

近接光源下における物体の見えの近似のための画像分割

岡部 孝弘[†] 佐藤 洋一[†]

近接光源下における物体の見えは、光源の方向と光源までの距離が物体表面上で変化するために、解析が容易ではない。ところが、物体表面上の微小領域に注目すると、領域内では光源の方向と距離の変化が小さいため、遠方光源を仮定した技術を適用することができる。本論文では、近接光源下における物体の見えを近似するための画像分割について、次の2つの考察を行う。第1に、近接光源下の物体の画像を矩形に分割した場合の近似精度を実験的に評価し、画像分割そのものの効果を確認する。第2に、近接光源下における物体の見えを近似するための画像分割法を提案する。提案手法では、物体と光源分布の特性に応じて、近似の意味で適切な分割を設計する。

Image Segmentation for Approximating Object Appearance under Near Lighting

TAKAHIRO OKABE[†] and YOICHI SATO[†]

Shading analysis of an object under near lighting is not an easy task, because the direction and distance of the light source vary over the surface of the object. Observing a small area on the surface, however, techniques assuming far lighting are applicable, because variations of the direction and distance are small in the area. In this paper, we present two contributions to image segmentation for approximating object's appearance under near light sources. First, we experimentally evaluate the accuracy of approximations using rectangular segmentation for images of objects under near light sources, and confirm the effects of image segmentation itself. Second, we propose a novel segmentation method for approximating images under near light sources. Our proposed method plans appropriate segmentations in terms of approximation accuracy, considering properties of objects and variable illumination conditions.

1. ま え が き

照明が物体の見えに与える影響に関する研究は、コンピュータビジョンの主要な研究課題の1つである。過去10年間を振り返ると、遠方光源を仮定した物体の見えの解析は、目覚ましい発展をとげたといえる。

たとえば、Shashua²⁸⁾は、平行光線下におけるLambert物体の画像を、3枚の基底画像を用いて表現した。また、Belhumeurら⁵⁾は、凸物体かつLambertモデルを仮定した場合に、任意の平行光線下においてとりうる画像集合が、最少で3枚の画像から構築される凸錐(照明錐)に拘束されることを示した。さらに、Ramamoorthiら²²⁾とBasriら²⁾は、球面調和関数を用いた周波数解析から、照明錐が4枚から9枚の基底画像の線形結合で近似的に表現されることを明らかにした。これらの解析に基づいて、顔認識^{2),6),11),19),20)}、照度差ステレオ¹⁾、shape from mo-

tion^{8),15),30),33)}、forward rendering^{24),26),31)}、および、inverse rendering^{18),23)}などに関する様々な手法が提案されてきた。

我々は、遠方光源を仮定した解析を発展させるといふ意味で、近接光源が物体の見えに与える影響について再考するよい時期が訪れたと考えている。単一点光源に照らされた物体を考えると、物体から光源までの距離 d が物体の大きさ s よりも十分に大きい場合($s \ll d$)、この光源は遠方光源、すなわち、平行光線と見なすことができる。一方、光源までの距離が物体の大きさよりも小さい場合($s > d$)、および、両者がほぼ等しい場合($s \sim d$)には、この光源を近接光源として取り扱う必要がある。近接光源下における物体の見えは、光源の方向と光源までの距離が物体表面上で変化するために、解析が容易でないことが知られている。

本研究の基本的な着想は、近接光源下において撮影された画像を分割することで、あたかも遠方光源下において撮影された画像のように扱う点にある。つまり、物体表面の微小領域に注目すると、その大きさ Δs は、

[†] 東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

たとえ物体の大きさが光源までの距離よりも大きい場合でも、光源までの距離よりも十分に小さくすることができる ($\Delta s \ll d$)。したがって、物体表面上の各微小領域に対して、遠方光源を仮定した技術を適用することができる。このように、画像分割は、近接光源下における物体の見えを扱うのに適した手法の1つであると考えられる。

明らかではあるが、画像の分割数を増やせば増やすほど、分割された各領域において平行光線の近似がより正確になる。しかしながら、遠方光源を仮定した技術を適用するために単に分割数を増やすということは、実用上望ましくない。たとえば、画像合成³¹⁾においては、分割数の増加にともない、計算時間が増大する。また、部分空間に基づく顔認識^{2),11)}では、分割数を増やすにつれて、識別性能が低下することがありうる。これは、分割数の増加にともない、テスト画像を同一人物の部分空間に射影したときに近接光源の影響で生じる誤差だけでなく、他人の部分空間に射影したときに生じる誤差もまた小さくなるためである。さらに、分割された各領域が微小平面に近づくにつれて、光源推定¹⁶⁾などの inverse rendering は不良条件 (ill-conditioned) に陥りやすくなる。

そこで本論文では、近接光源下において撮影された画像に対して平行光線を仮定した技術を適用するためには、どのように画像を分割するべきかという問題について議論する。具体的には、近似の意味で最適な主成分分析との類推から、近接光源下における物体の見えを近似するための画像分割法を提案する。提案手法では、分割数が与えられているとして、遠方光源下と近接光源下における物体の見えの差に基づいて、近似の意味で最適な画像分割を求める。我々の手法は、物体と光源分布の特性を考慮したうえで適切な分割を求める点が特長である。

本研究の主要な貢献は、以下の2つにまとめられる。第1に、近接光源下における物体の画像を矩形に分割した場合の近似精度を実験的に評価し、画像分割そのものの効果を確認する。我々の知る限り、近接光源下における物体の見えの近似については、単純な矩形分割の効果でさえ、これまでに報告されていない。第2に、近接光源下における物体の見えを近似するための画像分割法を提案し、合成画像と実画像を用いた実験からその有効性を示す。

本論文の構成は以下のとおりである。まず、2章で関連研究をまとめる。次に、3章で、近接光源下における物体の見えを近似するための画像分割法を提案する。4章で矩形分割と提案手法で得られる分割の効果

を確認した実験結果を報告し、5章で結ぶ。

2. 関連研究

近接光源下における物体の見えの解析に関しては、2つの異なるアプローチが可能である。1つは、物体表面の輝度と深さなどを関係付ける非線形方程式を明示的に解く直接的アプローチである。他方は、近接光源下における物体の見えを近似的に表現する間接的アプローチである。

2.1 直接的アプローチ

近接光源下における物体表面の輝度は、物体表面の位置(深さ)や光源の位置などについての非線形関数で表現される。我々は、物体表面の輝度と深さや光源位置などを関係付ける非線形方程式を明示的に解くアプローチを、直接的アプローチと呼ぶ。このアプローチは、主に、非線形方程式をいかに安定に解くかという論点から研究されてきた。

Iwahori ら¹³⁾は、既知の単一点光源下で撮影した画像列から、Lambert 物体の法線ベクトルと深さを獲得するための手法を提案した。彼らは、物体表面で輝度がピークとなる点における法線ベクトルの方向に光源が存在することを利用して、深さについての非線形方程式を解いている。また、Kim ら¹⁴⁾は、点光源の配置と非線形方程式の解の一意性の関係について考察している。さらに Clark⁷⁾は、単一点光源の運動を利用した照度差ステレオを提案した。彼は、光源位置の変化にともなう物体表面の輝度の変化に着目して、深さについての線形方程式を導いている。

最近、Hara ら¹²⁾は、inverse rendering の枠組みで、点光源の位置と物体の反射特性を同時に推定する手法を提案した。彼らは、物体表面で鏡面反射成分の輝度がピークとなる点の幾何学的性質を利用するとともに、対数変換により線形化した Torrance-Sparrow モデルを用いている。また、Takai ら³²⁾は、2個の Lambert 球を用いることで、近接光源だけでなく遠方光源も存在するようなシーンにおいても、近接光源の位置を安定に推定している。

このように、直接的アプローチは、物体や光源のモデリングに関して一定の成果を収めている。しかしながら、これらの手法は点光源などの比較的単純な光源を仮定しており、面光源などの複雑な光源の取扱いには検討の余地がある。

2.2 間接的アプローチ

非線形関数を明示的に扱う直接的アプローチに対して、間接的アプローチでは、近接光源下における物体の見えを近似的に表現する。まえがきで述べたように、

画像分割は、近接光源下の画像を近似するのに適した手法の1つであると考えられる。

近接光源下における物体の見えを扱うために画像を分割するという着想は、必ずしも新しいものではない。Zhaoら^{34),35)}は、mosaic image methodを提案し、オクルージョン、鏡面反射成分、および、影などの外れ値に対して頑健な主成分分析を実現している。この手法は、画像を矩形領域に分割したのち、各矩形領域に対して主成分分析を適用するものである。彼らは、画像を分割することにより、平行光線の仮定がより正確になるということにも言及している。しかしながら、彼らの研究の主眼はオクルージョンや影に対して頑健な主成分分析の実現にあり、近接光源下における物体の見えに対する画像分割の効果については考察されていない。

画像の分割は、照明変化をとまなう顔認識にも利用されている。複数の平行光線に照らされた顔を考えて、顔の表面上で法線方向が類似の点は、類似の平行光線の組に照らされる。この着想に基づいて、Baturら³⁾は、画像を法線ベクトルが類似の画素からなる小画像に分割して、各小画像に対して線形部分空間法²⁸⁾を適用した。Sakaueら²⁵⁾もまた、矩形分割と主成分分析を組み合わせた顔認識手法を提案している。ところが、これらの研究の目的は平行光線下で生じる陰に対して頑健な顔認識を実現することにあり、近接光源の影響については議論されていない。

また、最近、佐藤ら²⁷⁾は、矩形分割による近接光源の取扱いの応用例として、反射成分の分離への適用の可能性を検討している。具体的には、矩形分割を組み合わせることで、画像の線形化¹⁷⁾の仮定を、単一平行光線から単一点光源に緩和している。しかしながら、画像を一定の大きさの矩形領域に分割する彼らの手法には限界がある。たとえば、光源に近い領域や深さの変化の大きい領域では、領域内における光源の方向と距離の変化が大きくなるために、そもそも平行光線の仮定が成り立つとは限らない。

最近になって、近接光源下における物体の見えを近似するための新たな手法が、Frolovaら¹⁰⁾によって提案された。平行光線下のLambert物体の画像は、球面調和関数の低次項を用いて近似的に表現できることが知られている^{2),22)}。これに対して、彼らは、近接光源による影響を球面調和関数の高次項を用いて表現している。球面調和関数の高次項を用いた手法は、近接光源下における球の画像に対してうまく働くことが報告されている。しかしながら、この手法は、平面のような物体に対して適用することができない。なぜなら

ば、球面調和関数により構成される基底画像は物体表面の法線ベクトルの関数であることから、平面の基底画像は定数倍の自由度を除いてすべて等しくなるためである。

3. 提案手法

本章では、近似の意味で適切な画像分割を設計するための手法を提案する。

3.1 概要

提案手法は、視点位置および物体姿勢を固定として、様々な照明条件下で撮影された画像列を対象とする。本手法では、物体の形状と反射特性は既知とする。さらに、光源分布の変動に関する統計的特性も既知とする。なお、議論を簡単にするために、光源分布は点光源集合で表現されるものとする。

対象物体の画像を c 個の領域に分割するものとして、いずれかの領域に属する物体表面上の点について考える。物体表面上の点 p が、点 P_i を中心とする i 番目の領域 D_i に属する場合に、点 p における見えの近似誤差を $\text{err}(p, P_i)$ と表す。提案手法では、近似の意味で最適な分割を設計するために、評価関数

$$J = \sum_{i=1}^c \sum_{p \in D_i} \text{err}(p, P_i) \quad (1)$$

を最小化する。

まず、3.2節で、単一点光源に照らされたシーンの誤差関数 $\text{err}(p, P_i)$ を定義する。次に、3.3節で、照明変化をとまなうシーンに議論を拡張する。最後に、3.4節で、k-means クラスタリング⁹⁾に基づいた分割アルゴリズムを提案する。

3.2 誤差関数 I: 単一点光源

単位輝度の明るさを持つ単一点光源に照らされた物体を考え、物体表面上の点 p 、領域 D_i の中心 P_i 、および、点光源の位置をそれぞれ x 、 X 、および、 R とする(図1)。Lambertモデルを仮定すると、点 p における輝度 I は、光源からの距離の二乗に反比例する照度の減衰を考慮して、

$$I = \frac{1}{|R-x|^2} \times \rho n \cdot \frac{(R-x)}{|R-x|} S_{n,R-x} \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 ρ と n は、点 p におけるア

本研究では等方的な光源を仮定し、プロジェクタのような非等方的な光源は考慮しない。

本研究の目的は画像の近似であるため、物体表面上ではなく画像平面上において、近似誤差 $\text{err}(p, P_i)$ の和をとる。

鏡のような極端な例を除けば、以下の議論は他の反射モデルにも容易に拡張できる。

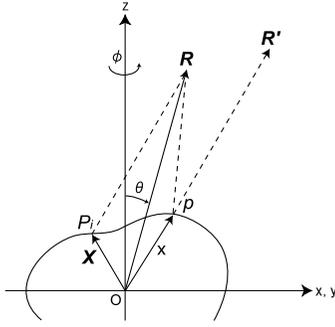


図 1 座標系

Fig.1 Coordinate system.

ルビドと法線ベクトルである．係数 $S_{n,R-x}$ は, attached shadow (陰) と cast shadow (影) を表す．すなわち, $n \cdot (R - x) < 0$ または点 p から見た光源方向 $(R - x)$ が物体により遮蔽されている場合に $S_{n,R-x} = 0$, それ以外の場合に $S_{n,R-x} = 1$ とする．

領域 D_i の内部で平行光線の仮定が近似的に成り立っているとすると, 点 p から見た点光源の位置 $(R - x)$ を, 領域中心 P_i から見た点光源の位置 $(R - X)$ に置き換えても, 点 p の輝度は大きく変化しないと考えられる．いい換えれば, 点 p は, $R' = x + (R - X)$ に位置する点光源に照らされていると見なすことができる．そこで, 平行光線の仮定を課したときの点 p における輝度 I' を

$$I' = \frac{\rho n \cdot (R - X)}{|R - X|^3} S_{n,R-X} \quad (3)$$

として, 単一点光源に照らされたシーンの誤差関数を $\text{err}(p, P_i) = (I - I')^2$ (4) と定義する．

3.3 誤差関数 II: 一般光源分布

提案手法の目的は, 様々な照明条件下で撮影された物体の画像列に対して近似誤差を最小化することにある．照明変動をともなうシーンにおいては, 3次元座標 r における光源の平均輝度を $L(r)$ とすると, 式 (4) で定義された単一点光源下の誤差関数を $L(r)$ の重みで足し合わせることで, 誤差関数を定義することができる．たとえば, 距離 $|R| = R$ の位置に存在する光源に照らされた物体の誤差関数は, $\int_0^{2\pi} \int_0^\pi (I - I')^2 L(R, \theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi$ のような積分で与えられる．ここで, $L(R, \theta, \phi)$ は, 極座標で表現された光源の平均輝度分布である．同様に, 物体から光源までの距離の変化も考慮することができる．

しかしながら, この拡張は, 計算コストの面で実用的ではない．後述の画像分割アルゴリズムでは, 反復処理の過程で必要となるたびに上記の積分を数値的に

求めるか, これらの積分をあらかじめ計算しておく必要がある．あらかじめ計算する場合には, 被積分関数が点 p と領域中心 P_i の両方に依存するため, すべての画素の組合せについて, つまり, N 画素の画像に対して $O(N^2)$ 個の積分を計算する必要がある．したがって, このような単純な拡張は, 膨大な計算時間または大量の記憶容量を必要とする．

そこで, $(I - I')$ を $|R| > |x|$ および $|R| > |X|$ の条件の下でテーラー展開して, 平行光線の仮定が成り立たなくなるときの一次の効果

$$I - I' \simeq \frac{\rho}{R^3} \left(\frac{3R \cdot n}{R^2} R - n \right) \cdot (x - X) S_{n,R} \quad (5)$$

に着目する．

その結果, 誤差関数は,

$$\text{err}(p, P_i) = \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 g_{jk} (x_j - X_j) (x_k - X_k) \quad (6)$$

のように表現される．これは, 誤差関数, つまり, 点 p と点 P_i の間の“距離”を, ユークリッド計量 ($g_{jk} = \delta_{jk}$) ではなく, 物体や光源分布の性質に基づいて

$$g_{jk} \equiv \frac{\rho^2}{R^6} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi \sin\theta d\theta \left(\frac{3R \cdot n}{R^2} R_j - n_j \right) \times \left(\frac{3R \cdot n}{R^2} R_k - n_k \right) S_{n,R} L(R, \theta, \phi) \quad (7)$$

のように定義される“計量” g_{jk} を用いて評価すべきであることを意味している．式 (5) の近似は, 我々の提案手法を簡便にする．式 (7) の被積分関数は領域中心の点 P_i とは独立で点 p のみに依存するため, 後述の画像分割アルゴリズムで必要となる $O(N)$ 個の計量をあらかじめ計算することができる．

3.4 分割アルゴリズム

提案手法では, 表 1 に示すようにして, 式 (1) の評価関数 J を最小化する画像分割を求める．基本的な処理について述べると, まず, 領域中心の初期位置を与える ($l.4$ または $l.6$)．次に, 物体表面上の点 p を, 誤差関数 $\text{err}(p, P_i)$ を P_i について最小化する領域に割り当て ($l.9$), 領域中心を, $\sum_{p \in D_i} \text{err}(p, P_i)$ を最小とする $P'_i \in D_i$ に更新する ($l.10$)．以上の領域への割り当てと領域中心の更新は, 収束するまで繰り返す ($l.11$)．

実験では, 被積分関数の帯域幅を 50 と仮定して, ガウスの求積法²¹⁾により積分を計算した．これは, 被積分関数の値を約 5,000 の方向でサンプルすることに相当している．

表 1 提案手法の擬似コード

Table 1 Pseudo-code of our proposed method.

1	initialize J_{\min}
2	for $i = 1, 2, \dots, (N_{\text{sample}} + N_{\text{resample}})$
3	if $i \leq N_{\text{sample}}$
4	randomly sample center positions
5	else
6	resample center positions
7	end
8	do
9	assign points to domains
10	update center positions
11	while segmentation changes
12	if $J_i < J_{\min}$
13	update the optimal center positions
14	$J_{\min} = J_i$
15	end
16	end

本手法では、局所解の問題を軽減するために、coarse-to-fine の戦略で最適解を探索する。具体的には、上述の過程を繰り返し (l.2), i 番目の反復における評価関数の値 J_i がその時点で最小となった場合に、領域中心の位置の暫定的な最適解を更新する (l.12 ~ l.15)。最初の N_{sample} 回の反復では、疎な探索を行うために、領域中心の初期位置はランダムに選択する。一方、最後の N_{resample} 回の反復では、最適解の周辺で密な探索を行うために、領域中心の初期位置を、暫定的な最適解の周辺から選択する。

4. 実験結果

近接光源下における物体の見えの近似に対する画像分割の効果を確認した実験結果を報告する。実験では、合成画像と実画像の両方を用いた。

4.1 定性的性質

初めに、提案手法により得られる画像分割の定性的性質について述べる。まず、照明条件や物体形状が分割結果に与える影響を調べるために、一様なアルビドを持つ Lambert 球の一部を対象物体として (図 2 左), 3 つの異なる照明条件 (光源の平均輝度分布) に対して近似の意味で適切な画像分割を設計した。球の中心を基準 ($r=0$) として z 軸の正方向 (視線方向) を北極 ($\theta=0$) とする極座標を (r, θ, ϕ) とする。最初の照明条件は, $(r, \theta, \phi) = (2r_s, \pi/4, 3\pi/4)$ に存在する単一点光源である。ここで r_s は球の半径である。第 2 の条件は, $r = R, \pi/6 \leq \theta \leq \pi/2, 0 \leq \phi \leq \pi/2$ の領域内に一様な確率で分布する単一点光源である。

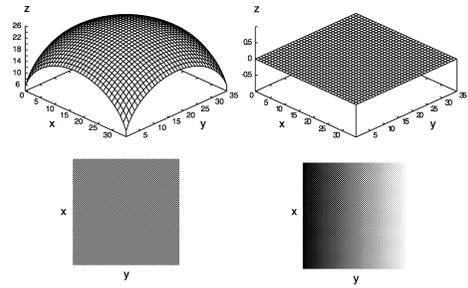


図 2 対象物体の 3 次元形状とアルビド：球 (左) と平面 (右)
Fig. 2 3D shape and albedo of target objects: sphere (left) and plane (right).

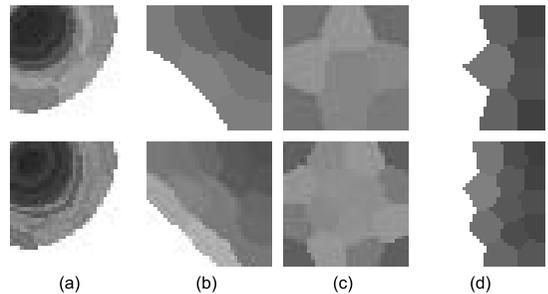


図 3 (a) 単一点光源, (b) 面分布光源, (c) 一様分布光源下における球の分割結果, および, (d) 一様分布光源下における平面の分割結果

Fig. 3 Segmentation results of the sphere under (a) a point light source, (b) a set of point light sources with area distribution, (c) those with uniform distribution, and (d) that of the plane under a set of light sources with uniform distribution.

第 3 の条件は, 式 (7) において $L(R, \theta, \phi)$ 一定, つまり, 球の周りに一様な確率で分布する単一点光源である。この条件は, シーンの光源分布に関する情報が事前に得られない場合を想定したものである。第 1 の照明条件に対しては式 (4) の誤差関数を, 第 2 と第 3 の照明条件に対しては式 (6) の誤差関数を用いた。

図 3 に, 分割結果を濃淡画像で示す。第 1, 第 2, および第 3 の照明条件はそれぞれ (a), (b), および (c) に対応し, 上段 (下段) の分割数は 9 (16) である。各画素の濃淡値は, 各画素の属する領域の大きさ (画素数) に比例している。したがって, 画素が暗ければ暗いほど, その画素は小さな領域に属していることを意味する。ただし, 大きさが平均 ($= N/c$) の領域内にある画素の濃淡値を 128 としたため, 一部の濃淡値は飽和している。

予備実験から, $N_{\text{sample}} = 1,000$ および $N_{\text{resample}} = 9,000$ とした。

第 2 と第 3 の照明条件では, 球の中心から点光源までの距離 R を一定とした。このとき, 評価関数 J から式 (7) の R^{-6} をくり出すことができるため, 分割結果は R の値に依存しない。

次に、アルビドが分割結果に与える影響を調べるために、非一様なアルビドを持つ Lambert 平面を対象物体として (図 2 右), 画像分割を行った. 上述の第 3 の条件と同様に, 平面の中心からの距離が一定の球面上に一樣な確率で分布する単一点光源を考え, 図 3 (d) に示す結果を得た.

これらの結果は, 以下の 4 つの重要な性質を示している.

- 各領域内の点は, ユークリッド距離の意味で, 近接しているとは限らない. 3.3 節で述べたように, 領域の大きさはシーンの幾何学的および光学的特性に応じて変化する.
- 領域の大きさは, 光源に近づけば近づくほど小さくなる. この性質は, 我々の直観と一致する. 領域の大きさの変化は, 分割結果 (a) や (b) が示すように, 光源の平均輝度分布が小さな立体角に集中していればしているほど支配的になる.
- 領域内で深さの変化が大きくなればなるほど, その領域の大きさは小さくなる. これは, 各領域の物理的な面積と画像平面に射影したときの面積の関係に起因する. 分割結果 (c) が示すように, この性質は, 光源の平均輝度分布が等方的である場合に支配的になる. この結果は, 光源推定への応用のように, たとえ光源分布についての事前知識が得られない場合であっても, シーンの深さに基づいて画像を分割すべきであることを示している.
- アルビドの大きい領域はより小さい領域に分割される. 画像の近似誤差の二乗を最小化する提案手法では, 各画素の近似誤差への寄与は, アルビドの二乗に比例する. したがって, 分割結果 (d) に見られる傾向は, 直観的に明らかである.

4.2 近似精度: 合成画像

次に, 近似誤差を厳密に評価するために, 合成画像を用いた実験を行った. 具体的には, 以下に述べるように, 近接光源に照らされた対象物体の拡散反射成分を, 平行光線を仮定した場合の基底画像に射影することで復元して, その誤差を評価した.

N 画素からなる画像の j ($j = 1, 2, \dots, N$) 番目の画素の位置を p_j , 輝度を I_j として, 基底ベクトル b_j を

$$b_j = \rho_j n_j \quad (8)$$

とする. ここで, ρ_j と n_j は, 点 p_j におけるアルビドと法線ベクトルである. 拡散反射成分を復元するために, 残差の二乗和 $\sum_{p_j \in D_i} w_j (I_j - s_i \cdot b_j)^2$ を最小化することにより, i 番目の領域の結合係数 s_i を求めた. ただし, 影を除去するために, $I_j = 0$ ならば $w_j = 0$, それ以外ならば $w_j = 1$ とした. そして, 残

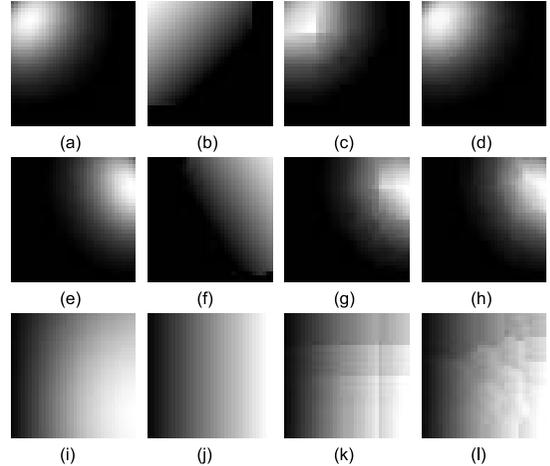


図 4 分割による画像の再現 (合成画像): (a) 球の入力画像, (b) 分割を行わずに復元した画像, (c) 矩形領域に分割して復元した画像, および (d) 提案手法により分割して復元した画像. 中段は異なる照明条件に対する球の画像. 下段は平面の画像

Fig. 4 Reconstruction based on segmentation (synthetic images): (a) an input image of the sphere, reconstructed images (b) without segmentation, (c) with rectangular segmentation, and (d) with the segmentation obtained by using our method. Images in the middle row are those under another illumination condition. Images in the lower row are an input and reconstructed images of the plane.

差の二乗和を画素値の二乗和で割ったもの

$$\epsilon = \frac{\sum_{i=1}^c \sum_{p_j \in D_i} w_j (I_j - s_i \cdot b_j)^2}{\sum_{j=1}^N I_j^2} \quad (9)$$

を近似誤差とした.

一樣なアルビドを持つ球を対象物体とした実験では, 3 つの照明条件を試した. 最初の 2 つの照明条件は, 球の中心を基準とする極座標で, $(2r_s, \pi/4, 3\pi/4)$ および $(3r_s, \pi/4, 3\pi/4)$ の位置にある単一点光源である. 第 3 の照明条件は, 球の中心からの距離 r が一定で, $\pi/6 \leq \theta \leq \pi/2$, $0 \leq \phi \leq \pi/2$ の領域内に一樣な確率で分布する単一点光源である. 画像のサイズは 36×36 画素で, 分割数は 1, 4, 9, 16, および 36 とした. 矩形分割においては, 画像を 2×2 , 3×3 , 4×4 , および 6×6 の正方形ブロックに分割した.

第 1 の照明条件の下で対象物体の画像を合成し, 画像分割と射影によりそれを復元した. 図 4 に, (a) 入力とした合成画像, (b) 分割を行わずに復元した画像, (c) 16 個の矩形領域に分割して復元した画像, および (d) 提案手法により 16 個の領域に分割して復元した画像を示す. 近似誤差と分割数の関係は図 5 (a) に示した. 実線と破線は, それぞれ, 矩形分割と提案手法で得られる近似誤差を表している. まず, 画像を分割

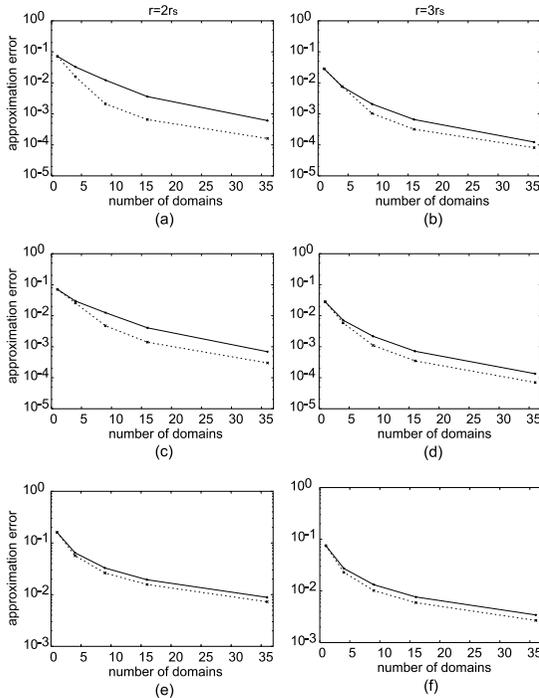


図5 近似誤差と分割数の関係(合成画像): (a)~(d)と(e)(f)は、球と平面の画像に対する結果を示す。照明条件は、(a) 距離 $2r_s$ 、(b) 距離 $3r_s$ に位置する単一点光源、(c) 距離 $2r_s$ 、(d) 距離 $3r_s$ に面分布する単一点光源、および、(e) 距離 $2r_s$ 、(f) 距離 $3r_s$ に一様分布する単一点光源である。なお、実線と破線はそれぞれ矩形分割と提案手法を表す

Fig. 5 Reconstruction error of synthetic images against the number of domains: (a)~(d) and (e)(f) show results for the sphere and plane images. Illumination conditions are a point light source located at (a) $2r_s$ or (b) $3r_s$, a set of point light sources located at (c) $2r_s$ or (d) $3r_s$ with area distribution, and those located at (e) $2r_s$ or (f) $3r_s$ with uniform distribution. The solid and dotted lines represent the errors of rectangular segmentation and our method respectively.

することで、近似誤差が劇的に小さくなっているのを確認することができる。たとえば、36個の矩形領域に分割した場合には、近似誤差は2桁程度も小さくなっている。さらに、提案手法で求めた画像分割は、単純な矩形分割と比較して、近似誤差を数分の1にまで改善している。つまり、我々の提案手法は、より少ない分割数でより高い近似精度を実現している。

同様の実験を行い、第2の照明条件に対する近似誤差を得た(図5(b))。第1の照明条件と比較して、点光源の位置が物体から離れているために、近似誤差は小さくなっている。

第3の照明条件に対しては、 $r = 2r_s$ または $r = 3r_s$ で $\pi/6 \leq \theta \leq \pi/2$, $0 \leq \phi \leq \pi/2$ の領域内に一様な確率で分布する単一点光源下の画像を100枚ずつ合

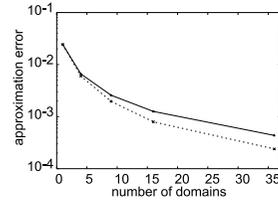


図6 近似誤差と分割数の関係(球の実画像)

Fig. 6 Reconstruction error of images of a plaster sphere against the number of domains.

成して、それらを復元した(図4(e),(f),(g),(h))。図5(c)と(d)に示した平均近似誤差は、第1と第2の照明条件に対する近似誤差と同様に振る舞っている。ただし、単一点光源ではなくある程度の広がりを持った光源分布を扱っているために、図5(a)と比較して、提案手法の近似精度がわずかに低下している。

非一様なアルビドを持つ平面を対象物体とした実験では、平面の中心から距離 r の球面上に一様な確率で分布する単一点光源を考えた。図4(i),(j),(k),(l)と図5(e),(f)の結果は、球を対象とした結果と同様の傾向を示しており、提案手法がアルビドの非一様な物体に対しても有効であることを確認することができる。

4.3 近似精度: 実画像

実画像を用いた実験結果を報告する。実験では、遠方光源および近接光源下の石膏球の画像を、アナログカメラ SONY DXC-9000 とキャプチャボード Matrox Meteor-II を用いて取得した。遠方(近接)光源と石膏球の中心との距離は、石膏球の半径の10倍以上(約2~3倍程度)である。

未知方向の遠方光源下で撮影された12枚の画像にSVDMD(Singular Value Decomposition with Missing Data²⁹)を適用し、石膏球の3枚の基底画像を推定した。近接光源下で撮影した10枚の画像は、画像分割による物体の見えの近似精度を評価するために用いた。なお、シーンの形状および画像のサイズが合成画像を用いた実験と同一になるように、これらの画像から対象領域を切り出して利用した。また、近接光源の位置は、前節の第3の照明条件に従うように、石膏球の右上の空間内で変化させた。

図6に、平均近似誤差と分割数の関係を示す。ただし、陰に対応する画素を取り除くための閾値 T を用いて、式(9)において、 $I_j < T$ ならば $w_j = 0$ 、それ以外ならば $w_j = 1$ とした。まず、図6の平均近似誤差が図5と同様に振る舞っているのが分かる。さらに、我々の提案手法は、矩形分割と比較して、近似精度を40%程度改善していることも確認することがで

きる．以上のことから，画像分割，特に我々の提案手法が，近接光源下における物体の見えを近似するのに有効であるといえる．

4.4 応用への展開

室内環境において頑健な顔認識を実現するためには，電気スタンド，コンピュータのモニター，天井の蛍光灯などの近接光源の影響を考慮する必要がある．本節では，提案手法の応用例として，近接光源下における顔認識への適用について検討する．

本論文ではこれまで対象物体の形状が既知であるとして議論を進めてきたが，顔認識への応用を考えると，この仮定は現実的であるとはいえない．そこで，顔というクラスの特性を利用できるかどうか，つまり，(i) 異なる人物に対する画像分割の結果が類似しているかどうか，および，(ii) 平均顔に対する画像分割の結果が他の人物の画像を近似するのにもうまく働くかどうかの2点を調べるために，3次元形状モデルと実画像を用いた実験を行った．

最初の実験では，Max-Planck Institute for Biological Cybernetics で公開されている顔データベース⁶⁾を利用した．このデータベースは，レーザスキャンにより獲得した4名の顔の3次元形状モデルと平均顔の3次元形状モデルを含んでいる．実験では，机で作業している人の顔が電気スタンドに照らされているような環境を想定した．このとき，対象人物が右利きであれば，顔が(対象人物から見て)左上の方向から照らされていると仮定するのは妥当であると考えられる．そこで，光源の平均輝度分布が，頭部中心からの距離 r が一定で $\pi/6 \leq \theta \leq \pi/2$, $0 \leq \phi \leq \pi/2$ の領域内で一様であるという条件の下で，近似の意味で適切な画像分割を求めた．この照明条件は，4.2節における第3の照明条件と同一である．

図7に，(a) 平均顔と(b)~(e) 4名の顔について，近接光源下における典型的な画像の例と分割結果を示した．各画像のサイズは 54×36 画素で，コーナーの黒い領域は背景である．この図から，分割結果が互いに類似しているのを確認することができる．具体的には，向かって右上に存在する領域は左下に存在する領域よりも小さく，向かって右側に存在する領域は左側に存在する領域よりも小さい．

次の実験では，4.3節の実験と同様にして撮影した

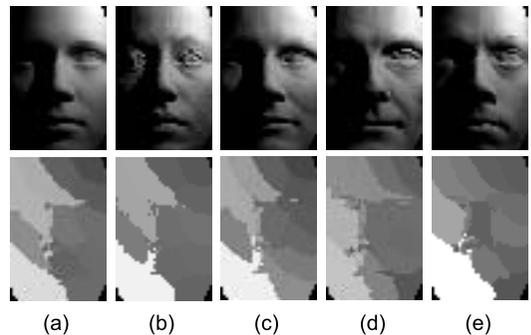


図7 近接光源下における画像の例と分割結果：(a) 平均顔，(b)~(e) 4名の顔モデル

Fig. 7 Images under near light sources and segmentation results: (a) an average face, and (b)~(e) faces of four persons.

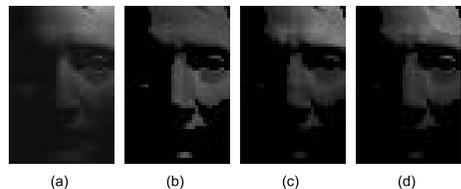


図8 分割による画像の再現(ナポレオン像)：(a) 実画像，(b) 分割を行わずに復元した画像，(c) 矩形領域に分割して復元した画像，および(d) 平均顔に対する分割を利用して復元した画像

ナポレオンの石膏像の画像を用いた．遠方光源下で撮影された12枚の画像にSVDMDを適用し，石膏像の3枚の基底画像を推定した．近接光源下で撮影された10枚の画像は，近似精度の評価に用いた．なお，画像のサイズ，および，両目の位置が平均顔の画像と一致するように，これらの画像から対象領域を切り出して利用した．また，近接光源の位置は，平均顔の画像分割を求める際に仮定した照明条件に従うように，石膏像の右上の空間内で変化させた．

図8に，一例として，(a) 実画像，(b) 分割を行わずに復元した画像，(c) 12個の矩形領域に分割して復元した画像，および，(d) 提案手法により12個の領域に分割して復元した画像を示す．また，平均近似誤差と分割数の関係を図9に示す．実線と破線は，それぞれ，矩形分割と提案手法で得られる平均近似誤差を表している．この図から，平均近似誤差が，図5の近似誤差と同様に振る舞うことが分かる．さらに，平均顔と石膏像の形状が異なり，かつ，相互反射などが存在するにもかかわらず，提案手法は，矩形分割と比較

厳密には，顔認識ではなく顔の見えの近似について議論する．しかしながら，顔画像の近似や圧縮は，固有顔の概念が示すように，認識においても重要であると考えられる．ただし，石膏像の実画像を用いるために，アルビドの影響は考慮しない．

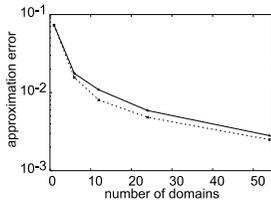


図9 近似誤差と分割数の関係（ナポレオン像）

Fig. 9 Reconstruction error of images of a plaster Napoleon figure against the number of domains.

して、近似精度を20%程度改善していることを確認することができる。

これらの実験結果は、近接光源下における見えを近似するための画像分割として、必ずしも認識対象となる人物ごとに適切な画像分割を求める必要はなく、平均顔に対する画像分割で代用できる可能性があることを示している。したがって、認識対象人物の3次元形状が得られない場合でも、平均顔に対する画像分割と、たとえば、主成分分析に基づく認識手法などを組み合わせることで、近接光源下においても有効な顔認識が実現できるものと考えられる。

5. むすび

本論文では、近接光源下において撮影された画像に平行光線を仮定した技術を適用するための必要条件となる、近似という観点から画像分割を議論した。本研究の主要な貢献は、(i) 近接光源下における物体の見えの近似に対する画像分割の効果を実験的に確認したこと、および、(ii) 物体と光源分布の特性を考慮して近似の意味で適切な画像分割を設計するための手法を提案したことである。これらの貢献に加えて、平行光線を仮定した従来技術と画像分割の親和性からも、画像分割が、近接光源下で撮影された画像を扱う様々な応用において有望なアプローチであることを確信している。

今後の研究課題として、本論文で提案した画像分割の枠組みを、顔認識や物体・光源のモデリングのための十分条件を考慮したうえで拡張したい。たとえば顔認識については、クラス内変動だけでなくクラス間変動も考慮する Fisherfaces⁴⁾ との類推に基づいて、個人差と近似誤差との比を最大にするような画像分割について検討したい。また、物体・光源のモデリングについては、法線方向の多様性も考慮したい。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（課題番号：13224051）の助成により行われた。

参考文献

- 1) Basri, R. and Jacobs, D.: Photometric stereo with general, unknown lighting, *Proc. IEEE CVPR 2001*, pp.II-374–381 (2001).
- 2) Basri, R. and Jacobs, D.: Lambertian reflectance and linear subspaces, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.25, No.2, pp.218–233 (2003).
- 3) Batur, A. and Hayes, M.: Linear subspaces for illumination robust face recognition, *Proc. IEEE CVPR 2001*, pp.II-296–301 (2001).
- 4) Belhumeur, P., Hespanha, J. and Kriegman, D.: Eigenfaces vs. Fisherfaces: Recognition using class specific linear projection, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.19, No.7, pp.711–720 (1997).
- 5) Belhumeur, P. and Kriegman, D.: What is the set of images of an object under all possible lighting conditions?, *Int'l. J. Computer Vision*, Vol.28, No.3, pp.245–260 (1998).
- 6) Blanz, V. and Vetter, T.: Face recognition based on fitting a 3D morphable model, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.25, No.9, pp.1063–1074 (2003).
- 7) Clark, J.: Active photometric stereo, *Proc. IEEE CVPR '92*, pp.29–34 (1992).
- 8) Du, F., Okabe, T., Sato, Y. and Sugimoto, A.: Reflectance estimation from motion under complex illumination, *Proc. IAPR ICPR 2004*, pp.218–222 (2004).
- 9) Duda, R., Hart, P. and Stork, D.: *Pattern Classification*, John Wiley & Sons (2001).
- 10) Frolova, D., Simakov, D. and Basri, R.: Accuracy of spherical harmonics approximations for images of Lambertian objects under far and near lighting, *Proc. ECCV 2004*, LNCS 3021, pp.574–587 (2004).
- 11) Georgiades, A., Belhumeur, P. and Kriegman, D.: From few to many: Illumination cone models for face recognition under variable lighting and pose, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.23, No.6, pp.643–660 (2001).
- 12) Hara, K., Nishino, K. and Ikeuchi, K.: Determining reflectance and light position from a single image without distant illumination assumption, *Proc. IEEE ICCV 2003*, pp.560–567 (2003).
- 13) Iwahori, Y., Sugie, H. and Ishii, N.: Reconstructing shape from shading images under point light source illumination, *Proc. IEEE ICPR '90*, pp.I-83–87 (1990).
- 14) Kim, B. and Burger, P.: Depth and shape from shading using the photometric stereo method, *CVGIP: Image Understanding*, Vol.54, No.3, pp.416–427 (1991).

- 15) Maki, A., Watanabe, M. and Wiles, D.: Geotensity: Combining motion and lighting for 3D surface reconstruction, *Int'l. J. Computer Vision*, Vol.48, No.2, pp.75–90 (2002).
- 16) Marschner, A. and Greenberg, D.: Inverse lighting for photography, *5th Color Imaging Conference*, pp.262–265 (1997).
- 17) Mukaigawa, Y., Miyaki, H., Mihashi, S. and Shakunaga, T.: Photometric image-based rendering for image generation in arbitrary illumination, *Proc. IEEE ICCV 2001*, pp.652–659 (2001).
- 18) Okabe, T., Sato, I. and Sato, Y.: Spherical harmonics vs. Haar wavelets: Basis for recovering illumination from cast shadows, *Proc. IEEE CVPR 2004*, pp.I-50–57 (2004).
- 19) Okabe, T. and Sato, Y.: Object recognition based on photometric alignment using RANSAC, *Proc. IEEE CVPR 2003*, pp.I-221–228 (2003).
- 20) Okabe, T. and Sato, Y.: Support vector machines for object recognition under varying illumination conditions, *Proc. ACCV 2004*, pp.724–729 (2004).
- 21) Press, W., Teukolsky, S., Vetterling, W. and Flannery, B.: *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press (1992).
- 22) Ramamoorthi, R. and Hanrahan, P.: On the relationship between radiance and irradiance: Determining the illumination from images of a convex Lambertian object, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol.18, No.10, pp.2448–2459 (2001).
- 23) Ramamoorthi, R. and Hanrahan, P.: A signal-processing framework for inverse rendering, *Proc. ACM SIGGRAPH 2001*, pp.117–128 (2001).
- 24) Ramamoorthi, R. and Hanrahan, P.: An efficient representation for irradiance environment maps, *Proc. ACM SIGGRAPH 2001*, pp.497–500 (2001).
- 25) Sakaue, F. and Shakunaga, T.: Face recognition by parallel partial projections, *Proc. ACCV 2004*, pp.144–150 (2004).
- 26) Sato, I., Okabe, T., Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Appearance sampling for obtaining a set of basis images for variable illumination, *Proc. IEEE ICCV 2003*, pp.800–807 (2003).
- 27) 佐藤 智, 高田和豊, 登 一生: 近接照明下における画像の線形化の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU 2004-73, pp.151–156 (2004).
- 28) Shashua, A.: On photometric issues in 3D visual recognition from a single 2D image, *Int'l. J. Computer Vision*, Vol.21, No.1/2, pp.99–122 (1997).
- 29) Shum, H.-Y., Ikeuchi, K. and Reddy, R.: Principal component analysis with missing data and its application to polyhedral object modeling, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.17, No.9, pp.854–867 (1995).
- 30) Simakov, D., Frolova, D. and Basri, R.: Dense shape reconstruction of a moving object under arbitrary, unknown lighting, *Proc. IEEE ICCV 2003*, pp.1202–1209 (2003).
- 31) Sloan, P., Kautz, J. and Snyder, J.: Precomputed radiance transfer for real-time rendering in dynamic, low frequency lighting environments, *Proc. ACM SIGGRAPH 2002*, pp.527–536 (2002).
- 32) Takai, T., Niinuma, K., Maki, A. and Matsuyama, T.: Difference sphere: An approach to near light source estimation, *Proc. IEEE CVPR 2004*, pp.I-98–105 (2004).
- 33) Zhang, L., Curless, B., Hertzmann, A. and Seitz, S.: Shape and motion under varying illumination: Unifying structure from motion, photometric stereo, and multi-view stereo, *Proc. IEEE ICCV 2003*, pp.618–625 (2003).
- 34) Zhao, L. and Yang, Y.-H.: Theoretical analysis of illumination in PCA-based vision systems, *Pattern Recognition*, Vol.32, No.4, pp.547–564 (1999).
- 35) Zhao, L. and Yang, Y.-H.: Mosaic image method: A local and global method, *Pattern Recognition*, Vol.32, No.8, pp.1421–1433 (1999).

(平成 17 年 9 月 20 日受付)

(平成 18 年 3 月 20 日採録)

(担当編集委員 日浦 慎作)



岡部 孝弘 (正会員)

1997 年東京大学理学部物理学科卒業 . 1999 年同大学大学院理学系研究科物理学専攻修士課程修了 . 2000 年同博士課程中退 . 2001 年より東京大学生産技術研究所技官 (技術職員) .

コンピュータビジョン, コンピュータグラフィックスに関する研究に従事 . 2005 年度電子情報通信学会論文賞, MIRU2004, MIRU2005 優秀論文賞, 2004 年度 PRMU 研究奨励賞を受賞 . 電子情報通信学会, IEEE 各会員 .



佐藤 洋一（正会員）

1997年カーネギーメロン大学計算機科学部ロボティクス学科博士課程修了。同年より東京大学生産技術研究所研究機関研究員，講師，助教授を経て，現在同大学大学院情報学環助教授。Ph.D. in Robotics。コンピュータビジョン，ヒューマン・コンピュータ・インタラクション，コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。MIRU2000 最優秀論文賞，MIRU 優秀論文賞（MIRU2004，MIRU2005），1999年度山下記念研究賞，1999年度日本バーチャルリアリティ学会論文誌論文賞，2005年度電子情報通信学会論文賞等を受賞。電子情報通信学会，日本バーチャルリアリティ学会，ACM，IEEE 各会員。
