

複数の照明条件の組合せによる物体の表面反射特性の密な推定

町田 貴史[†] 竹村 治雄^{†*} 横矢 直和[†]

Dense Estimation of Surface Reflectance Property by Combining Multiple Illumination Conditions

Takashi MACHIDA[†], Haruo TAKEMURA^{†*}, and Naokazu YOKOYA[†]

あらまし 実環境の物体をコンピュータグラフィックス(CG)で表現する際の有効な手法として、実写画像をテクスチャとして幾何形状に張り付ける手法がある。この手法では実写画像が撮影時の照明の影響を受けているため、物体をCGで表現する際に、仮想環境内の照明条件と実環境での照明条件が大きく異なる場合に合成結果が不自然なものとなる。従来からこの問題に対して、物体の距離画像と表面のテクスチャ画像から物体の反射特性を推定する研究がいくつか行われている。しかし反射成分の1つである鏡面反射成分は観測方向、光の照射方向、物体の形状に依存して観測されるため、物体の形状や物体表面の特性に対して様々な仮定を設定する必要があった。本論文では、様々な形状や複数の材質から構成された物体に対して忠実な表面反射特性の推定手法を提案する。具体的には、反射成分を物体面上の多くの点で観測するために物体の形状をもとに光の照射方向に関する照明条件を決定する。そして決定された複数の照明条件と計測データをカラー反射モデルに当てはめることで物体表面の反射特性を物体面上の各点で推定する。実験では、推定された反射特性をもとに物体をCG合成することで、様々な仮想環境内の照明条件に対して忠実に物体を表現できることを示す。

キーワード 表面反射特性, 照明条件, 全周計測レンジファインダ, 複合現実感

1. まえがき

近年、実環境と仮想環境を融合する複合現実感の研究が盛んに行われており[1]、現実物体と同様の写実性をもつ仮想物体を作成するための手法が研究されている[2]。これらの研究では、現実物体を仮想環境で再現する際に、物体の見え方に対する光学的な特性を忠実に再現する必要性が報告されている。この問題は複合現実感の分野では光学的整合性問題として扱われている。

この問題を解決する手法として、実環境における照明条件を推定し、仮想物体がおとす影や物体自身による影を表現する手法[3],[4]や、物体表面の陰付けを自動で行う手法[5]がある。特に陰付けは物体の見え方に直接影響を及ぼすため、写実性の向上のための重要な課題となっている。

陰付けを忠実に行うための手法として、複数の実画像を適切に組み合わせて任意の照明条件における画像を生成するImage Based Rendering (IBR) [6]~[8]と、物体の法線を計測してカメラ位置と光源位置が既知の条件下で、反射モデル、物体の法線情報、およびテクスチャ画像から物体の反射特性を推定するModel Based Rendering (MBR) [9]~[15]がある。IBRでは、物体の形状や表面反射特性を陽に推定することなく、画像のみから任意の照明条件での画像生成を行うため、物体形状や反射特性に何らかの仮定や、多くの照明条件下での実画像が必要となり、様々な物体に対して任意の照明条件による影響を忠実に表現することは困難である。これに対して、物体の形状や表面反射特性に関して特別な仮定を伴わないMBRでは、カメラキャリブレーションの誤差等により、複数のテクスチャ画像内の同一点が物体面上の同一点で重ならないという問題や、鏡面反射成分は観測値が微小となる場合が多く、拡散反射係数のみの推定にとどまるという問題がある[13],[14]。しかし、反射特性が求めれば任意の照明条件下での物体表現を容易に行うことが可能であり、

[†] 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科, 生駒市
Graduate School of Information Science, Nara Institute of
Science and Technology, 8916-5 Takayama-cho, Ikoma-shi,
630-0101 Japan

* 現在, 大阪大学サイバーメディアセンター

光学的整合性問題を解決するにあたって有効であると考えられる。

そこで本論文では、MBRの枠組みの中で距離画像と表面テクスチャ画像の同時計測が可能な全周計測レンジファインダを使用し、位置合わせ誤差が原理的に生じない計測を行う。また、物体形状に応じて適切な照明条件を複数設定することで、物体の表面反射を構成する拡散反射成分と鏡面反射成分を画像内の多くの点で観測する。これにより物体面上のほぼ全点で反射係数の推定を可能とする。また照明条件の選択の際には物体自身の影の影響を考慮し、推定精度の向上を図る。

以下、2.節において、反射モデルを用いて物体の形状と表面のテクスチャ画像から反射係数を推定する従来手法とその問題点について述べる。3.節では幾何形状とテクスチャ画像の取得と各反射成分を物体面上の多くの点で観測するための光源位置の決定、決定された照明条件を用いた反射係数の推定について述べる。4.節では実験結果について述べ、最後に考察と今後の課題について述べる。

2. 関連研究

一般に、物体の表面反射は拡散反射成分と鏡面反射成分の2つの成分の和で表される。図1は拡散反射成分と鏡面反射成分の性質を示している。拡散反射成分は光が物体表面に到達した場合に全方向に均一に反射し、観測方向には依存せず光源に対する面の向きにのみ依存する性質を持つ。これに対して、鏡面反射成分は光が物体表面において正反射方向で強く観測され、観測方向と正反射方向との間の角度が大きくなるにつれて、しだいに観測されなくなる性質を持つ。ここで正反射方向とは図1の右図のように入射光に対して、物体の法線を対称な軸とした方向のことである。本稿では、このような反射特性を忠実にモデル化した

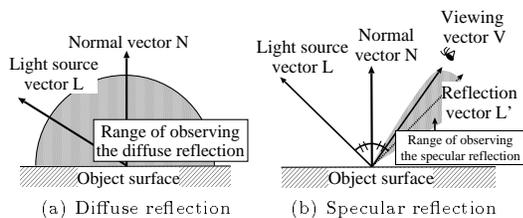


図1 物体面上での拡散反射と鏡面反射

Fig. 1 Diffuse and specular reflection on an object surface.

とされる次式のTorrance-Sparrowモデル[16]を使用する。

$$i = \frac{Y}{C^2}(i_d + i_s) \quad (1)$$

$$i_d = P_d(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}) \quad (2)$$

$$i_s = P_s \frac{1}{(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})} \exp\left(-\frac{(\cos^{-1}(\mathbf{V} \cdot \mathbf{L}'))^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

$$\mathbf{L}' = 2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})\mathbf{N} - \mathbf{L} \quad (4)$$

ここで、 i は観測された画像内の1画素の輝度でRGB値(i_r, i_g, i_b)を持ち、 i_d, i_s はそれぞれ拡散反射成分、鏡面反射成分、 P_d, P_s はそれぞれの成分の反射係数であり、RGB値(P_{dr}, P_{dg}, P_{db}), (P_{sr}, P_{sg}, P_{sb})を持つ。 σ は物体表面上の粗さを表す係数であり、この値は鏡面反射成分の広がりを見せている。その他、カメラ、光源、法線、正反射のそれぞれの方向を表すベクトルは $\mathbf{V}, \mathbf{L}, \mathbf{N}, \mathbf{L}'$ で表され既知とする。 Y は光源の強度を表す。 C は光源と物体面までの距離による光の減衰量を表しており、光源と物体面上の点との最小距離を1とし、他の点と光源との距離の2乗の相対的な減衰を表している。

この反射モデルを使用して P_d, P_s, σ の未知変数を推定するには一般的に、観測位置と光源位置を変えた様々な位置関係における複数のテクスチャ画像を取得し、物体表面上の各点において未知変数以上の方程式を立てる。未知変数の数以下の方程式では、反射係数が物体面上で均一な値であると仮定する[9]ことや、形状が滑らかである必要があり[10]、様々な形状を持つ物体、模様が付いた物体、異なる材質が混在する現実の物体では、その表面反射特性を推定することは困難である。さらに、未知変数以上の式が構築できた場合でも、鏡面反射成分は観測方向と正反射方向との間の角度が大きくなると急激に減少し、観測されなくなるため、鏡面反射成分が微小である場合には係数推定の計算が不安定なものとなる[11]。

以上の問題に対して佐藤ら[15]は、物体をロボットアームに固定し、物体を回転させることで、ある位置に固定されたレンジファインダ、CCDカメラ、光源を用い、多数のテクスチャ画像と多方向からの距離画像を取得する手法を提案している。この場合、物体面上のある1点におけるカメラ、光源、法線の様々な位置関係における観測結果から、拡散反射成分について物体面上での非一様な反射係数の推定が可能である。また、鏡面反射成分が微小である場合の対処として、複数画像内の輝度情報を特異値分解により式(1)で表さ

れる i_d, i_s の2つの反射成分に分離した上で、それぞれの反射係数に対して信頼性の高い推定値を得ている。しかし、多数の画像を必要とするため、物体のある1点を指す画素同士の位置合わせが厳密でなく、係数の推定値に誤差が含まれる。また、観測位置と光源位置の相対的な関係が固定されていることから、複雑な形状の物体では表面のごく一部でしか鏡面反射成分が観測されない場合が多く、反射係数の推定に線形補間をほどこしている。このため、物体の形状全体に対して、非一様な反射特性の推定が行えるものの、線形補間による推定を行うため、部分的に異なる反射特性を持つ物体の反射特性の推定は困難となる。

一方、本論文での提案手法では、物体の幾何形状とテクスチャ画像との厳密な位置合わせが行える全周計測レンジファインダを使用し、物体の全周の法線情報とテクスチャ画像から物体の反射係数を推定する。推定における解を安定に求めるための各反射成分の分離に関しては、色情報のクラスタリングによる手法[14]や、特異値分解を用いた手法[15]があるが、本研究では2つの反射成分を分離して観測することで、それぞれの反射係数を独立に推定する。また、拡散反射成分と鏡面反射成分を物体面上の多くの点で観測するため、あらかじめ適切な光源位置を決定し、複数の照明条件を用いて効率よく両反射成分の観測を可能とする。これにより、本手法では[15]に比べ、複雑な形状の物体や部分的に反射特性が異なる物体に対して、少ない画像枚数で、物体面上の大部分で線形補間を用いず各点で反射係数の推定を行うことが可能である。

3. 幾何形状とカラー画像からの反射係数の推定

3.1 概要

提案手法の処理の流れを図2に示す。処理は3次元画像計測(図2中A, D)、法線情報の取得(図2中B)、光源位置の選択(図2中C)、表面反射特性の推定(図2中E)に分けられる。各処理の概要は次のとおりである。

(1) 3次元画像計測

全周計測レンジファインダで対象物体の形状を計測し、距離画像を得る。また、選択された光源設置候補位置に光源を設置し、複数回計測することで、それぞれの照明条件下での表面テクスチャ画像を得る。

(2) 局所2次曲面近似による法線情報の取得

通常、全周計測レンジファインダから得られる距離情報にはノイズが含まれている。また、物体の形状に

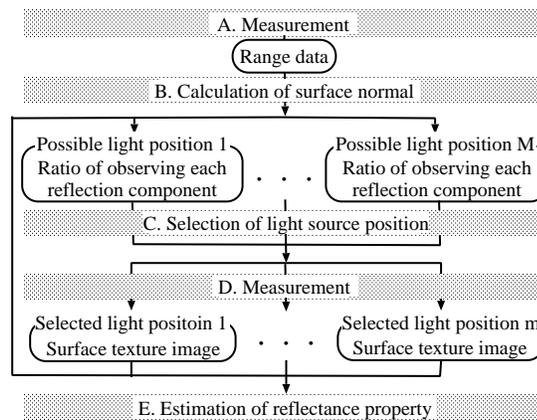


図2 物体の表面反射係数推定における処理手順
Fig. 2 Flow diagram of estimating surface reflectance properties.

おいて距離が不連続な点では、法線情報が正しく計算できないという問題がある。そこで前処理として、得られる距離データにおけるノイズ除去を行い、距離が不連続な部分に関して正しく法線情報を取得するために、距離情報を局所2次曲面で近似する。

(3) 複数の照明条件のための光源位置選択

物体の形状とカメラ位置を既知として、計測装置の周囲に複数の光源設置候補位置を設定し、物体の形状をもとに各反射成分をより多く観測できる光源位置を選択する。

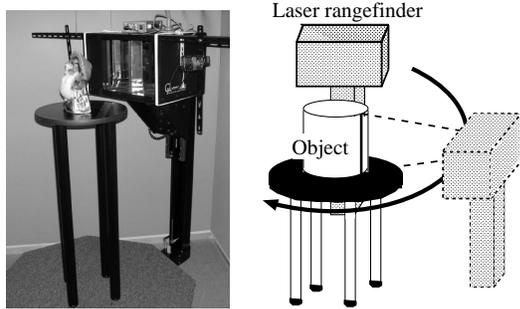
(4) 表面反射特性の推定

あらかじめ取得した物体の法線、選択された光源位置、計測により得られた複数の表面テクスチャ画像を反射モデルに当てはめ、物体表面の反射特性を推定する。

以下、それぞれの処理について詳しく説明する。

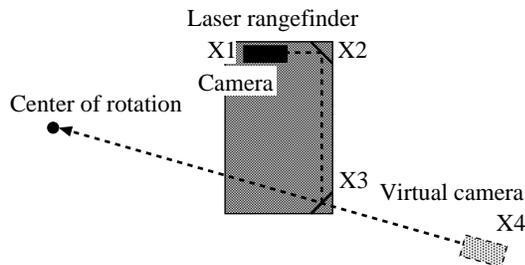
3.2 3次元画像計測

物体の幾何形状と表面のテクスチャ画像を取得する装置として全周計測レンジファインダ(Cyberware3030RGB)を使用する。全周計測レンジファインダの外観を図3(a)に、その計測時の動作を図3(b)に、カメラの位置を真上から見た図として図3(c)に示す。全周計測レンジファインダは装置が計測物体の周りを360度回転しながら計測物体にレーザ光を照射し、その反射光を内蔵しているCCDカメラで撮像することで3角測量の原理から、全周の距離画像とテクスチャ画像を同時に得ることができる。2つの画像は画素単位で1対1に対応しているため、計測の際に計測物体



(a) Appearance of 3D Digitizer

(b) Motion during measurement



(c) Direction of camera

図3 3次元画像計測装置
Fig. 3 3D-Digitizer.

の位置を固定すれば、複数回の計測を行ってもテクスチャ画像間においての位置ずれが発生しない。また、図3(c)では、カメラは装置のX1の位置に設置されており、X2、X3の位置にある鏡を通して物体の表面テクスチャを得ている。そこで本研究では、仮想的にカメラはX4の位置にあると考え、計測時のカメラの方位はこの仮想カメラと回転の中心を結ぶ方向とする。

なお、本装置で得られる距離画像とテクスチャ画像は、円筒座標系で表現されており、レンジファインダの回転軸、回転角に対して、それぞれ物体表面の回転軸からの距離とRGB値を値として持つ画像である。

3.3 局所2次曲面近似による法線情報の取得

前処理部での不連続を含む距離画像からの法線ベクトルの計算法について述べる。まず最初に、得られた距離画像に対して、 5×5 のメディアンフィルタによりノイズ除去を行う。次に、局所2次曲面近似を行う。全周計測レンジファインダから得られる距離情報は円筒座標系で表現されており、各点の3次元座標は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} (x, y, z) &= \{-r(s, t) \sin(s), -t, -r(s, t) \cos(s)\} \\ &= \mathbf{S}(s, t) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 r, s, t はそれぞれ円筒座標系での軸からの距離、回転角度、高さを表し、単位はそれぞれメートル、ラジアン、メートルとする。

式(5)の媒介変数表現のもとで、各点での単位法線ベクトルは以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \mathbf{N} &= \frac{\mathbf{S}_s \times \mathbf{S}_t}{\|\mathbf{S}_s \times \mathbf{S}_t\|} \quad (6) \\ &= \frac{1}{\|\mathbf{S}_s \times \mathbf{S}_t\|} \{-r_s \sin(s) - r \cos(s), \\ &\quad -r_t r, \\ &\quad -r_s \cos(s) + r \sin(s)\} \end{aligned}$$

$$\|\mathbf{S}_s \times \mathbf{S}_t\| = \sqrt{r_s^2 + r^2 + r^2 r_t^2}$$

ここで、 S_s, S_t はそれぞれ式(5)の媒介変数 s, t に対する偏微分操作を行ったものである。また、 r_s, r_t はそれぞれ距離画像 $r(s, t)$ 上の勾配である。この勾配は2次曲面近似から以下の式で表される。

$$r'(s, t) = as^2 + bt^2 + cst + ds + et + f \quad (7)$$

$$r'_s = 2as + ct + d \quad (8)$$

$$r'_t = 2bt + cs + e \quad (9)$$

計測装置から得られた距離情報 $r(s, t)$ と式(7)に関して次式を最小にする係数 $a \sim f$ を決定し、局所2次曲面近似を行う。

$$\begin{aligned} error &= \sum_{u=-2}^2 \sum_{v=-2}^2 \{r(s+u, t+v) \\ &\quad -r'(s+u, t+v)\}^2 \quad (10) \end{aligned}$$

ここで、 u, v は注目画素 (s, t) を中心とする 5×5 の窓内の局所座標を表す。一般に距離が不連続な点での曲面近似は誤差が大きくなるため、本研究では、文献[17]のアプローチにもとづき、選択的局所曲面近似を行う。これは、窓内の座標 (u, v) を中心とする 5×5 の窓、つまり座標 (s, t) を含む25個の窓の内、式(10)が最小となる窓内で求めた $a \sim f$ を座標 (s, t) の局所曲面近似係数とするものである。最後に、求めた係数 $a \sim f$ 、式(8)、(9)から r'_s, r'_t を求め、式(6)により法線情報を取得する。

3.4 複数の照明条件のための光源位置選択

予め計測した物体の形状をもとに、図4のように位置が既知の M 個の光源設置候補位置の中から光源位置を選択する。光源設置候補位置は全周計測レンジファインダの周囲に格子状に用意する。光源は装置に設置

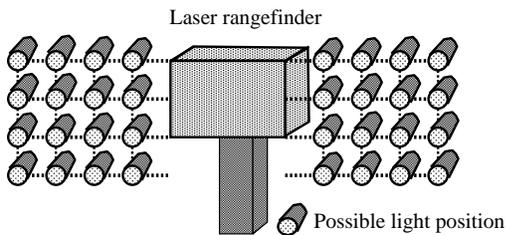


図4 複数の光源位置選択候補

Fig. 4 Multiple possible light source positions.

されるため、物体計測時は装置と同様に回転する。また、光源設置候補位置は縦方向に5個、横方向に12個、合計60個 ($M = 60$) の位置を上下左右5cm間隔で用意する。このとき、装置の仮想カメラと各光源設置候補位置の位置関係は一定に保たれる。各反射係数の推定に必要な各点の観測回数は式(2)、(3)の未知変数の数に対応し、拡散反射成分は1回以上、鏡面反射成分は2回以上の観測が必要である。さらに、各点において自己による影が生じる場合を考慮し、このときの光源位置は反射係数の推定には用いない。なお、本研究では、物体面上での1次反射のみを扱い、相互反射にともなう2次以上の反射は扱わないものとする。また、光源としては点光源を仮定する。光源、カメラの位置に関するキャリブレーションは大きさが既知である物体を用いて行っている。光源の明るさに対するキャリブレーションについては、選択された光源位置が複数の場合、1つの光源を各々の光源設置候補位置に設置し、計測する手順を繰り返す。このため、複数の光源を使用する場合に比べ、光源間のキャリブレーションは必要にはならない。複数の光源位置を使用する場合の距離による明るさの変化に対しては、式(1)から光源と物体との距離による減衰として考慮する。

以下では、光源設置候補位置を p ($p = 1, \dots, M$)、光源位置 p に光源を設置して観測される画像を $I_p = (i_{p1}, \dots, i_{pn})$ (i_{pk} は k 番目の画素の輝度値、 n は総画素数)、画像 I_p 内で拡散反射成分のみから成る画素の総数を D_p 、強い鏡面反射成分を含む画素の総数を S_p とする。また、光源 p において k 番目の画素が影の影響を受けるかどうかを表す指標を R_{pk} 、正反射方向 L^l とカメラ方向 V との間の角度を θ_r とする。

まず全ての光源設置候補位置 p においてテクスチャ画像内の各画素について以下の判定を行う。

- (1) 反射光が観測できるか
- (2) 拡散反射成分のみを観測しているか

(3) 強い鏡面反射成分を観測しているか

以上の判定の結果、各光源位置に対する各反射成分の観測数 D_p, S_q が、 $D_p = \text{Max}(D_1, \dots, D_M)$ となる光源位置 p と $S_q = \text{Max}(S_1, \dots, S_M)$ となる光源位置 q を選択する。2回目以降の選択は、これまでに選択された光源位置を除いた残りの候補位置の中から、同様の条件を満足する光源位置を選択する。選択処理の終了条件としては、鏡面反射成分の観測は困難となる場合があるため、まず全光源位置で計測した場合に、物体面全体に対して強い鏡面反射成分を含む点の数の割合を調べる。この割合をもとに光源選択の打ち切りのための閾値 th を決定する。閾値処理により、選択光源位置を増やしても推定可能な点が増加することはないと判断でき、少ない画像枚数で各反射係数を物体面上の大部分で推定可能となる。以上の処理により、最適な光源位置として m 個の光源位置が選択される。以下、それぞれの条件判定処理の詳細を述べる。

3.4.1 反射光の観測条件

物体面上の点 o に対して光源位置 p の光源から光を照射した場合、1次反射光をカメラで観測するためには、点 o における法線情報の誤差を考慮し、点 o がカメラから観測可能であること、かつ点 o が光源位置から観測可能となる場合である。そこで、 k 番目の画素における反射光を観測するための条件は、その位置の観測方向ベクトル V_k 、法線ベクトル N_k 、光の照射方向ベクトル L_{pk} が以下の式を満足する場合である。ここで、 V_k と N_k は光源位置 p には依存しない。

$$V_k \cdot N_k > 0, L_{pk} \cdot N_k > 0 \quad (11)$$

式(11)が成り立つ場合でも、物体の形状が複雑になると光源の位置によっては自身により影が生じ、影が計測物体の色であると判断される。そこで、光源設置候補位置 p と物体面上の点 o を結ぶ線分が物体面と交差するか否かを一般的な計算幾何学的手法 [18] を用いて判定する。物体の形状はすべて3角形ポリゴンで表現されているとする。図5は光源設置候補位置 p において注目する点 o が影となる場合を示している。このとき点 o に対応する全周テクスチャ画像の k 番目の画素における R_{pk} にマークをつける。この判定を物体の全点、全光源設置候補位置について行う。 R_{pk} にマークがある場合、 k 番目の画素における反射係数の推定に光源 p を選択しない。

3.4.2 拡散反射成分のみの計測

k 番目の画素に拡散反射成分のみが含まれるための

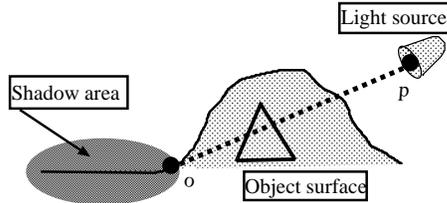


図5 影の検出のための判定

Fig. 5 An illustration of detecting a self-shadow.

条件は、式(11)を満足し、かつ式(4)で求まる正反射方向ベクトル L'_{pk} が以下の式を満足する場合である。

$$\theta_r = \cos^{-1}(\mathbf{V}_k \cdot \mathbf{L}'_{pk}) > \theta_{th1} \quad (12)$$

これは図6のように、観測方向と正反射方向との間の角度 θ_r が閾値 θ_{th1} より大きい場合で、鏡面反射の性質から鏡面反射成分による影響は無視できる。この場合、影の観測を示す指標 R_{pk} にマークがなければ、注目画素は拡散反射成分のみから成る画素として判断され、 D_p に数えられる。

3.4.3 強い鏡面反射成分の計測

k 番目の画素が強い鏡面反射成分を含むための条件は式(11)と以下を満足する場合である。

$$\theta_r = \cos^{-1}(\mathbf{V}_k \cdot \mathbf{L}'_{pk}) \leq \theta_{th2} \quad (13)$$

これは図7のように、角度 θ_r がしきい値 θ_{th2} 以下となる場合で、観測方向が正反射方向付近にあり、この場合、影の観測を示す指標 R_{pk} にマークがなければ、鏡面反射成分の性質から注目画素が強い鏡面反射成分を含む画素として判断され、 S_p に数えられる。

3.5 表面反射特性の推定

物体の反射特性の推定には、前節で決定された m 個の光源設置候補位置に対して、得られた複数の全周テクスチャ画像内の同じ位置の画素について反射特性を推定する。

ここで、光源位置 p に対する画像 $I_p = (i_{p1}, \dots, i_{pn})$ (i_{pk} は k 番目の画素の輝度値、 n は総画素数) において、 i_{pk} が拡散反射成分のみを含むと判断される場合、その輝度値を $i_{pk, diff}$ と表し、2つの反射成分を含み、かつ鏡面反射成分が強く観測されると判断される場合、その輝度値を $i_{pk, both}$ と表す。以下に反射特性推定の具体的な手順を示す。

3.5.1 拡散反射係数の推定

画像 I_p において、 $i_{pk, diff}$ と観測時の N_k, L_{pk} を式(2)に代入することにより、拡散反射係数 P_d を求め

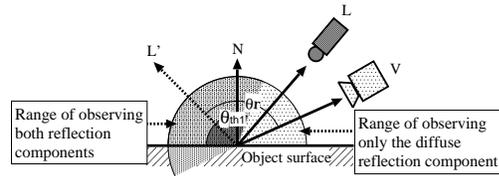


図6 拡散反射成分の観測範囲

Fig. 6 An observation range of diffuse reflection.

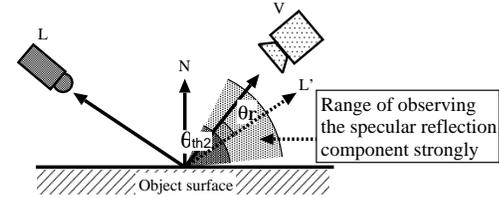


図7 鏡面反射成分の観測範囲

Fig. 7 An observation range of specular reflection.

る。ここで、推定値の信頼性を上げるため、 $\theta_r > \theta_{th1}$ となる画素の中から拡散反射成分が強く観測できる画素を選択する。またこのとき、前節で求めた R_{pk} を用いて注目画素に影は含まれないとする。

3.5.2 鏡面反射係数と表面粗さ係数の推定

2つの異なる光源位置 p, q で得られた画像 I_p, I_q において、 $i_{pk, both}$ と $i_{qk, both}$ から抽出された鏡面反射成分と観測時の N_k, L_{pk}, V_k を式(3)に代入することにより、鏡面反射係数 P_s と表面粗さ係数 σ を求める。ここで、推定値の信頼性を上げるため、先に示した2つの画素は輝度値の高い画素として $\theta_r \leq \theta_{th2}$ となる画素の中から θ_r が小さい画素とする。またこのとき、前節の R_{pk}, R_{qk} を調べ、2つの画素に影は含まれないとする。

まず、前節で求めた拡散反射係数 P_d を用いて、式(2)から2つの画素に含まれる拡散反射成分を推定する。式(1)から $i_{pk, both}, i_{qk, both}$ と、この拡散反射成分の強度との差分をとることにより、各画素の鏡面反射成分を抽出する。

次に、抽出した2つの鏡面反射成分を、式(3)に代入することによって得られる連立方程式から、鏡面反射係数と物体の表面粗さ係数を計算する。各画素につき鏡面反射成分の観測回数が1回以下である場合は係数の推定が不可能であるため、注目画素を中心とする $W \times W$ の窓内で求まっている係数の平均を注目画素の反射係数とする。また、窓が小さい場合、係数の補間が行えないため全周テクスチャ画像を横に探索し、

間の点における係数を線形に補間する。

4. 実験

提案手法の有効性を確認するために、以下の実験を行った。3.4節の光源位置選択と3.5節の反射係数の推定に使用するしきい値 θ_{th1} 、 θ_{th2} はそれぞれ60度、20度、光源選択終了のための閾値 th は80%、鏡面反射係数を線形補間により推定する場合の窓の大きさは 3×3 ($W = 3$)とした。また、Torrance-Sparrowモデルにおける光の強度 Y は1とした。

図8(a)に実験に使用した物体(プラスチック製の人形で、観測される鏡面反射成分に部分的に強弱がある)を示す。また、図8(b)~(d)に本手法により推定された各反射係数を画素値として円筒座標系で表現した様子を示す。図8(b)は拡散反射係数であり、物体全体で推定できている。図8(c)は鏡面反射係数である。この図では、くちばし、足の部分とその他の部分では鏡面反射に違いがあることがわかる。これは図8(a)からも明らかである。図8(d)は表面粗さ係数であり、最大値を白としたスケールを行っている。図8(e)は鏡面反射係数と表面粗さ係数が推定された割合を視覚的に表現したものであり、黒い部分は反射係数が推定不可能であったことを示している。拡散反射係数は画像内の全点で推定されたが、鏡面反射係数と表面粗さ係数は計測された物体面上の内の83.46%で推定されている。人形の頭、くちばし、足の部分では法線が鉛直上向き、あるいは鉛直下向きであるため鏡面反射成分の観測は不可能であった。この部分は線形補間により反射特性が推定されている。

次に、選択光源数と反射係数の推定可能な点の数との関係を図9に示す。実験で選択された光源設置候補位置は12個であり、グラフの横軸は選択された光源位置の数、縦軸は各反射係数が推定可能である点の数である。図9(a)は拡散反射係数が推定可能な点の数と選択光源位置の数との関係を、図9(b)は鏡面反射係数と表面粗さ係数が推定可能な点の数と選択光源位置の数との関係をそれぞれ示している。図9(b)では、選択された光源位置の数が1個で鏡面反射特性に関する割合は0%となっているが、これは鏡面反射係数、表面粗さ係数は2つの異なる鏡面反射成分が必要であるためである。拡散反射成分に関しては選択光源位置の数が5個で画像全体の100%に達している。また、鏡面反射成分に関しては、全光源設置候補位置で計測した場合には全体の83.53%で推定可能であり、本手法に

より最終的に12個の光源位置が選択され、物体面上の83.46%で鏡面反射係数と表面粗さ係数が推定可能となった。これらの結果から60個すべての光源設置候補位置を使用すること比べ、大幅に少ない画像枚数で限界に近い推定率(密度)が得られることが分かる。

図10は推定した各反射パラメータをもとに、仮想光源を用いてレンダリングを行った例である。仮想光源は物体の高さ方向の軸を中心とした円上を移動させている。ここでは、仮想光源の位置を角度で表している。図8(c)、(d)からも分かるように、くちばしや足の部分では鏡面反射係数が大きく、表面粗さ係数が小さいため、Torrance-Sparrowモデルに当てはめた場合、鋭いハイライトが発生している。また、その他の部分では、係数の推定結果から鏡面反射成分は微小なものになっている。このことから、図8(a)の実写画像と同様に違和感なくレンダリングされており、提案手法が妥当であることが確認できる。

問題点としては、提案手法では相互反射を考慮していないため、加算された反射光から反射係数を推定していることが挙げられる。このため、人形の首の部分などで係数の推定が正しく行われていないと考えられる。また、距離情報が正しく取得されないために人形の足の部分で正しくレンダリングされていないことが分かる。

5. あとがき

本稿では物体計測時の光源位置を複数決定し、拡散反射成分と鏡面反射成分を分離したテクスチャ情報と距離画像から、少ない画像枚数ながらも物体の反射係数を物体面上の多くの部分で点毎に密に推定する手法を提案した。本手法により、部分的に異なる表面反射特性をもつ物体に対しても反射係数を密に推定することができる。

しかし、光源のモデル化に誤差があり、部分的に推定値が安定して求まらない場合がある。また、現状では2次反射以上の反射を考慮していないため、複雑な形状をもつ実物体の反射係数が正しく求まらない場合がある。今後は光源の最適なモデル化、相互反射を考慮した反射係数推定法について検討する予定である。

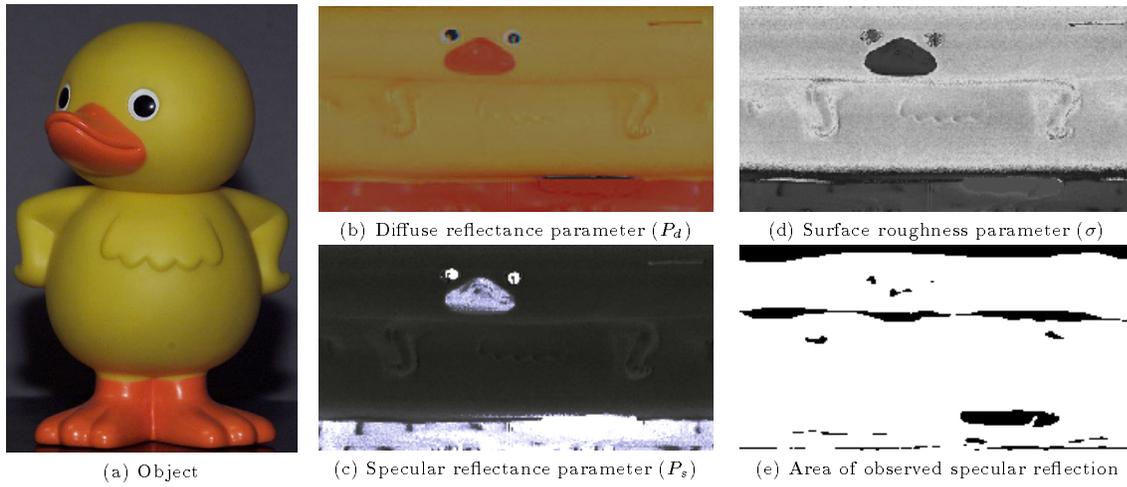


図8 計測物体と反射係数の推定結果

Fig. 8 A measured object and estimated reflectance parameters.

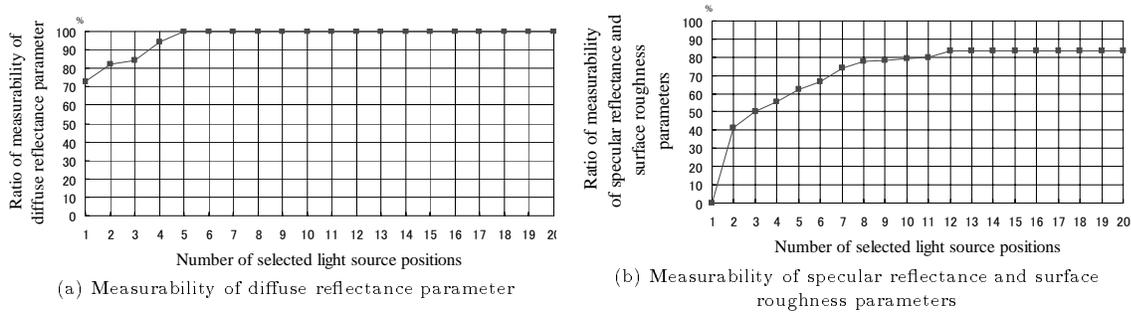


図9 選択光源位置の数と推定可能な各反射係数との関係

Fig. 9 The possibility of estimating reflectance parameters with respect to the number of light positions.

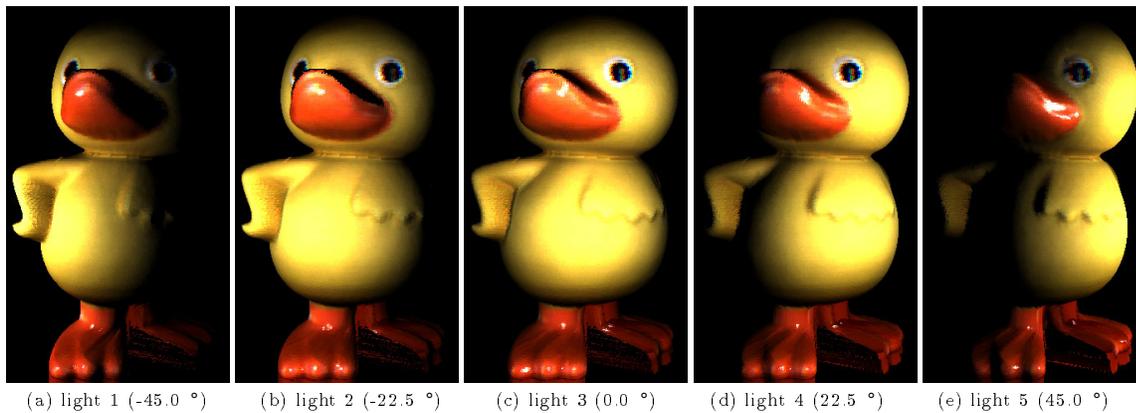


図10 仮想光源によるレンダリング結果

Fig. 10 Rendering of object with virtual light sources.

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会科研費補助

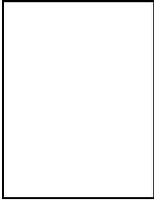
金(課題番号 13480098)による。

文 献

- [1] R. T. Azuma: "A Survey of Augmented Reality," *Presence*, Vol. 6, No. 4, pp. 355-385, 1997.
- [2] 富永 昌治: "色彩メディア処理研究とその動向", 信学技報, PRMU98-121, 1998.
- [3] 佐藤 いまり, 佐藤 洋一, 池内 克史: "実物体のソフトシャドウにもとづく実照明環境の推定", 情処研報, 98-CVIM-110-3, 1998.
- [4] Y. Yu and J. Malik: "Recovering Photometric Properties of Architectural Scenes from Photographs," *Proc. SIGGRAPH '98*, pp. 207-217, 1998.
- [5] 町田 貴史, 岩佐 英彦, 竹村 治雄, 横矢 直和: "3次元レンジファインダと複数の照明条件の組み合わせによる物体表面反射特性の推定", 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2000) 講演論文集, Vol. 1, pp. 113-118, 2000.
- [6] S. Lin and S. W. Lee: "A Representation of Specular Appearance," *Proc. Int. Conf. on Computer Vision*, Vol. 2, pp. 849-854, 1999.
- [7] S. Lin and S. W. Lee: "Estimation of Diffuse and Specular Appearance," *Proc. Int. Conf. on Computer Vision*, Vol. 2, pp. 855-860, 1999.
- [8] 宮木 一, 向川 康博, 尺長 健: "Photometric Image-Based Rendering における拡散反射と鏡面反射の生成", 信学技報, PRMU99-272, 2000.
- [9] K. Ikeuchi and K. Sato: "Determining Reflectance Properties of an Object Using Range and Brightness Images," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 13, No. 11, pp. 1139-1153, 1991.
- [10] 田中 法博, 富永 昌治, 河合 利幸: "カラー画像から反射パラメータの推定法とCG応用", 情処全大, pp. 105-112, 1999.
- [11] G. Kay and T. Caelli: "Inverting an Illumination Model from Range and Intensity Maps," *CVGIP: Image Understanding*, Vol. 59, pp. 183-201, 1994.
- [12] 大槻 正樹, 三浦 淳, 佐藤 幸男: "多方向測定による物体形状と表面反射特性の計測", 信学論, Vol. J76-D-II, No. 8, pp. 1536-1543, 1993.
- [13] 日浦 慎作, 佐藤 宏介, 井口 征士: "対象物体の回転による形状と反射率の同時計測", 情処学論, Vol. 36, No. 10, pp. 2295-2302, 1995.
- [14] 大槻 正樹, 佐藤 幸男: "多視点カラー画像と距離画像を用いたスペキュラ反射の分離", 信学論, Vol. J80-D-II, No. 6, pp. 1352-1359, 1997.
- [15] Y. Sato, M. D. Wheeler and K. Ikeuchi: "Object Shape and Reflectance Modeling from Observation," *Proc. SIGGRAPH '97*, pp. 379-387, 1997.
- [16] K. E. Torrance and E. M. Sparrow: "Theory for Off-specular Reflection from Roughened Surfaces," *Jour. Optical Society of America*, Vol. 57, pp. 1105-1114, 1967.
- [17] 横矢 直和, マーチン D. レビン: "微分幾何学特徴に基づく距離画像分割のためのハイブリッド手法", 情処学論, Vol. 30, No. 8, pp. 944-953, 1989.

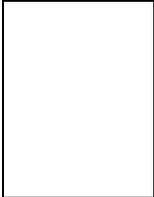
[18] 一松 信: “新数学辞典”, 大阪書籍, 1991.

(平成 x年 xx 月 xx 日受付)



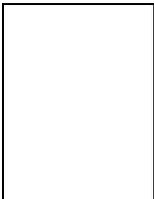
町田 貴史 (学生員)

平¹⁰ 阪大・基礎工・情報工卒．平¹² 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了．現在，同博士後期課程在学中．コンピュータビジョン，複合現実感の研究に従事．



竹村 治雄 (正員)

昭⁵⁷ 阪大・基礎工・情報工卒．昭⁶² 同大学院博士後期課程単位取得退学．同年(株)ATR入社．3次元ユーザインタフェース，CSCW，仮想現実の研究に従事．平⁶ 奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科助教授．工博．平¹³ 阪大・サイバーメディアセンター教授．情報処理学会，IEEE，ACM，日本VR学会各会員．



横矢 直和 (正員)

昭⁴⁹ 阪大・基礎工・情報卒．昭⁵⁴ 同大学院博士後期課程了．同年電子技術総合研究所入所．以来，画像処理ソフトウェア，画像データベース，コンピュータビジョンの研究に従事．昭⁶¹～⁶² マツギル大・知能機械研究センター客員教授．平⁴ 奈良先端科学技術大学院大学・情報科学センター教授．現在，同大情報科学研究科教授．平¹ 情報処理学会論文賞受賞．工博．情報処理学会，人工知能学会，日本認知科学会，映像情報メディア学会，IEEE各会員．