Vol.2010-CVIM-171 No.16
2010/3/18

PhotometryとGeometryにおける複合多視点幾何

加藤 一樹[†1] 坂上 文彦[†1] 佐藤 淳[†1]

本稿では，カメラから得られる幾何情報と輝度情報を組み合わせた新たな多視点幾何理論を提案する．従来の多視点幾何は，空間中の点をカメラに投影して得られる2次元点の座標情報（幾何情報）のみを用いて構成されていた．これに対して本稿では多視点幾何に輝度情報を加えることにより，幾何情報のみからでは得られなかった新たな多視点幾何拘束が得られることを示す．このため，本稿では近接光源画像を高次元空間において線形表現する線形輝度表現法を示す．この方法では各画素の輝度を8次元から1次元への投影として表現可能であり，これにより多視点幾何の枠組みを用いて，幾何情報と輝度情報の間に成り立つ多重線形拘束を導出することが可能となる．このような幾何と輝度の間に成り立つ多重線形関係を用いることにより，幾何と輝度の間での情報変換が可能となることを示す．また，実験により提案した新たな多視点幾何の有効性を示す．

Mixed Multiple View Geometry for Lights and Cameras from Photometric and Geometric Constraints

Kazuki Kato,[†1] Fumihiko Sakaue[†1] and Jun Sato[†1]

We propose a new multilinear relationship for cameras and close light sources. In this multilinear relationship, image point coordinates and image intensities can be handled in a single framework. Firstly, We derive a linear representation of image intensity taken under a general close light source. Secondly, We analyze multiple view geometry between cameras and close light sources, and derive new multilinear constraints among image point coordinates and image intensity. In particular, we study the detail of the multilinear relationship between a camera and 7 lights. Finally, we show some experimental results, and show that the new multilinear relationship can be used for linearly generating images illuminated by arbitrary close light sources.

1. はじめに

近年，物体の3次元復元に関する研究が盛んに行われている．その中で複数のカメラ間の関係を表す多視点幾何[2]や異なる次元のセンサの入力に対応した多視点幾何[3),4)]を用いた復元法が提案された．このような従来の多視点幾何では，センサに入力された画像点の座標（幾何情報）のみを用いて構成されていた．しかし，カメラにより得られる情報としては座標情報だけではなく，輝度情報も存在する．そこで本研究では，輝度情報と幾何情報を融合した新たな多視点幾何を導出する．

輝度情報に関しては，これまでに無限遠光源を仮定した研究が数多く行われてきた．しかし，無限遠光源モデルは単純ではあるが故に含まれている情報が少なく，3次元構造を輝度より推定する上では必ずしも良いモデルではない．これに対して近年，光源が物体に対して近い位置に存在する近接光源の輝度モデルに基づく形状復元に関する研究が進められつつある[5),6)]．しかし，この近接光源の輝度モデルは非線形であることや点ごとに光源方向が異なるなど，無限遠光源モデルと比較すると扱いが難しい．そこで，近接光源の輝度モデルを減衰項が一定であると仮定して近似することで線形関数として扱い，形状復元を行う方法が提案された[7)]．

以上のように，座標情報のみや輝度情報のみによる復元法は研究が進展しつつあるが，これら2つの情報を組み合わせた研究はほとんどなされていない[1)]．そこで本研究では，幾何情報と輝度情報を融合した新たな多重線形拘束が存在することを示す．さらに，この多重線形拘束を用いることで，従来は不可能であった幾何情報と輝度情報の間での情報変換が可能となることを示す．本稿では，以降，幾何情報と輝度情報を融合した新たな多重線形拘束のことを複合多視点幾何と呼ぶことにする．

2. 近接光源下における輝度モデルの線形化

本研究では，これまでに多くの研究で用いられてきた無限遠光源の近似は用いず，有限の位置に存在する光源をより正しく表現する近接光源下における輝度を用いる．しかし，近接光源下における輝度モデルは非線形モデルとなる．そこで本節では，近接光源下で撮影された画像を線形表現する方法を示す．

†1 名古屋工業大学大学院 情報工学専攻
Department of Computer Science, Nagoya Institute of Technology

© 2010 Information Processing Society of Japan

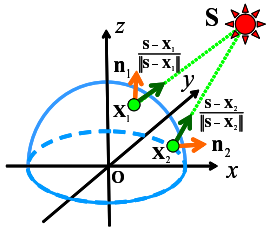


図 1 近接光源の幾何特性
Fig. 1 Geometric properties of close light sources.

2.1 近接光源画像の線形表現

今，物体表面の反射モデルが Lambertian モデルであり，負の輝度値も表現できると仮定すると，近接光源画像の輝度 i は次のように表すことができる．

$$i = \frac{1}{||\mathbf{S}-\mathbf{X}||^2} E\rho \frac{\mathbf{n}^\top(\mathbf{S}-\mathbf{X})}{||\mathbf{S}-\mathbf{X}||} \tag{1}$$

本稿では，この式 (1) を一般輝度モデルと呼ぶことにする．また，本稿では全ての輝度モデルは負の輝度値も表現できると仮定して以降説明していく．ここで，$1/||\mathbf{S}-\mathbf{X}||^2$ は減衰項と呼ばれ，光源強度 E が光源位置 $\mathbf{S}$ と物体形状 $\mathbf{X}$ の距離の 2 乗に反比例することを意味している．また，$(\mathbf{S}-\mathbf{X})/||\mathbf{S}-\mathbf{X}||$ は光源方向であり，近接光源の場合には，図 1 に示すように光源方向は 3 次元点 $\mathbf{X}$ によって異なる．そのために近接光源画像では無限遠光源画像とは異なり，画像全体を 1 つの光源方向についてまとめて表現することができない．さらに，任意光源画像も線形演算では合成できない．このように，近接光源画像は非線形関数により表現されており，無限遠光源画像に比べて扱いにくい．

そこで本研究では，光源強度 E が光源位置 $\mathbf{S}$ と物体形状 $\mathbf{X}$ の距離に反比例すると仮定し，輝度 i を次のような近似近接光源モデルで表すことにする．

$$i = \frac{1}{||\mathbf{S}-\mathbf{X}||} E\rho \frac{\mathbf{n}^\top(\mathbf{S}-\mathbf{X})}{||\mathbf{S}-\mathbf{X}||} \tag{2}$$

本稿では，式 (2) を近似輝度モデルと呼ぶことにする．ここで，式 (2) の右辺において，物体形状 $\mathbf{X}$ と法線 $\mathbf{n}$，反射率 ρ は点ごとに異なる．式 (2) の輝度モデルは式 (1) の一般輝度モデルの近似ではあるが，2.2 節で述べるように，無限遠光源を仮定した輝度モデルと比べるとはるかに良い近似を与えることが確認できている．式 (2) において物体形状 $\mathbf{X}$，法線 $\mathbf{n}$，反射率 ρ の 3 要素をまとめて高次元空間における 1 つの点とみなすと，式 (2) は次のように変形できる．

$$\kappa\widetilde{i} = \mathbf{L}\widetilde{\mathbf{Y}} \tag{3}$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & Es_x & Es_y & Es_z & -E & 0 & 0 \\ -2s_x & -2s_y & -2s_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \mathbf{S}^\top\mathbf{S} \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\widetilde{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} X & Y & Z & \rho n_x & \rho n_y & \rho n_z & \rho\mathbf{n}^\top\mathbf{X} & \mathbf{X}^\top\mathbf{X} & 1 \end{bmatrix}^\top \tag{5}$$

ここで，$\widetilde{i} = [i, 1]^\top$ は輝度 i の斉次表現であり，s_x, s_y, s_z は光源位置 $\mathbf{S}$ の 3 要素である．また，$\mathbf{Y}$ は $\mathbf{X} = [X, Y, Z]^\top$ と $\mathbf{n} = [n_x, n_y, n_z]^\top$, ρ から成る 8 次元点とみなすことができる．したがって，式 (3) は 8 次元点 $\mathbf{Y}$ を 1 次元輝度 i に投影する 1 次元射影カメラとして表せ，光源をカメラのように扱うことができることが分かる．また，8 次元点 $\mathbf{Y}$ という高次元空間における点として考えることで，近接光源画像の輝度 i を線形に表現できることが分かる．本稿では，この行列 $\mathbf{L}$ を輝度投影行列と呼ぶことにする．この輝度投影行列 $\mathbf{L}$ は光源強度 E および光源位置 $\mathbf{S}$ の情報より成り，これらは光源ごとに異なるため，$\mathbf{L}$ は光源ごとに異なるが物体形状には依存しない．

2.2 近似輝度モデルの有効性

ここではシミュレーション実験により，式 (2) で示す近似輝度モデルの有効性を示す．このために本節では，2 種類の近似モデルの近似精度を比較評価する．対象とする 2 種類の輝度の近似モデルは，1 つ目は式 (2) で示される近似輝度モデルである．また，2 つ目は光源を無限遠光源とみなした時の輝度モデルであり，輝度 i^∞ は次式で表される．

$$i^\infty = E\rho\mathbf{n}^\top\mathbf{s} \tag{6}$$

ここで $\mathbf{s}$ は物体から見た無限遠光源の方向である．以上，2 つの近似モデルで生成された輝度と式 (1) で示される一般輝度モデルで生成された輝度との間で比較を行い，近似精度を評価する．

今，図 2 に示すように光源が物体の真上の位置にあるとする．この光源位置を青の矢印方向に真上に移動させながら，各光源位置において前述した 3 つの輝度モデルでそれぞれ輝度を求めた．この時，各輝度モデルで求められた輝度値は正規化を行うことで，平均が 128 になるようにしておく．これは通常のカメラ内では，明るさの 0 レベルが自動調整されることを意味している．この正規化後，一般輝度モデルの輝度と 2 つの近似モデルの輝度との間の誤差を比較した．その結果を図 3 に示す．ここで図 3 のグラフの縦軸は画像全体におけ

© 2010 Information Processing Society of Japan

Vol.2010-CVIM-171 No.16
2010/3/18

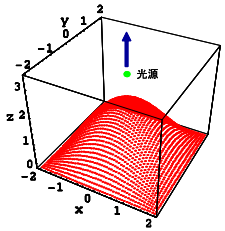


図 2 物体と光源の位置関係
Fig. 2 Positional relationship between object and light source.

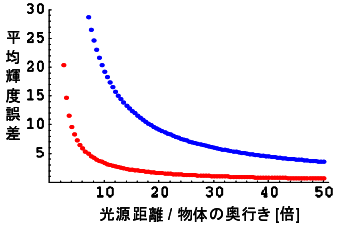


図 3 一般輝度モデルと近似モデル間の輝度誤差
Fig. 3 Systematic error of image intensity in the proposed intensity model and infinite light source model.

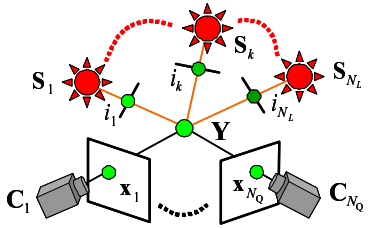


図 4 幾何と輝度に関する複合多視点幾何拘束
Fig. 4 Mixed multiple view geometry for lights and cameras.

る輝度の平均誤差，横軸は物体の奥行きに対する光源までの距離である．赤線は近似輝度モデルにおける誤差，青線は無限遠光源とみなした時の輝度モデルの誤差を表す． 図 3 のグラフより，式 (2) の近似輝度モデルの方がはるかに良い近似であり，光源距離がある程度以上の大きさになるとその近似誤差は無視できることが見て取れる．

3. 幾何情報の投影モデル

次に，幾何情報の投影について説明する．今，3 次元空間中の点 $\mathbf{X} = [X, Y, Z]^\top$ が射影カメラに投影され，この時に得られた投影点が $\mathbf{x} = [x, y]^\top$ であるとする．すると，この投影は 3×4 の投影行列 $\mathbf{P}$ を用いて次のように表すことができる．

$$\gamma\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{P}\tilde{\mathbf{X}} \tag{7}$$

この時，γ はこの投影における定数倍の不定性を表すスカラーである．ここで，輝度情報と幾何情報を組み合わせるために，投影元を輝度の投影と同じ式 (5) に示す $\mathbf{Y}$ にする必要がある．そこで，カメラの投影行列を次のように書き換える．

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{34} \end{bmatrix} \tag{8}$$

ここで，p_{jk} は通常の 3×4 行列の投影行列 $\mathbf{P}$ の j 行 k 列目の要素を表す．これにより，幾何情報の投影モデルは次式のように表すことができる．

$$\lambda\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{Q}\tilde{\mathbf{Y}} \tag{9}$$

ここで，λ はこの投影における定数倍の不定性を表すスカラーである．

4. 幾何と輝度に関する複合多視点幾何

次に，式 (9) で表された幾何情報への投影モデルと式 (3) で表された輝度情報への投影モデルを用いて幾何と輝度を融合した複合多視点幾何拘束を導出する．

4.1 複合多視点幾何拘束

今，図 4 に示すような 8 次元点 $\mathbf{Y}$ の N_Q 台のカメラへの投影と N_L 個の光源パターンによる輝度への投影を考える． 今，8 次元空間中の点 $\mathbf{Y}$ が式 (9) に従い N_Q 台のカメラ $\mathbf{C}_j$ に投影された時の投影点を $\mathbf{x}_j (j = 1, \cdots, N_Q)$ とする．また，この点 $\mathbf{Y}$ が式 (3) に従い N_L パターンの近接光源 $\mathbf{S}_k$ によって照らされた時の輝度を $i_k (k = 1, \cdots, N_L)$ とする．この時，8 次元点 $\mathbf{Y}$ の N_Q 台のカメラへの投影と N_L 個の光源パターンによる輝度への投影をまとめると，次式のように表すことができる．

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1 & \tilde{\mathbf{x}}_1 & & & & & \\ \vdots & & \ddots & & & & \\ \mathbf{Q}_{N_Q} & & & \tilde{\mathbf{x}}_{N_Q} & & & \\ \mathbf{L}_1 & & & & \tilde{i}_1 & & \\ \vdots & & & & & \ddots & \\ \mathbf{L}_{N_L} & & & & & & \tilde{i}_{N_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{Y}} \\ -\lambda_1 \\ \vdots \\ -\lambda_{N_Q} \\ -\kappa_1 \\ \vdots \\ -\kappa_{N_L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \vdots \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \vdots \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \tag{10}$$

© 2010 Information Processing Society of Japan

ここで，$\mathbf{Q}_j$ はカメラ $\mathbf{C}_j$ の投影行列を表し，λ_j はそのカメラへの投影における定数倍の不定性を表すスカラーである．また，$\mathbf{L}_k$ は光源 $\mathbf{S}_k$ の輝度投影行列を表し，κ_k はその光源への投影における定数倍の不定性を表すスカラーである．

式 (10) の左辺の $(3N_Q+2N_L)\times(9+N_Q+N_L)$ 行列を $\mathbf{M}$，$9+N_Q+N_L$ 次元ベクトルを $\mathbf{V}$ とすると，式 (10) は次のように書き換えることができる．

$$\mathbf{MV}=\mathbf{0} \tag{11}$$

行列 $\mathbf{M}$ は $(3N_Q+2N_L)\times(9+N_Q+N_L)$ 行列であるが，式 (11) がゼロベクトルではない解 $\mathbf{V}$ を持つことから，行列 $\mathbf{M}$ の階数は常に次の条件を満たす．

$$\mathrm{rank}\mathbf{M}<9+N_Q+N_L \tag{12}$$

つまり，行列 $\mathbf{M}$ から $(9+N_Q+N_L)\times(9+N_Q+N_L)$ の部分正方行列 $\mathbf{M}'$ を取り出すと次に示す通り，どの部分正方行列 $\mathbf{M}'$ もその行列式は 0 となる．

$$\det\mathbf{M}'=0 \tag{13}$$

この時，式 (13) で表される拘束がカメラ N_Q 台，光源パターン N_L 個の場合の複合多視点幾何拘束である．以降，この拘束を (N_Q,N_L) の幾何拘束と表記することにする．

ここで行列 $\mathbf{M}$ から部分正方行列 $\mathbf{M}'$ を取り出すための $9+N_Q+N_L$ 行を選ぶ際に，(N_Q,N_L) の幾何に関する有効な拘束を得るためには，N_Q 個のカメラ行列のいずれからも少なくとも 2 行以上選び，N_L 個の輝度投影行列のいずれからも必ず 2 行選ばなければならない．よって，(N_Q,N_L) の幾何に関する有効な複合多視点幾何拘束を得るためには，カメラの台数 N_Q，光源のパターン数 N_L に関する次の条件を満たす必要がある．

$$2N_Q+2N_L\leq 9+N_Q+N_L \tag{14}$$

さらに，行列 $\mathbf{M}$ から $(9+N_Q+N_L)\times(9+N_Q+N_L)$ の部分正方行列 $\mathbf{M}'$ を取り出すためには，行列 $\mathbf{M}$ の行数が列数以上である必要がある．この条件を式で表すと次のようになる．

$$9+N_Q+N_L\leq 3N_Q+2N_L \tag{15}$$

よって，式 (14) と式 (15) より，N_Q と N_L は次式を満たさなければならないことが分かる．

$$N_Q\leq 9-N_L\leq 2N_Q \tag{16}$$

また，カメラの投影行列 $\mathbf{Q}$ は式 (8) に示す通り，4 列から 8 列までの要素が 0 である．これにより，光源のパターンが 5 個以下の場合にはテンソルの要素が常に 0 となり，拘束とならない．つまり，光源のパターン数 N_L は 6 個以上必要である．

$$N_L\geq 6 \tag{17}$$

以上，式 (16) と式 (17) より，幾何と輝度を融合した複合多視点幾何拘束は $(N_Q,N_L)=(0,9),(1,8),(1,7),(2,6),(3,6)$ の計 5 個存在することが分かる．

4.2 (1,7) の幾何拘束

次に (1,7) の幾何拘束，すなわちカメラ 1 台と 7 つの異なる光源に関する幾何拘束を導出する．この場合には，式 (11) の行列 $\mathbf{M}$ は 17×17 の正方行列となる．この時，$\det\mathbf{M}=0$ を展開し，整理すると，次式の多重線形拘束が得られる．

$$x^a i_1^b i_2^c i_3^d i_4^e i_5^f i_6^g i_7^h \mathcal{C}_{abcdefgh}=0 \tag{18}$$

ここで $\mathcal{C}_{abcdefgh}$ は投影行列 $\mathbf{Q}$ と輝度投影行列 $\mathbf{L}$ を用いて，次のように表すことができる．

$$\mathcal{C}_{abcdefgh}=\epsilon_{ayz}\epsilon_{bj}\epsilon_{ck}\epsilon_{dm}\epsilon_{en}\epsilon_{fo}\epsilon_{gp}\epsilon_{hr}\det\mathbf{W} \tag{19}$$

$$\mathbf{W}=\begin{bmatrix}\mathbf{q}^{y\top} & \mathbf{q}^{z\top} & \mathbf{l}_1^{j\top} & \mathbf{l}_2^{k\top} & \mathbf{l}_3^{m\top} & \mathbf{l}_4^{n\top} & \mathbf{l}_5^{o\top} & \mathbf{l}_6^{p\top} & \mathbf{l}_7^{r\top}\end{bmatrix} \tag{20}$$

ここで，$\mathbf{q}^\alpha$, $\mathbf{l}^\alpha$ はそれぞれ $\mathbf{Q}$, $\mathbf{L}$ の α 行目のベクトルである．また，ϵ_{abc} は $\{a,b,c\}$ から $\{1,2,3\}$ への置換が偶置換であれば 1，奇置換であれば -1，それ以外であれば 0 の値を取るテンソルである．同様に，ϵ_{ab} は $\{a,b\}$ から $\{1,2\}$ への置換が偶置換であれば 1，奇置換であれば -1，それ以外であれば 0 の値を取るテンソルである．

式 (19) で表された $\mathcal{C}_{abcdefgh}$ は 8 階テンソルであり，3×2^7 要素を持つ．この要素の中で非ゼロの要素は 105 要素であり，$\mathcal{C}_{abcdefgh}$ の自由度は定数倍の不定性を除いて，104 自由度となる．また，式 (18) に示す (1,7) の幾何拘束では 1 組の対応関係から 1 本の式が得られる．すなわち，画像中の 104 点の画素の座標と輝度より $\mathcal{C}_{abcdefgh}$ を線形に求めることができる．

このようにして $\mathcal{C}_{abcdefgh}$ が求まると，輝度と点の座標との間で情報変換が可能となる．例えば，$\mathcal{C}_{abcdefgh}$ と投影点 $\mathbf{x}$，及び 6 個の異なる光源下における輝度 $i_1,\cdots,i_6$ が既知の場合には，式 (18) より 7 番目の光源下での輝度 i_7 を推定することができる．

4.3 5 つの複合多視点幾何拘束の一般特性

前節では，(1,7) の幾何拘束について説明を行った．ここでは，残り 4 つの幾何拘束の関係式を示す．先と同様に $\det\mathbf{M}'=0$ を展開し，整理することで，次に示す多重線形拘束が得られる．

$$i_1^a i_2^b i_3^c i_4^d i_5^e i_6^f i_7^g i_8^h i_9^j \mathcal{Z}_{abcdefghj}=0 \tag{21}$$

$$x^a i_1^b i_2^c i_3^d i_4^e i_5^f i_6^g i_7^h i_8^j \epsilon_{ayz}\mathcal{D}^y_{bcdefghj}=0_z \tag{22}$$

$$x_1^a x_2^b i_1^c i_2^d i_3^e i_4^f i_5^g i_6^h \epsilon_{byz}\mathcal{F}^y_{acdefgh}=0_z \tag{23}$$

© 2010 Information Processing Society of Japan

Vol.2010-CVIM-171 No.16
2010/3/18

表 1 複合多視点幾何の一般特性
Table 1 Properties of mixed multiple view geometry.

(N_Q, N_L)	テンソル	要素数 (非ゼロ)	線形自由度	独立な式数/点	必要最小点数
(0,9)	$\mathcal{Z}_{abcdefghj}$	$2^9(126)$	125	1 本	125 点
(1,8)	$\mathcal{D}^y_{bcdefghj}$	$3 \times 2^8(210)$	209	2 本	105 点
(1,7)	$\mathcal{C}_{abcdefgh}$	$3 \times 2^7(105)$	104	1 本	104 点
(2,6)	$\mathcal{F}^y_{acdefgh}$	$3^2 \times 2^6(135)$	134	2 本	67 点
(3,6)	$\mathcal{T}^{suy}_{defghj}$	$3^3 \times 2^6(405)$	404	8 本	51 点

$$x_1^a x_2^b x_3^c i_1^d i_2^e i_3^f i_4^g i_5^h i_6^j \epsilon_{ast}\epsilon_{buv}\epsilon_{cyz}\mathcal{T}^{suy}_{defghj} = 0_{tvz} \tag{24}$$

ここで，式 (21) は (0,9) の幾何拘束，式 (22) は (1,8) の幾何拘束，式 (23) は (2,6) の幾何拘束，式 (24) は (3,6) の幾何拘束を表している．

次に，5 つの幾何拘束についてテンソルの要素数，その内の非ゼロの要素数，テンソルの線形自由度，対応点 1 組が得られた際の線形独立な式数，さらにテンソルを線形に求める際の必要最小点数を調べた結果を表 1 に示す．

5. (1,7) の幾何拘束による輝度推定実験

本節では (1,7) の幾何拘束，すなわちカメラ 1 台と 7 つの異なる光源に関する幾何拘束を用いて輝度推定を行った実験結果を示す．次に，輝度の推定結果を安定化させる方法について説明すると共に，その結果を示す．最後に，従来法による輝度推定の結果との比較を行い，提案法の有用性を示す．

5.1 輝度推定の実験結果

まず，輝度推定の実験環境を図 5 に示す．本実験では，図 6 に示すように円錐と球，彫像の 3 種類の物体を使用した．この 3 種類の物体の奥行きは，それぞれ 15cm, 15cm, 10cm である． また，光源としては電球を使用した．ここでは，この電球を物体から 70cm から 90cm（物体の奥行きに対して 5 倍から 6 倍）程度離れた位置で移動させることにより，様々な近接光源下における輝度画像を取得した．このように光源位置を変えてカメラで撮影した輝度画像 7 枚を図 7 に示す．

これら 7 枚の輝度画像を用いて，図 7(a) の光源下における彫像の輝度を推定する実験を行った．そこで，まず図 7 に示す円錐と球の画像点座標と 7 つの異なる光源下における輝度情報から 104 組の対応関係を用いて，式 (18) を解くことで $\mathcal{C}_{abcdefgh}$ を求める．次に，求められた $\mathcal{C}_{abcdefgh}$ と彫像の画像点座標，6 つの異なる光源下における彫像の輝度情報から，

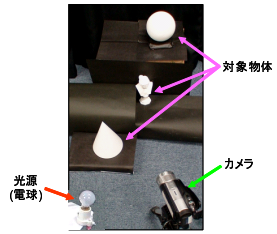
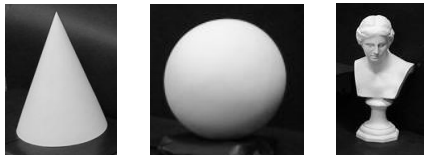


図 5 輝度推定の実験環境
Fig. 5 Experimental environment estimated to image intensity.



(a) 円錐 (b) 球 (c) 彫像

図 6 対象物体
Fig. 6 3D Object.



(a) (b) (c) (d) (e) (f) (g)

図 7 7 種類の近接光源下で撮影された輝度画像
Fig. 7 Seven images taken under a close light source.

図 7(a) における彫像の輝度の推定を行った．その推定結果を図 8 に示す．ここで，図 8 の (a) は真の輝度値であり，(b) は $\mathcal{C}_{abcdefgh}$ から推定した輝度を表している．この推定結果において正の輝度値は白，負の輝度値は赤で表している．また (c) は真値と推定結果の誤差の大きさを 1 画素ごとに表した画像であり，本稿では誤差分布と呼ぶことにする．この誤差分布は，誤差が “0〜127 は緑”，“128〜255 は黄色”，“256 以上は赤” で表されており，緑と黄色に関しては誤差が大きい程，色が明るくなっている．つまり，全体が黒い程，推定結果が良いことを表している．

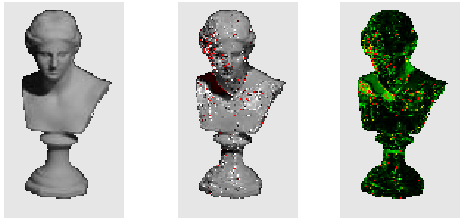
また本研究では，輝度推定の精度評価値として次式に示すはずれ値を除いた平均輝度誤差 E_{photo} を用いる．

$$E_{photo} = \frac{1}{N - T_{photo}} \sum_{k=1}^{N-T_{photo}} |i_k - \hat{i}_k| \tag{25}$$

ここで，i_k は画素 k の真の輝度値，$\hat{i}_k$ は画素 k の推定輝度値，N は推定対象の総画素数を表している．また，T_{photo} ははずれ値の数を表しており，$|i_k - \hat{i}_k|$ が閾値を超える画素の画

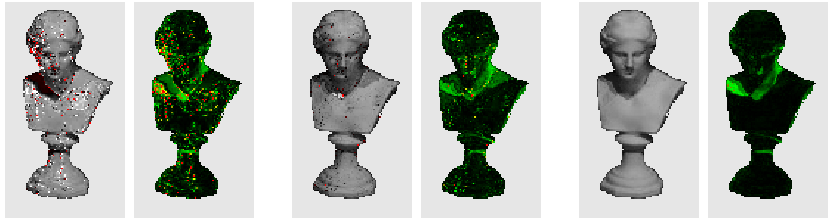
© 2010 Information Processing Society of Japan

Vol.2010-CVIM-171 No.16
2010/3/18



(a) 真の輝度値　(b) 推定結果　(c) 誤差分布

図 8　輝度推定結果と誤差分布
Fig. 8　Estimated image intensity and error distribution.



(a)$\alpha = 1$　(b)$\alpha = 5$　(c)$\alpha = 30$

図 9　繰り返し回数 α による推定結果の違い
Fig. 9　Estimated image intensity by the proposed method.

素数である．

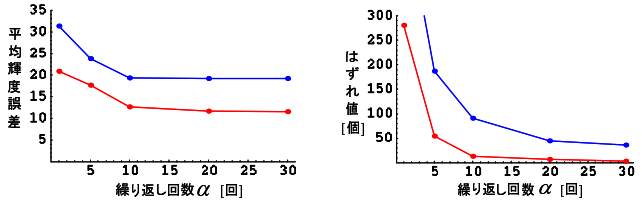
本研究では，彫像の画素数 N は 4,539 画素であり，閾値は 128 として評価を行った．図 8 の推定結果では平均輝度誤差 $E_{photo} = 20.874$，はずれ値 $T_{photo} = 281$ 個となり，多くのはずれ値が生じていることが分かる．また，このはずれ値は図 8(c) の誤差分布より，部分的に存在するのではなく所々に大きな誤差として現われていることが見て取れる．

5.2　推定結果の安定性の向上

そこで次に，輝度推定結果の精度を安定化する方法について説明する．まず $\mathcal{C}_{abcdefgh}$ を求める際に使用する対応点 104 組の選び方をランダムに変え，輝度の推定を α 回繰り返し行う．すると，1 画素当たり α 個の輝度推定結果が得られるので，このメディアンを輝度推定の最終的な結果とする．このようにメディアンを結果として用いることで，推定結果において大きく外れた値を取り除くことができる．これにより，推定結果の安定性の向上を図った．繰り返し回数 α を $\alpha = 1, 5, 30$ とした場合の推定結果の違いを図 9 に示す．

図 9 より，繰り返し回数 α が大きくなる程，大きな誤差が減り，真値と比較しても違和感のない推定結果が得られていることが見て取れる．このことは，繰り返し回数 α が大きくなるにつれて誤差分布全体が黒くなっていることからも確認できる．また $\alpha = 30$ においても誤差の大きな領域が存在するが，これらは近似輝度モデルでは表現できない陰領域や相互反射成分の影響が大きな領域であると考えられる．

次に，繰り返し回数 α を変えた場合の平均輝度誤差 E_{photo} とはずれ値 T_{photo} の変化を調べた結果を図 10 に赤線のグラフで示す．図 10 のグラフの値は，それぞれの α に対して 30 回推定を行った平均の値である．グラフより，E_{photo} も T_{photo} も共に繰り返し回数 α が大きくなるにつれて，小さくなっていることが分かる．これらより，繰り返し回数が増えるに



(a) 平均輝度誤差 E_{photo}　(b) はずれ値 T_{photo}

図 10　繰り返し回数 α による精度
Fig. 10　Relationship between accuracy of image intensity and number of iteration α.

従って，より真の輝度値に近い良い推定結果が得られることが分かる．

5.3　提案法と従来法の比較による評価

本節では，提案法と従来法による輝度推定の結果について比較を行い，提案法の有用性を示す．ここで，本研究における従来法とは輝度画像を無限遠光源画像とみなし，輝度推定を行う手法を示す．まず，この従来法における輝度推定の方法について簡潔に説明する．

従来法では，図 7 に示す輝度画像を無限遠光源画像と仮定する．これにより，画像 4 枚間の輝度は次のような関係を満たすと考えることができる．

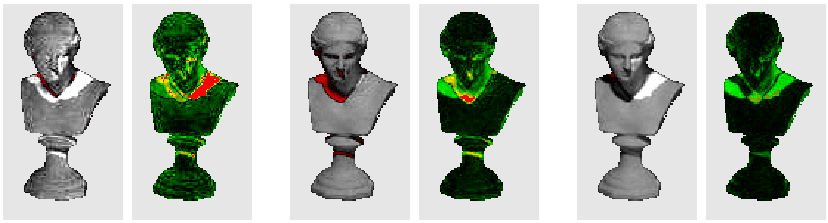
$$\mathbf{I}_4^{\infty} = \beta_1 \mathbf{I}_1^{\infty} + \beta_2 \mathbf{I}_2^{\infty} + \beta_3 \mathbf{I}_3^{\infty} \tag{26}$$

ここで，$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ は各画像の係数である．また画素数が N である時，$\mathbf{I}_k^{\infty}$ は $[i_{k1}, \cdots, i_{kN}]^{\top}$ なる N 次元ベクトルである．したがって，式 (26) の $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ を求めることができれば，輝度 $\mathbf{I}_4^{\infty}$ を推定することができる．

そこで本実験では，$\mathbf{I}_4^{\infty}$ を図 7(a) の輝度情報とみなし，まず図 7(a),⋯,(d) に示す円錐と球

© 2010 Information Processing Society of Japan

Vol.2010-CVIM-171 No.16
2010/3/18



(a)$\alpha = 1$ (b)$\alpha = 5$ (c)$\alpha = 30$

図 11 従来法と提案法による推定結果の違い
Fig. 11 Estimated image intensity by the existing method.

の輝度情報から 4 組の対応関係を用いて，$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ を求める．次に，求められた $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ と図 7(b),(c),(d) の彫像の輝度情報から，図 7(a) における彫像の輝度の推定を行った．先と同様に使用する 4 組の対応点をランダムに変えて α 回推定し，このメディアンを推定結果とした．このようにして従来法で推定を行った結果を，誤差分布と共に図 11 に示す．図 11 の誤差分布を見ると，図 9 と比べて陰に関する領域だけではなく，全体的に誤差が生じていることが見て取れる．

また，繰り返し回数 α を変えた場合の平均輝度誤差 E_{photo} とはずれ値 T_{photo} の変化を調べた結果を図 10 の青線のグラフで示す．図 10 より，平均輝度誤差 E_{photo}，はずれ値 T_{photo} のどちらのグラフにおいても常に提案法の方が従来法よりも安定した結果が得られていることが見て取れる．よって，提案法は無限遠光源を仮定する従来法よりも輝度推定において有用であることが分かる．

6. 精度評価実験

次に，シミュレーション実験によりテンソルの精度評価を行った結果を示す．本実験では，式 (1) に示す一般輝度モデルにより輝度画像を生成した．ただし，生成された輝度値は平均が 128 になるように正規化を行い，この正規化後の輝度値を用いて評価実験を行った．

6.1 テンソル計算時の点数の違いによる評価

まず，テンソルを計算する際に使用する点数 M を変えて行った評価実験の結果を示す．はじめに，シミュレーション実験の環境を図 12 に示す．ここで青点はカメラ 1 の位置，緑の 7 点はそれぞれ光源を表しており，赤は対象物体を表している．これら 7 個の光源はそれぞれ，物体の高さに対して 10 倍程度離れた位置に点在させた．また，図 12 では光源を

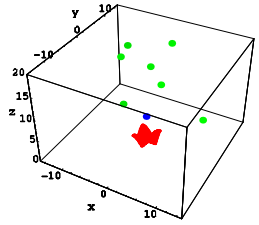
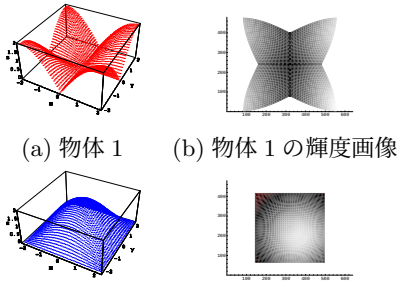


図 12 実験環境
Fig. 12 Experimental environment.



(a) 物体 1 (b) 物体 1 の輝度画像
(c) 物体 2 (d) 物体 2 の輝度画像

図 13 対象物体と輝度画像
Fig. 13 3D Object and image intensity.

7 個まとめて表示しているが，1 つの画像を撮影する際には 1 つの光源のみを使用する．対象物体としては，図 13(a), (c) に示す 2 つの物体を用いる．これら 2 つの物体は共に 2,401 点で構成されており，高さは 2 である．物体 1，物体 2 を 1 つの光源下で撮影した輝度画像をそれぞれ図 13(b), (d) に示す．ここで，輝度画像は正の輝度値を白，負の輝度値を赤で表している．

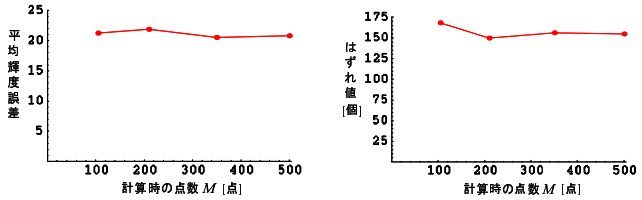
これらの輝度値に対してそれぞれ ± 3 の正規分布ノイズを印加して，輝度の推定実験を行った．まず，物体 1 の画像点座標と 7 つの異なる光源下における輝度情報から M 組の対応点を用いて，$\mathcal{C}_{abcdefgh}$ を求める．求められた $\mathcal{C}_{abcdefgh}$ と物体 2 の画像点座標，及び 6 つの異なる光源下における物体 2 の輝度情報から，図 13(d) に示す輝度情報の推定を行った．ここでは，M を 104, 210, 350, 500 と変えて輝度を推定し，テンソル計算時の点数 M とテンソルの精度の関係を評価した．

図 14 にテンソル計算時の各点数 M において，30 回推定を行った際の平均輝度誤差 E_{photo} とはずれ値 T_{photo} をそれぞれグラフで示す．図 14 のグラフより，(1,7) の幾何拘束においてはテンソル計算時の点数 M が増えても，推定精度があまり変化していないことが見て取れる．これより，テンソル計算時の点数 M が増えても，$\mathcal{C}_{abcdefgh}$ はほとんど改善しないことが分かる．

6.2 光源位置の違いによる評価

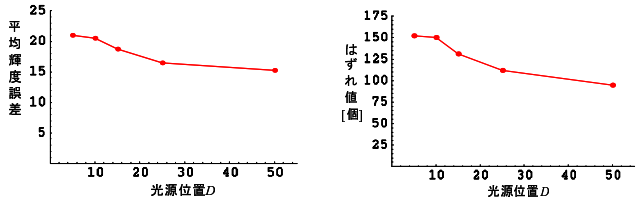
次に，光源と対象物体の間の距離を変えて行った評価実験の結果を示す．本実験では，図 12 に示すように光源が物体の高さに対して D 倍程度離れた位置に点在するように配置し，

© 2010 Information Processing Society of Japan



(a) 平均輝度誤差 E_{photo}　　(b) はずれ値 T_{photo}

図 14 テンソル計算時の点数 M による計算精度
Fig. 14 Relationship between accuracy of image intensity and number of corresponding point M.



(a) 平均輝度誤差 E_{photo}　　(b) はずれ値 T_{photo}

図 15 光源位置 D による計算精度
Fig. 15 Relationship between accuracy of image intensity and postion of a close light source D.

この時の D を 5, 10, 15, 25, 50 と変えて，得られた輝度画像を用いて輝度の推定を行った．本実験では，D の値に因らず光源方向は一定とし，物体から光源までの距離のみ変化させた．先と同様に輝度値に対して ±3 の正規分布ノイズを印加し，350 組の対応点を用いて $\mathcal{C}_{abcdefgh}$ を求めた．求めた $\mathcal{C}_{abcdefgh}$ を用いて輝度推定した結果を比較することで，光源位置 D とテンソルの精度の関係を評価した．

図 15 に各光源位置 D において，30 回推定を行った際の平均輝度誤差 E_{photo} とはずれ値 T_{photo} をそれぞれグラフで示す．図 15 のグラフより (1,7) の幾何拘束においては光源位置 D が物体から離れる程，推定結果が安定していることが見て取れる．これは図 3 で示したように光源位置 D が大きくなる程，一般輝度モデルの輝度値が近似輝度モデルの輝度値に近づき，この結果，テンソルがより安定に計算できるからであると考えられる．

7. ま と め

本研究では，カメラから得られる幾何情報と輝度情報を組み合わせた新たな多視点幾何として，複合多視点幾何を提案し，その一般特性を明らかにした．また，輝度情報と幾何情報とを組み合わせるために，新たに近接光源の輝度モデルの線形表現法を示した．実画像により，カメラ 1 台と 7 個の光源パターンが存在する場合の (1,7) の幾何拘束による輝度推定実験を行い，提案した複合多視点幾何により，任意の近接光源下における輝度画像が生成できることを示した．さらに従来の無限遠光源を仮定した手法との比較を行い，提案法の方がより良い輝度推定結果が得られることを示した．

今後は，テンソルからのカメラ行列や輝度投影行列の復元について考える必要がある．これらが復元できることにより，物体の 3 次元形状復元など様々な研究への発展が期待できる．

参 考 文 献

1) A.Maki, M.Watanabe, and C.S. Wiles. Geotensity: Combining motion and lighting for 3d surface reconstruction. *6th International Conference on Comuputer Vision*, pp. 1053–1060, 1998.
2) R.Hartley and A.Zisserman. Multiple view geometry in computer vision. *Cambridge University Press*, 2000.
3) K. Kozuka and J. Sato. Multiple view geometry for mixed dimensional cameras. *Third International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, Vol.1, pp. 5–12, 2008.
4) P.Sturm. Mixing catadioptric and perspective cameras. *Workshop on Omnidirectional Vision*, 2002.
5) 岡部孝弘, 佐藤洋一. 近接点光源は未較正照度差ステレオにおける形状復元の不定性を解決するか? 情報処理学会研究報告. CVIM, [コンピュータビジョンとイメージメディア], Vol. 2007, No.1, pp. 153–160, 2007.
6) 岡谷貴之, 出口光一郎. 投影中心に点光源がある場合の shape-from-shading : 内視鏡画像からの 3 次元形状復元. 情報処理学会研究報告. コンピュータビジョン研究会報告, Vol.96, No.5, pp. 19–26, 1996.
7) Y.Fujita, F.Sakaue, and J.Sato. Linear image representation under close lighting for shape reconstruction. *International Conference on Comuputer Vision Theory and Applications*, Vol.2, pp. 67–72, 2009.

© 2010 Information Processing Society of Japan