

幾何情報と光学情報に基づく複合多視点幾何

坂上 文彦^{†a)} 加藤 一樹[†] 佐藤 淳^{†b)}

Mixed Multiple View Geometry on Geometry and Photometry

Fumihiko SAKAUE^{†a)}, Kazuki KATO[†], and Jun SATO^{†b)}

あらまし 本論文では、カメラから得られる画像点の座標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。これに対して本論文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。このために、本論文では近接光源画像の輝度情報を高次元空間からの線形投影により表現する方法を示す。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でき、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できる。このような幾何と輝度の間に成り立つ多重線形拘束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、実環境での実験及びシミュレーション環境を利用した評価実験により、提案した新たな多視点幾何の評価を行った結果を示す。

キーワード 多視点幾何, 近接光源画像

1. ま え が き

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 [1], [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] などが提案された。このような従来の多視点幾何は、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る。しかし、一般的なカメラから得られる情報には座標情報だけではなく輝度情報も含まれており、この輝度情報にも形状に関する情報が含まれることが知られている。本研究では、これらの情報を統一的に取り扱うことによる画像処理の高精度化を目指し、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。特に、本論文では新たに導出した幾何の評価を行い、その性質について議論する。

輝度情報を用いた形状復元法として、従来、無限遠光源を仮定した研究が数多く行われてきた [5], [6]。し

かし、無限遠光源モデルは単純ではあるがゆえに含まれている情報が少なく、3次元形状を輝度より推定する上では必ずしも適切なモデルではない。これに対して近年、光源が物体に近い位置に存在する近接光源下での輝度モデルに基づく物体形状の復元に関する研究が進められつつある [7], [8]。しかし、この近接光源画像の輝度モデルは非線形なモデルであり、また、点ごとに光源方向が異なるため、無限遠光源モデルと比較すると扱いが難しい。そのため、画像の小領域分割を利用することにより、近接光源画像を線形モデルにより表現する方法なども報告されている [9], [10]。しかし、これらの方法においても計算量や適切な画像分割方法など、いくつかの課題が残されている。

一方幾何情報に関しては、静止したカメラの関係を表現する一般的な多視点幾何 [1] だけでなく、拡張カメラモデルを用いた運動するカメラ間の関係を表す方法 [2], [11], [12] なども提案されている。更に、画像を取得するための一般的なカメラだけでなく、1次元ラインセンサや3次元レンジセンサなど複数の異なるセンサを同一の枠組みで取り扱えるように一般化した拡張多視点幾何 [4] なども提案されている。

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。これら二つの情報

[†] 名古屋工業大学, 名古屋市

Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

a) E-mail: sakaue@nitech.ac.jp

b) E-mail: junsato@nitech.ac.jp

を組み合わせた研究についても、近年、いくつかの報告がなされている [13]～[16]。Higo ら [13] は近接光源を取り付けたカメラで物体を撮影することで、物体形状だけでなく、法線方向も同時に復元可能であることを示している。しかし、この方法においても物体形状は投影座標からの情報に強く依存しており、また、法線方向は輝度情報に強く依存しているため、二つの情報を同等のものとして扱ってはいない。また、Migita [15], [16] らも法線方向と 3 次元情報を同時に最適化する方法を提案しているが、非線形最適化を利用しているためその計算量は非常に大きい。

本研究では、近接光源下で撮影された画像を対象とし、このような画像では、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。更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。これにより、幾何情報と輝度情報を統一的に取り扱うことが可能となるため、これらの情報を複合的に利用した画像処理の枠組みを実現できる。また、これらの拘束を利用することにより、復元精度の向上や反射率と形状の同時推定など、様々な応用が期待できる。本論文では、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。

2. 近接光源下における輝度モデルの線形化

本研究では、単一の光源が対象物体の近くに存在すると仮定し、近接光源下における輝度モデルを用いて画像輝度を表現する。一般的に、近接光源下における輝度モデルは非線形なモデルとなるが、本論文ではこれを近似的に線形式のみにより表現する方法を提案する。本章では、この近似輝度モデルについて述べる。

2.1 近接光源画像の線形表現

今、物体に対して近接した位置 \mathbf{S} にある光源強度 E の光源が、物体上の反射率 ρ 、法線方向 \mathbf{n} の点 \mathbf{X} を照らしているとする。物体表面の反射が Lambert モデルで表現できると仮定し、更に attached shadow が含まれないものとする、この近接光源 \mathbf{S} による点 \mathbf{X} の輝度 i は次のように表すことができる。

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

式 (1) の $1/\|\mathbf{S} - \mathbf{X}\|^2$ は光の減衰により輝度が光源位置 \mathbf{S} と点 \mathbf{X} の距離の 2 乗に反比例することを表して

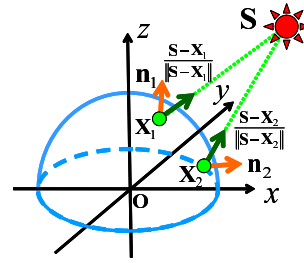


図 1 近接光源の幾何特性
Fig. 1 Intensity model under close lighting.

いる。また、 $(\mathbf{S} - \mathbf{X})/\|\mathbf{S} - \mathbf{X}\|$ は光源方向を表している。本論文では、この式 (1) を一般輝度モデルと呼ぶ。

一般輝度モデルが示すとおり、近接光源下では図 1 のように光源方向は 3 次元点 \mathbf{X} に依存して変化する。そのため、画像全体の光源方向を同一のものとして取り扱うことはできない。また同様の理由により、線形演算のみでは任意光源画像を合成することができない。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、線形表現が可能である無限遠光源画像に比べて扱いが難しい。

本研究では、光の減衰が光源位置 \mathbf{S} と 3 次元点 \mathbf{X} の距離に反比例するものとして近似し、輝度 i を次のような近似光源モデルで表す。

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

本論文では、式 (2) を近似輝度モデルと呼ぶことにする。この近似輝度モデルは、2.2 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良好な近似を与えることが確認できている。

ここで、式 (2) において 3 次元点 \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一つの点とみなすと、式 (2) は次のように変形できる。

$$\kappa \tilde{i} = \mathbf{L} \tilde{\mathbf{Y}} \quad (3)$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & E s_x & E s_y & E s_z & -E & 0 & 0 \\ -2s_x & -2s_y & -2s_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \mathbf{S}^\top \mathbf{S} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{Y} = \left[X, Y, Z, \rho n_x, \rho n_y, \rho n_z, \rho \mathbf{n}^\top \mathbf{X}, \mathbf{X}^\top \mathbf{X} \right]^\top \quad (5)$$

ここで、 $\tilde{i} = [i, 1]^\top$ 、 $\tilde{\mathbf{Y}} = [\mathbf{Y}, 1]^\top$ はそれぞれ輝度 i 、及びベクトル \mathbf{Y} の斉次表現であり、 s_x, s_y, s_z は光源位置 \mathbf{S} の各要素である。また、 κ は定数倍の不定性を

表すスカラーである．このとき， \mathbf{Y} は点 $\mathbf{X} = [X, Y, Z]^T$ 及び法線 $\mathbf{n} = [n_x, n_y, n_z]^T$ ， ρ からなる 8 次元点とみなすことができ，これにより，式 (3) は 8 次元点 \mathbf{Y} を 1 次元輝度 i に投影する 1 次元射影カメラとみなすことができる．すなわち，画像中の輝度を決定する光源をカメラと同様に扱うことが可能になる．これにより，輝度情報を多視点幾何の枠組みで取り扱うことが可能となる．本論文では，この行列 \mathbf{L} を輝度投影行列と呼ぶ．この輝度投影行列 \mathbf{L} は光源強度 E 及び光源位置 \mathbf{S} のみにより構成される．そのため， \mathbf{L} は異なる光源下で撮影された画像ごとに異なるが，光源条件が等しければ撮影された物体には依存しない．

このように近似輝度モデルを利用することにより，一般モデルを線形式のみで表現することが可能となる．しかし，ここで用いられる 8 次元空間の各要素間には非線形な拘束条件が存在する．このような非線形の拘束条件は高精度な推定のためには重要であると考えられるが，本論文の主旨とは異なるため，ここでは全ての要素が独立であるものとして議論をすすめる．

また，線形表現を実現するための輝度情報の近似方法については，式 (1) を展開することにより得られる様々な方法が考えられ，次元数を増加させることにより近接光源画像を完全に表現することも可能である．しかし，このような場合には投影行列や幾何拘束の推定に非常に多くの画像が必要とされ，また，推定も不安定となる．そのため，本論文では光源位置などの物理情報が直接的に扱えるように，上述した近似輝度モデルを採用した．

2.2 近似輝度モデルの有効性

2.1 で示したとおり，近似輝度モデルを用いることにより近接光源画像を線形式のみで表現することができる．本節ではシミュレーション実験結果に基づき，式 (2) で示す近似輝度モデルの近似精度について議論する．この実験では，近接光源画像を近似輝度モデル及び無限遠光源モデルを用いて近似表現することにより，それぞれのモデルの近似精度を調べた．無限遠光源モデルにおいては，画像の輝度 i^∞ は，一般に次式のように表せる．

$$i^\infty = E \rho \mathbf{n}^T \mathbf{s} \quad (6)$$

ここで \mathbf{s} は物体から見た無限遠光源の方向である．近接光源画像では全ての点で光源方向が異なるため，このモデルにおいては各点の光源方向の平均を光源方向として用いた．

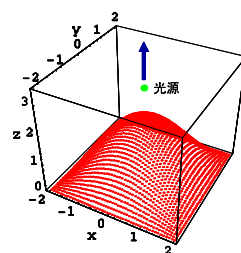


図 2 物体と光源の位置関係

Fig. 2 Target object and point light source.

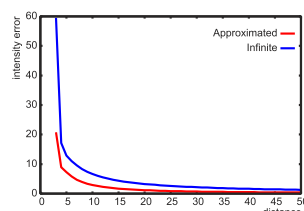
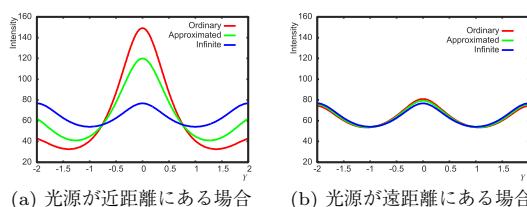


図 3 一般輝度モデルと近似モデル間の輝度誤差

Fig. 3 Relationship between intensity errors and distance from object for approximate intensity model and infinite intensity model.



(a) 光源が近距離にある場合

(b) 光源が遠距離にある場合

図 4 光源位置による輝度分布の変化

Fig. 4 Intensity distribution under (a) a near light source and (b) a far light source.

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．この光源位置を矢印方向（真上）に移動させながら，各光源位置において (a) 一般輝度モデル，(b) 近似輝度モデル，(c) 無限遠光源モデルを用いて各点の輝度を求めた，このとき各輝度モデルで求められる輝度値は輝度減衰等の影響により大幅に異なるため，あらかじめ輝度値の平均が 128 となるように正規化した．これは通常のカメラでシーンに合わせてゲインや絞りを適切に調整することに相当する．この正規化後，一般輝度モデルの輝度と二つの近似輝度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る輝度の平均誤差，横軸は物体の奥行に対する光源までの距離である．各曲線は近似輝度モデルにおける誤差と無限遠光源モデルにおける誤差を表す．

図3のグラフより、式(2)の近似輝度モデルの方が実際のモデルに近い輝度値を与えていることが分かる。また、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が小さくなっていることが確認できる。

また、光源が近距離にある場合と、遠距離にある場合について輝度分布の比較を行った。図4に対象シーンの $X=0$ の場合における観測地点による輝度の違いを示す。これらの図では、横軸が対象シーンの Y 軸を表しており、縦軸が各位置での観測輝度を表している。また、それぞれの直線は一般輝度モデルを用いた場合(赤)、近似輝度モデルを用いた場合(緑)、無限遠光源モデルを用いた場合(青)に計算された輝度値を表している。この図を見ると、光源位置が対象に近い場合でも近似輝度モデルがある程度一般輝度モデルの分布を表現できているのに対し、無限遠光源モデルではその分布を適切に表現できていないことが分かる。また、光源距離が遠くなった場合には、どちらのモデルを用いた場合でもある程度一般輝度モデルを近似可能であることが確認できる。

これらの結果から、近似輝度モデルを用いることにより、無限遠光源モデルを用いるよりも適切に近接光源画像が表現可能であることが確認できた。また、光源位置が物体から遠くなる場合には近似精度が向上することも確認できた。

3. 幾何情報の投影モデル

次に、幾何情報の投影について述べる。今、3次元空間中の点 $\mathbf{X} = [X, Y, Z]^T$ が射影カメラに投影され、このときに得られた投影点が $\mathbf{x} = [x, y]^T$ であるとする。この投影関係は、 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。

$$\lambda \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{P} \tilde{\mathbf{X}} \quad (7)$$

ここで、 $\tilde{\mathbf{X}}, \tilde{\mathbf{x}}$ はそれぞれ \mathbf{X}, \mathbf{x} の斉次表現であり、 $\tilde{\mathbf{X}} = [\mathbf{X}^T, 1]^T$, $\tilde{\mathbf{x}} = [\mathbf{x}^T, 1]^T$ である。また、 λ は定数倍の不定性を表すスカラーである。

ここで、輝度の線形表現に用いた8次元点 \mathbf{Y} を画像座標に投影することを考える。8次元点 \mathbf{Y} において、画像への投影に影響する要素は対象の3次元位置のみであるため、カメラの投影行列を次のように書き換えることにより、8次元から2次元への投影が実現される。

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

ここで、 p_{jk} は式(7)で示した投影行列 \mathbf{P} の j 行 k 列目の要素を表す。これにより、8次元空間における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。

$$\lambda \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{Q} \tilde{\mathbf{Y}} \quad (9)$$

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。以上により、近接光源下で撮影された画像において、画像点の輝度及び画像座標への投影を同一の8次元空間からの投影として定義することができた。以降では、これらの投影において成立する多視点幾何について議論を行う。

4. 幾何と輝度に関する複合多視点幾何

本章では式(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。以降では、このような多視点幾何にどのような幾何拘束が存在するかを示した後、いくつかの多視点幾何を具体例として取り上げ議論を行う。

4.1 複合多視点幾何拘束

今、3次元点 \mathbf{X} を N_L 個の異なる光源下で照明し、それぞれの光源下における画像を N_Q 台の異なるカメラで撮影したとする。すると、このときの画像中の輝度と投影座標は図5に示すように8次元点 \mathbf{Y} の光源 \mathbf{S} の輝度投影行列 \mathbf{L} による投影と、カメラ \mathbf{C} のカメラ投影行列 \mathbf{Q} による投影として考えることができる。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 $\mathbf{x}_j (j = 1, \dots, N_Q)$ とする。また、この点 \mathbf{Y} が式(3)に従い N_L の近接光源 \mathbf{S}_k によって照らされた時の輝度を $i_k (k = 1, \dots, N_L)$ とす

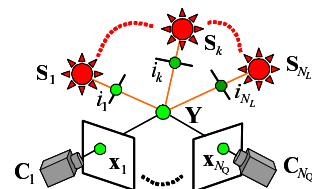


図5 幾何と輝度に関する複合多視点幾何拘束
Fig.5 Mixed extended multiple view geometry for photometry and geometry.

る. すると, 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は, 次式のようにまとめることができる.

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

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.

$$\mathbf{M}\mathbf{V} = \mathbf{0} \quad (11)$$

行列 \mathbf{M} は $(3N_Q + 2N_L) \times (9 + N_Q + N_L)$ 行列であるが, 式 (11) が自明ではない解 \mathbf{V} をもつことから, 行列 \mathbf{M} の階数は常に次の条件を満たす.

$$\text{rank}\mathbf{M} < 9 + N_Q + N_L \quad (12)$$

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とおり, どの部分正方行列 \mathbf{M}' もその行列式は 0 となる.

$$\det\mathbf{M}' = 0 \quad (13)$$

このとき, 式 (13) で表される拘束がカメラ N_Q 台, 光源 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.

ここで, (N_Q, N_L) における有効な幾何拘束を得るために, 行列 \mathbf{M} から部分正方行列 \mathbf{M}' を選択する方法を考える. このとき, 部分行列 \mathbf{M}' は $(9 + N_Q + N_L) \times (9 + N_Q + N_L)$ 行列であることから, \mathbf{M} から $(9 + N_Q + N_L)$ 行を選択する必要がある. カメラ投影行列及び輝度投影行列は, 斉次表現を用いて表されているため, (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, また, 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. これは, 投影に斉次表現が利用されている場合には, 1 行のみからでは有効な拘束を得ることができないためである. これにより, (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.

$$2N_Q + 2N_L \leq 9 + N_Q + N_L \quad (14)$$

更に, 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.

$$9 + N_Q + N_L \leq 3N_Q + 2N_L \quad (15)$$

よって, 式 (14) と式 (15) より, N_Q と N_L は次式を満たす必要がある.

$$N_Q \leq 9 - N_L \leq 2N_Q \quad (16)$$

また, カメラの投影行列 \mathbf{Q} は式 (8) に示すとおり, 4 列から 8 列までの要素が 0 である. これにより, 光源が 5 個以下の場合には光源位置にかかわらず行列式が 0 となるため拘束を得ることができない. したがって光源数 N_L は 6 以上必要である.

$$N_L \geq 6 \quad (17)$$

式 (16) と式 (17) より, 幾何と輝度に関する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 5 通りのみしか存在しないことが分かる. 以下では, これら 5 通りの多視点幾何を導出する. なお, $(0, 9)$ の幾何ではカメラが 0 台となっているが, これはカメラから得られる座標情報を使用していないため, 異なる照明条件下で撮影された輝度同士の関係のみを表した幾何となっている. したがって, 本論文で提案する幾何情報と輝度情報を組み合わせた多視点幾何には厳密な意味では含まれない. しかし, この幾何についても提案法と同一の枠組みで取り扱うことが可能であるため, ここでは提案法の一部として取り扱うこととする.

4.2 (1, 7) の幾何拘束

上述した幾何拘束のうち, まず, $(1, 7)$ の幾何拘束, すなわちカメラ 1 台と七つの異なる光源に関する拘束について述べる. この場合には, 式 (11) の行列 \mathbf{M} は 17×17 となる. この場合, \mathbf{M} は正方行列となるため,

$\det \mathbf{M} = 0$ を展開して整理すると、次の多重線形拘束が得られる。

$$x_1^a i_1^b i_2^c i_3^d i_4^e i_5^f i_6^g i_7^h C_{abcdefgh} = 0 \quad (18)$$

ここで $C_{abcdefgh}$ はカメラ投影行列 \mathbf{Q}_1 と輝度投影行列 $\mathbf{L}_k (k = 1, \dots, 7)$ を用いて、次のように表すことができる。

$$C_{abcdefgh} = \epsilon_{ayz} \epsilon_{bj} \epsilon_{ck} \epsilon_{dm} \epsilon_{en} \epsilon_{fo} \epsilon_{gp} \epsilon_{hr} \det \mathbf{W} \quad (19)$$

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1^{\top} & \mathbf{q}_1^{\top} & \mathbf{l}_1^{\top} & \mathbf{l}_2^{\top} & \mathbf{l}_3^{\top} & \mathbf{l}_4^{\top} & \mathbf{l}_5^{\top} & \mathbf{l}_6^{\top} & \mathbf{l}_7^{\top} \end{bmatrix} \quad (20)$$

ここで、 \mathbf{q}_j^{β} , \mathbf{l}_k^{β} はそれぞれ \mathbf{Q}_j , \mathbf{L}_k の β 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 の値をとるテンソルである。

式 (18) で表された $C_{abcdefgh}$ は 8 階テンソルであり、 3×2^7 要素をもつ。この要素の中で非零の要素は 105 要素である。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。したがって、画像中の 104 点の座標情報と輝度情報より $C_{abcdefgh}$ を線形に求めることができる。

ただし、与えられた点群を元に、式 (18) により得られる各式の間に線形従属の関係が存在する場合、適切にテンソルを計算できないことがある。例えば、全ての点が同一直線上に存在する場合、式 (18) に非常に多くの従属関係が発生するため、適切に推定を行うことができない。また、全ての点で法線が同一方向となるような場合にもやはり推定を行うことができない。したがって、適切にテンソルの推定を行うためには、点の分布が 3 次元的な広がりをもち、また、法線方向も様々な方向のものが存在する点群を選択する必要がある。

この $C_{abcdefgh}$ を求めることができれば、異なる光源下で撮影された 6 枚の画像の輝度値 i_1, \dots, i_6 から式 (18) を用いて 7 枚目の画像の輝度値 i_7 を推定することが可能である。つまり、明示的な形状復元を行わずに近接光源下における異なる光源環境画像への輝度変換を実現できる。

以上により、近接光源下で撮影された画像間に存在

する関係を線形に表現できた。この方法では、輝度と座標の関係が直接的に表現可能である。そのため、従来の Photometric Stereo 法などと比べて、輝度どうしの関係を表す際に座標情報をより積極的に利用することが可能である。

4.3 (2, 6) の幾何拘束

次に (2, 6) の幾何拘束、すなわちカメラ 2 台と六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 18×17 となる。このとき、 17×17 の部分正方行列 \mathbf{M}' を用いて $\det \mathbf{M}' = 0$ を展開し、整理すると、次式の多重線形拘束が得られる。

$$x_1^a x_2^b i_1^c i_2^d i_3^e i_4^f i_5^g i_6^h \mathcal{F}_{acdefgh}^y = 0_z \quad (21)$$

ここで $\mathcal{F}_{acdefgh}^y$ 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。

$$\mathcal{F}_{acdefgh}^y = \epsilon_{ars} \epsilon_{cj} \epsilon_{dk} \epsilon_{em} \epsilon_{fn} \epsilon_{go} \epsilon_{hp} \det \mathbf{W} \quad (22)$$

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1^{\top} & \mathbf{q}_1^{\top} & \mathbf{q}_2^{\top} & \mathbf{l}_1^{\top} & \mathbf{l}_2^{\top} & \mathbf{l}_3^{\top} & \mathbf{l}_4^{\top} & \mathbf{l}_5^{\top} & \mathbf{l}_6^{\top} \end{bmatrix} \quad (23)$$

式 (22) で表された $\mathcal{F}_{acdefgh}^y$ は 8 階テンソルであり、 $3^2 \times 2^6$ 要素をもつ。この要素の中で非零の要素は 135 要素である。また、式 (21) に示す (2, 6) の幾何拘束では 1 組の対応関係から 3 本の式が得られるが、そのうち独立な式は 2 本である。したがって、画像中の 67 点の座標情報と輝度情報より $\mathcal{F}_{acdefgh}^y$ を線形に求めることができる。

このようにして $\mathcal{F}_{acdefgh}^y$ 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、 $\mathcal{F}_{acdefgh}^y$ と 2 台のカメラにおける投影点 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ 、及び五つの異なる光源下における輝度 i_1, \dots, i_5 が既知の場合には、式 (21) より 6 番目の光源下での輝度 i_6 を推定することができる。また、 $\mathcal{F}_{acdefgh}^y$ と第 1 カメラの投影点 \mathbf{x}_1 、及び六つの異なる光源下における輝度 i_1, \dots, i_6 が既知の場合には、式 (21) より第 2 カメラにおける投影点 \mathbf{x}_2 を推定することができる。この点変換は従来の幾何情報のみのカメラ 2 台における 2 視点幾何拘束では不可能であったが、輝度情報を加えることで新たに実現可能となった。

4.4 五つの複合多視点幾何拘束の一般特性

4.2, 4.3 ではそれぞれ (1, 7), (2, 6) の幾何拘束について説明を行った。ここでは、残り三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。

表 1 複合多視点幾何の一般特性

Table 1 Specifications of mixed multiple view geometries.

(N_Q, N_L)	テンソル	要素数 (非零)	式数/点	最小点数
(0, 9)	$\mathcal{Z}_{abcdefghj}$	$2^9(126)$	1 本	125 点
(1, 8)	$\mathcal{D}_{bcdefghj}^y$	$3 \times 2^8(210)$	2 本	105 点
(1, 7)	$\mathcal{C}_{abcdefgh}$	$3 \times 2^7(105)$	1 本	104 点
(2, 6)	$\mathcal{F}_{acdefgh}^y$	$3^2 \times 2^6(135)$	2 本	67 点
(3, 6)	$\mathcal{T}_{defghj}^{suy}$	$3^3 \times 2^6(405)$	8 本	51 点

$$i_1^a i_2^b i_3^c i_4^d i_5^e i_6^f i_7^g i_8^h i_9^j \mathcal{Z}_{abcdefghj} = 0 \quad (24)$$

$$x_1^a i_1^b i_2^c i_3^d i_4^e i_5^f i_6^g i_7^h i_8^j \epsilon_{ayz} \mathcal{D}_{bcdefghj} = 0_z \quad (25)$$

$$x_1^a x_2^b x_3^c i_1^d i_2^e i_3^f i_4^g i_5^h i_6^j \epsilon_{ast} \epsilon_{buv} \epsilon_{cyz} \mathcal{T}_{defghj}^{suy} = 0_{tvz} \quad (26)$$

ここで、式 (24) は (0, 9) の幾何拘束、式 (25) は (1, 8) の幾何拘束、式 (26) は (3, 6) の幾何拘束を表している。

次に、五つの幾何拘束についてテンソルの要素数、対応点 1 組が得られた際の線形独立な式数、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。

なお、全てのテンソルについて、 \mathbf{F} 行列における rank2 制約のような拘束条件が存在する。そのため、各テンソルの自由度は表 1 に示した非零の要素数よりも小さい。そのため、安定な推定を行うためにはこれらの拘束を考慮する必要があるが、これについては今後の検討課題とする。

以上により、近似輝度モデルを用いた場合に輝度情報と幾何情報の間に成立する複合多視点幾何拘束について述べた。以降では、ここで提案した幾何拘束を用いたいくつかの実験結果を示すことにより、幾何拘束の有効性を示すとともに、その特性について議論を行う。

5. (1, 7) の幾何拘束による輝度推定実験

5.1 実験環境

本節では、(1, 7) の幾何拘束、すなわちカメラ 1 台と七つの異なる光源に関する幾何拘束を取り上げ、これを用いて輝度変換を行った実験結果を示す。

まず、実験に用いた環境を示す。図 6 に示すように対象物体及びカメラを配置して撮影された画像を用いて実験を行った。電球を動かしながら撮影を行うことにより、照明環境の異なる 7 枚の画像を取得した。対象物体には石膏製の円錐、球、彫像を用いた。画像中の円錐及び球の部分を用いてテンソルの計算を行い、

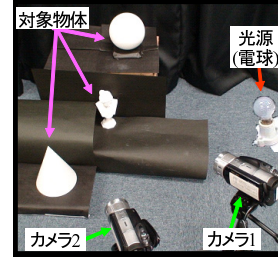


図 6 実験環境

Fig. 6 Experimental environment.

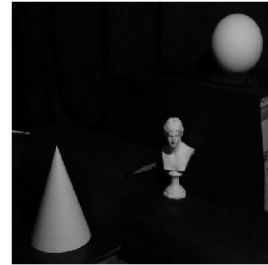


図 7 撮影画像例

Fig. 7 An example of experimental image.

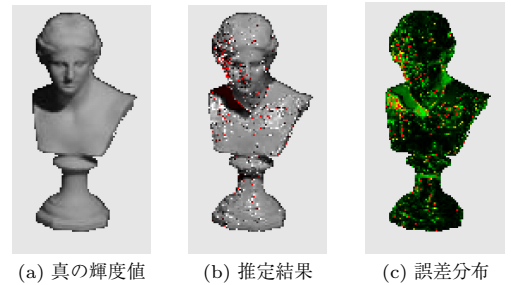


図 8 輝度推定結果と誤差分布

Fig. 8 Estimated result (b) and its errors (c).

画像部分を用いて評価を行った。撮影された画像の例を図 7 に示す。

5.2 輝度推定の実験結果

本実験では 4.2 で示した輝度変換を用いて輝度推定を行った。まず円錐と球の画像点座標と七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 $\mathcal{C}_{abcdefgh}$ を求めた。次に、求められた $\mathcal{C}_{abcdefgh}$ と彫像の画像点座標、六つの異なる光源下における彫像の輝度情報から、図 8 (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画素ごとに表した画像であり，ここではこれを誤差分布と呼ぶ．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ほど，色が明るくなっている．つまり，全体が黒いほど，推定結果が良いことを表している．また，本実験では，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' を用いた．

$$E' = \frac{1}{N - N_{out}} \sum_{k=1}^{N - N_{out}} |i_k - \hat{i}_k| \quad (27)$$

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， N_{out} ははずれ値の数を表しており， $|i_k - \hat{i}_k|$ がしきい値を超える画素の画素数である．彫像の画素数 N は 4,539 画素であり，しきい値は 128 とした．

図 8 の推定結果では平均輝度誤差 $E' = 20.9$ ，はずれ値の数は $N_{out} = 281$ 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れていることが見て取れる．これは，テンソルの自由度が推定している非零の要素数と比べて大幅に小さいため，テンソルの推定が不安定になっていることが原因であると考えられる．また，入力画像中には近似輝度モデルでは表現不可能な attached shadow や cast shadow などの非線形成分が多く含まれる．このような非線形成分についても推定を不安定にする一つの要因となっていると考えられる．

5.3 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について考える．ここでは複数の $C_{abcdefgh}$ をあらかじめ求めておき，これを利用して安定化を行った．各テンソル C は画像中からランダムに選択された 104 点から計算した． C を α 個計算しておき，各テンソルごとに輝度変換を行い，求められた輝度値の中央値を推定結果とした．テンソルの数 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．また，図 10 に平均輝度誤差及びはずれ値の数と，繰返し回数 α の関係を示す．

図 9 より， α が大きくなるほど，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， α が大きくなるに

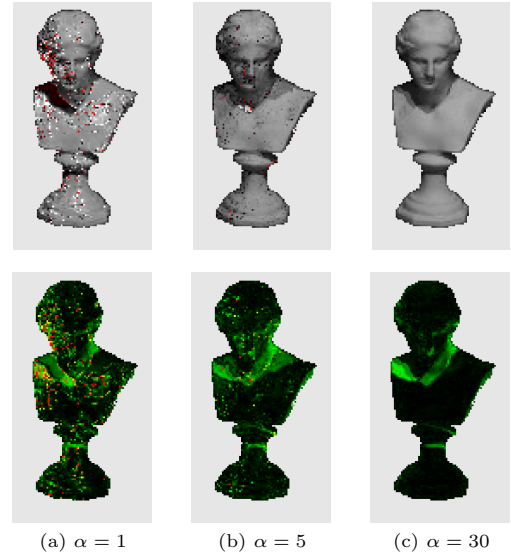


図 9 推定に用いるテンソルの数 α による推定結果の違い
Fig.9 Estimated results and errors for each α .

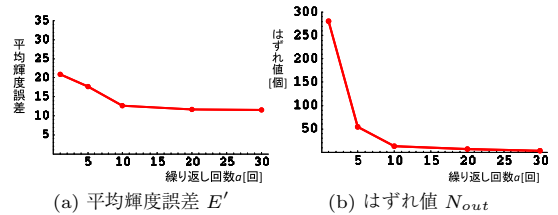


図 10 繰返し回数 α による精度

Fig.10 Relationship between α and estimated errors.

つれて誤差分布全体が黒くなっていることから確認できる．また，図 10 から， α を増加させることにより，はずれ値，推定誤差がともに減少していることが確認できる．これは，複数のテンソルを用いて推定を行うことにより，attached shadow や cast shadow の影響が少ないテンソルを選択できたことも要因の一つであると考えられる．

なお， $\alpha = 30$ 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．見方を変えれば，これらの領域については非線形な成分を線形成分により置き換えている，すなわち近接光源画像における画像の線形化 [17] を実現しているとも考えられる．このような画像の線形化は，相互反射や影領域，鏡面反射の検出などへの応用が期待できる．

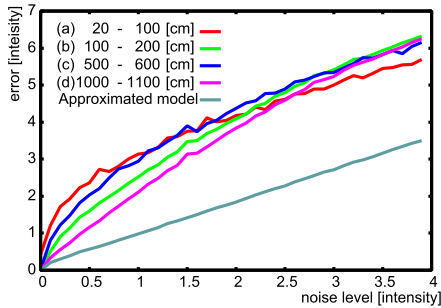


図 11 輝度変換におけるノイズの影響

Fig. 11 Relationship between intensity transfer and intensity noise.

5.4 (1, 7) の幾何に関する評価実験

次に、コンピュータ上で合成したシミュレーション環境を用いて、提案法の評価を行った。対象シーンには $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ の立方体中にランダムな位置、法線をもつ点を 1000 点配置し、これをカメラで撮影することにより得られた画像を用いて実験を行った。各点の観測輝度は式 (1) による負の値を含む一般輝度モデルに従うものとした。また、オクルージョンや影 (cast shadow) については発生しないものとした。

まず、光源の距離が輝度変換に与える影響について調べた。光源は点が配置された立方体の中心から (a) 20~100 cm, (b) 100~200 cm, (c) 500~600 cm, (d) 1000~1100 cm の距離の範囲にランダムに配置した。このようにして式 (1) により作成された輝度に正規分布ノイズを印加し、ノイズの標準偏差を変化させて供試画像を生成した。また、比較のために式 (2) の近似輝度モデルを用いて供試画像を生成した場合についても同様の実験を行った。テンソルの計算には 1000 点中の 500 点を用いた。この 500 点からランダムに 400 点を選択しテンソルを計算した。このとき選択する点を変更しながら計算を行い、51 種類のテンソルを求めた。この 51 種類のテンソル全てを用いて輝度変換を行い、その中央値を輝度変換の結果とした。このような処理を各ノイズ標準偏差ごとに 50 回ずつ行い、その平均誤差を調べた。図 11 に輝度変換の結果とノイズの関係を示す。

まず、供試画像生成に近似輝度モデルを用いた場合の結果に着目すると、ノイズの標準偏差が大きくなるにつれて誤差が線形に増加していることが確認できる。これは、輝度が近似輝度モデルにより表現される場合、提案法によりこれを完全に表現可能であり、その結果、

ノイズが幾何関係の推定に大きな悪影響を与えなかったためと考えられる。

次に、供試画像の生成に一般輝度モデルを用いた場合の結果に着目すると、ノイズが 0 の場合でも全ての距離において推定誤差が発生することが確認できた。これは、近似輝度モデルでは一般輝度モデルを完全に表現することができないためである。この際、光源との距離が遠くなるにつれて誤差が小さくなることが確認できた。これは、光源の距離が遠くなることにより近似輝度モデルの近似精度が向上したためと考えられる。また、ノイズが 0 以外の箇所については、ノイズの標準偏差が小さい場合には光源と対象の距離が長い場合の方が誤差が小さくなっていることが分かる。これは、2.2 でも述べたとおり、距離が大きくなるにつれて近似輝度モデルと一般輝度モデルの差が小さくなることに起因している。しかし、ノイズの標準偏差が大きくなると、距離が小さい場合の方が誤差が小さくなる場合が存在する。これは、画像中のノイズが大きくなると、近似輝度モデルと一般輝度モデルの差分よりも画像ノイズの影響の方が大きくなるためであると考えられる。

6. (2, 6) の幾何に関する評価実験

次に、コンピュータ上で合成したシミュレーション環境を用いて、(2, 6) の幾何に関する評価を行った。この実験では、2 台のカメラ間で 4.3 で述べた点変換を行うことにより、幾何の安定性評価を行った。対象シーンは 5.4 の実験と同様のものとした。実験に使用する 2 台のカメラはシーンの中心から 10~20 cm の距離にランダムに配置した。また、これらのカメラの光軸はシーンの中心を向くように設定した。シーン中の点配置、光源の位置、カメラの位置をランダムに変更しながら実験を行い、(2, 6) の幾何におけるノイズ及び光源位置が座標変換に与える影響を調べた。光源位置は 5.4 と同様に、(a) 20~100 cm, (b) 100~200 cm, (c) 500~600 cm, (d) 1000~1100 cm の範囲で移動させた。

まず、幾何計算に用いる対応点の座標誤差が変換に与える影響を調べた。この実験では、輝度に印加するノイズを 0 に固定し、対応点座標のみにノイズを印加した。図 12 にその結果を示す。

この結果より、光源と対象の距離が遠い場合の方が変換誤差が小さいことが確認できる。これは、光源距離が離れることにより近似輝度モデルの近似誤差が小

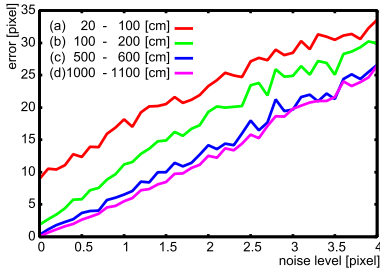


図 12 点変換における座標ノイズの影響

Fig. 12 Relationship between point transfer and point noise.

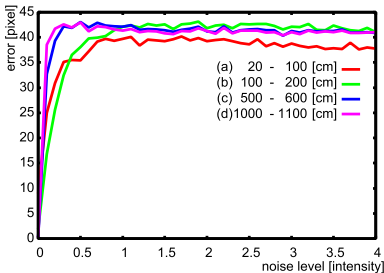


図 13 点変換における輝度ノイズの影響

Fig. 13 Relationship between point transfer and intensity noise.

さくなったためと考えられる。また、座標ノイズの標準偏差が大きくなると、どの光源距離についても変換誤差がほぼ線形に増加していることが分かる。これは、カメラによる投影には近似輝度モデルが影響を与えないため、ノイズの影響が大きく表れなかったためと考えられる。

次に、輝度誤差が変換に与える影響について調べた。この実験では、座標に印加するノイズを 0 に固定し、輝度に印加するノイズの標準偏差を変化させることによりその影響を調べた。図 13 にその結果を示す。

図 13 から分かったとおり、この結果では光源の距離が遠い場合には、ノイズの標準偏差が小さな場合でもその影響が顕著に表れており、適切な推定が行えない。これは、通常のカメラ間に成立する幾何拘束に比べて、光源とカメラの間に成立する幾何拘束が弱く、推定が不安定になった結果と考えられる。特に、光源が対象から遠い場合にはその影響が顕著に表れている。これは、光源と対象の距離が大きくなった場合には光源環境が平行光に近づくため、3 次元位置が輝度に与える影響が小さくなり、ノイズが与える影響が相対的に大きくなるためと考えられる。このような場

合、法線方向を主に利用して行われる輝度変換ではノイズの影響が少なくなるが、3 次元位置に依存して行われる座標変換ではノイズの影響が顕著に表れる。そのため、提案した幾何関係を利用する場合には、近似輝度モデルが破綻しない範囲で、ある程度光源を対象に近づけるなど、対象と光源の位置を適切に設定する必要があるといえる。

7. む す び

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。更に、カメラ 1 台と 7 個の光源が存在する場合の (1, 7) の幾何拘束による輝度推定実験についても行い、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。また、シミュレーション環境を利用した実験により、提案法の評価を行った。

今後は、非線形な依存関係や attached shadow, cast shadow などの線形成分の影響を考慮したテンソルの推定方法を検討する。また、適切なテンソル推定を行うための条件についてより詳細な解析を行うとともに、提案法の適用範囲に関する検討を行う。更に、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。

文 献

- [1] R. Hartley and A. Zisserman, Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press, 2000.
- [2] L. Wolf and A. Shashua, "On projection matrices $P^k \rightarrow P^2, k = 3, \dots, 6$, and their applications in computer vision," Proc. 8th International Conference on Computer Vision, vol.1, pp.412–419, 2001.
- [3] P. Sturm, "Mixing catadioptric and perspective cameras," Proc. Workshop on Omnidirectional Vision, 2002.
- [4] K. Kozuka and J. Sato, "Multiple view geometry for mixed dimensional cameras," Proc. Third International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP2008), vol.1, pp.5–12, 2008.
- [5] H. Hayakawa, "Photometric stereo under a light source with arbitrary motion," J. Opt. Soc. Am. A, vol.11, no.11, pp.3079–3088, 1994.

- [6] R. Zhang, P. Tsai, J. Cryer, and M. Shah, "Shape from shading: A survey," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.21, no.8, pp.690-706, 1999.
- [7] 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, pp.19-26, 1996.
- [8] 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?," 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2007), pp.153-160, 2007.
- [9] K. Takata and K. Nobori, "Photometric linearization under near point light sources," IEICE Trans. Inf. & Syst., vol.E89-D, no.7, pp.2004-2011, July 2006.
- [10] T. Okabe and Y. Sato, "Effects of image segmentation for approximating object appearance under near lighting," Proc. Asian Conference on Computer Vision (ACCV2006), vol.1, pp.764-775, 2006.
- [11] K. Hayakawa and J. Sato, "Multiple view geometry in the space-time," Proc. Asian Conference on Computer Vision, pp.437-446, 2006.
- [12] C. Wan and J. Sato, "Multiple view geometry under projective projections in space-time," IEICE Trans. Inf. & Syst., vol.E91-D, no.9, pp.2353-2359, Sept. 2008.
- [13] T. Higo, Y. Matsushita, N. Joshi, and K. Ikeuchi, "A hand-held photometric stereo camera for 3-d modeling," Proc. 12th International Conference on Computer Vision (ICCV2009), pp.1234-1241, 2009.
- [14] A. Maki, M. Watanabe, and C. Wiles, "Geotensity: Combining motion and lighting for 3d surface reconstruction," Proc. 6th International Conference on Computer Vision (ICCV1998), pp.1053-1060, 1998.
- [15] T. Migita, S. Ogino, and T. Shakunaga, "Direct bundle estimation for recovery of shape, reflectance property and light position," Proc. European Conference on Computer Vision (ECCV2008), pp.412-425, 2008.
- [16] T. Migita, K. Sogawa, and T. Shakunaga, "Specular-free residual minimization for photometric stereo with unknown light sources," Proc. Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology 2011, vol.1, pp.178-189, 2011.
- [17] 向川康博, 石井育規, 尺長 健, "画像の線形化による光学現象の解析," 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, vol.45, SIG8 (CVIM9), pp.40-52, 2004.

(平成 24 年 2 月 3 日受付, 6 月 11 日再受付)



坂上 文彦 (正員)

平 15 岡山大学大学院博士前期課程了。平 18 同大学院博士後期課程了。平 18 より名古屋工業大学助手。平 19 より名古屋工業大学助教。コンピュータビジョン, パターン認識に関する研究を行っている。博士 (工学)。



加藤 一樹

平 19 名工大・工・情報工学卒。平 21 同大学院情報工学専攻修士課程了。在学中, コンピュータビジョンに関する研究に従事。



佐藤 淳 (正員)

昭 59 名工大・工卒。平 8 ケンブリッジ大大学院博士課程了。同年ケンブリッジ大・工・助手。平 10 名工大・工・助教授。平 16 より同大学院情報工学専攻・教授。この間に, ATR 人間情報通信研究所客員研究員等, コンピュータビジョン, 視覚誘導, 視覚的ユーザインタフェースの研究に従事。博士 (Ph.D.)。著書に「コンピュータビジョン—視覚の幾何学—」(コロナ社)等。BMVC'94 最優秀科学論文賞, BMVC'97 最優秀科学論文賞, 第 5 回画像センシングシンポジウム論文賞等受賞。IEEE 会員。