

## 複雑照明下における運動物体の反射特性の推定

杜 菲<sup>†</sup> 岡部 孝弘<sup>†</sup> 佐藤 洋一<sup>†</sup> 杉本 晃宏<sup>††</sup>

Reflectance Estimation of a Moving Object under Complex Illumination

Fei DU<sup>†</sup>, Takahiro OKABE<sup>†</sup>, Yoichi SATO<sup>†</sup>, and Akihiro SUGIMOTO<sup>††</sup>

あらまし 本論文では、未知の複雑照明下で運動する Lambert 物体の画像列から、シーンの光学的特性を獲得するための手法を提案する。提案手法は、拡散反射の見えの球面調和関数を用いた表現に基づいており、Shape From Motion (SFM) で得られる物体の形状と組み合わせることにより、運動物体の画像列のみから物体表面のアルビドと光源輝度分布を推定する。本手法を用いて SFM の枠組みで光学的モデルを獲得することにより、任意姿勢かつ任意照明下の物体の画像を合成することができる。合成画像及び実画像を用いた実験を行い、提案手法の有効性を確認した。

キーワード Shape From Motion (SFM), 反射特性, Lambert モデル, 複雑照明, 球面調和関数

## 1. ま え が き

画像を合成するためには、対象となるシーンの幾何学的及び光学的モデルが必要である。ところが、合成画像のリアリティを追求すればするほどシーンのより詳細なモデルが必要となるため、そのモデルを手作業で準備することが困難になってしまう。そのため、近年、シーンのモデルを実画像から自動的に獲得するための研究が盛んに行われている。本研究では、実画像に基づくモデルの獲得のうち、光学的特性の獲得について議論する。

これまで、実画像に基づく光学的特性の獲得は、主に三つの異なる条件の下で研究されてきた。具体的には、物体を照らす光源の変化を利用したアプローチ [1], [5], [15] ~ [17], 物体を観測する視点位置の変化を利用したアプローチ [7], [9], 及び、物体の姿勢変化を利用したアプローチ [6], [11], [18] に分類される。これらのうち、本論文では、姿勢変化を利用したアプローチについて議論する。つまり、我々は、ビデオカメラなどで撮影された運動物体の画像列から、その物体の光学的特性を推定することを目指す。

運動物体の画像列に基づくモデリング手法として、Shape From Motion (SFM) [14] が知られている。SFM は、物体姿勢や視点位置の変化を伴う画像列から物体の幾何学的特性、つまり、三次元形状と姿勢を獲得する手法であり、光学的特性は扱わない。そのため、画像合成においては、しばしばテクスチャマッピングが利用される。ところが、テクスチャマッピングでは、運動に伴う物体表面の輝度の変化が考慮されない。したがって、テクスチャマッピングを利用した画像合成には、物体を照らす光源と物体表面の陰影との整合性や、貼り合わせたテクスチャの境界の連続性などに問題がある。

従来のテクスチャマッピングに対して、Debevec らは、異なる視点から撮影した画像をユーザの視点に応じて内挿する view-dependent texture mapping を提案した [4]。この手法は、ユーザの視点に依存する鏡面反射成分や幾何学的なモデルの獲得が困難な細部などの表現において優れているが、物体の反射特性そのものを推定しているわけではないため、照明条件の異なる画像を合成することはできない。

これらのテクスチャマッピングの問題点を解決するものとして、運動物体の画像列から光学的特性をも獲得する手法が提案されている。しかしながら、照明条件として少数個の点光源 [6] や単一点光源と一様な環境光 [18] を仮定しているため、応用範囲が限られる。

本論文では、複雑照明下で運動する物体の画像列か

<sup>†</sup> 東京大学生産技術研究所, 東京都

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

<sup>††</sup> 国立情報学研究所, 東京都

National Institute of Informatics, 2-1-2 Hitotsubashi, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8430 Japan

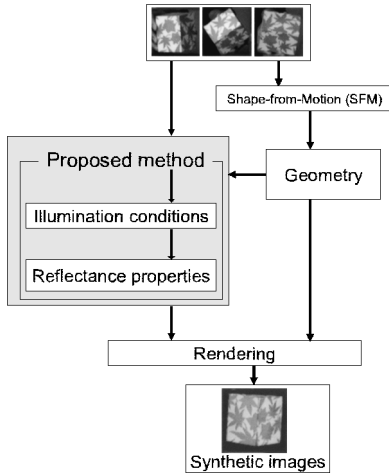


図 1 運動物体の画像列からのモデリングと画像合成

Fig. 1 Modeling and rendering from an image sequence of a moving object.

ら、物体の光学的特性を獲得する手法を提案する。提案手法では、Lambert モデル、凸物体、及び遠方光源の三つを仮定する。つまり、対象物体の反射特性が Lambert モデルで記述されるとして、物体表面のアルビド（拡散反射率）を推定する。また、凸物体の仮定から、キャストシャドウ（影）や相互反射の影響は考慮しない。ただし、遠方光源の分布は未知かつ任意として、複数個の点光源、面光源、及び拡散光源などが存在するシーンにおいても適用可能な手法を提案する。

提案手法は、Ramamoorthi ら [9] や Basri ら [2] による、拡散反射の見えの周波数解析に基づいている。彼らは、反射特性が Lambert モデルで記述される凸物体について、視点位置及び物体姿勢一定の下で照明条件のみを変化させて得られる任意の画像が、球面調和関数の低次項を用いて近似的に表現されることを示した。我々は、この周波数解析と SFM から得られる物体の形状を組み合わせて、物体表面で観測される輝度を効率良く表現する。具体的には、未知の光源分布を、物体表面の輝度に寄与する少数個のパラメータのみで表現する。このことにより、複雑照明下で運動する物体の画像列からのアルビドの推定が可能になる。以上の手続きで幾何学的及び光学的モデルを獲得することにより、図 1 のフローチャートのように、任意姿勢かつ任意照明下の物体の画像を合成することができる。

本論文の構成は以下のとおりである。まず、2. で関連研究についてまとめる。3. では、周波数解析に基づいた光学的特性の推定法を提案する。4. で合成画像及

び実画像を用いた実験結果を報告し、5. で結ぶ。

## 2. 関連研究

まえがきで述べたように、実画像に基づく光学的特性の獲得は、照明変化を利用したアプローチ [1], [5], [15] ~ [17]、視点位置の変化を利用したアプローチ [7], [10]、及び、物体姿勢の変化を利用したアプローチ [6], [11], [18] の三つに分類される。本章では、各アプローチの従来手法を簡単に紹介するとともに、我々の提案手法の利点を述べる。

### 2.1 照明変化を利用したアプローチ

照度差ステレオに代表される照明変化を利用した手法では、視点位置及び物体姿勢一定の下で照明条件を変えて撮影した画像列から、幾何学的及び光学的モデルを獲得する [1], [5], [15] ~ [17]。ところが、照度差ステレオは、一般に、単一点光源 [5], [16] や単一点光源と一様な環境光 [17] などの照明条件を仮定するため、複雑照明下の画像に適用することができない。

これらの手法に対して、Basri ら [1] は、拡散反射の見えの周波数解析 [2], [9] に基づいて、複雑照明下の画像列から物体の形状とアルビドを推定する手法を提案した。具体的には、入力画像列の特異値分解により得られる基底が球面調和関数で記述される基底の線形結合で表現されると仮定して、入力画像列を最もよく近似する線形結合係数、法線ベクトル、及び、光源分布の展開係数を推定している。

また、Unten ら [15] は、物体の三次元形状を併用して、複雑照明下の画像列からアルビドを推定する手法を提案した。彼らは、複雑照明下の画像を単一点光源下の画像の線形結合で表現し、様々な照明条件下の画像から、線形結合係数とアルビドを推定している。

### 2.2 視点位置の変化を利用したアプローチ

Inverse rendering においては、異なる視点位置から撮影した画像列とシーンの三次元形状に基づいて、シーンの光学的特性を獲得する手法が提案されている [7], [10]。

Nishino ら [7] は、少数個の点光源に照らされた画像列から、シーンの光源分布と反射特性を同時に推定している。まず、視点変動への依存性に基づいて、拡散反射成分と鏡面反射成分の分離を行っている。次に、抽出した鏡面反射成分の正反射方向を光源方向の初期値として、光源分布と反射モデルパラメータの同時最適化を行っている。

また、Ramamoorthi ら [10] は、inverse rendering

表 1 従来手法との比較  
Table 1 Comparison with previous work.

| Method                          | Illumination | View point | Pose     |
|---------------------------------|--------------|------------|----------|
| Basri [1]<br>Unten [15]         | variable     | fixed      | fixed    |
| Nishino [7]<br>Ramamoorthi [10] | fixed        | variable   | fixed    |
| Our Method                      | fixed        | fixed      | variable |

を信号処理の枠組みで定式化し、光源分布と反射モデルの畳み込みで表現される物体表面の輝度をフーリエ変換して、光源分布、反射モデル、及び表面輝度のフーリエ係数が満たす関係を導いた。彼らは、逆畳み込み問題を解くことにより、複雑照明下で撮影された画像列から光源分布と反射特性を推定している。

### 2.3 物体姿勢の変化を利用したアプローチ

姿勢変化を利用したアプローチとして、運動物体の画像列からの光学的特性の獲得法が提案されている。

Maki ら [6] は、拡散反射の見えを表現する三次元輝度部分空間と SFM の概念を組み合わせ、幾何輝度拘束と呼ばれる、フレーム間の対応点の輝度の間に成り立つ拘束を提案した。彼らは、この幾何輝度拘束に基づいて、運動物体の密な形状とアルビドを推定している。

また、Zhang ら [18] は、3 (または 4) 次元輝度部分空間と SFM における三次元アフィン部分空間の拘束を考慮して、SFM、照度差ステレオ、及び、多視点ステレオを統一的に扱った。特に、輝度に関する拘束から物体表面の法線ベクトルが安定に推定できることを利用して、一様なアルビドをもつ物体の密な形状の復元に成功している。

これらの手法により、運動物体の画像列から光学的特性を獲得することが可能である。しかしながら、Maki ら [6] は少数個の点光源を、Zhang ら [18] は単一点光源と一様な環境光などの比較的単純な照明条件を仮定しているため、応用範囲に限られる。

### 2.4 提案手法の特長

まず、我々の提案手法は、複雑照明下の画像列に適用可能であるという点で、単純な照明条件を仮定した従来手法 [5], [6], [16] ~ [18] よりも実用的である。

次に、複雑照明下の画像列から光学的特性を獲得する従来手法 [1], [7], [10], [15] と比較する。表 1 に示したように、従来手法が照明変化または視点位置の変化を利用しているのに対して、我々の提案手法は物体姿

勢の変化を利用している<sup>(注1)</sup>。つまり、運動物体の画像列に基づいて光学的特性を獲得するのは、我々の手法のみである。

最近になって、Simakov ら [13] は、我々の手法と密接に関連する手法を提案した。彼らは、複雑照明下の運動物体の画像列から、物体の三次元形状を復元する手法を提案した。この手法は、拡散反射の見えの周波数解析 [2], [9] に基づいているという点で、我々の手法と共通している。しかしながら、彼らの主眼は物体形状の密な復元にあり、光学的特性は考慮されていない。そのため、物体を照らす光源と物体表面の陰影との間に整合性がない。一方、我々の主眼は光学的特性の獲得にあり、SFM で復元可能な比較的単純な形状を仮定しているものの、光学的整合性を実現している。

## 3. 提案手法

本章では、SFM により物体の形状と姿勢が推定されると仮定して、運動物体の画像列から光学的特性を獲得する手法を提案する。

### 3.1 球面調和関数を用いた輝度の表現

はじめに、提案手法のもとになる拡散反射の見えの周波数解析 [2], [9] について述べる。

Lambert 面上の位置  $x$  における輝度  $I(x)$  は、アルビド  $\rho(x)$ 、光源輝度分布  $L(\theta, \phi)$ 、及び反射モデル  $A(\theta') = \max(\cos \theta', 0)$  を用いて、

$$I(x) = \rho(x) \int_0^{2\pi} \int_0^\pi L(\theta, \phi) A(\theta') \sin \theta d\theta d\phi \quad (1)$$

のように表現される。ここで  $(\theta, \phi)$  は世界座標の  $z$  軸正方向を  $\theta = 0$  とするグローバルな極座標で、 $(\theta', \phi')$  は面上の位置  $x$  における外向き法線方向を  $\theta' = 0$  とするローカルな極座標である。

光源輝度分布と反射モデルは単位球面上の関数として表現されるため、 $L(\theta, \phi)$  と  $A(\theta')$  は、球面調和関数  $Y_{l,m}$  を用いて、

$$L(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l L_{l,m} Y_{l,m}(\theta, \phi), \quad (2)$$

$$A(\theta') = \sum_{l=0}^{\infty} A_l Y_{l,0}(\theta'), \quad (3)$$

(注1): Lambert 表面の輝度は、視点の方向が変わっても一定であるが、物体の姿勢が変われば変化する。したがって、視点位置の変化と物体姿勢の変化では、仮定が全く異なる。

のように展開される．ここで，展開係数  $L_{l,m}$  と  $A_l$  は，

$$L_{l,m} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi L(\theta, \phi) Y_{l,m}(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi, \quad (4)$$

$$A_l = 2\pi \int_0^\pi A(\theta') Y_{l,0}(\theta') \sin \theta' d\theta', \quad (5)$$

のように計算される．

式 (1) に式 (2) と (3) を代入すると，Legendre 陪関数の加法定理と球面調和関数の直交性から，輝度  $I(x)$  は，光源分布と反射モデルの球面調和関数による展開係数  $L_{l,m}$  と  $A_l$  を用いて，

$$I(x) = \rho(x) \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \sqrt{\frac{4\pi}{2l+1}} A_l L_{l,m} Y_{l,m}(\mathbf{n}) \quad (6)$$

と表現される．ここで  $\mathbf{n}$  は位置  $x$  における法線ベクトルである．

ところが，式 (5) から， $A_l \sim l^{-2}$  ( $l$ : even) 及び  $A_l = 0$  ( $l$ : odd,  $l > 1$ ) であり，99%以上のエネルギーが  $l \leq 2$  に集中していることが知られている．そのため，光源輝度分布の三次以上の項は，Lambert 面の輝度にほとんど寄与しない．以上のことから，輝度  $I(x)$  は，球面調和関数の最初の 9 項を用いて，

$$I(x) \approx \rho(x) \sum_{l=0}^2 \sum_{m=-l}^l \sqrt{\frac{4\pi}{2l+1}} A_l L_{l,m} Y_{l,m}(\mathbf{n}) \quad (7)$$

のように近似することができる．

### 3.2 光源分布の推定

運動物体の表面上の点  $p$  ( $p = 1, 2, 3, \dots, P$ ) に着目し，その点の  $f$  ( $f = 1, 2, 3, \dots, F$ ) 番目のフレームにおける輝度を  $I^{(p,f)}$  とする．拡散反射成分の輝度は式 (7) のように球面調和関数の低次項を用いて近似できるため，

$$I^{(p,f)} \approx \rho^{(p)} \left( \frac{\sqrt{\pi}}{2} L_{0,0} + \sqrt{\frac{\pi}{3}} L_{1,-1} n_x^{(p,f)} + \sqrt{\frac{\pi}{3}} L_{1,0} n_z^{(p,f)} + \sqrt{\frac{\pi}{3}} L_{1,1} n_y^{(p,f)} + \dots \right) \quad (8)$$

が成り立つ．ここでは， $A_l$  の具体的な値を代入するとともに， $f$  番目のフレームにおける点  $p$  の法線ベクトル  $(n_x^{(p,f)}, n_y^{(p,f)}, n_z^{(p,f)})$  を用いて球面調和関数を書き下している．更に，光源輝度分布とアルビドの両方を未知とする提案手法の枠組みではアルビドと光源

の明るさの縮退を解けないため， $\bar{\rho}^{(p)} = \rho^{(p)} L_{0,0}$  及び  $\bar{L}_{l,m} = L_{l,m}/L_{0,0}$  として，

$$I^{(p,f)} \approx \bar{\rho}^{(p)} \left( \frac{\sqrt{\pi}}{2} + \sqrt{\frac{\pi}{3}} \bar{L}_{1,-1} n_x^{(p,f)} + \sqrt{\frac{\pi}{3}} \bar{L}_{1,0} n_z^{(p,f)} + \sqrt{\frac{\pi}{3}} \bar{L}_{1,1} n_y^{(p,f)} + \dots \right) \quad (9)$$

を得る．

SFM から各点のフレーム間の対応関係，及び物体の形状と姿勢が分かるため，輝度  $I^{(p,f)}$  と法線ベクトル  $(n_x^{(p,f)}, n_y^{(p,f)}, n_z^{(p,f)})$  は既知である．したがって，式 (9) は， $\bar{\rho}^{(p)}$  ( $p = 1, 2, 3, \dots, P$ ) と  $\bar{L}_{l,m}$  ( $l = 1, 2; -l \leq m \leq l$ ) を未知数とする連立方程式である．

ここで，連続したフレームにおける点  $p$  の輝度の比を  $k^{(p,f)} \equiv I^{(p,f+1)}/I^{(p,f)}$  とすると，式 (9) より，

$$\begin{aligned} & -\frac{\sqrt{\pi}}{2} (k^{(p,f)} - 1) \\ & \approx \sqrt{\frac{\pi}{3}} \bar{L}_{1,-1} (k^{(p,f)} n_x^{(p,f)} - n_x^{(p,f+1)}) \\ & + \sqrt{\frac{\pi}{3}} \bar{L}_{1,0} (k^{(p,f)} n_z^{(p,f)} - n_z^{(p,f+1)}) + \dots \quad (10) \end{aligned}$$

が得られる．すなわち，光源分布の展開係数についての線形方程式が得られる．したがって，8 個の未知数  $\bar{L}_{l,m}$  についての  $P(F-1)$  個の線形方程式を解くことで，運動物体の画像列から光源分布を推定することができる<sup>(注2)</sup>．なお，次節の実験では，最小二乗法により解を求めた．

### 3.3 アルビドの推定

アルビドは，各フレームで計算される推定値の平均とする．すなわち，前節で求めた光源分布の展開係数  $\bar{L}_{l,m}$  を用いて，

$$\bar{\rho}^{(p)} = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F \frac{I^{(p,f)}}{\frac{\sqrt{\pi}}{2} + \sqrt{\frac{\pi}{3}} \bar{L}_{1,-1} n_x^{(p,f)} + \dots} \quad (11)$$

とする．

提案手法により得られるのはアルビドの相対的な大きさである．そこで，任意に指定した基準点のアルビドが  $\rho_{\text{ref}}$  であるとして，その値との比を  $\bar{\rho}$  とする．例えば，第 1 番目の点を基準点にとると，

(注2): 前処理として SFM を利用しているため， $P(F-1) \geq 8$  だけでなく  $F \geq 3$ ， $P' \geq 4$  も満たす必要がある．ここで  $P'$  は SFM に用いる特徴点の数であり，これらの特徴点とアルビドを推定する点は一般に異なる．

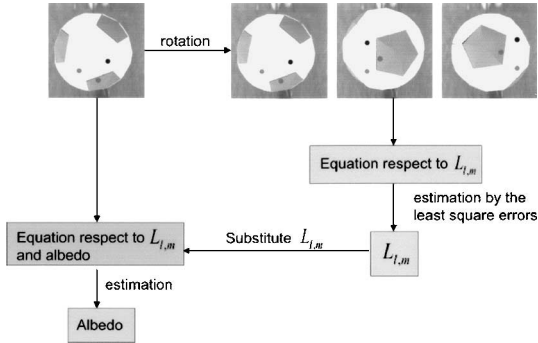


図 2 光源分布とアルビドの推定手続き  
Fig. 2 Steps for estimating illumination and albedo.

$$\hat{\rho}^{(p)} \equiv \hat{\rho}^{(p)} / \hat{\rho}^{(1)} \times \rho_{\text{ref}} \quad (12)$$

となる。

図 2 に、提案手法による光源輝度分布とアルビドの推定の手続きをまとめる。

#### 4. 評価実験

##### 4.1 合成画像を用いた実験

まず、仮定が満たされている理想的な場合について提案手法の有効性を確認するために、合成画像を用いた実験を行った。

実験では、サッカーボールと立方体ブロックの二つを対象物体とした。複雑照明下で運動する物体の画像列を得るために、広ダイナミックレンジの全方位光源マップ [3] と Radiance [8] を利用した。なお、階調は 8 ビットで表現した。図 3 に、光源分布と合成画像の例を示す。

サッカーボールの合成画像を用いた実験では、面上で選択した 10 点の輝度を、七つの異なる姿勢で観測した ( $P = 10, F = 7$ )。このとき、これらの点はすべての姿勢においてカメラから観測可能であった。観測した輝度と法線方向を入力として、前節で述べた提案手法により、光源分布の展開係数  $\bar{L}_{l,m}$  とアルビド  $\hat{\rho}^{(p)}$  を求めた。ここでは、第 1 番目の点のアルビドがあらかじめ与えた正解値に等しくなるように、 $\rho_{\text{ref}} \equiv \hat{\rho}_1 = 0.1$  とした。表 2 に実験結果をまとめた。各点 ( $p = 2, 3, 4, \dots, 10$ ) について、第 2 行の推定値と第 3 行の正解値がほぼ一致しているのを確認することができる。

立方体ブロックを用いた実験では、立方体の各面に図 4(a) のテクスチャを貼り、画像を合成した ( $P = 4, F = 45$ )。ここでは、遠方光源の仮定から同

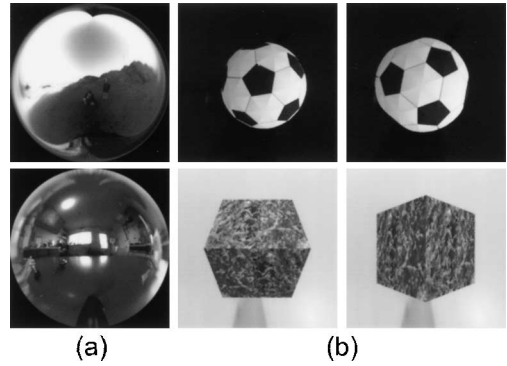


図 3 全方位光源マップ (a) と入力画像の例 (b)  
Fig. 3 Light probes (a) and examples of input image sequences (b).

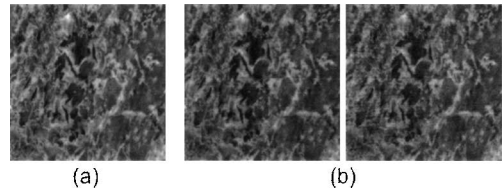


図 4 テクスチャの正解 (a) と推定結果 (b)  
Fig. 4 Original (a) and recovered (b) textures.

一面上の点で照度が等しいため、各面の代表点のみでアルビドを推定し、他の点のアルビドは代表点との輝度比から求めた。図 4(b) に示した二つの異なる面のテクスチャの推定結果が、正解 (a) とほぼ等しいことを確認することができる。

表 3 に、サッカーボールの画像列から推定した光源分布の展開係数とその正解値をまとめた。ここでは、光源分布の展開係数を  $(l, m) = (0, 0)$  の成分が 1 になるように正規化している。提案手法で推定した展開係数は正解値と一致しているとはいえないが、その理由は以下のように考えることができる。

まず、Lambert モデルの仮定から、同じ明るさの光源であれば、物体表面における法線方向と光源方向のなす角度が小さいほど物体表面の輝度への寄与が大きい。次に、視点位置一定で姿勢変化する物体を撮影しているために、観測される物体表面の法線はカメラの方向を向いている。そのため、観測される物体表面の輝度は、カメラの反対方向よりもカメラの方向の光源の影響を受けやすい。極端な例であるが、カメラの正反対方向に存在する光源が、カメラから観測される輝度に全く寄与しないのは自明である。したがって、推定した展開係数は、角度空間に戻して見たときに、カ

表 2 アルビド  $\bar{\rho}^{(p)}$  の推定値と正解値  
Table 2 Estimated values and ground truths of albedo  $\bar{\rho}^{(p)}$ .

| Point: $p$      | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Estimated value | 0.100 | 0.910 | 0.102 | 0.988 | 0.976 | 0.980 | 1.027 | 0.102 | 0.974 | 0.102 |
| Ground truth    | 0.100 | 1.000 | 0.100 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.100 | 1.000 | 0.100 |

表 3 光源分布の展開係数  $\bar{L}_{l,m}$  の推定値と正解値  
Table 3 Estimated values and ground truths of illumination coefficients  $\bar{L}_{l,m}$ .

| Frequency: (l, m) | (0, 0) | (1, -1) | (1, 0) | (1, 1) | (2, -2) | (2, -1) | (2, 0) | (2, 1) | (2, 2) |
|-------------------|--------|---------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|
| Estimated value   | 1.000  | -0.372  | -0.117 | -0.295 | -0.166  | 0.111   | -0.344 | -0.180 | -0.191 |
| Ground truth      | 1.000  | -0.660  | -0.253 | 0.463  | -0.000  | 0.238   | -0.047 | -0.124 | -0.000 |

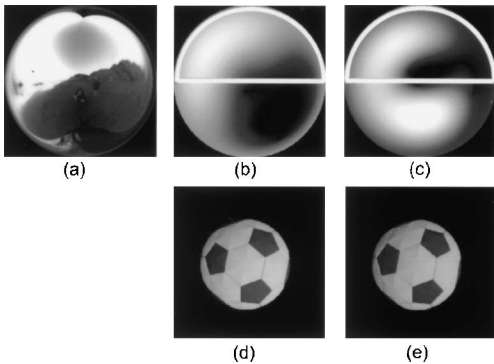


図 5 光源輝度分布と合成画像: (a) 入力光源分布, (b) 入力分布の低周波成分, (c) 提案手法により推定した分布, (d) 低周波光源下の合成画像, (e) 推定した光源下の合成画像.

Fig. 5 Illumination distributions and synthetic images: (a)Original distribution. (b)Low-order approximation of the original distribution. (c)Estimated distribution by using our method. (d)Synthetic image under the low-order illumination. (e)Synthetic image under the estimated illumination.

メラの方向の光源分布は正確であるがカメラの反対方向の光源分布は不正確であることが予想される.

実際に上述の議論を確認する. 図 5 (a) に, 画像合成に用いた入力光源輝度分布を示す. この光源分布から, 式 (4) により, 展開係数の正解値を計算することができる. 図 5 (b) は, 展開係数の正解値を用いて, 提案手法で推定可能な低周波 ( $l \leq 2$ ) の光源分布を再構成したものである. 推定の結果得られた光源分布 (c) と比較して, 白線で囲んだカメラの方向の分布がほぼ一致しているのを確認することができる. 更に, (b) と (c) の光源分布のもとでの合成画像 (d) と (e) もおおむね一致している. 以上のことから, 光源分布の展開係数の推定値と正解値の不一致は, 観測可能な点の

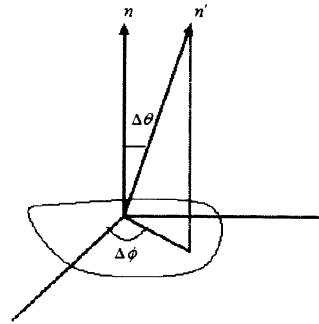


図 6 法線ベクトルに付加する誤差  
Fig. 6 Artificial errors added to normal vector.

輝度への寄与が小さいカメラの反対方向の光源によるものであり, 観測可能な点のアルビドの推定への影響は小さいことが確認できる.

#### 4.2 形状の誤差に対する頑健性

SFM で得られる形状には誤差が含まれる. そこで, 実画像を用いた実験を行う前に, 提案手法の形状誤差に対する頑健性を確認した.

実験では, サッカーボールの表面上で選択した 10 点について, その法線ベクトルに誤差を加えて, 法線ベクトルの誤差の大きさとアルビドの推定精度の関係を調べた. 具体的には, 正しい法線ベクトル  $n$  と誤差を加えた法線ベクトル  $n'$  との関係 ( $\Delta\theta, \Delta\phi$ ) を表して,  $\Delta\theta$  は標準偏差  $\sigma$  の正規分布に従うとし,  $\Delta\phi$  は 0 から  $2\pi$  の一様分布に従うとした (図 6).

図 7 に, ある 2 点についての実験結果を示す. 横軸は  $\Delta\theta$  の標準偏差  $\sigma$  で, 縦軸はアルビドの推定値と正解値 (= 1) との差の絶対値である. ここでは, アルビドの推定を各  $\sigma$  について 500 回試行し, 誤差の平均値と標準偏差を示している. 図 7 から, 我々の提案手法は, SFM による誤差が大きくなって推定精度

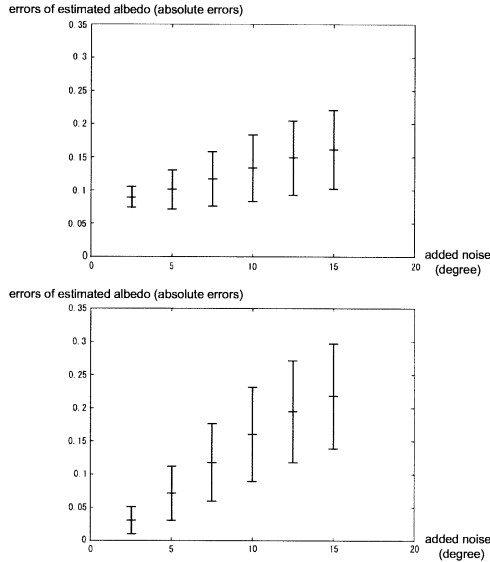


図7 形状の誤差とアルビドの推定精度の関係

Fig. 7 Accuracy of estimated albedo against geometrical error.

が急激に悪化することがないという意味で、安定であることが分かる。

このように、提案手法は形状の誤差に頑健であるため、3. で述べた手法とSFMを組み合わせることにより、運動物体の画像列から幾何学的及び光学的モデルを獲得することができる。

#### 4.3 実画像を用いた実験

実画像を用いた実験では、図8のような和紙を貼った立方体のブロック ( $P = 4, F = 45$ ) とだ円柱の容器 ( $P = 13, F = 45$ ) を対象物体とした。これらの物体を手で回転させた画像を、ビデオカメラ (Sony DFW-VL500) を用いて、平行投影の仮定が成り立つ環境で撮影した。立方体ブロックについては特徴点を手作業で、また、だ円柱容器については特徴点を自動的に<sup>(注3)</sup>追跡して、SFM [14] により各物体の形状を獲得した。具体的には、SFM から得られた離散的な点集合に対して三角形分割アルゴリズムを適用し、物体表面を三角形パッチで近似的に表現したのち、各三角形パッチ (平面) の法線を物体表面の法線とした。図8の(a)と(b)中の点は手作業で追跡した立方体ブロックの特徴点を、(c)中の白線は復元した三次元形状のメッシュモデルを示している。同様に、(f)にだ円柱容器のメッシュモデルを示した。

図8(d)に入力画像の1枚を、(e)に同一シーンの形

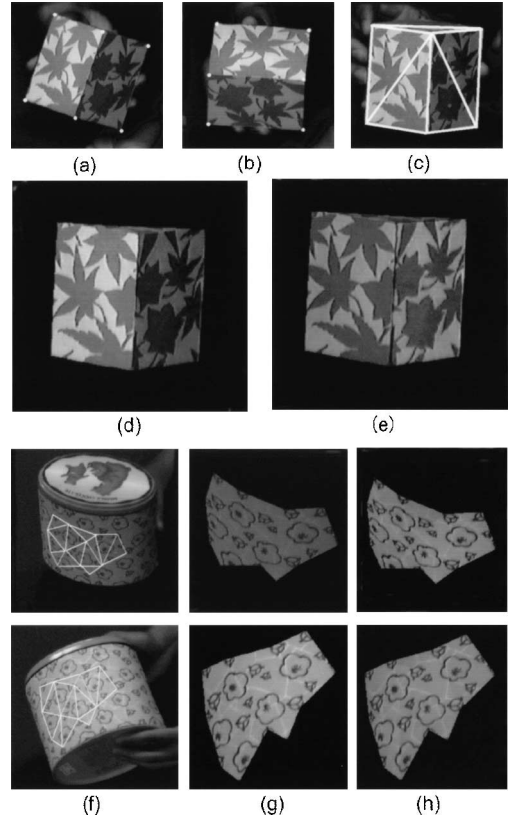


図8 実画像を用いた実験結果：(a)、(b)立方体ブロックの特徴点、(c)形状のメッシュモデル、(d)入力画像、(e)推定したテクスチャ、(f)だ円柱容器の形状のメッシュモデル、(g)入力画像、(h)推定したテクスチャ。

Fig. 8 Experimental results by using real images: (a), (b)Feature points of a cubic block. (c)Recovered shape. (d)Input image. (e)Estimated texture of the block. (f)Feature points and shape of an elliptical pillar box. (g)Input images. (h)Estimated textures of the box.

状モデルに提案手法により獲得したテクスチャを貼った画像を示す。入力画像(d)では、照明の影響により二つの面の明るさが異なっている。一方、推定したテクスチャ(e)は照明の影響をうまく補正できており、二つの面の明るさはほぼ一致している。

また、だ円柱容器の画像列を用いた実験でも同様の結果が得られた。図8の(g)は姿勢の異なる入力画像を、(h)は推定したテクスチャを貼った画像である。この場合にも、照明の影響による入力画像の陰影が除

(注3): Kanade-Lucas-Tomasi の特徴点追跡アルゴリズムを実装した KLT [12] を利用した。

去されているのを確認することができる。

これらの実験結果から、提案手法を用いて、複雑照明下における運動物体の光学的特性を獲得できることが分かる。

## 5. む す び

本論文では、複雑照明下の運動物体の画像列から光学的特性を獲得する手法を提案した。具体的には、SFMにより物体の幾何学的モデルを獲得したのち、球面調和関数を用いた拡散反射成分の表現に基づいて、Lambert物体のアルビドを推定した。また、合成画像と実画像を用いた実験から、提案手法の有効性を確認した。

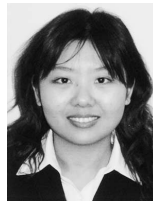
本研究では Lambert 物体を対象とした。鏡面反射も含めた任意の反射特性をもつ物体の光学的特性の獲得については、将来の研究課題としたい。

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, 14380161)の助成により行われた。

## 文 献

- [1] R. Basri and D. Jacobs, "Photometric stereo with general, unknown lighting," Proc. IEEE CVPR 2001, pp.II-374-381, 2001.
- [2] R. Basri and D. Jacobs, "Lambertian reflectance and linear subspaces," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.25, no.2, pp.218-233, 2003.
- [3] P. Debevec, "Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography," Proc. ACM SIGGRAPH '98, pp.189-198, 1998.
- [4] P. Debevec, C. Taylor, and J. Malik, "Modeling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry and image-based approach," Proc. ACM SIGGRAPH '96, pp.11-20, 1996.
- [5] A. Georghiades, "Incorporating the Torrance and Sparrow model of reflectance in uncalibrated photometric stereo," Proc. IEEE ICCV 2003, pp.816-823, 2003.
- [6] A. Maki, M. Watanabe, and C. Wiles, "Geotensity: Combining motion and lighting for 3D surface reconstruction," Int'l. J. Computer Vision, vol.48, no.2, pp.75-90, 2002.
- [7] K. Nishino, Z. Zhang, and K. Ikeuchi, "Determining reflectance parameters and illumination distribution from sparse set of images for view-dependent image synthesis," Proc. IEEE ICCV 2001, pp.599-606, 2001.
- [8] <http://radsite.lbl.gov/radiance/>
- [9] R. Ramamoorthi and P. Hanrahan, "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.
- [10] R. Ramamoorthi and P. Hanrahan, "A signal-processing framework for inverse rendering," Proc. ACM SIGGRAPH 2001, pp.117-128, 2001.
- [11] Y. Sato, M. Wheeler, and K. Ikeuchi, "Object shape and reflectance modeling from observation," Proc. ACM SIGGRAPH '97, pp.379-387, 1997.
- [12] J. Shi and C. Tomasi, "Good features to track," Proc. IEEE CVPR '94, pp.593-600, 2001.
- [13] D. Simakov, D. Frolova, and R. Basri, "Dense shape reconstruction of a moving object under arbitrary, unknown lighting," Proc. IEEE ICCV 2003, pp.1202-1209, 2003.
- [14] C. Tomasi and T. Kanade, "Shape and motion from image streams under orthography: A factorization method," Int'l. J. Computer Vision, vol.9, no.2, pp.137-154, 1992.
- [15] H. Unten and K. Ikeuchi, "Color alignment in texture mapping of images under point light source and general lighting condition," Proc. IEEE CVPR 2004, pp.I-234-239, 2004.
- [16] R. Woodham, "Photometric method for determining surface orientation from multiple images," Optical Engineering, vol.19, no.1, pp.139-144, 1980.
- [17] A. Yuille, D. Snow, R. Epstein, and P. Belhumeur, "Determining generative models of objects under varying illumination: shape and albedo from multiple images using SVD and integrability," Int'l. J. Computer Vision, vol.35, no.3, pp.203-222, 1999.
- [18] L. Zhang, B. Curless, A. Hertzmann, and S. Seitz, "Shape and motion under varying illumination: unifying structure from motion, photometric stereo, and multi-view stereo," Proc. IEEE ICCV 2003, pp.618-625, 2003.

(平成 16 年 10 月 7 日受付, 17 年 2 月 7 日再受付)



杜 菲

2000 南開大・物理学系物理卒。2004 東京大学大学院情報理工学系研究科電子情報学専攻修士課程了。複雑照明下における明るさ解析に関する研究に従事。2005 同博士課程休学、日本シスコシステムズ(株)に入社。





岡部 孝弘 (正員)

1997 東大・理・物理卒。1999 同大大学院理学系研究科物理学専攻修士課程了。2000 同博士課程中退。2001 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。MIRU2004 優秀論文賞受賞。情報処理学会, IEEE 各会員。



佐藤 洋一 (正員)

1997 カーネギーメロン大・計算機科学部ロボティクス学科博士課程了。同年より東京大学生産技術研究所研究機関研究員, 講師を経て, 現在同研究所助教授。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。平 11 年度山下記念研究賞, MIRU2000 最優秀論文賞, 平 11 年度日本バーチャルリアリティ学会論文誌論文賞, IEEE VR2001 Honorable Mention for the Outstanding Paper Award, MIRU2004 優秀論文賞等を受賞。情報処理学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ACM, IEEE 各会員。



杉本 晃宏 (正員)

1987 東大・工・計数卒。1989 同大大学院工学系研究科修士課程了(数理工学専攻)。同年, 日立製作所基礎研究所に入社。1991~1995 ATR に出向。1999 京都大学講師。2002 国立情報学研究所助教授, 現在に至る。2005 総合研究大学院大学複合科学研究科助教授併任。博士(工学)。視覚情報処理や離散システム・アルゴリズムなどに興味をもち, 数理的手法に基づいたコンピュータビジョンの研究に従事。2001 情報処理学会論文賞受賞。