

光学的アプローチに基づく現実世界のモデル化手法

宮崎大輔[†] Robby T. Tan[†] 原 健二[‡] 池内克史[†]

[†] 東京大学生産技術研究所

[‡] 福岡県東京事務所

E-mail : {miyazaki, robby, hara, ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

あらまし 近年、医療分野やエンターテインメント分野においてバーチャルリアリティ技術の重要性が増してきている。本論文では、光学の知識を用いて、現実世界を仮想空間に再現するための手法について述べる。現実物体を高い現実感で仮想化するためには、幾何情報と光学情報と環境情報の取得が必要となる。本論文の前半では、幾何情報取得のための一手法として、偏光を用いた透明物体モデリング手法を紹介する。また、後半では、光学情報と環境情報取得のための手法として、一枚のカラー画像から光源の位置・色と物体表面の反射特性を推定する手法を紹介する。

Photometric Approach towards the Modeling of Real World

Daisuke Miyazaki[†], Robby T. Tan[†], Kenji Hara[‡] and Katsushi Ikeuchi[†]

[†] Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

[‡] Fukuoka Prefectural Government Office in Tokyo

E-mail : {miyazaki, robby, hara, ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

Abstract Today, in the field of medical science and entertainment, the importance of virtual-reality techniques are becoming higher. This paper explains the method to virtualize a real world by using an optical knowledge. Acquiring geometrical, photometrical, and environmental information is necessary to virtualize real objects in high reality. First, we introduce a polarization-based modeling method of transparent objects, which is one of geometrical modeling methods. Next, we introduce a estimation method of position and color of a light source and reflectance properties of a real object's surface from a single image, which is one of photometrical and environmental modeling methods.

1 はじめに

近年、医療分野やエンターテインメント分野においてバーチャルリアリティ技術の重要性が増してきている。本論文では、光学の知識を用いて、現実世界を仮想空間に再現するための手法について述べる。現実物体を高い現実感で仮想化するためには、幾何情報と光学情報と環境情報の取得が必要となる。

幾何情報とは、物体の3次元形状のことを指す。幾何情報を取得するセンサは数多く出回っているが、透明な物体をモデリングできるセンサは無いに等しい。そこで、本論文の前半では、幾何情報取得のための一手法として、偏光を用いた透明物体モデリング手法を紹介する。

光学情報とは、物体表面のテクスチャ（色）と表面の粗さを表す。また、環境情報とは、周囲の光源環境のことを指す。本論文の後半では、光学情報と環境情報取得のための手法として、一枚のカラー画像から光源の位置・色と物体表面の反射特性を推定する手法を紹介する。

2 幾何情報取得

金属物体や透明物体などの形状を計測できうる技術として近年注目を浴びているのが、物体の偏光特性を用いたものである。Koshikawa[1]は、偏光させた光をつやのある物体に照射し、反射光の偏光度を解析する事により、物体の表面形状の制約を得る手法を考案した。Wolffら[2]は、非偏光の光を物体に照射した時の偏光の様子を解析する事により、物体の表面法線の制約が得られる事を示した。また、両眼視と偏光解析を組み合わせる事により物体の形状を計測しようと試みたが、対応点の問題があり、板状のガラスや金属の向きしか計測できなかった。透明物体の形状を計測しようと最初に試みたのはSaitoら[3]である。しかし、法線の決定には曖昧性の問題があり、特定の形状にしか適用できなかった。

Miyazakiら[4]はSaitoらの手法をさらに発展させ、熱放射光の偏光解析に基づいて法線の曖昧性の問題を解決し、透明物体の表面形状を計測する事に成功した。Rahmannら[5]は3つの方向から物体の偏光データを取得する事により、Wolffらの手法における対応点の問題を解決できる事を示した。ま

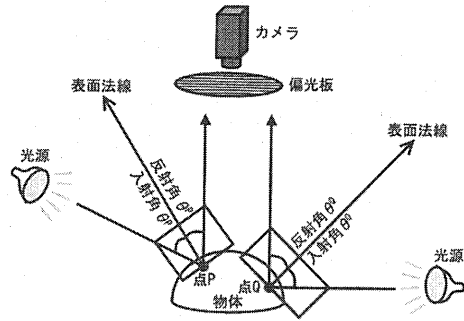


図1: 計測装置の幾何配置

た、Rahmannらの示した手法を使うと2つの方向からの偏光データだけで物体の表面形状を計測できる事もあるという事がシミュレーションを通じて実証された。彼らは実際には5つの方向から偏光データを取得し、つやのある不透明物体の表面形状を計測する事に成功した。

この章ではRahmannらやMiyazakiらよりも簡便な方法により透明物体の表面形状を計測する手法を提案する。Saitoらの手法における法線の曖昧性の問題を、物体を微小な角度だけ回転させる事によって解決する。また、Wolffらにおける対応点の問題を、偏光度から対応点を求める方法を示す事によって解決する。本手法はMiyazakiらの手法と比べて赤外光の実験装置が不要のため装置がより簡単な物になっている。Rahmannらの論文では5つの方向からの偏光データで実物体の形状を復元したが、本実験では2つの方向からの偏光データのみで実物体の形状を復元する。

2.1 透明物体モデリング手法

図1は計測装置の幾何配置を表している。計測対象物体の真上にカメラを配置し、カメラの前に偏光板を配置する。屈折率1.0の空気中を進む非偏光な光が屈折率 n の物体表面で反射した光が偏光する様子を観測する。光源方向と表面法線のなす角を入射角と言い、カメラ方向と表面法線のなす角を反射角と言う。透明な物体では入射角と反射角は等しくなる。法線を求めるためにはこの反射角（入射角）を求める必要がある。

偏光板を回して物体をカメラで観測する事により偏光度を計算する事ができる。偏光度は0から1までの値をとり、非偏光な光は偏光度が0となり、完

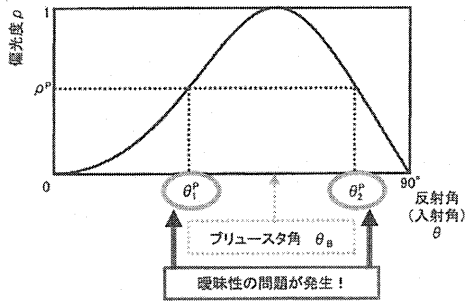


図 2: 偏光度と反射角の関係

全直線偏光している光は偏光度が 1 となる。反射角がブリュースタ角の時のみ偏光度が 1 となる。偏光度と反射角の関係は以下の式で表される。

$$\rho = \frac{2 \sin^2 \theta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta - n^2 \sin^2 \theta + \sin^4 \theta}}{n^2 - \sin^2 \theta - n^2 \sin^2 \theta + 2 \sin^4 \theta} \quad (1)$$

偏光度 ρ は屈折率 n と反射角 θ の関数になっている。屈折率は与えられていると仮定する。よって、偏光度を観測する事により反射角を計算する事が可能である。

図 2 は式 (1) のグラフである。縦軸が偏光度を表しており、横軸が反射角を表している。偏光度が 1 つ与えられた時、反射角はブリュースタ角 θ_B の時を除いて 2 つ得られる。2 つの反射角のうちどちらか一方が正しい反射角である。正しい表面法線を得るためにはこの曖昧性の問題を解決する必要がある。

偏光度データをブリュースタ角の点、つまり、偏光度が 1 である点で分割した場合を考えよう。なお、ブリュースタ角の点をつないでできる閉曲線をブリュースタ線と呼ぶ事にする。また、この領域分割をブリュースタ分割と呼ぶ事にする。偏光度データをブリュースタ分割し、領域ごとに曖昧性を除去する事にする。

今、物体は連続で滑らかな閉じた物体を仮定する事にする。この時、領域内の 1 点でも曖昧性を除去できれば領域内の全ての反射角が決定できる。

各領域を以下の 3 つの型に分類する事にする。

1. B-E 領域
2. B-N 領域
3. B-B 領域

B-E 領域は外縁線を含む領域だと定義する。B-N 領

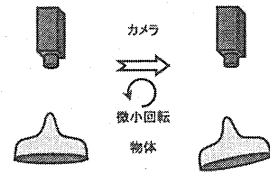


図 3: 物体の微小回転

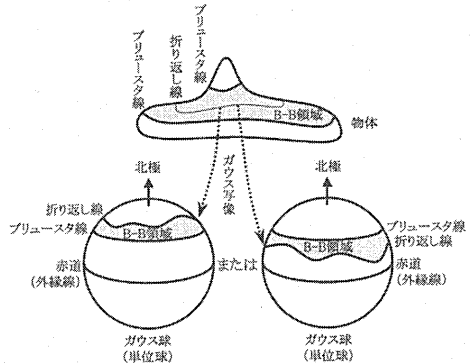


図 4: B-B 領域のガウス写像

域は $\theta = 0^\circ$ となる点を含む領域であると定義する。B-E 領域と B-N 領域の曖昧性は簡単に除去できるので B-B 領域の曖昧性除去手法のみを説明する。

今、物体をカメラに対して微小な角度だけ傾ける事を考えよう (図 3)。物体を回転させない状態で得られた偏光度データと物体を微小回転させた状態で得られた偏光度データを比較する事により曖昧性を除去する。

物体表面上の B-B 領域をガウス写像によりガウス球面上に写した様子を描いたのが図 4 である。ガウス球の北極の上空の方向にカメラが位置するものとする。物体表面上の B-B 領域はブリュースタ線のみで囲まれ、 $\theta = 0^\circ$ の点や $\theta = 90^\circ$ の点を含まない。つまりガウス球面上では B-B 領域は北極も赤道も含まない。物体表面が滑らかな時、物体表面上の閉領域はガウス球面上でも閉領域に写像される。これらの事により、物体表面上の B-B 領域をガウス球面上に写像した領域は必ずブリュースタ線とそれ以外の 1 個以上の曲線で囲まれる。ブリュースタ線では無いガウス球面上の曲線を折り返し線と呼ぶ事にする。

折り返し線は物体を回転させても折り返し線のままである。ゆえに、この折り返しという性質は物体

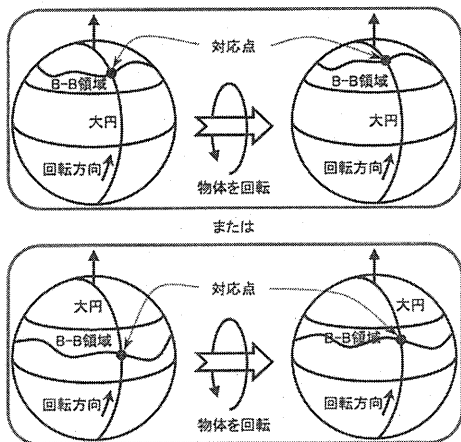


図 5: 対応点

の回転に不変な幾何学的性質である。

ガウス球の北極と南極を含み、回転方向を表す大円を考える。この大円上の点は物体を回転させた後もこの大円上に移る。この大円と折り返し線の交わる点を対応点として用いる事にする(図5)。図から分かる通り、この対応点は、物体表面上のB-B領域内の点のうち、物体の回転方向に沿った法線ベクトルを持つ点の中の、偏光度最小点となっている。得られた2つの偏光度データそれぞれをプリユースタ分割し、各B-B領域内に1つの対応点を探し出す事ができる。

物体を回転させていない状態で計測した偏光度を $\rho(\theta)$ と表し、物体を微小な角度 $\Delta\theta$ だけ回転させた時に得られた偏光度を $\rho(\theta + \Delta\theta)$ とすると、対応点において偏光度の差を計算すると以下の式のようになる。

$$\rho(\theta + \Delta\theta) - \rho(\theta) \simeq \rho'(\theta)\Delta\theta \quad (2)$$

偏光度を微分した値 ρ' のグラフを図6に示した。図6(b)には偏光度の微分のグラフが描かれており、図6(a)に偏光度のグラフが描かれている。

偏光度の微分値 ρ' は $0^\circ < \theta < \theta_B$ のとき正の値を取り、 $\theta_B < \theta \leq 90^\circ$ のとき負の値を取る。物体を回転させる方向は与えてやるものとする。つまり、 $\Delta\theta$ の符号は既知とする。対応点における偏光度の差は得られたデータから計算できる。これらの事から、式(2)により、その領域の点が $0^\circ < \theta < \theta_B$ なのか $\theta_B < \theta \leq 90^\circ$ なのかが分かる。つまり、曖昧性が除去できるという訳である。

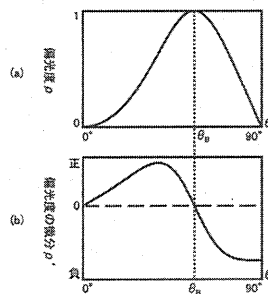


図 6: 偏光度の微分

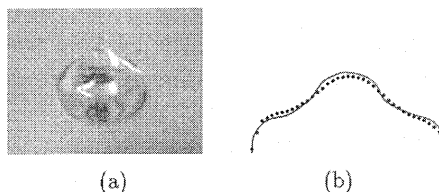


図 7: (a) ベル型の透明物体の写真, (b) 実測値と理論値の比較

計測装置は Saito ら [3] と同様の物を使用する。

図 7(a) の物体に本手法を適用した結果を図 7(b) に示す。図 7(b) は物体を横から見た時の表面形状を表している。本手法によって得られた形状を点で表しており、理論値と思われる形状を実線で表している。

3 光学・環境情報取得

近年, Sato らは Torrance-Sparrow モデル [6] を簡略化した反射モデルに基づき明るさ分布を解析することにより、光源方向と反射特性を推定する手法を開発した [7]。また, Ramamoorthi らは、球面調和関数と因子分解を用いて表面反射特性と光源方向を同時に推定する手法を提案した [8]。一方, Tominaga らは、Phong モデルを採用して、1枚の実画像から表面反射特性と光源方向および光源色を推定する手法を提案した [9]。しかし、これらの手法は、光源状況を無限遠の点光源に近似した平行光源の方向を推定しており、光源が物体から近距離にある場合には適用が難しかった。

この章では、1枚のカラー画像のみから光源の位置と物体表面の反射特性を同時に推定する手法を提案する。本手法は、1) 鏡面反射成分と光源方向、

2) 拡散反射成分と鏡面ピークから光源までの距離、のそれぞれの関係を利用する。本手法には、1) 入力画像が1枚だけでよい、2) 従来の光源推定手法の多くが光源方向のみを推定していたのに対し、物体から有限距離にある点光源の3次元位置まで推定できる、といった利点がある。また、本手法は、このとき分離される鏡面反射成分を用いることで、光源色の推定もおこなう。

まず、鏡面ピーク点から光源方向を求め、その方向ベクトル上における光源の奥行きを拡散反射成分の数値モデルのあてはまりの良さにもとづいて初期推定する。次に、この光源位置下で拡散反射パラメータを初期推定し、鏡面反射成分を分離する。そして、この鏡面反射成分と上で得られた光源位置を用いることにより、鏡面反射パラメータを初期推定する。このようにして推定された鏡面反射パラメータから拡散反射成分を再分離し、これら一連のモデルあてはめと反射成分分離とからなる手続きを繰り返すことにより、光源位置と表面反射特性のパラメータを最終的に決定する。最後に、このとき分離される鏡面反射成分に対して既存の光源色推定手法[10]を適用することにより、光源色を精度良く推定することが可能になる。

3.1 光源位置・色と反射特性の推定

本手法は、Torrance-Sparrow 反射モデル [6] を簡略化したモデル式

$$i_c = \left[k_{d,c} \cos \theta_i + \frac{k_{s,c}}{\cos \theta_r} \exp\left[-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right] \right] \frac{L_c}{R^2} \quad (3)$$

を用いる [7]。ここで、 c は RGB のいずれか、 i_c は画像面の明るさ、 L_c は点光源の光度である。 R は光源から物体表面の各点までの距離である。 $k_{d,c}$ と $k_{s,c}$ はそれぞれ拡散反射成分と鏡面反射成分に対応する反射係数、 σ は表面あらさを表す。また、 θ_i は物体表面の点における入射角であり、法線方向と光源方向とがなす角度、 θ_r は法線方向と視線方向とがなす角度、 α は光源方向と視線方向の2等分方向と法線方向とがなす角度である (図 8)。

式 (3) から明らかに $k_{d,c}$ 、 $k_{s,c}$ と L_c の分離は不可能であるため、

$$K_{d,c} = k_{d,c} L_c \quad (4)$$

$$K_{s,c} = k_{s,c} L_c \quad (5)$$

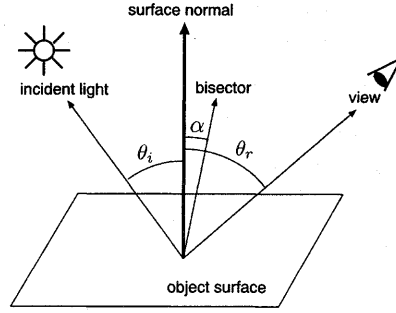


図 8: 幾何学モデル

とおく。このとき、式 (3) は

$$I_c = K_{d,c} \cos \theta_i + \frac{K_{s,c}}{\cos \theta_r} \exp\left[-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right] \quad (6)$$

のように表される。ただし、

$$I_c = i_c R^2 \quad (7)$$

である。本論文では、式 (6) におけるパラメータ $\vec{K}_d = [K_{d,R}, K_{d,G}, K_{d,B}]^T$ 、 $\vec{K}_s = [K_{s,R}, K_{s,G}, K_{s,B}]^T$ 、 σ をまとめて表面反射特性と呼び、特に \vec{K}_d を拡散反射パラメータ、 \vec{K}_s と σ を鏡面反射パラメータと呼ぶことにする。

以下、RGB を表す添字 c は省略する。また、総和については RGB すべての和がとられるものとする。

\mathbf{N}_p を鏡面ピークにおける単位法線ベクトル、 \mathbf{L}_p と \mathbf{V}_p を鏡面ピークを始点としてそれぞれ光源および視点を向く単位ベクトルとする。このとき、鏡面ピークでは正反射が生じているとみなせるので、 \mathbf{L}_p は \mathbf{N}_p と \mathbf{V}_p を用いて

$$\mathbf{L}_p = \mathbf{N}_p + (\mathbf{N}_p, \mathbf{V}_p) \mathbf{N}_p - \mathbf{V}_p \quad (8)$$

と表される。ここで、 \mathbf{N}_p 、 \mathbf{V}_p 、実世界3次元位置と2次元画素位置の対応関係はいずれも既知であることから \mathbf{L}_p が求まる。このとき、光源位置 \mathbf{L} は鏡面ピークの3次元位置 \mathbf{P} 、 \mathbf{L}_p と光源奥行き t を用いて

$$\mathbf{L} = \mathbf{P} + t \mathbf{L}_p \quad (9)$$

となるので、 \mathbf{L} を推定するためには光源奥行き t を求めればよい。

まず、拡散反射領域を設定する。ここでは、画像平面上において鏡面ピークからあるしきい値以上離れたところにある画素の集合を求め、これらに対応

する物体表面点の集合を拡散反射領域とする。この拡散反射領域において拡散反射のモデル (式 (6) 右辺の第 1 項) を最もよく成り立たせるような t を求める。そのため、最小化すべき評価関数 f を

$$f(x_1(t), \dots, x_{N_j}(t)) = \sum_{j=1}^{N_j} \left(x_j(t) - \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} x_i(t) \right)^2 \quad (10)$$

のように定める。ただし、 N_j は拡散反射領域に属する画素の総数、 $x_j(t)$ は

$$x_j(t) = \frac{I^{(j)}}{\cos(\theta_i^{(j)}(t))} \quad (11)$$

である。 $I^{(j)}$ と $\theta_i^{(j)}(t)$ はそれぞれ、拡散反射領域における j 番目の画素の輝度およびこの画素に対応する表面点における入射角である。

評価関数 f を局所最小化するために、光源奥行き t の摂動をおこない、 f の値が不変になるまで、またはほとんど減少しなくなるまで摂動を繰返す。この摂動では、現在得られている t に対し、 $t_1 = t - \Delta t$, $t_2 = t$, $t_3 = t + \Delta t$ の 3 つについて $f(x_1(t_n), \dots, x_{N_j}(t_n))$ ($n = 1, 2, 3$) を求め、これらの中で f の値を最小ならしめる t_n を次ステップの値とする。ここで、 Δt はユーザが適当な値を設定するものとする。本実験では $\Delta t = 2\text{mm}$ とおいた。このとき得られた光源奥行きの推定値 t^* を式 (9) に代入することにより、光源位置の推定値 \mathbf{L}^* が得られる。

次に、 t^* のもとで拡散反射パラメータ K_d を推定する。ここでは、次式の 2 乗誤差を最小化する。

$$E_1(K_d) = \sum_{j=1}^{N_j} \left(I^{(j)} - K_d \cos(\theta_i^{(j)}(t^*)) \right)^2 \quad (12)$$

この最小解 \tilde{K}_d^* は次式で得られる。

$$K_d^* = \frac{\sum_{j=1}^{N_j} I^{(j)}}{\sum_{j=1}^{N_j} \cos(\theta_i^{(j)}(t^*))} \quad (13)$$

物体表面領域に属する画素 (以下、物体表面画素) が N_k 個あるとき、その k 番目の画素の鏡面反射成分は、前節で得られた推定値を用いて

$$I_s^{(k)*} = I^{(k)} - K_d^* \cos(\theta_r^{(k)}(t^*)) \quad (14)$$

のように反射成分を分離することで得られる。これに鏡面反射のモデル (式 (6) 右辺の第 2 項) を当て

はめる問題は、前節の拡散反射パラメータ推定の場合とは異なり、非線形になる。そこで、まず鏡面反射のモデル式

$$I_s = \frac{K_s}{\cos \theta_r} \exp \left[-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2} \right] \quad (15)$$

を対数変換により

$$Y = -\frac{1}{\sigma^2} X + \ln K_s \quad (16)$$

のように線形化する [7]。ただし

$$X = \frac{\alpha^2}{2} \quad (17)$$

$$Y = \ln I_s + \ln \cos \theta_r \quad (18)$$

である。そこで、 N_k 個の物体表面画素に対して、変換式 (17), (18) により $X - Y$ 空間にプロットした点が式 (16) で表される同一直線上にのるようにパラメータ推定をおこなう。具体的には、このデータ対の集合に直線の最小 2 乗当てはめを行って得られた回帰直線と式 (16) の係数比較により、初期推定値 \tilde{K}_s^+ と σ^+ を求める。

次に、 \tilde{K}_s^+ と σ^+ をあらためて初期値とし、最小化すべき 2 乗誤差を

$$E_2(K_s, \sigma) = \sum_{k=1}^{N_k} \left(I_s^{(k)} - \frac{K_s}{\cos(\theta_r^{(k)})} \exp \left[-\frac{(\alpha^{(k)}(t^*))^2}{2\sigma^2} \right] \right)^2 \quad (19)$$

のように定義する。式 (19) を局所最小化するため、以下の 1) と 2) を交互に繰り返す。

1) 現在得られている σ を固定して、 K_s を

$$K_s = \frac{\sum_{k=1}^{N_k} I_s^{(k)}}{\sum_{k=1}^{N_k} \frac{1}{\cos(\theta_r^{(k)})} \exp \left[-\frac{\alpha^{(k)}(t^*)^2}{2\sigma^2} \right]} \quad (20)$$

のように修正する手続き。

2) 現在得られている K_s を固定して

$$\kappa^{(n)} = \frac{1}{\sigma^{(n)}} \quad (21)$$

$$\kappa^{(n+1)} = \kappa^{(n)} - \gamma \sum_{k=1}^{N_k}$$

$$\left(I_s^{(k)} - \frac{K_s}{\cos(\theta_r^{(k)})} \exp \left[-\frac{(\alpha^{(k)}(t^*))^2 (\kappa^{(n)})^2}{2} \right] \right)^2 \\ \times \frac{K_s (\alpha^{(k)}(t^*))^2 \kappa^{(n)}}{\cos(\theta_r^{(k)})} \exp \left[-\frac{(\alpha^{(k)}(t^*))^2 (\kappa^{(n)})^2}{2} \right] \quad (22)$$

$$\sigma^{(n+1)} = \frac{1}{\kappa^{(n+1)}} \quad (23)$$

の3つを順に実行する σ の更新処理を収束するまで繰り返す手続き。

ここで、 n は更新ステップ、 γ は学習係数である。 γ にはユーザが適当な値を代入しなければならないが、かなり小さな値にしておかないと発散するので注意が必要である。

以上の手続きにより、鏡面反射パラメータの推定値 K_s^* と σ^* が得られる。しかし、このようにして得られた推定値は拡散反射成分をかなり大まかに近似した拡散反射領域を用いて得られたものであり、必ずしも正確とはいえない。そこで、 N_k 個の物体表面画素に対して、いま得られている鏡面反射パラメータと光源位置を用いて、再度、拡散反射成分を

$$I_d^{(k)*} = I^{(k)} - \frac{K_s^*}{\cos(\theta_s^{(k)})} \exp\left[-\frac{(\alpha^{(k)}(t^*))^2}{2(\sigma^*)^2}\right] \quad (24)$$

のように分離する。そして、先程とまったく同様の手続きで光源奥行きと拡散反射パラメータの推定を行う。

以上のような鏡面反射と拡散反射の各反射モデルの当てはめと反射成分分離からなる手続きを十分な近似が得られるまで繰り返す。ただし、2回目以降の鏡面反射パラメータの推定では、十分解に近い値が得られていると仮定し、このとき得られている値を初期値として式(19)を最小化する。式(16)に直線当てはめをおこなう処理はスキップする。

このように分離された鏡面反射成分から容易に得られる鏡面反射領域を用いて、光源色推定をおこなうことができる。色恒常性(color constancy)理論に基づく光源色推定手法は、Finlaysonらによって提案された[10]。しかし、その手法は鏡面反射がほとんど観測されない拡散反射領域も対象に含めるものであったため、拡散反射領域が鏡面反射領域に比べて広いときは誤推定を生じやすかった。これに対し、提案手法では、まず分離した鏡面反射成分を利用して、鏡面反射と拡散反射の両方が観測される領域、すなわち鏡面反射領域を原画像から抽出する。次に、この鏡面反射領域においてFinlaysonらの手法[10]を適用すると、比較的安定な推定が可能となる。

図9(a)に示す実画像を入力として、光源の位置、色と物体反射特性の推定をおこなった。

光源位置と表面反射特性の推定値を用いて合成した仮想物体画像を図9(b)に示す。仮想物体画像と実画像の差分画像を誤差マップとして図9(c)に示す。ただし、この誤差マップでは仮想物体画像が実

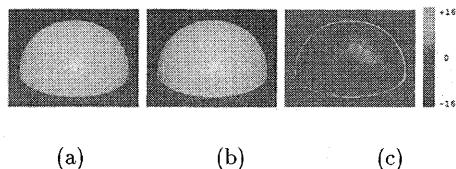


図9: 合成結果:(a) 実画像, (b) 仮想物体画像, (c) 誤差マップ

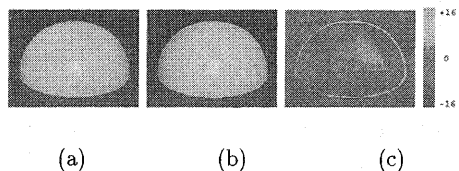


図10: 合成結果:(a) 実画像, (b) 仮想物体画像, (c) 誤差マップ

画像と比べて明るい画素ほど赤く、暗いところほど青く、等しくなるほど緑になるように設定している。

次に、提案手法を用いて推定された光源色の妥当性を評価するため、白色光源下における実画像を図10(a)に示す。推定された光源色を用いて合成した白色光源下の仮想物体画像を図10(b)に示す。これらの画像の誤差マップを図10(c)に示す。

また、上の推定値を用いて異なる光源条件下で画像を合成した結果を図11、12に示す。まず、異なる光源位置下で観測した実画像を図11(a)に示す。光源位置と表面反射特性の推定値を用いて合成した仮想物体画像を図11(b)に示す。これらの推定値は図11(a)に示す画像を入力として用いていないことに注意する。両者の誤差マップを図11(c)に示す。次に、異なる光源色下で観測した実画像を図12(a)に示す。光源色の推定値を用いて合成した仮想物体画像を図12(b)に示す。これらの誤差マップを図12(c)に示す。

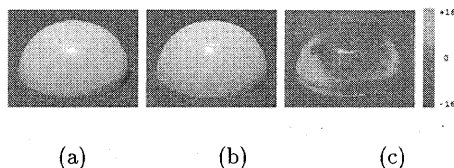


図11: 合成結果:(a) 実画像, (b) 新たな光源位置下における仮想物体画像, (c) 誤差マップ

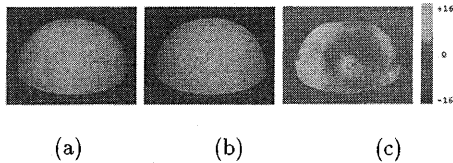


図 12: 合成結果 : (a) 実画像, (b) 新たな光源色下における仮想物体画像, (c) 誤差マップ

4 結び

本論文では, 現実物体をリアルに仮想化するための幾何・光学・環境情報を取得する手法について述べた。本論文の前半 (第 2 章) では, 幾何情報取得のための一手法として, 偏光を用いた透明物体モデリング手法を紹介した。本論文の後半 (第 3 章) では, 光学情報と環境情報取得のための手法として, 一枚のカラー画像から光源の位置・色と物体表面の反射特性を推定する手法を紹介した。

第 2 章では従来非接触では困難と思われてきたガラスやアクリルやプラスチックなどの透明な物体の表面形状を計測する簡便で安価な手法を提案した。偏光度から物体の表面法線を求める際に曖昧性の問題が発生するが, 物体を微小回転させる事により曖昧性の問題を解決する手法を示した。また, ガウス球を使ってその手法の正当性を論じた。テクスチャの無いつやっばい物体や金属光沢のある物体は対応点を探し出す事は比較的困難だが, 本論文では折り返しという性質を利用して対応点を求める事に成功した。

第 3 章では, 反射モデル当てはめと反射成分分離を一体化した反復計算と色恒常性理論を用いて, 一枚のカラー画像と幾何モデルのみから光源位置, 光源色および物体の表面反射特性を推定する方法について述べた。これらの推定値を用いて非常にリアルな仮想物体画像を生成する方法を示した。

参考文献

[1] Kazutada Koshikawa, "A Polarimetric Approach to Shape Understanding of Glossy Objects," in *Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 493-495, Tokyo, Japan, August 1979.

[2] Lawrence B. Wolff and Terrance E. Boult, "Constraining Object Features Using a Polarization Reflectance Model," *IEEE Transactions on Pat-*

tern Analysis and Machine Intelligence, 13 (7), pp.635-657, July 1991.

- [3] Megumi Saito, Yoichi Sato, Katsuhi Ikeuchi, and Hiroshi Kashiwagi, "Measurement of Surface Orientations of Transparent Objects by use of Polarization in Highlight," *Journal of the Optical Society of America A*, 16 (9), pp.2286-2293, September 1999.
- [4] Daisuke Miyazaki, Megumi Saito, Yoichi Sato, and Katsushi Ikeuchi, "Determining Surface Orientations of Transparent Objects Based on Polarization Degrees in Visible and Infrared Wavelengths," *Journal of the Optical Society of America A*, 19 (4), pp.687-694, April 2002.
- [5] Stefan Rahmann and Nikos Canterakis, "Reconstruction of Specular Surfaces using Polarization Imaging," in *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1:149-155, Kauai Marriott, Hawaii, December 2001.
- [6] K. E. Torrance and E. M. Sparrow, "Theory of off-specular reflection from roughened surfaces," *Journal of the Optical Society of America*, Vol.57, pp.1105-1114, 1967.
- [7] K. Ikeuchi and K. Sato, "Determining reflectance properties of an object using range and brightness images," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.13, No.11, pp.1139-1153, 1991.
- [8] R. Ramamoorthi and P. Hanrahan, "A signal processing framework for inverse rendering," *Computer Graphics Proceedings, SIGGRAPH2001*, pp.117-128, 2001.
- [9] S. Tominaga and N. Tanaka, "Estimating reflection parameters from a single color image," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.20, No.5, pp.58-66, 2000.
- [10] G. D. Finlayson and G. Schaefer, "Solving for color constancy using constrained dichromatic reflection model," *Inter. J. Computer Vision*, Vol42, No.3, pp.127-144, 2001.