

物体からの拡散反射光の推定

森 克己* 渡辺 浩司* 片桐 重和* 浅野 敦子** 渡邊 栄治†

Estimation of Diffuse Reflection at Object Surface

Katsumi MORI* Koji WATANABE* Shigekazu KATAGIRI*
Atsuko ASANO** and Eiji WATANABE†

ABSTRACT

This paper presents a new method for estimating diffuse reflection. The method is based on the dichromatic reflection model which says reflection at an object surface consists of two components, i.e. diffuse reflection and specular reflection. The components represent object color and light source color respectively and play important roles in Object Recognition and Computer Graphics. However, estimating the components separately has been difficult. The presented method based on an idea of using a cuboid to separate the components. First, it is pointed out that three surfaces of a cuboid illuminated by parallel rays give pure diffuse reflection (DR) to a camera sensing the surfaces. The second point is that normal DR radiance (NDR) corresponding to normally incident rays can be derived from radiance of the surfaces. The NDR gives the highest value of DR and light source direction. Finally, DR models at rounded edges are analytically studied and results of experiment suggest that the dichromatic reflection model is not available.

キーワード：拡散反射、物体色、直方体、2色性反射モデル、光源方向

Keywords: diffuse reflection, object color, cuboid, dichromatic reflection model, light source direction

1. まえがき

この100年は色彩の世紀だとも云われている。自然界の色彩には大きな変化はないが、人工的な色彩の増大は目を見張るばかりである。印刷、写真、映画、TVは全て白黒からカラーになり、衣服・ファッションからイルミネーションにいたるまで、街中に色彩が溢れている。もはや、色彩を無視した生活は考えられなくなっている。この理由の1つは、色材の進歩である。また、照明技術の革新でもある。ガス灯から電灯、ネオンサイン、蛍光灯、発光ダイオードへと照明光源の

進歩は著しい。

また一方では、今日、インターネットを始めとする、ネットワーク経由の商品販売や医療診断なども普及しつつあり、ディスプレイ上の表示色の統一、すなわち、カラーマネジメントの重要性が強く認識されるようになってきた。このような、社会のカラー情報化を背景に、本報告では、物体の色を決定する拡散反射光の推定法について検討する。

我々は物体の色をその反射光として知覚する。与えられた照明下での反射光は照明光の分光特性と物体の分光反射特性および物体表面の形状で決まる。光の反

* 情報処理工学科 ** 経済学科 † 甲南大学理工学部

射モデルとしては Phong や Torrance-Sparrow の 2 色性反射モデル (dichromatic reflection model) [1-3] が良く知られている。2 色性反射モデルでは、反射光の輝度は拡散反射 (diffuse reflection) と鏡面反射 (specular reflection) という性質が異なる 2 つの成分の和で与えられる。鏡面反射成分は物体と空気の境界面で反射される照明光そのものであり、一方、拡散反射成分は物体内部まで入り色素等による散乱や吸収を受けた後再び物体表面から空気中に出てくる光である。鏡面反射成分は画像中ではハイライト (highlight) 部を形成し光源色 (light source color) を表すのに対し、拡散反射成分はその光源に対する物体色 (object color) を表す。富永らはこの反射モデルの妥当性を詳しく調べ、プラスチック、ペンキ、陶器、植物葉など、多くの物体表面に対して適用可能であることを検証している [4]。

一般的に物体を観測したときには、拡散反射成分と鏡面反射成分が混在した状態で観測される。カメラを通して観測した画像から光源色と物体色を分離することは物体認識やコンピュータグラフィックス (CG) の分野において重要である。物体認識の分野では色恒常性の実現技術として、すなわち、異なる照明環境下での不変的な物体色の識別を可能とする技術として検討されている [5-7]。また、CG の分野では、CG 画像と写真の融合による複合現実感の実現を目的に、写真から光環境や物体表面の反射特性を推定する方法が検討されている [8,9]。

具体的な両成分の分離推定の考え方としては、①まず拡散反射成分を求め、その残差を鏡面反射成分とする、②逆に、鏡面反射成分を先に求める、③両成分を同時並行的に求める、の 3 つがある。いずれにしても、レンジファインダや特性が既知の補助光源、偏光フィルタ、回転台など特殊な装置を必要とする。また、複数枚の画像間の対応付け、反復処理など実際には困難な問題を含んでいる。

本論文では、直方体の試料を用いることで、光源や物体、カメラの配置に関する高い幾何学的精度を必要とせず、拡散反射成分を容易に推定できる手法を提案する。具体的には、照明光が当たる直方体の 3 平面の反射輝度から入射角 0 の場合の垂直拡散反射輝度、すなわち、物体色が求まることを示す。光源とカメラ以外に特殊な装置を必要としない、光の入射角の絶対値が求まる、などの利点がある。

2. 拡散反射成分の抽出と物体色の推定

2.1 反射モデル

本論文では反射モデルとして Torrance-Sparrow モ

デルを用いる。この反射モデルでは、物体表面からの反射光の分光輝度分布 $L(\lambda)$ は波長 λ の関数として、

$$L(\lambda) = \alpha \cos(\theta^i) S(\lambda) E(\lambda) + \beta \frac{F(\theta^i, n(\lambda), \kappa(\lambda)) \delta(\rho)}{\cos(\theta^r)} E(\lambda) \quad (1)$$

で与えられる [3]。ここで、 $E(\lambda)$ は光源の分光分布、 $S(\lambda)$ は物体面の分光反射率、 θ^i と θ^r はそれぞれ入射角と反射角、 α と β は重みである。また、 $F(\dots)$ は物体表面のフレネル反射率であり、入射角 θ^i 、屈折率 $n(\lambda)$ 、吸収係数 $\kappa(\lambda)$ の関数である。さらに、 $\delta(\rho)$ は表面の粗さを与える。 ρ は入・反射角の 2 等分線と表面法線が成す角である。式 (1) の右辺第 1 項は拡散反射成分を、第 2 項は鏡面反射成分を与える。反射輝度は光源の分光特性 $E(\lambda)$ や物体表面の分光反射率 $S(\lambda)$ とともに、入・反射角 θ^i 、 θ^r に依存している。

2.2 拡散反射成分の推定

本方法では、まず、拡散反射成分の推定を行う。照明光が当たる直方体の 3 面を同時に観測するとき、その輝度値は拡散反射成分のみから成り、かつ、それら 3 つの面の輝度値から入射角 0 の垂直拡散反射輝度が推定できることを示す。

図 1 のような反射特性が等しい面を持つ直方体を考え、3 つの稜に沿って座標軸 (x 、 y 、 z) を設定する。

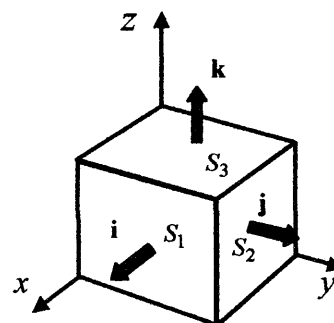


図 1 直方体と座標系

いま、直方体の3面 S_1 、 S_2 、 S_3 を同時に照らす1つの平行な照明光 \mathbf{E} を考える。すなわち、照明光 \mathbf{E} は $x > 0$ 、 $y > 0$ 、 $z > 0$ の象限内にあるものとする。

3軸 x 、 y 、 z に対する照明光 \mathbf{E} の方向余弦を $(\cos \theta_1$ 、 $\cos \theta_2$ 、 $\cos \theta_3)$ とすると、面 S_1 、 S_2 、 S_3 の単位法線ベクトルは明らかに x 、 y 、 z 軸方向の単位ベクトル \mathbf{i} 、 \mathbf{j} 、 \mathbf{k} と一致するので、面 S_1 、 S_2 、 S_3 に対する照明光の入射角は θ_1 、 θ_2 、 θ_3 となる。以後、入射角 θ^i の上添字 i は省略する。

次に、照明光 \mathbf{E} で照らされた3面 S_1 、 S_2 、 S_3 を同時に観測する場合の反射光を考える。鏡面反射成分は面の法線に関して入射角と対称的な狭い反射角内でのみ観測されることから、視点方向への反射光には鏡面反射成分は無く、全て、拡散反射成分となることが分かる。図1の場合、紙面の手前から入射した照明光 \mathbf{E} の鏡面反射成分は紙面の裏側へと出て行くことになる。

上述の結果、面 S_1 、 S_2 、 S_3 の反射輝度は式(1)の右辺第1項の拡散反射成分のみから成り、それぞれ、

$$L_{Si}(\lambda) = \alpha \cdot \cos(\theta_i) \cdot S(\lambda)E(\lambda), \quad (2)$$

$$(i = 1, 2, 3)$$

となる。

ここで、前述のように、直方体の3面 S_1 、 S_2 、 S_3 に対する入射角 θ_i の余弦 $\cos \theta_i$ が照明光 \mathbf{E} の方向余弦であることに着目すると、方向余弦に関する

$$\sum_{i=1}^3 \cos^2 \theta_i = 1 \text{ の関係から、}$$

$$\sum_{i=1}^3 \{L_{Si}(\lambda)\}^2 = \{\alpha \cdot S(\lambda)E(\lambda)\}^2 \quad (3)$$

が得られる。式(3)は3つの面 S_1 、 S_2 、 S_3 の反射輝度 $L_{Si}(\lambda)$ の2乗和は入射角 0 で照明光 \mathbf{E} を物体に照射

したときに得られる拡散反射輝度を与えることを示している。この結果、光源、物体、カメラの位置に関する厳密な幾何学的な精度を必要とすることなく、垂直に物体面を照らしたときの拡散反射輝度を求めることが可能となる。

そこで、新たに、式(1)の重み α を含めて垂直拡散反射輝度を以下のように定義する。

$$D_0^\lambda = \alpha \cdot S(\lambda)E(\lambda) \quad (4)$$

一旦、垂直拡散反射輝度 D_0^λ が求まると、入射角 θ の同一照明光で照らされた場合の拡散反射輝度 D_θ^λ は次式で求めることができる。

$$D_\theta^\lambda = D_0^\lambda \cdot \cos(\theta) \quad (5)$$

2.3 物体色の推定

面 S_i の R 、 G 、 B カラー成分は次のように求められる[10]。

$$\begin{aligned} R_{Si}^D(\theta_i) &= \int_{[\lambda]} L_{Si}(\lambda) \overline{r(\lambda)} d\lambda \\ &= \cos(\theta_i) \int_{[\lambda]} \alpha S(\lambda) E(\lambda) \overline{r(\lambda)} d\lambda \\ &= R_0^D \cdot \cos(\theta_i), \\ G_{Si}^D(\theta_i) &= G_0^D \cdot \cos(\theta_i), \\ B_{Si}^D(\theta_i) &= B_0^D \cdot \cos(\theta_i), \quad (i = 1, 2, 3). \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、

$$\begin{aligned} R_0^D &= \int_{[\lambda]} \alpha S(\lambda) E(\lambda) \overline{r(\lambda)} d\lambda, \\ G_0^D &= \int_{[\lambda]} \alpha S(\lambda) E(\lambda) \overline{g(\lambda)} d\lambda, \\ B_0^D &= \int_{[\lambda]} \alpha S(\lambda) E(\lambda) \overline{b(\lambda)} d\lambda \end{aligned} \quad (7)$$

である。また、 $\overline{r(\lambda)}$ 、 $\overline{g(\lambda)}$ 、 $\overline{b(\lambda)}$ は R 、 G 、 B 表色系におけるセンサーの分光感度、 $[\lambda]$ は可視光の波長領域である。

式(3)の導出と同様に、3平面 S_1 、 S_2 、 S_3 のカラー成分の2乗和を求めると、

$$\begin{aligned} \sum_{i=1,2,3} \{R_{S_i}^D(\theta_i)\}^2 &= \{R_0^D\}^2 \cdot \sum_{i=1,2,3} \cos^2(\theta_i) \\ &= \{R_0^D\}^2, \\ \sum_{i=1,2,3} \{G_{S_i}^D(\theta_i)\}^2 &= \{G_0^D\}^2, \\ \sum_{i=1,2,3} \{B_{S_i}^D(\theta_i)\}^2 &= \{B_0^D\}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

を得る。すなわち、 R 、 G 、 B のカラー成分ごとの垂直拡散反射輝度 R_0^D 、 G_0^D 、 B_0^D 、すなわち、物体色を求めることができる。

垂直拡散反射輝度 R_0^D 、 G_0^D 、 B_0^D が求まると、入射角 θ の面の拡散反射輝度 $[R_\theta^D, G_\theta^D, B_\theta^D]^t$ (t は転置を示す)は、式(6)より、

$$\begin{bmatrix} R_\theta^D \\ G_\theta^D \\ B_\theta^D \end{bmatrix} = \cos(\theta) \begin{bmatrix} R_0^D \\ G_0^D \\ B_0^D \end{bmatrix} \quad (9)$$

で与えられる。 R, G, B 色空間における物体色ベクトルを

$$\mathbf{D}_\theta = R_\theta^D \mathbf{r} + G_\theta^D \mathbf{g} + B_\theta^D \mathbf{b} \quad (10)$$

と記述する。ただし、 $\mathbf{r}, \mathbf{g}, \mathbf{b}$ は色空間における R, G, B 軸方向の単位ベクトルである。

2.4 光源方向の推定

写真撮影時の光源方向を知ることは、同じ照明環境下の物体の認識や写真とCG画像の合成処理に有効である。

本方法では、式(6)、(7)、(8)から光源方向を容易に求めることができる。すなわち、直方体の3つの平面 S_i ($i=1,2,3$)について、輝度値 $R_{S_i}^D(\theta_i)$ 、 $G_{S_i}^D(\theta_i)$ 、 $B_{S_i}^D(\theta_i)$ を観測で求めた後、式(8)から各カラー成分の垂直拡散反射輝度 R_0^D 、 G_0^D 、 B_0^D を求める。その後、

式(6)から

$$\cos(\theta_i) = \frac{R_{S_i}^D(\theta_i)}{R_0^D} = \frac{G_{S_i}^D(\theta_i)}{G_0^D} = \frac{B_{S_i}^D(\theta_i)}{B_0^D} \quad (11)$$

により平面 S_i に対する入射角 θ_i が求められる。理論的には、当然、 R 、 G 、 B のいずれのカラー成分で求めても、同じ入射角 θ_i が得られることになる。このことは、求めた結果の信頼性の評価に利用できる。

3. 実験と考察

3.1 実験条件

図2に実験試料であるプラスチック製の積み木の観測状況を示す。積み木は断面が(6 cm x 6 cm)または(6 cm x 3 cm)、長さが6 cmまたは12 cmの直方体であり、稜は円柱状に丸く成形されている。使用したカメラは市販のデジタルカメラで、オートホワイトバランスはoff、画像データは非圧縮モードで撮影した。

床、壁、天井などの周囲からの反射光の影響が少なくなるように、試料直方体をカメラの3脚に乗せ、外光を遮断した状態で3面にスライドプロジェクタの光を照射し、それらの3面が同時に見えるカメラ位置から撮影した。光源と試料の距離は3 m程度とし、試料面上の観測領域を直径約5 cmの領域内とすることで近似的に平行光とみなした。

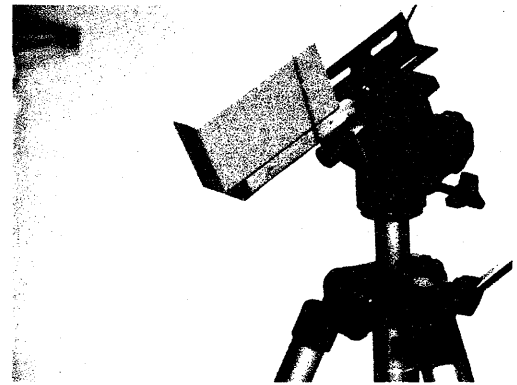
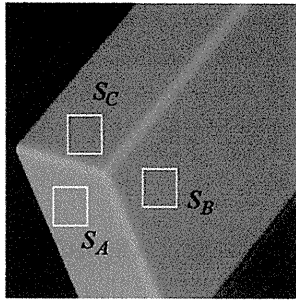


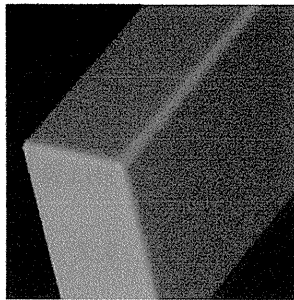
図2 試料の観測状態

試料の色は白、橙、桃、象牙の4色である。図3に実験に用いた試料の写真を示す。

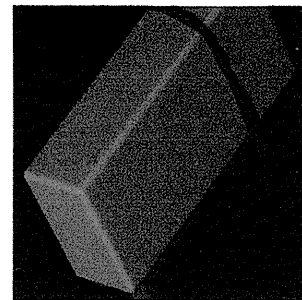
画像サイズは(400x400 画素)、輝度階調数は256である。図(a-1)には説明の便宜上、観測領域 S_A, S_B, S_C を示している。観測領域の大きさは(11x11 画素)である。図3の各試料で、#1と#2 (#はW、D、P、Iを



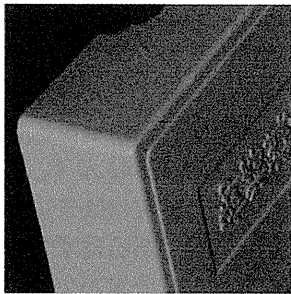
(a-1) 白 W1



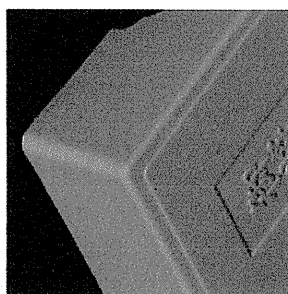
(a-2) 白 W2



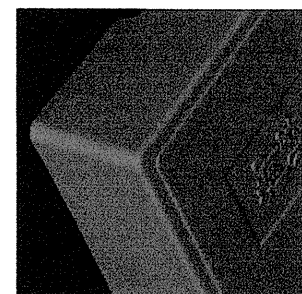
(a-3) 白 W3



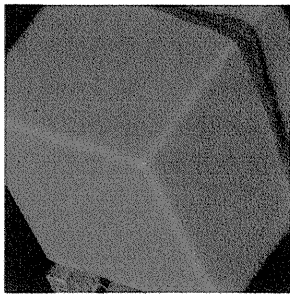
(b-1) 橙 D1



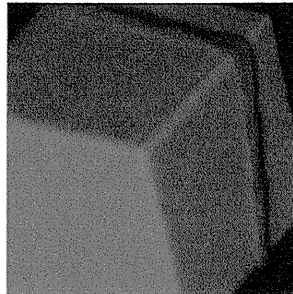
(b-2) 橙 D2



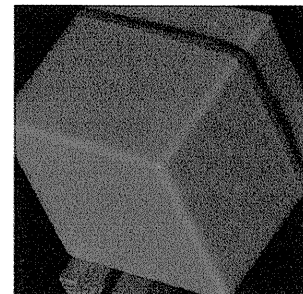
(b-3) 橙 D3



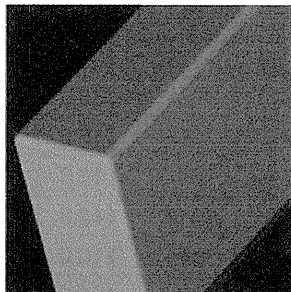
(c-1) 桃 P1



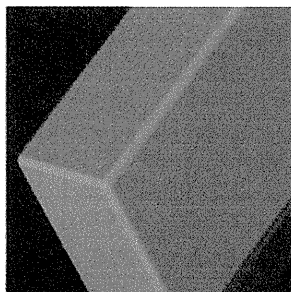
(c-2) 桃 P2



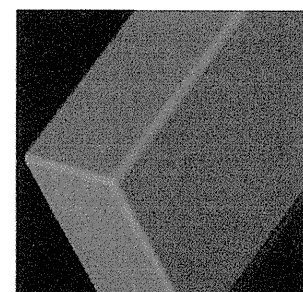
(c-3) 桃 P3



(d-1) 象牙 I1



(d-2) 象牙 I2



(d-3) 象牙 I3

図3 実験で用いた試料の写真

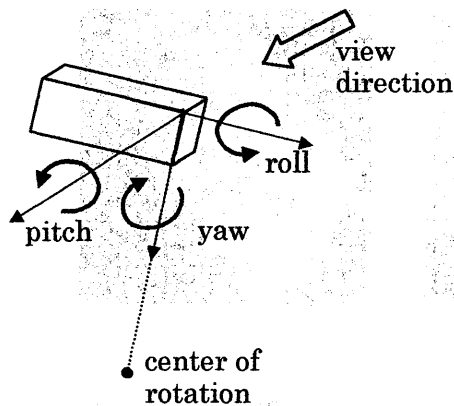


図4 姿勢規定用の3軸角

表1 試料の設定姿勢(度)

姿勢	ロール	ピッチ	ヨー
S0	2.1	-0.6	0.0
S1	-2.2	-31.8	24.5
S2	-2.4	-36.1	25.2
S3	-2.7	-36.7	28.0
S4	-1.0	-24.7	18.1
S5	-1.5	-23.7	22.4

表す)は試料の姿勢が異なるだけで照明およびカメラの撮影条件は同じである。#3は#1、#2より露光量が少なく、カメラの撮影条件が異なる。試料W3とD3、P3とI3はそれぞれ露光量は同じである。

表2 実測輝度値

試料		実測輝度値								
		面A			面B			面C		
		R	G	B	R	G	B	R	G	B
白	W1	144.0	169.0	150.0	114.0	138.0	123.0	113.0	138.0	123.0
	W2	154.0	180.0	160.0	92.1	118.0	104.0	98.5	123.0	112.0
	W3	108.0	132.0	115.0	88.5	111.0	97.4	93.3	118.0	105.0
橙	D1	159.0	172.0	130.0	98.8	109.0	77.4	104.0	116.0	84.4
	D2	144.0	155.0	115.0	124.0	135.0	95.3	131.0	142.0	103.0
	D3	113.0	124.0	91.2	90.2	99.6	70.1	99.1	110.0	76.2
桃	P1	157.0	113.0	98.9	141.0	98.0	85.1	146.0	104.0	92.8
	P2	176.0	131.0	115.0	131.0	87.7	75.4	126.0	84.5	76.1
	P3	151.0	110.0	94.8	130.0	88.4	76.2	138.0	98.2	87.0
象牙	I1	151.0	168.0	127.0	103.0	118.0	89.1	92.3	110.0	84.3
	I2	140.0	155.0	116.0	115.0	129.0	96.2	122.0	136.0	105.0
	I3	125.0	139.0	103.0	100.0	117.0	86.4	108.0	122.0	93.1

図4には直方体試料の姿勢を規定するロール(roll)、ピッチ(pitch)、ヨー(yaw)の3軸の角度を示す。また、表1には、実験で設定した試料の姿勢(S0は角度センサーの初期値)を示す。観測面の輝度が極端に違わないという条件から、ロール角はほぼ一定で、ピッチ角とヨー角を主に変化させた。各写真撮影時の試料の姿勢は表3に示す。

3.2 垂直拡散反射輝度と入射角の推定

図3に示す各試料について、観測領域 S_A 、 S_B 、 S_C

内の各画素の R 、 G 、 B 輝度値(0~255)を測定した。表2に各観測領域(11x11画素)の平均値を示す。

前述のように、試料#1、#2に比べて#3の輝度値が低いのは、カメラの露光量が少ないためである。

表2の3面の実測輝度値から垂直拡散反射輝度と光の入射角を求めた結果を表3に示す。

光源に対する直方体の姿勢(傾き)が変化しても、垂直拡散反射輝度は不変であるはずである。この点から表3の結果を見ると、露光量が少ない試料#3(#はW,D,P,I)の値が試料#1、#2の値に比べて明らかに小さいのに対して、露光量が同じで姿勢のみが異なる試料#1、#2はほぼ近い値をとっている。このことから、姿勢の違いに対する垂直拡散反射輝度の不変性が確認される。試料#1、#2の値に若干のずれが見られるが、これは、姿勢の違いによって、試料と光源、カメラ間の距離が変動するためである。

表3 垂直拡散反射輝度と入射角の推定値

試料	姿勢		垂直拡散反射輝度			入射角(度)								
						面 A			面 B			面 C		
			R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B
白	W1	S1	215.6	258.2	229.7	48.1	49.1	49.2	58.1	57.7	57.6	58.4	57.7	57.6
	W2	S4	204.7	247.9	221.3	41.2	43.4	43.7	63.3	61.6	62.0	61.2	60.3	59.6
	W3	S2	167.9	209.0	183.7	50.0	50.8	51.2	58.2	57.9	58.0	56.3	55.6	55.1
橙	D1	S4	214.1	234.4	173.2	42.1	42.8	41.4	62.5	62.3	63.5	60.9	60.3	60.9
	D2	S3	230.8	249.8	181.4	51.4	51.7	50.7	57.5	57.3	58.3	55.4	55.4	55.4
	D3	S2	175.3	193.4	138.0	49.9	50.1	48.6	59.0	59.0	59.5	55.6	55.3	56.5
桃	P1	S3	256.6	182.2	160.1	52.3	51.7	51.9	56.7	57.5	57.9	55.3	55.2	54.6
	P2	S5	253.0	178.9	157.2	45.9	42.9	43.0	58.8	60.6	61.3	60.1	61.8	61.0
	P3	S2	242.4	171.9	149.5	51.5	50.2	50.7	57.6	59.1	59.4	55.3	55.2	54.4
象牙	I1	S5	204.8	232.9	176.6	42.5	43.8	44.0	59.8	59.6	59.7	63.2	61.8	61.5
	I2	S2	218.4	243.2	183.7	50.1	50.4	50.8	58.2	58.2	58.4	56.0	56.0	55.1
	I3	S2	193.1	218.8	163.5	49.7	50.6	51.0	58.8	57.7	58.1	56.0	56.1	55.2

3.3 物体面の傾きの検出

物体面に対する光の入射角が求まることから、逆に、光源を固定すれば物体表面の傾きを求めることが可能となる。

図5(a)は図3の試料 D1 の再掲である。試料 D1 の表面には文字が浮かし彫りで記されており、種々の傾きの微小面を含んでいる。試料 D1 に対する垂直拡散反射輝度は $[R_0^D, G_0^D, B_0^D]^t = [214.1, 234.4, 173.2]^t$ と求め

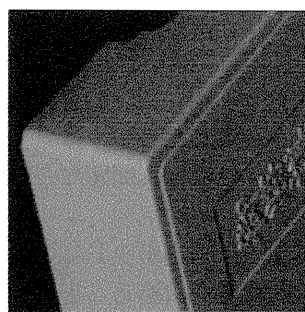
られている。したがって、検出したい面の傾きを θ とすれば、式(9)から、画像上でのカラー成分値 $[R_\theta^D, G_\theta^D, B_\theta^D]^t$ を持つ画素の領域として検出することができる。 $58^\circ \geq \theta \geq 63^\circ$ の傾きの面を検出した結果を黒画素領域として図5(b)に示す。上面が平坦でなく、撓んでいることが確認できる。

4. 稜の解析

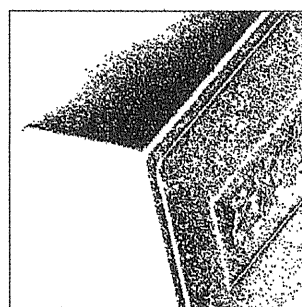
4.1 カメラのダイナミックレンジの補完

図6はハイライト部を含む試料である。ハイライト部は鏡面反射領域であり、光源色情報を含んでいる。したがって、式(1)で表される拡散反射成分と鏡面反射成分を分離できれば、物体認識あるいはCG画像と写真の融合技術にとって有用な情報が得られる。

図7は図6のハイライト部に対するカラーヒストグラムである。鏡面反射成分は光源光そのものに近いので拡散反射成分に比べると輝度値ははるかに高くなる。すなわち、拡散反射成分と鏡面反射成分の両成分のR,G,Bカラー成分の輝度分布はかなり広がる。これ



(a) 試料 D1



(b) 検出結果

図5 指定傾き面の検出実験

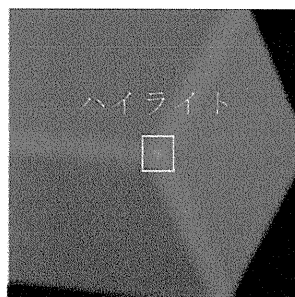


図6 ハイライト部

に対し、デジタルカメラのダイナミックレンジは比較的狭く、一般に、1つのダイナミックレンジ内に、上記のすべての成分を収めることは困難である。図7の例でも、拡散反射のB成分は輝度値0以下の縮退が生じており、他方、鏡面反射成分のR成分は輝度値255に近い値をとっている。

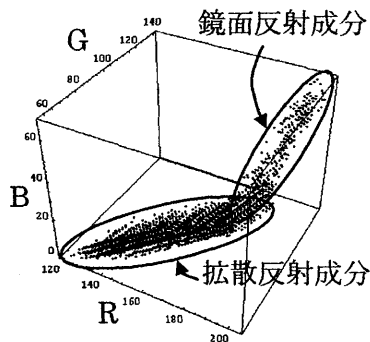


図7 カラーヒストグラム

この問題を避けるためには、絞りを変えるなどして撮影した、ダイナミックレンジが異なる複数枚の写真を対象に処理する必要があるが、露光量と輝度値の線形性の保証などカメラの校正問題などの困難な問題が生じる。

拡散反射の輝度値に縮退が生じていれば、本提案手法の垂直拡散反射輝度を求めることができない。そこで、より輝度値が高い拡散反射成分で垂直拡散反射輝度値を推定することが要求される。図6から分るように、平面領域に比べると、稜部分は明らかに輝度値が高いことが分る。したがって、この稜部分から垂直拡散反射輝度値が推定できれば、デジタルカメラのダイナミックレンジの狭さの問題が改善される。

4.2 稜部分の輝度分布

図8のようにハイライト部分を中心とする円軌跡を考え、軌跡上の画素の輝度値を計測した。R成分についての結果を図9に示す。

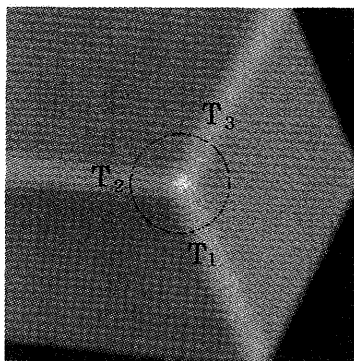


図8 輝度の観測点軌跡

試料は稜が丸く形成されており、平面に比べて輝度が高くなっている。G、Bのカラー成分についても同様の結果が得られる。CCDカメラのダイナミックレンジの狭さを補う意味でも、輝度が高いこれらの稜部分を利用することが考えられる。

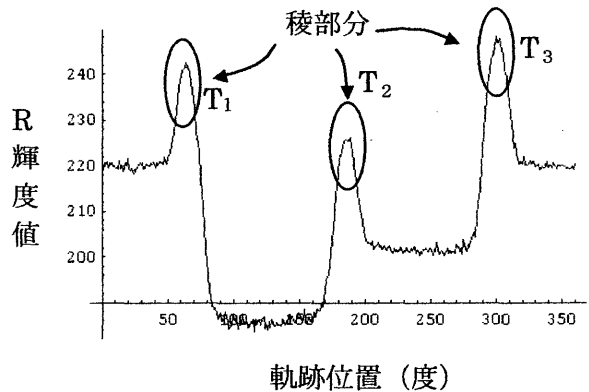


図9 稜部の輝度分布

4.2.1 理論的解析

(1) 最大輝度入射角

稜の断面が円形で(円柱軸稜とよぶ)、照明光は並行光線であると仮定して解析する。

光源方向 \mathbf{e} を、一般に

$$\mathbf{e} = e_x \mathbf{i} + e_y \mathbf{j} + e_z \mathbf{k} \quad (12)$$

とおく。

図1のように座標系を設定するとき、照明光で照らされる3個の稜の円柱軸方向はそれぞれ \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} となることが分る。そこで、いま、図10のように、稜の円柱軸方向が \mathbf{i} である稜について考える。

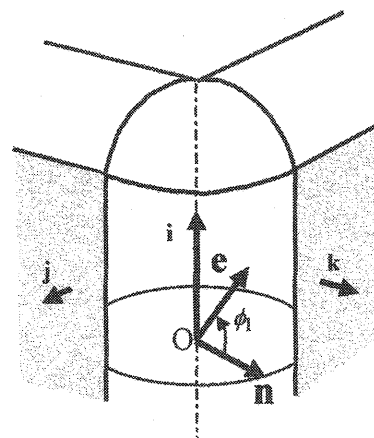


図10 円柱軸稜の解析

このとき、稜面の法線は $y-z$ 平面上にあり、入射角 ϕ_1 が最小になる法線を \mathbf{n} とすれば、

$$\mathbf{n} = n_y \mathbf{j} + n_z \mathbf{k} = \gamma(e_y \mathbf{j} + e_z \mathbf{k}) \quad (13)$$

となる。ただし、 n_x, n_y, n_z は法線 \mathbf{n} の方向余弦、 γ は正規化係数で

$$\gamma = 1/\sqrt{e_y^2 + e_z^2}$$

である。
このとき、

$$\begin{aligned} \cos(\phi_1) &= \mathbf{e} \cdot \mathbf{n} \\ &= \gamma(e_x \mathbf{i} + e_y \mathbf{j} + e_z \mathbf{k}) \cdot (e_y \mathbf{j} + e_z \mathbf{k}) \\ &= \sqrt{e_y^2 + e_z^2} \end{aligned} \quad (14)$$

となる。

(2) 拡散反射モデル

ここで、次式のように、拡散反射輝度が入射角の余弦の m 乗に比例する反射モデルを考える。

$$L(\lambda) = \alpha \cos^m(\theta) S(\lambda) E(\lambda) \quad (15)$$

[I] $m=1$ の反射モデル

Torrance-Sparrow モデルに従う場合である。
3つの直交する稜に関して

$$\begin{aligned} \cos^2 \phi_1 + \cos^2 \phi_2 + \cos^2 \phi_3 &= 2(e_x^2 + e_y^2 + e_z^2) \\ &= 2 \end{aligned} \quad (16)$$

である。稜における拡散反射輝度に関して、式 (3) と同様に

$$\begin{aligned} L_{T1}(\lambda) &= \alpha \cdot \cos \phi_1 \cdot S(\lambda) E(\lambda), \\ L_{T2}(\lambda) &= \alpha \cdot \cos \phi_2 \cdot S(\lambda) E(\lambda), \\ L_{T3}(\lambda) &= \alpha \cdot \cos \phi_3 \cdot S(\lambda) E(\lambda) \end{aligned} \quad (17)$$

から、

$$\begin{aligned} \{L_{T1}(\lambda)\}^2 + \{L_{T2}(\lambda)\}^2 + \{L_{T3}(\lambda)\}^2 &= 2\{\alpha \cdot S(\lambda) E(\lambda)\}^2 \\ &= 2D_0^2(\lambda) \end{aligned} \quad (18)$$

を得る。即ち、3つの稜の最大輝度点の2乗和を求め、垂直拡散反射輝度の2乗の倍の値が求めら

れることになる。

[II] $m=2$ の反射モデル

$$\begin{aligned} L_{T1}(\lambda) &= \alpha \cdot \cos^2 \phi_1 \cdot S(\lambda) E(\lambda), \\ L_{T2}(\lambda) &= \alpha \cdot \cos^2 \phi_2 \cdot S(\lambda) E(\lambda), \\ L_{T3}(\lambda) &= \alpha \cdot \cos^2 \phi_3 \cdot S(\lambda) E(\lambda) \end{aligned} \quad (19)$$

より、

$$\begin{aligned} L_{T1}(\lambda) + L_{T2}(\lambda) + L_{T3}(\lambda) &= 2\alpha \cdot S(\lambda) E(\lambda) \\ &= 2D_0(\lambda) \end{aligned} \quad (20)$$

即ち、3つの稜の最大輝度点の単純和を求め、垂直拡散反射輝度の2倍の値が求められることになる。

4.2.2 実験

図9にグラフで示した稜の輝度データを、各稜毎に輝度値の高い5点を表4に示す。

表4の結果(平均値)を4.2.1の反射モデルに適用した。その結果を表5に示す。

表5で垂直拡散反射輝度 D_0 は図8に示す試料について求めたものである。また、比は $m=1, 2$ の反射モ

デルに対して、それぞれ、 $\sum_{i=1,2,3} L_{Ti}^2 / 2D_0^2$ 、

$\sum_{i=1,2,3} L_{Ti} / 2D_0$ で定義している。

表5の結果、稜部における拡散反射モデルは $m=2$ の反射モデルがよく適応し、その場合、3つの稜の輝度値の単純和が垂直拡散反射輝度の2倍の値を与えることが分る。これは、これまでの Torrance-Sparrow

表4 稜の輝度輝度値(高輝度値5個)

稜	カラー成分	輝度データ					平均
		1	2	3	4	5	
T ₁	R	242.5	243.9	242.5	243.3	242.8	243.0
	G	159.5	160.2	159.3	161.3	161.3	160.3
	B	37.6	38.2	36.1	38.4	40.6	38.2
T ₂	R	226.7	226.7	226.0	227.5	225.8	226.5
	G	145.0	150.1	150.0	150.3	149.5	149.9
	B	32.0	32.3	31.7	32.3	32.3	32.1
T ₃	R	247.6	246.2	248.3	247.4	247.4	247.4
	G	163.6	162.3	164.1	163.1	164.0	163.4
	B	38.4	37.4	38.8	37.5	38.4	38.1

モデルと異なる結果である。なお、B成分に関してはいずれのモデルでも比は1.0と大きくかけ離れている。これは、R、G成分に比べてB成分の輝度値が極端に小さく、一部の画素では0縮退が生じており、B成分の垂直拡散反射輝度値が不正確であるためだと考えられる。

5. むすび

物体表面における反射モデルとしては2色性反射モデルが良く知られているが、拡散反射成分と鏡面反射成分の分離推定が困難であった。

本論文では物体色を決める拡散反射光の推定法について、理論的考察と実験的検証を行い以下のような結果を得た。

- (1) 互いに直交する3平面を含む直方体の試料を用いることで、試料平面を垂直に照らしたときの拡散反射輝度である、垂直拡散反射輝度を容易に推定することが可能である。
- (2) 光源、カメラに対する試料の3次元姿勢の変化に関する垂直拡散反射輝度の不変性が成立する。
- (3) 垂直拡散反射輝度を基に、光源の方向が求められる。逆に、光源を固定すれば、物体表面の傾きを推定することが可能である。
- (4) 円筒状に丸く縁取りされた直方体の稜における拡散反射輝度を解析し、入射角の余弦の2乗に比例する拡散反射モデルが実験結果に良く適応する。

本方法で求められる垂直拡散反射輝度は、当該光源に対して物体面上で観測される拡散反射輝度の最大値

表5 実験データの反射モデルへの当てはめ

		R	G	B
垂直拡散反射輝度	D_0	351.6	226.5	37.5
$m=1$ の反射モデル	$2D_0^2$	247245	102605	2813
	$\sum L_{Ti}^2$	171558	74866	3941
	比	0.694	0.730	1.401
$m=2$ の反射モデル	$2D_0$	703.2	453.0	75.0
	$\sum L_{Ti}$	716.9	473.6	108.4
	比	1.019	1.045	1.445

である。したがって、この値を超える輝度成分は鏡面反射成分として明確に分離することが可能となる。

また、丸く縁取りされた直方体の稜における拡散反射モデルについては新しい結果であり、今後さらに検討を進める必要がある。

参考文献

- [1] Phong, B.T. , " Illumination for computer generated pictures," Comm. ACM, Vol.18, No.6, pp.311-317, 1975
- [2] Torrance, K.E. and Sparrow, E.M., "Theory for off-specular reflection from roughened surface," Journal of Optical Society of America, Vol.57, pp.1105-1114, 1967
- [3] 田中法博、富永昌治、"3次元反射モデルの解析と推定," 情処論、コンピュータビジョンとイメージメディア、Vol.41, No. SIG 10 (CVIM 1) ,pp.1-11, 2000
- [4] 富永昌治、大橋伸一郎、"物体のカラー反射モデル," 情処論、Vol. 33, No.1, pp.37-45, 1992
- [5] 大田友一、塚田正人、林泰博、"複数枚のカラー画像からの照明光と物体色の復元," 信学論、A, Vol.J76-A, No.12, pp.1778-1786, 1993
- [6] 竹部啓輔、伊藤直己、中内茂樹、臼井支朗、"色恒常性を有するデジタルカラーイメージング," 信学論、D-II, Vol. J83-D-II, No. 8, pp.1753-1762, 2000
- [7] 岡部孝弘、佐藤洋一、"ランダムサンプルコンセンサスを用いた光学的アラインメントに基づく物体認識," 情処論、コンピュータビジョンとイメージメディア、Vol.44, No. SIG 9 (CVIM 7) ,pp.124-131, 2003
- [8] Imari Sato, Yoichi Sato, Katsushi Ikeuchi, " Illumination from Shadows," IEEE Trans. on Pattern Anal. & Mach. Intell., vol.25, no.3, pp.290-300, 2003
- [9] 向川康博、宮木一、三橋貞彦、尺長健、"Photometric Image-Based Rendering による仮想照明画像の生成," 情処論、コンピュータビジョンとイメージメディア、Vol.41, No. SIG 10 (CVIM 1) ,pp.19-30, 2000.
- [10] 田島讓二著、"カラー画像複製論," 画像工学シリーズ⑩、丸善株式会社、1998.