し，それぞれの領域内であれば無限遠光源モデルにより近似可能であると仮定している．これにより，線形式のみでの近接光源画像の取り扱いを実現している．

また Okabe ら [4] は，物体と光源分布の特性に応じた近似の意味で最適な画像分割法を提案している．これらの方法を用いる場合，線形式での近接光源画像表現が実現できるものの，分割された領域の評価などに繰り返し演算が必要となり，やはり，計算コストが増大する．また，画像の局所的な情報のみに着目しているため，画像全体の大局的な変化に対応できないという問題がある．

3 近接光源画像の線形表現法

3.1 非線形関数の線形表現法

2.1 節で述べたように，近接光源画像の輝度は非線形関数で表現される．本稿では，非線形関数を線形に表現する方法として高次写像 [1] を適用し，これを用いて近接光源画像を線形に表現する方法を提案する．

提案法では，画像全体に対する線形式を導出するため，領域分割を用いることによる生じる問題は発生しない．また，この方法は線形演算のみで構成されるため，非線形解法を用いる方法と比べて少ない計算量で実現でき，また初期値の問題も発生しない．

3.2 光源位置の高次写像を用いた近接光源画像の輝度の線形表現法

ここではまず，輝度モデルの高次写像について考える．本来，近接光源画像の輝度は式 (1) を用いて表現されるが，本稿では距離減衰が一定だと仮定し，近接光源画像の輝度 I を次のように表現する．

$$I = E\rho\frac{\max(\mathbf{n}^\top(\mathbf{S}-\mathbf{X}),0)}{||\mathbf{S}-\mathbf{X}||} \tag{2}$$

ここで，高次空間で輝度モデルを考えるため，式 (2) の両辺を 2 乗する．

$$I^2 = E^2\rho^2\frac{\{\mathbf{n}^\top(\mathbf{S}-\mathbf{X})\}^2}{||\mathbf{S}-\mathbf{X}||^2} \tag{3}$$

ここで得られる式を 2 次輝度モデルと呼び，以降，この式 (3) を元に議論を進める．

式 (3) の右辺より，輝度 I^2 は光源位置 $\mathbf{S}$ の 2 次項までを用いて表現されていることが分かる．そこで，光源位置 $\mathbf{S} = [\ S_1 \quad S_2 \quad S_3\ ]^\top$ の高次写像 $\mathbf{S}^2$ を以下のように定義する．

$$\mathbf{S}^2 \equiv \left[\begin{array}{ccccc} S_1^2 & S_2^2 & S_3^2 & S_1S_2 & S_1S_3 \\ S_2S_3 & S_1 & S_2 & S_3 & \end{array}\right]^\top \tag{4}$$

高次写像された光源位置 $\mathbf{S}^2$ を用いることにより，式 (3) は以下のように表現できる．

$$I^2 = \frac{\mathbf{p}_1^\top\left[\begin{array}{c}\mathbf{S}^2\\1\end{array}\right]}{\mathbf{p}_2^\top\left[\begin{array}{c}\mathbf{S}^2\\1\end{array}\right]} \tag{5}$$

ここで，$\mathbf{p}_1$，$\mathbf{p}_2$ は 10 次元ベクトルであり，形状 $\mathbf{X} = [\ X_1 \quad X_2 \quad X_3\ ]^\top$ や法線方向 $\mathbf{n} = [\ n_1 \quad n_2 \quad n_3\ ]^\top$ を用いて以下のように表現される．

$$\mathbf{p}_1 = E^2\rho^2\left[\begin{array}{cccc} n_1^2 & n_2^2 & n_3^2 & \\ 2n_1n_2 & 2n_1n_3 & 2n_2n_3 & \\ -2n_1\mathbf{n}^\top\mathbf{X} & -2n_2\mathbf{n}^\top\mathbf{X} & & \\ -2n_3\mathbf{n}^\top\mathbf{X} & (\mathbf{n}^\top\mathbf{X})^2 & & \end{array}\right]^\top \tag{6}$$

$$\mathbf{p}_2 = \left[\begin{array}{ccccccc} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -2X_1 \\ -2X_2 & -2X_3 & ||\mathbf{X}||^2 & & & & \end{array}\right]^\top \tag{7}$$

さらに，$\mathbf{P} = [\ \mathbf{p}_1 \quad \mathbf{p}_2\ ]^\top$ とし，斉次表現を用いて式 (5) を書き換えることにより，以下の式が得られる．

$$\lambda\tilde{I^2} = \mathbf{P}\tilde{\mathbf{S}^2} \tag{8}$$

ここで，λ は 0 以外の実数である，また，$\tilde{I^2}$，$\tilde{\mathbf{S}^2}$ はそれぞれ，輝度 I^2 と光源 $\mathbf{S}^2$ の斉次表現であり，以下のように定義される．

$$\tilde{I^2} = \left[\begin{array}{c} I^2 \\ 1 \end{array}\right] \quad \tilde{\mathbf{S}^2} = \left[\begin{array}{c} \mathbf{S}^2 \\ 1 \end{array}\right] \tag{9}$$

式 (8) の行列 $\mathbf{P}$ は 2×10 の行列であり，本稿ではこの行列 $\mathbf{P}$ を輝度投影行列と呼ぶことにする．式 (6) および式 (7) より，輝度投影行列 $\mathbf{P}$ は形状 $\mathbf{X}$ および法線方向 $\mathbf{n}$ の情報を含んでおり，それらの高次写像によって構成されることが分かる．また，形状 $\mathbf{X}$ および法線方向 $\mathbf{n}$ は各画素ごとに異なるため，輝度投影行列 $\mathbf{P}$ は各画素ごとに異なる．

式 (8) より，光源位置情報を高次空間に写像することで近接光源画像の輝度を線形に表現できることが分かる．また，式 (8) は輝度 I^2 と輝度投影行列 $\mathbf{P}$ と光源情報 $\mathbf{S}^2$ の間の線形関係を表していることから，I^2，$\mathbf{P}$，$\mathbf{S}^2$ の 3 つのうちのいずれか 2 つが既知であれば残りの 1 つが線形解法により求まることが分かる．以下では，式 (8) を用いて，輝度投影行列を推定する方法や光源情報を推定する方法を示す．

3.3 輝度投影行列の推定

本節では，式 (8) の線形表現を用いることで，画像から輝度投影行列 $\mathbf{P}$ を線形に推定する方法について述べる．式 (8) から λ を消去し，$\mathbf{p}_1$，$\mathbf{p}_2$ についてまとめると，以下の式を得る．

$$\left[\begin{array}{cc} \tilde{\mathbf{S}^2}^\top & -I^2\tilde{\mathbf{S}^2}^\top \end{array}\right]\left[\begin{array}{c}\mathbf{p}_1\\\mathbf{p}_2\end{array}\right] = 0 \tag{10}$$

光源位置 $\mathbf{S}$ が既知であるとすると，1 枚の画像から輝度投影行列 $\mathbf{P}$ に関する線形拘束式が 1 本得られる．したがって，光源位置の異なる画像が N 枚得られたとすると，以下の式を得ることができる．

$$\mathbf{M}_P\left[\begin{array}{c}\mathbf{p}_1\\\mathbf{p}_2\end{array}\right] = \mathbf{0} \tag{11}$$

ここで，$\mathbf{M}_P$ は次のような $N \times 20$ の行列である．

$$\mathbf{M}_P = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{S}_1^2}^\top & -I_1^2\tilde{\mathbf{S}_1^2}^\top \\ \vdots & \\ \tilde{\mathbf{S}_N^2}^\top & -I_N^2\tilde{\mathbf{S}_N^2}^\top \end{bmatrix} \tag{12}$$

また，$\mathbf{S}_k$，I_k はそれぞれ，k 枚目の画像の光源位置と輝度である．

式 (11) より，$[\ \mathbf{p}_1^\top \quad \mathbf{p}_2^\top\ ]^\top$ は $\mathbf{M}_P$ の右零空間として求まることが分かる．そのため，高次空間で線形独立な画像が 19 枚与えられた場合，式 (11) より $\mathbf{p}_1$，$\mathbf{p}_2$ が計算可能となる．

以上により，画像から輝度投影行列 $\mathbf{P}$ を線形に推定可能であることを示した．以降，本稿では輝度投影行列 $\mathbf{P}$ の推定に使用した画像を基底画像と呼ぶことにする．

3.4 光源情報の推定

次に，任意光源画像が与えられた場合に，その入力画像の光源情報 $\mathbf{S}^2$ を式 (8) を用いて画像から線形に推定する方法を述べる．入力画像に影や鏡面反射が存在しないとすると仮定すると，式 (8) から λ を消去し，$\tilde{\mathbf{S}^2}$ についてまとめることにより，次の式が得られる．

$$\left[\mathbf{p}_1 - I^2\mathbf{p}_2\right]^\top \tilde{\mathbf{S}^2} = 0 \tag{13}$$

輝度投影行列 $\mathbf{P}$ が既知であるとすると，1 画素につき，$\tilde{\mathbf{S}^2}$ に関する線形拘束式が 1 本得られる．光源情報は入力画像全体で等しいため，全画素で式 (13) を計算することにより，次の式を得ることができる．

$$\mathbf{M}_S\tilde{\mathbf{S}^2} = \mathbf{0} \tag{14}$$

ここで，画素数を Ω とすると，$\mathbf{M}_S$ は次に示すような $\Omega \times 10$ の行列である．

$$\mathbf{M}_S = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{11}^\top - I_1^2\mathbf{p}_{12}^\top \\ \vdots \\ \mathbf{p}_{\Omega 1}^\top - I_\Omega^2\mathbf{p}_{\Omega 2}^\top \end{bmatrix} \tag{15}$$

ここで，$\mathbf{p}_{p1}$，$\mathbf{p}_{p2}$ は，それぞれ画素 p での輝度投影行列の行ベクトル $\mathbf{p}_1$，$\mathbf{p}_2$ であり，I_p はその画素の輝度である．

式 (14) から，$\tilde{\mathbf{S}^2}$ は $\mathbf{M}_S$ の右零空間であることが分かる．そのため，高次空間で線形独立な画素が 9 点与えられると，$\tilde{\mathbf{S}^2}$ が計算可能である．

3.5 任意光源画像の再合成

本節では，輝度投影行列 $\mathbf{P}$ と光源情報 $\mathbf{S}^2$ から画像を再合成する方法を述べる．線形表現された近接光源画像の輝度は式 (8) で表現されている．つまり，輝度投影行列 $\mathbf{P}$ と光源情報 $\mathbf{S}^2$ が既知であれば，輝度を推定することができる．

いま，基底画像を用いて推定された輝度投影行列を $\hat{\mathbf{P}}$ とし，この $\hat{\mathbf{P}}$ を用いて推定された光源情報を $\hat{\mathbf{S}^2}$ とする．このとき，再合成された入力画像の輝度 $\hat{I^2}$ は次式によって得ることができる．

$$\lambda\tilde{\hat{I^2}} = \hat{\mathbf{P}}\tilde{\hat{\mathbf{S}^2}} \tag{16}$$

式 (16) から，再合成された輝度 $\hat{I^2}$ が線形に推定できる．以降，本稿では以上のようにして再合成された画像を再合成画像と呼ぶ．

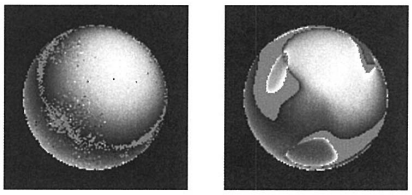
しかし，提案した方法では輝度を I^2 として表現しているため，法線方向と光源方向の内積が負となる attached shadow の表現ができないという問題が存在する．

4 安定な輝度投影行列の推定

4.1 高次写像を用いた場合の問題点

前節までで，光源位置の高次写像を用いることにより，近接光源画像を線形に表現できることを示した．ただし，これまでの議論は，画像の輝度および光源位置が正しく計測されているものとして進めてきた．しかし，実際の環境では，計測により得られる輝度や光源位置には計測誤差が生じる．そのため，計測された輝度や光源位置を用いて輝度投影行列 $\mathbf{P}$ の推定を行うと，計測誤差の影響が $\mathbf{P}$ に現れる．

図 1 は，輝度や光源位置に関してノイズが存在する場合において推定された輝度投影行列から画像の再合成を行った例である．これらの画像より，合成画像はノイズの影響を大きく受けていることが分かる．そこで，以降では輝度投影行列に制約をかけて，より安定に推定する方法について議論する．



(a) 輝度ノイズ　　(b) 光源位置ノイズ

図 1: 計測誤りを含む場合の再合成画像（緑：推定された輝度が負の領域）

4.2 輝度投影行列の構造を考慮した場合の推定

はじめに，輝度投影行列の構造を考慮することによって，より安定に輝度投影行列を推定する方法を述べる．光源位置 $\mathbf{S}$ が既知の場合，$\mathbf{p}_2$ は式 (7) で表現されるため，6 つの要素が定数となる．この場合，これらの要素については推定を行う必要がないため，輝度投影行列の自由度は 14 となる．式 (10) に式 (7) を代入して，定数項を移項すると，次式が得られる．

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{S}}^{2\top} & -I^2\tilde{\mathbf{S}}^{\top} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 \\ p_{2\{7\}} \\ p_{2\{8\}} \\ p_{2\{9\}} \\ p_{2\{10\}} \end{bmatrix} = I^2||\mathbf{S}||^2 \quad (17)$$

ここで，$\tilde{\mathbf{S}}$ は光源 $\mathbf{S}$ の斉次表現であり，$p_{2\{i\}}$ は $\mathbf{p}_2$ の i 番目の要素を表している．

いま，N 枚の光源位置の異なる画像が得られた場合，輝度投影行列 $\mathbf{P}$ について以下の関係が成り立つ．

$$\mathbf{M}_{14} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 \\ p_{2\{7\}} \\ p_{2\{8\}} \\ p_{2\{9\}} \\ p_{2\{10\}} \end{bmatrix} = \mathbf{V}_I \quad (18)$$

ここで，$\mathbf{M}_{14}$ は $N \times 14$ の行列であり，次のような形で表現される．

$$\mathbf{M}_{14} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{S}}_1^{2\top} & -I_1\tilde{\mathbf{S}}_1^{\top} \\ \vdots & \\ \tilde{\mathbf{S}}_N^{2\top} & -I_N\tilde{\mathbf{S}}_N^{\top} \end{bmatrix} \quad (19)$$

また，$\mathbf{V}_I$ は N 次元ベクトルであり，次式で表現される．

$$\mathbf{V}_I = \begin{bmatrix} I_1^2||\mathbf{S}_1||^2 \\ \vdots \\ I_N^2||\mathbf{S}_N||^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

これより，$N = 14$ の場合，輝度投影行列 $\mathbf{P}$ は $\mathbf{M}_{14}$ の逆行列 $\mathbf{M}_{14}^{-1}$ を式 (18) の左からかけることにより，推定できる．また，$N > 14$ の場合，最小 2 乗法を用いて輝度投影行列 $\mathbf{P}$ を次式により推定できる．

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 \\ p_{2\{7\}} \\ p_{2\{8\}} \\ p_{2\{9\}} \\ p_{2\{10\}} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{14}^{+}\mathbf{V}_I \quad (21)$$

ここで，$\mathbf{M}_{14}^{+}$ は行列 $\mathbf{M}_{14}$ の擬似逆行列であり，$\mathbf{M}_{14}^{+} = (\mathbf{M}_{14}^{\top}\mathbf{M}_{14})^{-1}\mathbf{M}_{14}^{\top}$ である．

以上により，輝度投影行列の構造を考慮することで，最小 14 枚の画像を用いて輝度投影行列 $\mathbf{P}$ を線形に推定できることが分かる．このような場合，輝度投影行列を強く制約して $\mathbf{P}$ を推定しているため，より安定な推定が行える．

4.3 カメラが既校正の場合の推定

次に，カメラが既校正の場合に，輝度投影行列 $\mathbf{P}$ を推定する方法について述べる．いま，カメラ座標系とワールド座標系が一致しているとする．カメラ行列 $\mathbf{P}_c$ が既知の場合，形状 $\mathbf{X}$ は画像点 $\tilde{\mathbf{m}}$ を用いて次のように表現できる．

$$\tilde{\mathbf{X}} = d\mathbf{P}_c^{-}\tilde{\mathbf{m}} \quad (22)$$

ここで，$\tilde{\mathbf{X}}$ は形状 $\mathbf{X}$ の斉次表現であり，d は 0 以外の定数である．また，$\mathbf{P}_c^{-}$ はカメラ行列 $\mathbf{P}_c$ の擬似逆行列であり，$\mathbf{P}_c^{-} = \mathbf{P}_c^{\top}(\mathbf{P}_c\mathbf{P}_c^{\top})^{-1}$ である．

一方，輝度投影行列を用いた場合，形状 $\mathbf{X}$ は式 (7) から次のようにスケールの不定性 λ を持って推定することができる．

$$\lambda\tilde{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} p_{2\{7\}} \\ p_{2\{8\}} \\ p_{2\{9\}} \\ -2p_{2\{1\}} \end{bmatrix} \quad (23)$$

光源位置 $\mathbf{S}$ が既知の場合，式 (7) から $p_{2\{1\}}$ は定数となるため，式 (22) と式 (23) から，輝度投影行列の要素 $p_{2\{7\}}$，$p_{2\{8\}}$，$p_{2\{9\}}$ は次のように表現できることが分かる．

$$\begin{bmatrix} p_{2\{7\}} \\ p_{2\{8\}} \\ p_{2\{9\}} \\ 1 \end{bmatrix} = \mu \mathbf{P}_c^- \tilde{\mathbf{m}} \tag{24}$$

ここで，μ はカメラからの距離を表す変数であり，式 (24) の右辺の唯一の未知数である．式 (24) より，カメラが既校正の場合，$p_{2\{7\}}$，$p_{2\{8\}}$，$p_{2\{9\}}$ という 3 つの未知数を μ という 1 つの未知数で置き換えることができる．これにより，輝度投影行列の推定パラメータを削減することが可能であり，より安定な輝度投影行列 $\mathbf{P}$ の推定が可能となる．また，この方法は **4.2** 節で示した方法と容易に併用することができる．以降では合成画像を用いた実験により，提案法の有効性を示す．

5 輝度投影行列の安定性評価

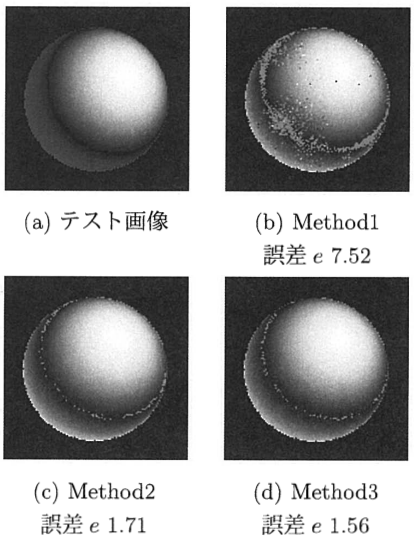
5.1 実験環境

本稿で提案した方法の有効性を確認するため，コンピュータ上で合成した画像を用いてシミュレーション実験を行った．まず，以降で示す実験の環境について述べる．この実験では，ノイズを印加した基底画像を用いて輝度投影行列 $\mathbf{P}$ の評価を行った．基底画像およびテスト画像の輝度は次式で計算した．この式では，attached shadow 領域の負の輝度も表現できるものとしている．

$$I = E\rho \frac{\mathbf{n}^\top (\mathbf{S} - \mathbf{X})}{||\mathbf{S} - \mathbf{X}||} \tag{25}$$

対象物体は半径 50cm の半球とし，基底画像およびテスト画像の光源位置は，半球の中心から 120 cm ～ 140 cm の距離に配置した．このとき光源は，緯度 15° ～ 90°，経度 −180° ～ 180° の領域でランダムに配置した．また，画像サイズは 128 × 128 とした．

このような環境下で，輝度投影行列に制約をかけずに推定する方法（Method1），**4.2** 節で示した輝度投影行列の構造を考慮して推定する方法（Method2），**4.2** 節と **4.3** 節で示した輝度投影行列の構造とカメラ行列を両方考慮して推定する方法（Method3）を用いて輝度投影行列の推定を行い，それぞれの方法を評価，比較した．



(a) テスト画像　(b) Method1 誤差 e 7.52

(c) Method2 誤差 e 1.71　(d) Method3 誤差 e 1.56

図 2: 輝度にノイズを印加した場合の再合成画像

5.2 画像ノイズに対する安定性の評価

まず，画像ノイズが印加された場合の輝度投影行列 $\mathbf{P}$ の推定について評価を行った．この実験では，合成された 100 枚の基底画像に対して正規分布ノイズを印加し，輝度投影行列の推定を行った．

各実験での推定結果の評価には，基底画像とは異なる条件下で合成したテスト画像について $\tilde{\mathbf{S}}^2$ の推定を行い，再合成された画像 $\hat{I}^2$ とテスト画像の誤差 e を次式により計算し，これを用いた．

$$e = \frac{1}{\Omega} \sum_p^{\Omega} \left| |I_p| - \sqrt{\max(\hat{I}_p^2, 0)} \right| \tag{26}$$

ここで，I_p，$\hat{I}_p^2$ は p 番目の画素の輝度値を表し，Ω はテスト画像の全画素数を表している．

印加するノイズは輝度の観測精度が 6bit となるように標準偏差を調整した．テスト画像には図 2(a) を用いた．図 2(b)，(c)，(d) に Method1～Method3 を用いて画像を再合成した結果とそれぞれの方法で計算された誤差 e を示す．ここで，赤い領域は輝度が負になる領域であり，緑の領域は推定した輝度 $\hat{I}^2$ が負になる領域である．

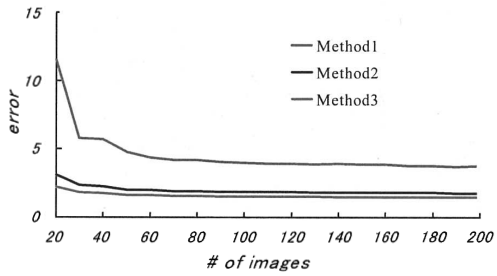
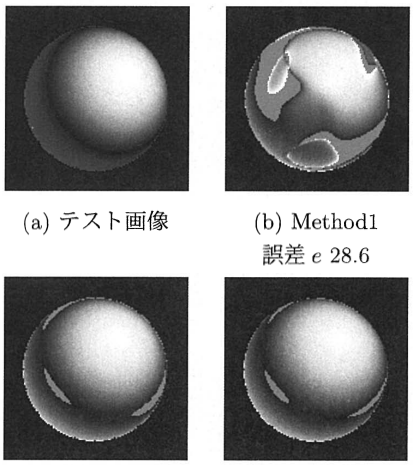


図 3: 基底画像の観測輝度が 6bit 精度となるようノイズを印加した場合の基底画像枚数と誤差の関係

図 2(a) を見ると，適切に推定を行えなかった画素が粒子状に存在している．これは，今回印加したノイズが画素ごとに独立しているからだと考えられる．また，画像全体および誤差 e から，輝度投影行列に制約をかけるほど再合成画像がテスト画像に近づくことが分かる．

次に，輝度投影行列 $\mathbf{P}$ の推定に用いる基底画像の使用画像枚数と推定精度の関係について評価を行った．すべての基底画像の観測輝度が 6bit 程度となるよう，画像に正規分布ノイズを印加した．基底画像の枚数を 20 枚から 200 枚まで 10 枚ずつ増やしていき，それぞれの枚数で輝度投影行列の推定を行い，再合成された画像の誤差 e を計算した．この実験を，光源位置を変えながら 100 回行い，その誤差 e の平均値を算出した．得られた結果を図 3 に示す．ここで，図 3 の横軸は輝度投影行列の推定に用いた基底画像の枚数であり，縦軸は平均した誤差 e である．また，Method1 での結果を赤，Method2 での結果を青，Method3 での結果を緑の線で示す．

図 3 より，すべての条件において輝度投影行列の推定に使用する基底画像の枚数が多いほど，良好な推定が行えていることが確認できる．これは，基底画像枚数が増えることによって，輝度投影行列に関する最小 2 乗解が真値に近づくからである．特に，Method2，Method3 では，20 枚の段階で誤差が十分に小さくなっており，少数の画像からでも安定な推定が行えることが確認できる．また，全ての画像枚数について Method3 が最良の結果を与えており，その有効性を確認できる．



(a) テスト画像　(b) Method1 誤差 e 28.6

(c) Method2 誤差 e 2.21　(d) Method3 誤差 e 1.78

図 4: 光源位置にノイズを印加した場合の再合成画像

5.3 光源位置ノイズに対するロバスト性の評価

次に，光源位置にノイズが印加された場合の評価を行った．この実験では，100 枚の基底画像のすべての光源位置に標準偏差 3.0cm の正規分布ノイズを印加した．前節と同様に，図 4(a) に示した画像から光源推定を行い，再合成された画像と誤差 e を図 4(b)，(c)，(d) に示す．

まず，図 4(b) を見ると適切な推定が行えなかった画素が画像内で連続的に存在していることが分かる．これは，今回印加したノイズが画像全体に対して同一の影響を及ぼすためであり，$\mathbf{P}$ の推定の成否が画像全体を通じて決定されたためと考えられる．また，画像全体および誤差 e から，輝度投影行列に多くの制約をかけるほど再合成画像がテスト画像に近づくことが確認できる．

次に，基底画像の光源位置に標準偏差 3.0cm の正規分布ノイズを印加し，基底画像枚数と推定精度に関する評価を行った．評価には，前節の実験と同様に，式 (26) で示されるテスト画像と再合成画像の誤差 e を用いた．基底画像の光源位置を変えながら 100 回の試行を行い，誤差 e の平均値を算出した．得られた結果を図 5 に示す．図 5 の各軸および各線は，**5.2** 節と同様のものを表している．

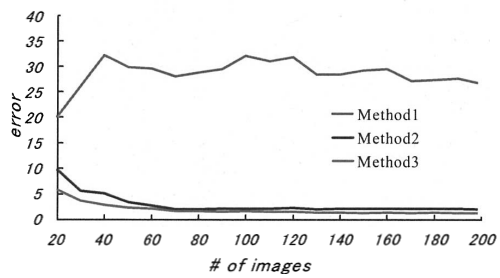


図 5: 基底画像の光源位置に標準偏差 3.0cm の正規分布ノイズを印加したときの基底画像枚数と誤差 e の関係

図 5 から，Method2，Method3 では，使用する基底画像が多いほど安定になることが確認できる．特に Method3 はこれまでの実験と同様に高い推定精度を維持しており，少ない画像からでもある程度良好な推定が行えている．一方，Method1 では，基底画像枚数を増加させても，Method2，Method3 ほどの顕著な改善が確認できなかった．これは，Method1 が輝度投影行列の $p_{2\{1\}}$〜$p_{2\{6\}}$ に対して，何ら制約を付加していないことに起因すると考えられる．式 (3) において，これらの要素は分母の 2 次項の係数となっているため非線形性が強く，光源ノイズの影響を増幅しやすい．さらに，これらの推定に誤りが発生すると，ノイズの影響を大きく増幅してしまう．これにより，Method1 は光源ノイズに対して非常に脆弱な方法となってしまっている．そのため，光源位置が適切に推定できない環境では Method1 を用いて処理を行うことは難しいと考えられる．

以上，これらの結果より，Method2，Method3 については輝度ノイズ，光源ノイズどちらに対してもある程度頑健な推定が行えることが確認できた．一方，Method1 については光源ノイズの影響を受けやすいことが分かった．したがって，輝度投影行列の推定に制約を用いれば安定に近接光源画像を線形表現可能であることが確認できた．

6 まとめ

本稿では，光源位置の高次写像を利用することにより，近接光源画像の輝度を線形表現する方法を提案した．これにより，形状および法線方向の高次写像である輝度投影行列を導出した．提案した表現法を用いることにより，輝度投影行列，光源情報，輝度はすべて線形に推定可能であることを示した．また，輝度投影行列の構造，およびカメラ行列を考慮することにより，より安定に輝度投影行列を推定する方法を提案し，実験によりその有効性を確認した．提案法では，光源位置の 2 次写像を用いて議論を進めてきた．しかし，光源位置のさらに高次の項までを考慮すれば，減衰項の表現も可能であると考えられる．また，画像全体の線形表現を実現しているため，従来の無限遠光源画像を対象に提案されている方法を容易に近接光源画像を対象とした場合に拡張可能と考えられる．さらに，提案した方法は，9 次元空間の点を 2 次元空間に投影するモデルだと考えることができるため，既存のカメラ幾何の方法を利用することが可能であり，光源位置が未知である場合への適用も可能になると考えられる．

参考文献

[1] 麻生英樹, 津田宏治, 村田昇: パターン認識と学習の統計学, 岩波書店 (2004).

[2] Iwahori, Y., Sugie, H. and Ishi, N.: Reconstructing shape from shading images under point light source illumination, *Proc. ICPR*, Vol. 1, pp. 83–87 (1990).

[3] Mukaigawa, Y., Ishii, Y. and Shakunaga, T.: Classification of Photometric Factors Based on Photometric Linearization, *Proc. ACCV*, pp. 613–622 (2006).

[4] Okabe, T. and Sato, Y.: Effects of image segmentation for approximating object appearance under near lighting, *Proc. ACCV*, Vol. I, pp. 569–580 (2006).

[5] Sato, S., Takata, K. and Nobori, K.: Photometric Linearization under Near Point Light Sources, *IEICE Trans. Information and Systems*, Vol. E89-D, No. 7, pp. 2004–2011 (2006).

[6] Zhao, L. and Yang, Y.-H.: Theoretical analysis of illumination in PCA-based vision system, *Pattern recognition*, Vol. 32, No. 4, pp. 547–564 (1999).