

2 群 (画像・音声・言語) - 2 編 (パターン認識とビジョン)

5 章 照明・反射解析

(執筆者：向川康博，日浦慎作，佐藤いまり)[2010 年 1 月 受領]

概要

本章では，カメラで撮影された画像中の明るさに基づいて，被写体の材質・形状や，撮影時の照明環境を推定する技術を紹介する．ある入射光に対し物体表面で観測される反射光の振る舞いは，材質や表面の微細形状に依存する．5-1 節では，照明方向や観測方向を変化させたときに観察される物体表面の明るさ変化の表現方法や反射モデルについて説明する．物体表面で観察される明るさは，その物体の反射率のみならず，物体表面の向きによっても大きく変化する．これに伴い，物体表面で観察される明るさから法線方向及び形状を推定することも可能である．5-2 節では，形状推定のためのアルゴリズム (Shape from Shading 及び Photometric Stereo) を紹介する．次に，5-1 節で紹介した反射特性の表現に基づき物体表面の反射特性をモデル化する手法を説明し (5-3 節)，最後に，対象世界の情報 (反射特性・形状) を既知として，観察されるシーンの明るさをもとにして光源分布を獲得する方法について紹介する (5-4 節)．

【本章の構成】

本章では反射モデル (5-1 節)，形状推定 (5-2 節)，反射特性の推定 (5-3 節)，光源推定 (5-4 節) に関して，基礎理論と形状・反射特性・光源それぞれの推定アルゴリズムについて述べる．

2群 画像・音・原語-2編 パターン認識とビジョン-5章 照明・反射解析

5-1 反射モデル

(執筆者: 向川康博)[2010年1月受領]

物体表面で観測される反射光の振る舞いは、材質や表面の微細形状に依存する。照明方向や観測方向を変化させたときの物体表面の明るさの変化を解析するために、これまでに様々な表現方法やモデルが考案されてきた。本節では、不透明物体で生ずる反射のモデル(BRDF)と、半透明物体で生じる表面下散乱のモデル(BSSRDF)について、それぞれ概説する。

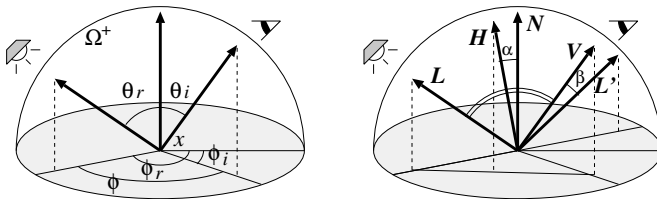
5-1-1 BRDF

物体表面の反射特性は、双方向反射率分布関数(BRDF: Bi-directional Reflectance Distribution Function)によって表現される。物体表面上のある点 x における BRDF は、図 5・1(a) に示すように入射と反射の双方向に依存し、照明方向 (θ_i, ϕ_i) からの入射光の強さ(イラディアン)に対する、観測方向 (θ_r, ϕ_r) への反射光の強さ(ラディアン)の比として定義される。厳密には BRDF は波長にも依存するが、画像の生成や解析のためには各波長ごとの反射率は冗長であることが多いため、赤(R)、緑(G)、青(B)の3チャンネルごとに BRDF を定義し、次式のように四つの角度をパラメータとするのが一般的である。

$$f_{BRDF}(x, \theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r). \quad (5.1)$$

なお、図 5・1(b) に示す照明方向 L と観測方向 V を固定し、対象物体を観測面の法線 N を軸に回転させたとき、明るさが変化するものを異方性反射、変化しないものを等方性反射と呼ぶ。異方性反射は織物やヘアライン加工された金属などで見られる比較的特殊な反射である。一方、等方性反射は、その性質から方位角については相対角 $\phi = \phi_r - \phi_i$ で決まるため、次式のように三つの角度パラメータでの記述が可能である。

$$f_{BRDF}^{isotropic}(x, \theta_i, \theta_r, \phi). \quad (5.2)$$



(a) 照明・観測方向を表す角度パラメータ (b) 反射モデルに用いられるベクトル

図 5・1 反射を表現する際に用いられる角度パラメータとベクトル

BRDF は、反射という物理現象を表現するため、次に挙げる二つの条件を満たす。

条件-1: 相反性(レシプロシティ)

入射方向と反射方向を入れ替えても値が変化しない。すなわち、

$$f_{BRDF}(x, L, V) = f_{BRDF}(x, V, L). \quad (5.3)$$

条件-2: エネルギー保存の法則

反射光の総和が, 入射光の総和を越えてはならない. すなわち,

$$\int_{\Omega^+} f_{BRDF}(x, L, V)(N \cdot L)dL \leq 1. \quad (5.4)$$

ここで, Ω^+ は, 観測点から見える半球面である.

これらの性質をもつ BRDF を具現化したものが反射モデルである. なお, BRDF はイラディアンズに対するラディアンズの比として定義され, 照明方向と法線方向の角度関係は含めず, 純粋に表面の材質のみを反映する関数である. したがって, 反射光の強度を算出する場合は, 式 (5.4) のように $\cos \theta_r (= N \cdot L)$ を乗ずる必要がある. 一方, 反射モデルは直感的な取扱いを容易にするために, 法線の向きを表す余弦の項も含めるのが一般的である.

できるだけ単純なパラメトリック関数で現実の反射特性を正確に表現することを目指して, 現在までに様々な反射モデルが提案されてきた. 多くの反射モデルは, 図 5.2 のように, 反射光を拡散反射成分と鏡面反射成分の和として近似する*. 以下, 拡散反射成分と鏡面反射成分の具体的な反射モデルを, それぞれ順に述べる.

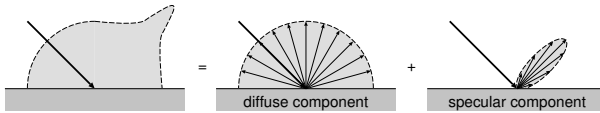


図 5.2 拡散反射成分と鏡面反射成分

(1) 拡散反射モデル

拡散反射は, 入射光が表面層内部で乱反射することで生ずる成分であり, 観測方向に依存せず, あらゆる方向に均一の強度で観測される. そのため, 拡散反射の BRDF は角度パラメータに依存せず定数となる. ざらざらした石膏などで観測される反射光は, ほぼ拡散反射成分だけを含む. 拡散反射モデルとして, 次式のように, 拡散反射の強さは照明方向と法線方向のなす角の余弦に比例すると仮定する Lambert モデルが広く用いられている.

$$i = \rho_d \max(0, N \cdot L). \quad (5.5)$$

ここで, ρ_d は拡散反射率(ディフューズアルベドとも呼ばれる)であり, 物体色を表す.

なお, コンピュータビジョン分野では, 線形演算が可能であることから, Lambert モデルが陰影解析のために広く用いられている. 一方, コンピュータグラフィクス分野では, 微小面によって生ずる自己遮へいや自己陰影などの影響を考慮した Oren-Nayar モデル¹⁾も, より現実に近い反射モデルとして利用されている.

* 初期の反射モデルでは環境光成分も定数として含めていたが, 大域照明による間接光の表現が一般的になってからは利用されなくなった.

(2) 鏡面反射モデル

鏡面反射は、入射光が大気と表面層との境界において反射することで生ずる成分であり、正反射方向付近で強く観測される。なめらかな表面で強く観測され、ハイライトとも呼ばれる。鏡面反射は正確なモデル化が難しいことから、多くの反射モデルが提案されている。ここでは、各モデルに含まれている鏡面反射成分の項を比較する。

Phong モデル²⁾は、経験に基づく古典的なモデルであり、次式のように照明方向の正反射方向 L' と観測方向 V のなす角 β の余弦のべき乗として近似するモデルである。

$$i = \rho_s \cos^n \beta. \quad (5.6)$$

ここで、 ρ_s は鏡面反射率であり、鏡面反射の強さを表す。係数 n は、表面の粗さを表すパラメータである。あくまで経験に基づくモデルであり、エネルギー保存の法則を満たす保証がないなどの性質は気を付ける必要はあるが、簡単に計算できるため、計算機能力が低かった初期の CG ではよく用いられた。

Torrance-Sparrow³⁾モデルは、最も初期に開発され、物理的な解析に基づいた反射モデルである。鏡面反射の強度は、実際には正反射方向から少しずれた角度でピークをもつ性質があり、これをオフスペキュラーと呼ぶ。Torrance-Sparrow モデルは、物体表面は微小面の集合で構成されると仮定し、微小面による遮蔽やフレネル反射を解析することでオフスペキュラーを表現できる物理的に正しいモデルである。

光学の分野で開発された Torrance-Sparrow モデルは、後に Blinn⁴⁾によって簡潔に再定義され、コンピュータグラフィックスに応用された。Blinn の定式化によれば、鏡面反射の強度は次式で表現される。

$$i = \rho_s \frac{DGF}{N \cdot V}. \quad (5.7)$$

ここで、 D は法線分布項であり、物体表面の法線のばらつきを表現する。 G は幾何減衰項であり、微小面の凹凸によって生ずる自己遮へい・自己陰影を表現する。 F はフレネル項であり、物理的な特性が異なる領域の境界では反射が生じ、屈折率や光の入射角度により反射率が変化するフレネル反射を表現する。以下、それぞれの具体的な定式化を順に説明する。

まず、法線分布項 D を定義するために、物体表面は完全な鏡面反射を生ずる微小面の集合で構成されると仮定する。法線分布項 D は、照明方向と観測方向の二等分方向（ハーフベクトル） H と、法線方向 N のなす角 α の確率密度関数を表す。すなわち、ハーフベクトルに対して、微小面の法線がどれだけばらついているかを表す。具体的な法線分布項を表すパラメトリック関数として、以下に挙げるように様々な定式化が試みられている。

D_1 は、微小面の法線のばらつきを、 α の余弦のべき乗で近似したモデルである。Phong モデルと基本的な考え方は似ているが、Phong モデルが照明方向の正反射方向と観測方向のなす角によって定義されていたのに対して、これを照明方向と観測方向の二等分方向で定義しなおすことで、反射の相反性を満たすように改良したものである。

$$D_1 = \cos^{n_1} \alpha. \quad (5.8)$$

D_2 は、微小面の法線のばらつきをガウス関数で近似したモデルであり、Torrance-Sparrow

モデルで用いられている。

$$D_2 = e^{-(an_2)^2}. \quad (5.9)$$

D_3 は、Trowbridge-Reitz によって提案された分布モデルである。

$$D_3 = \left(\frac{(n_3)^2}{\cos^2 \alpha ((n_3)^2 - 1) + 1} \right)^2. \quad (5.10)$$

次に、微小面の凹凸によって生ずる自己遮へい・自己陰影を表現する幾何減衰項 G は、入射光が遮られるシャドウイングと、反射光が遮られるマスキングを考慮したモデルである。いずれも、照明方向もしくは観測方向が物体の接平面に近付くほど減衰が大きくなり、次式のように定式化される。

$$G = \min \left(1, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot V)}{(V \cdot H)}, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot L)}{(V \cdot H)} \right). \quad (5.11)$$

最後に、フレネル反射を表現するフレネル項 F は、照明方向もしくは観測方向が物体の接平面に近付くほど強くなり、次式のような近似式によって定式化される*。

$$F = \frac{1}{2} \frac{(g-c)^2}{(g+c)^2} \cdot \left(1 + \frac{c(g+c)-1}{c(g-c)+1} \right)^2 \quad (5.12)$$

$$c = V \cdot H, \quad g = \sqrt{\eta^2 + c^2} - 1. \quad (5.13)$$

ここで、 η は相対屈折率である。

Cook-Torrance モデル⁵⁾は、Torrance-Sparrow モデル中の法線分布項 D を、次式のように絶対強度を直接算出できるベックマン分布で表現したものである。

$$D_4 = \frac{1}{(n_4)^2 \cos^4 \alpha} e^{-\left(\frac{\tan^2 \alpha}{(n_4)^2}\right)}. \quad (5.14)$$

また、Cook-Torrance モデルでは、分光反射率を用いることで、反射光の波長ごとのエネルギー分布を算出する。これにより、光源色とは異なる色として観測される金属面での鏡面反射を、より正確に表現できるようになる。

Ward モデル⁶⁾は、彼が開発した BRDF 計測システムで得られた計測値を記述するために考案された、異方性反射を表現できる反射モデルである。多くの異方性反射は、織物であれば繊維方向、ヘアライン加工された金属であればブラシ方向といったように、反射が線対称となる軸をもつ。そこで、Torrance-Sparrow モデルのうち、法線分布項 D のみを取り出し、表面の粗さ係数を、対称軸に平行な方向と垂直な方向に別々に定義できるように拡張したものである。これにより、法線を軸に観測面を回転させたときの見え方の変化を表現できる。

このように、オフスペキュラーや異方性反射などの特徴を表現するために、個別に反射モ

* 厳密なフレネル反射の計算は複雑であるため、通常はこのような近似式が用いられることが多い。この他にもいくつかの近似的な計算法が知られている。

デルが開発されてきた．一方，これらの特徴をすべて表現することを目指した Lafortune モデル⁷⁾は，コサインロープを一般化した汎用的な反射モデルである．

なお，本節で述べた BRDF，及びそれを具現化した反射モデルは，物体表面上のある 1 点の反射特性を独立に表現するものである．物体表面上の隣接する点どうしの関係，すなわち空間的な分布を表現したい場合には，BRDF をテクスチャに拡張した BTF (Bi-directional Texture Function) が利用される．

5-1-2 BSSRDF

金属以外のほとんどの物体では，物体表面へ入射した光が内部にも到達する半透明の性質をもつ．大理石・皮膚・ミルクが半透明物体の典型例として挙げられるが，プラスチックや木材，野菜や果実，紙や布など，我々の身の回りに存在する物体の多くも半透明の性質をもつ．

不透明物体では，図 5・3(a) のように，ある点 x における入射光と反射光の関係だけを考えればよい．一方，半透明物体では，図 5・3(b) のように物体表面上のある点 x_i に入射した光は物体の内部で散乱し，物体表面上の別の点 x_o から出射する．この物体内部での散乱を表面下散乱 (サブサーフェーススキャタリング) と呼ぶ．

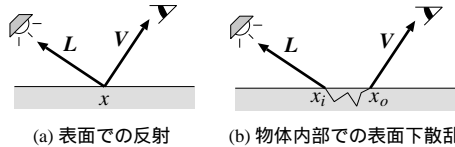


図 5・3 不透明物体と半透明物体の違い

このような半透明物体で生ずる表面下散乱は，双方向散乱面反射率分布関数 (BSSRDF: Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function) で表現される．BSSRDF は入射点 x_i に L の方向から入射した光が観測点 x_o において V の方向に出射する率として，次式のように定義される．

$$f_{BSSRDF}(x_i, L, x_o, V). \quad (5 \cdot 15)$$

表面下散乱は，図 5・4 に示すように，シングルスキャタリング f_{BSSRDF}^{single} とマルチスキャタリング $f_{BSSRDF}^{multiple}$ の和として近似されることが多い*．

$$f_{BSSRDF}(x_i, L, x_o, V) = f_{BSSRDF}^{single}(x_i, L, x_o, V) + f_{BSSRDF}^{multiple}(x_i, L, x_o, V). \quad (5 \cdot 16)$$

シングルスキャタリングは，入射光が物体内部で一度だけ反射することによって生ずる散乱であり，霧や濁った水など，散乱物質の密度が低い媒体で強く観測される．光源から発せられた光が視点に届くまでの光路が一意に定まるため，光路に沿って減衰率を積分することによって計算される．

* 実際には，2 回反射や 3 回反射などの，シングルスキャタリングとマルチスキャタリングの中間の性質をもつ低次の多重散乱も存在する．

一方、マルチスキャタリングは、入射光が物体内部で何度も反射を繰り返すことによって生ずる散乱であり、皮膚や大理石など、散乱物質の密度が高い媒体で強く観測される。反射を繰り返すため、あらゆる方向に同じ強度で散乱する等方散乱の性質をもつ。これをディフュージョンと呼ぶ⁸⁾。マルチスキャタリングを厳密に計算するためには、複雑な光路を追跡する必要があり、モンテカルロレイトレーシング法⁹⁾ やフォトンマッピング法¹⁰⁾などの計算コストの高い手法が用いられてきた。

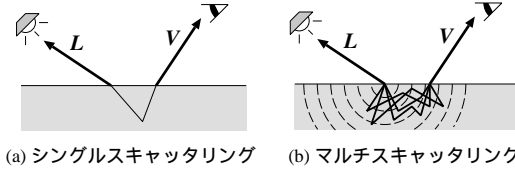


図 5.4 表面下散乱の分解

Jensen はマルチスキャタリングを簡単なパラメトリック関数で近似するダイポールモデル¹¹⁾を提案した。ダイポールモデルでは、マルチスキャタリングは入射光と出射光の方向に依存しないと仮定することで、BSSRDF を次式のように分解する。

$$f_{BSSRDF}^{multiple}(x_i, \mathbf{L}, x_o, \mathbf{V}) = \frac{1}{\pi} F_t(\eta, \mathbf{V}) R_d(x_i, x_o) F_t(\eta, \mathbf{L}) \quad (5.17)$$

ここで、 η は相対屈折率であり、 F_t は物体表面を光が透過する際のフレネル係数を表す項である。また、 $R_d(x_i, x_o)$ は、 x_i に入射した光が x_o に到達する際の減衰を表す散乱項であり、2 点間の距離 $r = \|x_o - x_i\|$ の関数として、次式で近似される。

$$R_d(r) = \frac{\alpha}{4\pi} \left\{ z_r \left(\sigma_{tr} + \frac{1}{d_r} \right) \frac{e^{-\sigma_{tr} d_r}}{d_r^2} + z_v \left(\sigma_{tr} + \frac{1}{d_v} \right) \frac{e^{-\sigma_{tr} d_v}}{d_v^2} \right\}$$

このとき、各変数は以下のように与えられる。

$$d_r = \sqrt{r^2 + z_r^2}, \quad d_v = \sqrt{r^2 + z_v^2}, \quad z_r = \frac{1}{\sigma'_t}, \quad z_v = z_r \left(1 + \frac{4}{3} A \right) \quad (5.18)$$

$$A = \frac{1 + F_{dr}}{1 - F_{dr}}, \quad F_{dr} = -\frac{1.440}{\eta^2} + \frac{0.710}{\eta} + 0.668 + 0.0636\eta \quad (5.19)$$

$$\sigma_{tr} = \sqrt{3\sigma_a \sigma'_t}, \quad \sigma'_t = \sigma'_s + \sigma_a, \quad \sigma'_s = \sigma_s (1 - g), \quad \alpha = \frac{\sigma'_s}{\sigma'_t} \quad (5.20)$$

ここで σ_s は散乱係数、 σ_a は吸収係数と呼ばれる材質固有のパラメータである。また、 g は入射方向と散乱方向のなす角の余弦と位相関数の積を積分した値であり、前方散乱では正に、後方散乱では負に、等方散乱の場合ゼロとなる。

このように、ダイポールモデルではマルチスキャタリングを、材質に固有の $\sigma_s, \sigma_a, \eta, g$ の四つのパラメータをもつシンプルな関数で近似表現できることが分かる。ダイポールモデルの直感的な意味は、図 5.5 のように、物体内部に点光源を配置し、更に境界条件を満たす

ように入射点の上に光を吸収する負の光源を配置することで、マルチスキャタリングを近似したものである。

その後、ダイポールモデルを紙などの薄い物体にも適用できるように拡張したマルチポールモデル¹²⁾や、散乱項を複数のガウス分布で近似することで GPU を用いたハードウェアレンダリングを実現¹³⁾するなど、コンピュータグラフィクス分野では、表面下散乱の高速レンダリング技術について研究が進められている。

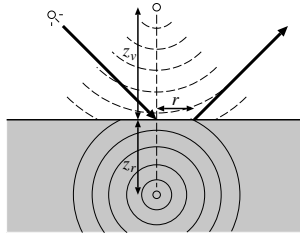


図 5.5 ダイポールモデル

参考文献

- 1) M. Oren and S.K. Nayar, "Generalization of Lambert's Reflectance Model," Proc. SIGGRAPH'94, pp.239-246, 1994.
- 2) B.T. Phong, "Illumination for computer generated pictures," Proc. SIGGRAPH'75. pp.311-317, 1975.
- 3) K.E. Torrance and E.M. Sparrow, "Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces," JOSA, vol.57, Issue 9, pp.1105-1112, 1967.
- 4) J.F. Blinn, "Models of light reflection for computer synthesized pictures," Proc. SIGGRAPH'77, pp.192-198, 1977.
- 5) R.L. Cook and K.E. Torrance, "A reflectance model for computer graphics," Proc. SIGGRAPH'81, pp.307-316, 1981.
- 6) G.J. Ward, "Measuring and Modeling anisotropic reflection," Proc. SIGGRAPH'92, pp.255-272, 1992.
- 7) E.P.F. Lafortune, S.C. Foo, K.E. Torrance, and D.P. Greenberg, "Non-Linear Approximation of Reflectance Functions," Proc. SIGGRAPH'97, pp.117-126, 1997.
- 8) J. Stam, "Multiple scattering as a diffusion process," Proc. Eurographics Rendering Workshop, 1995.
- 9) M. Pharr and P. Hanrahan, "Monte Carlo evaluation of non-linear scattering equations for subsurface reflection," Proc. SIGGRAPH2000, pp.75-84, 2000.
- 10) H.W. Jensen and P.H. Christensen, "Efficient Simulation of Light Transport in Scenes with Participating Media using Photon Maps," Proc. SIGGRAPH'98, pp.311-320, 1998.
- 11) H.W. Jensen, S.R. Marschner, M. Levoy, and P. Hanrahan, "A Practical Model for Subsurface Light Transport," Proc. SIGGRAPH2001, pp.511-518, 2001.
- 12) C. Donner H. W. Jensen, "Light Diffusion in Multi-Layered Translucent Materials," Proc. SIGGRAPH2005, pp.1032-1039, 2005.
- 13) E.d'Eon, D. Luebke, E. Enderton, "Efficient Rendering of Human Skin," Eurographics Symposium on Rendering, 2007.

2 群 - 2 編 - 5 章

5-2 形状推定

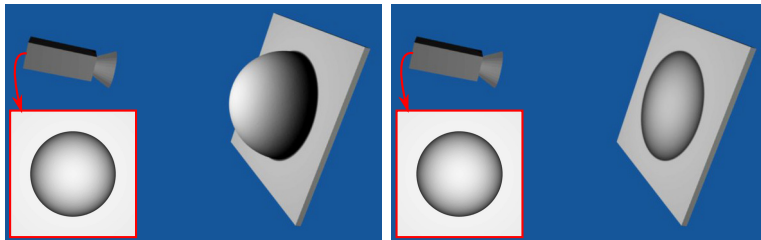
(執筆者：日浦慎作) [2010 年 1 月受領]

5-1 節で述べたように、物体表面の見かけの明るさはその物体の反射率だけで決まるのではなく、その物体表面の向きによっても変わる。そこでコンピュータグラフィックスでは、あらかじめ定義された物体の形状に反射モデルを適用することで各画素の明るさを求め、陰影づけが施された画像を提示する。我々人間の視覚は、そのようにして陰影づけられた画像から物体の形状を推測することができるが、これと同様のことを計算機により行う方法を総称して陰影からの形状解析 (Shape from Shading)¹⁾ と呼ぶ。

Shape from Shading は不良設定問題となる場合が多い。例えば 1 枚のモノクロ画像が与えられた場合を考えると、それぞれの画素は一つのスカラ値 (輝度値) を与えるが、その画素に対応する物体表面の点は点の向き (反射特性に等方向性が成り立つ場合でも 2 自由度) や反射率など複数の未知数をもつため、それらが独立であるならば不良設定問題である。そこで照明条件が異なる複数の画像を用いることなどにより問題を良設定化する方法が考えられている。ここではそのような方法の代表例として照度差ステレオ法 (Photometric Stereo)²⁾ についても述べる。

5-2-1 Shape from Shading

ここではまず、1 枚の画像の陰影から対象物体の形状を求める問題について考える。図 5・6 に示すように、もしシーンの形状と反射率分布の双方が不明であったとすると、この問題は解くことができない。なぜなら反射率一定の立体的シーン (図 5・6(a)) をカメラで撮影したときに得た輝度分布と同じ輝度分布を、平面的であるが反射率が一定でないシーン (図 5・6(b))、例えば (a) の写真そのもの) が生み出すことができるからである。それゆえ、1 枚の画像からの Shape from Shading では対象物体の反射率が一樣であると仮定することがほとんどである。



(a) 反射率一定の立体的シーン

(b) 反射率が変化する平面的シーン

図 5・6 1 枚の画像から形状と反射率を同時に求めることはできない。(a) 反射率は一定でも立体的であれば陰影により明暗変化が生ずる。(b) 平面状の物体上の反射率の分布 (例: 写真) から (a) と同じカメラ画像を得ることができる。よって 1 枚の画像から、シーンの形状が (a) であるか (b) であるかを判断することはできない。

次に簡単のため，対象物体の反射特性は拡散反射（5-1-1 項 (1)）であり，また光源は平行光源であると仮定する．また対象物体上には陰が生じない，すなわち照明方向 L と法線 N のなす角 θ は 90 度以下であるとする．このとき $N \cdot L \geq 0$ であるから，

$$i = \rho_d \max(0, N \cdot L) = \rho_d N \cdot L = \rho_d \cos(\theta) \tag{5.21}$$

となる．よって

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{i}{\rho_d} \right) \tag{5.22}$$

のように照明方向 L と法線 N のなす角 θ を求めることができる．しかし方位は 2 自由度であるのに対し一つのパラメータしか復元できないため，図 5.7 のように法線の方位はある円錐面上に乗ることが分かるだけである．この制約はそもそも，方位が 2 自由度であるのに対して各点の輝度がスカラー量であることに起因する．これを解決するためには，対象物体の形状に関する性質や仮定により問題を正則化しなければならない．

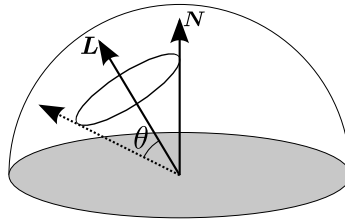


図 5.7 1 枚の画像からの法線推定．観測点の輝度から照明方向 L と法線 N のなす角 θ を求めることができる．しかし法線は照明方向を軸とする円錐面上にあることが分かるだけで，方位は一意には定まらない．

ここでは対象物体の形状が連続的でなめらかであると仮定する．このとき対象物体の法線はその形状の微分から求められる．例えば対象物体の形状が xy 平面に関する一価関数 $f(x, y)$ で表されるとすると法線 $N(x, y)$ は

$$N(x, y) = \frac{\begin{bmatrix} -\frac{\partial f}{\partial x} & -\frac{\partial f}{\partial y} & 1 \end{bmatrix}^T}{\left\| \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial y} & 1 \end{bmatrix} \right\|_2} \tag{5.23}$$

と表されるが，このとき任意の閉じた経路 C について一周積分した値は，始点と終点の高さが必ず一致することから

$$\oint_C \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right) \cdot d\mathbf{l} = 0 \tag{5.24}$$

が成立する．これを可積分条件という．このとき以下の二次偏微分からなる式

$$E_1 = \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y} \tag{5.25}$$

が 0 になるはずである．また，対象物体の形状がなめらかであると仮定していることから，法線方向の変化率

$$E_{xx} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial x}, E_{xy} = \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial f}{\partial x}, E_{yx} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y}, E_{yy} = \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial f}{\partial y}, \quad (5 \cdot 26)$$

の絶対値も各々小さいはずである．そこでこれら $E_1^2, E_{xx}^2, E_{xy}^2, E_{yx}^2, E_{yy}^2$ の重み付け和が各点において小さくなるように，形状を表す関数を画像全体に対して最適化する方法が用いられる．

5-2-2 Photometric Stereo

前節で述べたように，単一の画像から法線を一意に定めることはできない．そこで照明方向が異なる複数の画像を用いて式 (5 \cdot 21) を連立させ，周囲画素との関係や対象物体形状の仮定を用いることなく法線を一意に求める方法が Photometric Stereo である．

ここでも再び，対象物体の反射特性は Lambert の拡散反射モデルに従うと仮定する． n 通りの照明条件でシーンを撮影したとき，それぞれの入射光の方向ベクトルを L_1, L_2, \dots, L_n ，光源照度を a_1, a_2, \dots, a_n とする．また画像から R 画素取得するとき，これら各点の法線ベクトルを N_1, N_2, \dots, N_R ，各点の反射率を $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_R$ とする．このとき観測データは照明条件の数 n と画素数 R の組合せにより $I_{11}, I_{12}, \dots, I_{nR}$ の nR 個得られ，これらの間の関係は

$$\begin{aligned} \mathbb{I} &= \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & \dots & I_{1R} \\ I_{21} & I_{22} & \dots & I_{2R} \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ I_{n1} & I_{n2} & \dots & I_{nR} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} s_{x1} & s_{y1} & s_{z1} \\ s_{x2} & s_{y2} & s_{z2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{xn} & s_{yn} & s_{zn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{x1} & v_{x2} & \dots & v_{xR} \\ v_{y1} & v_{y2} & \dots & v_{yR} \\ v_{z1} & v_{z2} & \dots & v_{zR} \end{bmatrix} = \mathbb{S}\mathbb{N} \end{aligned} \quad (5 \cdot 27)$$

と表現できる．ここでは \mathbb{I} を観測行列と呼ぶ．ただし $(s_{xi}, s_{yj}, s_{zi}) = a_i L_i, (v_{xj}, v_{yj}, v_{zj}) = \rho_j N_j$ である．ここでもしすべての光源の方位と照度が既知である，すなわち \mathbb{S} が与えられていると仮定すると，法線と反射率の情報を含む行列 \mathbb{N} は

$$\mathbb{N} = \mathbb{S}^+ \mathbb{I} \quad (5 \cdot 28)$$

で求められる．ただし \mathbb{S}^+ は \mathbb{S} の疑似逆行列で， $\mathbb{S}^+ = (\mathbb{S}^T \mathbb{S})^{-1} \mathbb{S}^T$ である．式から明らかなように，この計算は $n = 3$ のときに連立方程式として解かれ， $n > 3$ のときに最小自乗法として解が得られる．

Photometric Stereo はその後，光源に関する情報 \mathbb{S} が未知の場合について拡張された．これを Uncalibrated Photometric Stereo といい， \mathbb{I} のランクが 3 であることを利用し，特異値分解により \mathbb{I} を \mathbb{S} と \mathbb{N} に分解する．しかし特異値分解の不定性により物体の形状を一意に決定することができない．この不定性は Generalized Bas-Relief ambiguity³⁾ と呼ばれ，反射特性

(BRDF)に関する仮定や陰，鏡面反射などによりこの不定性を取り除く研究が盛んに行われている。

参考文献

- 1) B.K.P. Horn, "Height and gradient from shading, Int. Journal of Computer Vision," vol.5, pp.37-75, 1990.
- 2) R.J. Woodham, "Photometric method for determining surface orientations from multiple images," Optical Engineering, vol.19, pp.139-144, 1980.
- 3) Peter N. Belhumeur, David J. Kriegman, Alan L. Yuille, "The Bas-Relief Ambiguity, International Journal of Computer Vision," vol.35, pp.33-45, 1999.

2群 - 2編 - 5章

5-3 反射特性の計測

(執筆: 向川康博)[2010年1月受領]

実物体の反射特性を正確に知ることができれば、より写実性の高いCGを合成できるだけでなく、塗装面の検査や表面微細形状に基づく真贋判定など、様々な応用が期待される。5-1節でも述べたとおり、BRDFは入射と反射の双方向に依存するため、物体表面上の計測点に対して、照明方向と観測方向を様々に変化させた場合の反射光強度をサンプリングする必要がある。本節では、BRDFのサンプリング方法について述べた後、サンプリング値と反射モデルの関係について説明する。

5-3-1 BRDFのサンプリング方法

物体表面上の計測点に対して、照明方向と観測方向を様々に変化させた場合のBRDFをサンプリングする方法は、用いる装置や前提条件の違いによって、主に四つの手法に大別できる。以下では、それぞれのサンプリング方法とともに、その利点と問題点を整理する。

(1) 光源とセンサを機械的に回転

図5・8(a)のように、ロボットアームや回転ステージに光源とセンサ(あるいは対象物体)を取り付け、機械的に回転させることで、計測面の法線方向に対して照明方向と観測方向を様々に変化させた場合のBRDFをサンプリングすることができる。計測点を中心とした半球面上で光源とセンサを均一かつ密に回転させるためには、専用の計測装置であるゴニオリフレクトメータが利用される¹⁾。回転角度を小さくすることで密なBRDFをサンプリングできるが、機械的な回転のために計測時間が長くなることが問題である。

(2) 反射特性が一樣な物体を利用

簡便な方法として、物体表面のBRDFが一樣であれば、少数の画像からBRDFをサンプリングすることができる。例えば、球はすべての法線方向を含むため、図5・8(b)のように光源とカメラを固定して球を撮影するだけでも、球面上の各点における法線に対して相対的に照明方向と観測方向が異なるBRDFのサンプリングが可能である²⁾。更に光源位置を変化させれば、より多くのBRDFをサンプリングできる。布などのように球にすることが難しい素材の場合は円筒に巻きつけるなどの工夫も可能である³⁾。更に、3次元スキャナと併用することで、人間の顔などの任意形状を撮影した画像からBRDFをサンプリングすることも可能である⁴⁾。形状が既知であれば比較的手軽に計測できるが、不均一なBRDFをもつ物体には適用できないという制限がある。

(3) 光源とセンサを半球状に配置

光源やセンサを物理的に回転させる代わりに、図5・8(c)のように、計測対象を中心に光源とセンサを半球状に配置することで、入射角と反射角の様々な組合せによるBRDFをサンプリングできる。151台のフラッシュ付きカメラを半球上に配置したシステム⁵⁾や、半球上に配置したLEDを光源とセンサの両方の機能のために利用するシステム⁶⁾などが開発されている。光源とセンサの機械系な回転が不要であることから高速な計測が可能であるが、物理的

な制約から密な BRDF のサンプリングは難しい。

(4) 反射屈折光学系を工夫

鏡、魚眼レンズ、ビームスプリッタなどの反射屈折光学系を工夫することで、機械的な回転機構を用いることなく照明・観測方向を高速かつ密に変化させて BRDF をサンプリングできる。光源やセンサの角度を仮想的に変化させるために、楕円鏡⁷⁾や放物面鏡⁸⁾のほか、円筒状の鏡⁹⁾や万華鏡のように平面鏡を組み合わせたもの¹⁰⁾など、鏡の形状を工夫した様々な計測システムが開発されている。更に、光源としてプロジェクタを用いることで、照明方向を高速に変えることができる。例えば図 5・8(d) は、楕円鏡の二つの焦点位置にプロジェクタと対象物体をそれぞれ配置した例¹¹⁾であり、計測対象を中心として、光源とカメラ位置を仮想的に半球状に密に配置できる。反射屈折光学系とプロジェクタを組み合わせることで、BRDF を高速かつ密にサンプリングできるが、光学的なアライメントが難しいなどの問題がある。

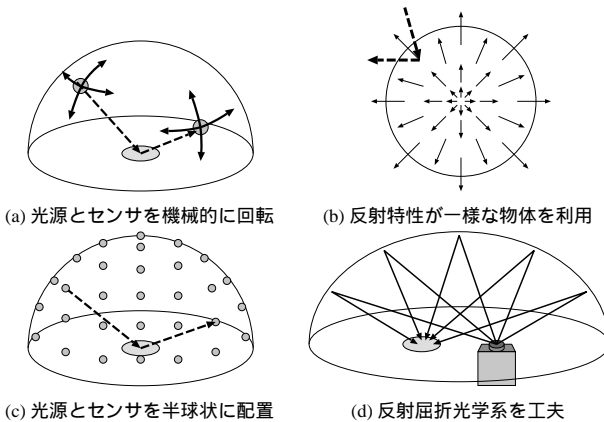


図 5・8 BRDF のサンプリング

5-3-2 BRDF のサンプリングと反射モデル

サンプリングされた BRDF は、反射特性を表す離散的な情報に過ぎない。サンプリング値を、表面の微細形状の解析や CG に利用するためには、サンプリング値と反射モデルの関係を明らかにする必要がある。

一般には、対象物体に適した反射モデルを仮定し、サンプリング値に反射モデルを当てはめてパラメータを推定する。この場合は、仮定したモデルが実際の反射と適合していることが前提となり、いかに安定してパラメータを推定できるかが課題となる。5-1 節でも述べたとおり、ほとんどの反射モデルでは、反射光を拡散反射成分と鏡面反射成分の和として表現している。そのため、パラメータ推定の前処理として、反射光を拡散反射成分と鏡面反射成分に分離し、それぞれ別々にモデルに当てはめられる。両成分の分離のためには、拡散反射と鏡面反射の偏光や色の違いなどが利用される。例えば、照明が偏光であった場合、鏡面反射は偏光を保つのに対して、拡散反射は偏光の性質を乱す。この性質を利用すれば、照明を

偏光とし、カメラの前に配置した偏光板を回転しながら撮影することで、拡散反射と鏡面反射を比較的安定に分離することが可能である。また、2色性反射モデルによれば、鏡面反射は光源色となるのに対して、拡散反射は光源色と物体色の積となることから、RGB空間での分布の違いを利用して両成分を分離できる。

一方、反射特性が複雑で既存のパラメトリック関数で近似することが困難な場合や、映画などのように極めて高い再現性が求められる場合には、サンプリング値をそのままBRDFの参照テーブルとして利用することも可能である。以前は、このような方法は記憶容量の問題から非現実的と考えられてきたが、最近ではテラバイト単位の膨大な記憶容量が安価に利用できることから、現実的になりつつある。ただし、十分な精度を保つためには、BRDFのサンプリング間隔を密にする必要があるため、いかにして計測時間を短縮するかが課題となる。

参考文献

- 1) H. Li, S.C. Foo, K.E. Torrance, and S.H. Westin, "Automated three-axis gonireflectometer for computer graphics applications," Proc. SPIE, vol.5878, pp.221-231, 2005.
- 2) S.R. Marschner, S.H. Westin, E.P.F. Lafortune, K.E. Torrance, "Image-Based Bidirectional Reflectance Distribution Function Measurement," Applied Optics, vol.39, no.16, pp.2592-2600, 2000.
- 3) R. Lu, J.J. Koenderink, and A.M.L. Kappers, "Optical Properties (Bidirectional Reflection Distribution Functions) of Velvet," Applied Optics, vol.37, No.25, pp.5974-5984, 1998.
- 4) S.R. Marschner, S.H. Westin, E.P.F. Lafortune, K.E. Torrance, and D.P. Greenberg, "Image-Based BRDF Measurement Including Human Skin," Proc. 10th Eurographics Workshop on Rendering, pp.139-152, 1999.
- 5) G. Müller, G.H. Bendels, and R. Klein, "Rapid Synchronous Acquisition of Geometry and Appearance of Cultural Heritage Artefacts," VAST2005, pp13-20, 2005.
- 6) M. Ben-Ezra, J. Wang, B. Wilburn, X. Li, and L. Ma, "An LED-only BRDF Measurement Device," Proc. CVPR2008, pp.1-8, 2008.
- 7) P.R. Mattison, M.S. Dombrowski, J.M. Lorenz, K.J. Davis, H.C. Mann, P. Johnson, and B. Foos, "Hand-held directional reflectometer: an angular imaging device to measure BRDF and HDR in real time," Proc. SPIE, vol.3426, pp.240-251, 1998.
- 8) K.J. Dana and J. Wang, "Device for convenient measurement of spatially varying bidirectional reflectance," J. Opt. Soc. Am. A, vol.21, Issue 1, pp.1-12, 2004.
- 9) S. Kuthirummal and S.K. Nayar, "Multiview Radial Catadioptric Imaging for Scene Capture," Proc. SIGGRAPH2006, pp.916-923, 2006.
- 10) J.Y. Han and K. Perlin, "Measuring Bidirectional Texture Reflectance with a Kaleidoscope," ACM Transactions on Graphics, vol.22, no.3, pp.741-748, 2003.
- 11) Y. Mukaigawa, K. Sumino, Y. Yagi, "Rapid BRDF Measurement using an Ellipsoidal Mirror and a Projector," IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, vol.1, pp.21-32, 2009.

2群 - 2編 - 5章

5-4 光源の推定

(執筆者: 佐藤いまり) [2010年1月受領]

5-2節では、異なる照明下で観察した物体の明るさを手がかりとして物体形状を推定する手法を学んだ。本章では、逆に物体形状を既知として、観察されるシーンの明るさをもとにして光源分布を獲得する方法について説明する。

5-4-1 明るさの線形性に基づく光源推定

一般に、物体の明るさと光源との間には加法性が成り立つ。いくつかの光源を考えた場合、それらの光源がすべて点灯した際の物体の明るさは、各光源の下で観察された明るさの和となる。例えば、単位輝度をもつ二つの光源 $I^{(1)}$, $I^{(2)}$ のもとで観察されるシーン内のある点 i の明るさをそれぞれ $R_i(I^{(1)})$, $R_i(I^{(2)})$ と表すと、光源 $I^{(1)}$, $I^{(2)}$ を両方点灯したときに観察される点 i の明るさ x_i は、 $x_i = R_i(I^{(1)}) + R_i(I^{(2)})$ のように求めることができる。

また、ある光源の強さを定数倍にした際に観察される物体の明るさは、この光源のもとで観察された明るさの定数倍となる。例えば、 $I^{(1)}$ の強さが α_1 倍、 $I^{(2)}$ の強さが α_2 倍変化した場合の点 i の明るさは、 $x_i = \alpha_1 R_i(I^{(1)}) + \alpha_2 R_i(I^{(2)})$ のように求めることができる。

ここで、任意の光源分布を無限遠方に存在する無限個の光源 $I^j (j = 1, \dots, \infty)$ の和として表現すると、その光源分布のもとにおいて観察される明るさは $x_i = \sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j R_i(I^{(j)})$ と表すことができる。ここで α_j は各光源 I^j の強さを表す光源分布係数となる。実際には、光源分布は無限個ではなく十分に多い数 m 個の光源の和として近似して用いられることが多い:

$$x_i = \sum_{j=1}^m \alpha_j R_i(I^{(j)}). \quad (5.29)$$

例えば、ジオデシックドームは、その頂点が球面上で等しい密度で分布するという性質をもつため、 m 個の頂点方向を用いて等立体角で均等に光源分布を近似することができる。

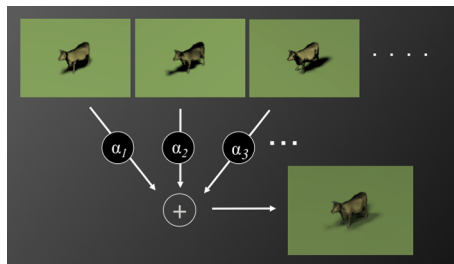


図 5.9 線形和による表現:各光源のもとで観察される画像に各光源の強さを表す光源分布係数 α_j をかけ合わせて和をとることで光源強度が変化した際の画像を生成できる

式 (5.29) において、各光源 $I^{(j)}$ のもとで観察されるシーン内の点 i の明るさを表す $R_i(I^{(j)})$ が与えられているとすると、あるシーンで観察される n 点の明るさ $x_i (i = 1, \dots, n)$ より、シーンの光源強度分布 α_j に関する連立 1 次方程式を得る:

$$x_i = \alpha_1 R_i(I^{(1)}) + \alpha_2 R_i(I^{(2)}) + \dots + \alpha_m R_i(I^{(m)}) \quad (i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m)$$

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ x_i \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \dots R_i(I^{(j)}) \dots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ \alpha_j \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$\mathbb{X} = \mathbb{R} \cdot \mathbb{I} \quad (5.30)$$

ここで、 \mathbb{R} の j 列は光源 $I^{(j)}$ のもとで観察される(または生成される)点 i の明るさ ($i = 1, \dots, n$) に相当する。したがって、あるシーンにおいて観察される画像中の n 画素 ($n \geq m$) の明るさ \mathbb{X} をもとに、式 (5.30) を未知数 α_j について解くことにより光源分布 $\alpha_j I^{(j)}$ ($j = 1, 2, \dots, m$) を求めることができる。これが明るさの線形性に基づく光源推定における基本的な考え方となっている。なお、現実には負の明るさをもつ光源が存在することはないため、式 (5.30) は光源分布係数 α_j が負にならないといった条件のもとで解かれることが多い。

ここで、各光源 $I^{(j)}$ 下におけるシーン内のある点 x_i の明るさを表す $R_i(I^{(j)})$ は光源からの 1 次反射だけでなく相互反射や影などの各要因も含んでいるとしても基本的な枠組みは変わらない点が重要である。例えば、シーン内の物体の幾何形状や反射特性が正しく与えられているとすれば、各基底光源下において観察される明るさは、大局照明問題のための CG の描画手法を用いてあらかじめ計算しておくことができる。また、シーン内の物体の形状や反射特性が与えられていないとしても、各基底光源下において実物体の画像を撮影すれば、そこで観察された明るさは相互反射などのすべての要因を含んだものとなる。このことから、明るさの線形性に基づく光源推定は非常に一般的な枠組みであるといえる。

Marschner らはこの枠組みに基づいて、単光源の方向を変えながら撮影した物体の画像の集合が与えられた場合に、未知の光源分布下で撮影された物体の画像から光源分布を表す係数 α_j を推定している³⁾。しかしながら、人の顔など比較的拡散反射成分が強く観察される物体を対象とし、主に 1 次反射成分のみを取り扱ったために光源分布係数を安定に求めることが難しかった。

5-4-2 影に基づく光源推定

凸物体表面上で観察される反射光のみならず、物体により落とされる影(キャストシャドウ)を利用することで複雑な光源分布も安定かつ正確に推定する手法が提案されている⁷⁾。この場合には遮へい物体により光源からの光が遮られることも考慮するため、式 (5.29) は

$$x_i = \sum_{j=1}^m \alpha_j S_{i,j} R_i(I^{(j)}) \quad (5.31)$$

のようになる。ここで $S_{i,j}$ は i 番目の画素で観察する物体表面上の点において j 番目の光源からの光が遮へいされているかどうかを表す係数であり、遮へいされていれば $S_{i,j} = 0$ 、遮へいされていなければ $S_{i,j} = 1$ となる。今、対象物体と遮へい物体の両方の形状が既知であるとすればこの係数は両方の物体の幾何関係をもとに計算することができる。よって、あとは明るさの線形性に基づき平面上に落とされる影内の明るさ分布と光源分布係数との関係を

式 (5・30) と同様に表現し光源分布を推定することができる:

$$x_i = \alpha_1 S_{i,1} R_i(I^{(1)}) + \alpha_2 S_{i,2} R_i(I^{(2)}) + \dots + \alpha_m S_{i,m} R_i(I^{(m)}) \quad (i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m)$$

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ x_i \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \dots S_{i,j} R_i(I^{(j)}) \dots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ \alpha_j \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{R}\mathbf{I} \tag{5・32}$$

図 5・10 に陰影から光源分布を推定した例を示す。この例では図 (a) の入力画像中のシーンにおける光源分布を推定するために、(b) に示す遮へい物体が床面上に落とすキャストシャドウ内の明るさをもとに光源分布を推定している。このようにして推定された光源分布を用いて新たな仮想物体を重ねこんだ結果を (c) に示す。

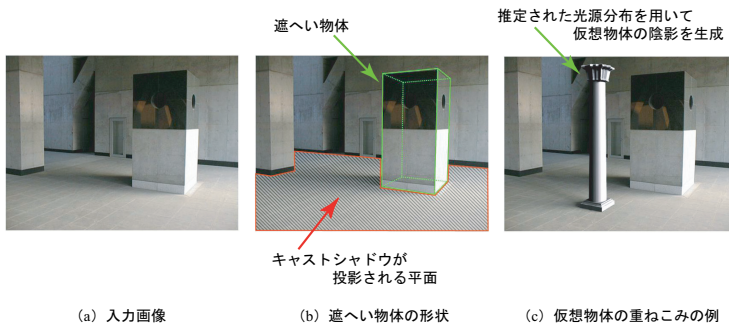


図 5・10 明るさの線形性に基づく光源推定

拡散反射面における 1 次反射成分のみを考慮した場合と異なり、影を考慮した場合には式 (5・32) において、 i, j の幾何関係に基づき求められる $S_{i,j}$ が多様となり、 \mathbf{R} がランク落ちしにくく、結果として光源分布係数を安定に求めることが可能となる。

例えば、図 5・10 において、キャストシャドウが投影される平面が拡散反射成分のみで構成され、遮へい物体がなく光の遮へいが発生しない状況を想定する。平面上の点 i が同じ法線方向をもつと考えると、観察される明るさ x_i 及び $R_i(I^j)$ がすべての点 i で同じとなり、この場合、式 (5・30) は不良設定問題となってしまふ。これに対し、遮へい物体による光の遮へいを考慮した場合、 i, j の幾何関係により求められる遮へい係数 $S_{i,j}$ が多様となり、この問題を回避することができる。

5-4-3 光源推定の安定性

光源推定の安定について、Ramamoothi らは理論的な解析を報告している⁶⁾。彼らは、凸物体表面上のある点における 1 次反射光強度の分布は環境の光源輝度分布と物体表面の BRDF

との畳み込みにより記述されるということに着目し、これらの関係は周波数領域において次のように簡潔に表現されることを示した。

$$B_{lm pq} = \Lambda_l L_{lm} \hat{\rho}_{l pq} \quad (5.33)$$

ここで $B_{lm pq}$ は反射光強度分布を球面調和関数で展開した展開係数、 L_{lm} は光源分布の展開係数、 $\hat{\rho}_{l pq}$ は BRDF の展開係数、 Λ_l は正規化定数、 l, m, p, q はそれぞれ球面調和関数の次数を表している。式 (5.33) から、観察された反射光分布から計算される展開係数 $B_{lm pq}$ を BRDF の展開係数 $\rho_{l pq}$ で割ることにより光源分布の展開係数 L_{lm} 、すなわち光源分布が求められることが分かる。

$$L_{lm} = \Lambda_l^{-1} \frac{B_{lm pq}}{\hat{\rho}_{l pq}} \quad (5.34)$$

しかしながら、Lambert モデルに従う完全拡散反射面では 99% 以上のエネルギーが 2 次以下の周波数成分に集中しているため、低次の $\hat{\rho}_{l pq}$ 以外はほぼゼロに等しく光源展開係数 L_{lm} を安定に求めることができない。Marschner ら³⁾が報告している光源推定の際の不安定さはこれに起因している。

これに対し、完全鏡面物体の場合には BRDF の展開係数 $\hat{\rho}_{l pq}$ が高次まで値をもつために、高次の光源展開係数を安定に求めることができる。これは鏡状の球体の反射光をもとに高周波成分を含んだ光源分布がうまく計測できることを説明している。また、影に基づく光源推定が経験的にうまく働く理由について周波数領域における理論的解析を報告し、更に複雑な光源分布を安定かつ効率よく推定するために Harr Wavelet 基底を用いた推定手法も提案されている⁴⁾。

5-4-4 光源設計を目的とした光源推定

明るさの線形性に基づく光源推定に関連した技術として、CG の分野において開発された光源設計 (lighting design) のための手法がある。Schoeneman らはシーン内の光源の輝度をいかにして調整するかという光源設計の問題を、ユーザが指定されたシーンの明るさを最も良く再現するような光源の輝度を求める問題ととらえ、painting with light と呼ばれる手法を開発した⁸⁾。Costa らは単にユーザが指定したシーンの明るさを最も良く再現するというだけでなく、シーン内のある特定の机面ができるだけ均一に照らされている、ある視点からユーザがシーンを見た場合にまぶしい鏡面反射光が目に入らない、といったより複雑な制約条件をも考慮した光源設計法を提案している¹⁾。更に、Shacked らは人間の視知覚特性をも考慮したうえで最も良いと思われる光源分布を決定するという興味深い手法を開発している⁹⁾。

5-4-5 専用のキャリブレーション物体を利用した光源推定

実環境の光源分布を計測するために専用のキャリブレーション物体を利用する方法がいくつか提案されている。例えば Debevec らは light probe と呼ばれる鏡面球をシーン内に設置して撮影し、鏡面球上の反射光強度をもとに環境内の光源分布を決定している²⁾。ただし、あらかじめ手入力で与えられている部屋の形状を利用して球と光源までの距離は求めている。なお、鏡面球を用いた光源分布計測において鏡面上の反射光強度を正しく求めるには十分広

いダイナミックレンジをもった計測が必要とされることから、シャッター速度を変えながら撮影した複数枚の画像をもとに生成する高ダイナミックレンジ画像が用いられることが多い。

1個の参照球だけでは光源の方向しか分からず光源までの距離が計測できないという課題に対して、Powellらは鏡面反射が強く観察される参照球を2個用いることにより、二つの参照球上のハイライトの対応づけを行い光源の位置を求める手法を提案している⁵⁾。ただし、この例ではいくつかの点光源の位置を求めるにとどまっており、より複雑な光源分布の推定へは適用できない。

鏡面反射するキャリブレーション球を用いる方法に対し、均一な反射特性をもった完全拡散球を利用した方法もいくつか提案されている。十分遠方にある1個の光源で拡散球を照らした場合、光源により照らされる領域と陰になる領域との間に円状の境界線が観察される。Zhangらは拡散球状でこのような境界線を複数見つけることにより複数の方向光源の方向と強度を推定する手法を開発した¹⁰⁾。しかしながら、拡散球を利用した手法では、球面上で境界線や等輝度線を安定に見つけることが難しく、数個程度の点光源など比較的単純な光源分布にしか適用できないという問題がある。

参考文献

- 1) A. Costa, A. Sousa, and F. Ferreira, "Lighting design: A goal based approach using optimization," Proc. the 10th Eurographics Workshop on Rendering, pp. 317-328, 1999.
- 2) P. Debevec, "Rendering synthetic objects into real scenes: Bridging traditional and imagebased graphics with global illumination and high dynamic range photography," Proc. ACM SIGGRAPH 98, pp.189-198, 1998.
- 3) S. Marschner and D. Greenberg, "Inverse lighting for photography," Proc. IS&T/SID Fifth Color Imaging Conference, pp.262-265, 1997.
- 4) T. Okabe, I. Sato, and Y. Sato, "Spherical harmonics vs. Haar wavelets: basis for recovering illumination from cast shadows," Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '04), pp.1-50-57, 2004.
- 5) M. Powell, S. Sarkar, and D. Goldgof, "A simple strategy for calibrating the geometry of light Sources," IEEE Trans. PAMI, vol.23, no.9, pp.1022-1027, 2001.
- 6) R. Ramamoorthi and P. Hanrahan, "A signalprocessing framework for inverse rendering," Proc. ACM SIGGRAPH 2001, pp.117-128, 2001.
- 7) I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Illumination from shadows," IEEE Trans. PAMI, vol.25, no.3, pp.290-300, 2003.
- 8) C. Schoeneman, J. Dorsey, B. Smits, J. Arvo, and D. Greenberg, "Painting with light," Proc. ACM SIGGRAPH'93, pp.143-146, 1993.
- 9) R. Shacked and D. Lischinski, "Automatic lighting design using a perceptual quality metric," Computer Graphics Forum (Eurographics 2001), vol.20, no.3, pp.215-227, 2001.
- 10) Y. Zhang and Y. Yang, "Multiple illuminant direction detection with application to image synthesis," IEEE Trans. PAMI, vol.23, no.8, pp.915-920, 2001.