社団法人　電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
TECHNICAL REPORT OF IEICE.

未知光源環境下での鏡面反射成分付き反射特性の並列計算可能な再構成法

飯山　将晃† 　青木　啓史† 　亀田　能成†† 　美濃　導彦††

† 京都大学情報学研究科
†† 京都大学総合情報メディアセンター
〒 606-8501 京都市左京区吉田二本松町

E-mail: †iiyama@kuis.kyoto-u.ac.jp

あらまし　未知光源環境における鏡面反射成分を含む反射特性を並列計算可能なアルゴリズムで再構成する方法を提案する．観測の対象空間をボクセルの集合として表現し，ボクセル毎に独立した計算で反射特性の再構成を行うことで並列計算可能な手法を実現する．光の反射を記述する一般的なモデルの一つである Torrance-Sparrow 反射モデルを改良して，ボクセル独立な再構成計算に適した新たな反射モデルを導入し，この新たな反射モデルに基づいて反射特性の推定をボクセル独立に行う．まず，物体表面に属するボクセル (表面ボクセル) を抽出し，次に表面ボクセルの法線を計算する。最後に反射モデルに基づいて表面ボクセルの反射特性を推定する。光源が未知な実空間において物体の形状と反射特性を再構成する実験を行い、提案手法の有効性を示した。

キーワード　反射特性再構成, 鏡面反射, 並列計算

A Parallel Computable Reconstruction Method of Reflection Property under Unknown Lighting Condition

Masaaki IIYAMA†, Hirohumi AOKI†, Yoshinari KAMEDA††, and Michihiko MINOH††

† Graduate School of Infomatics, Kyoto University
†† Center for Information and Multimedia Studies, Kyoto University
Yoshidanihonmatsucho, Sakyoku, Kyoto, 606-8501, Japan

E-mail: †iiyama@kuis.kyoto-u.ac.jp

Abstract　In this paper, we present a new method to reconstruct the reflection property in real space under unknown lighting condition. In our approach, the calculation of reconstruction is done independently at each voxel. Reconstructed reflection property represents both diffuse reflection and specular reflection at each voxel. Based on Torrance-Sparrow reflection model, we propose an improved reflection model suitable to the voxel-independent reconstruction. Our method consists of 3 steps. First we extract surface voxels. Then the surface normal at each surface voxel is calculated. Finally, we estimate reflection property of it. Experimental results show the effectiveness of our method.

Key words　reconstruction of reflection property, specular reflection, parallel compute

1. はじめに

近年，グラフィックス (CG)/コンピュータビジョン (CV) 技術の発展によって，実世界に存在する物体や空間を再構成し，計算機上の仮想空間に取り込む要求が増大している．計算機上に現実の三次元世界を再構成する技術は，実際のカメラでは不可能な自由視点からの画像を生成することができ，物体に加工を行ったり光源環境を変化させた場合の見え方を知ることもできるといった利点がある．

このような技術に要求される要素として，写実性の向上と処理の実時間性が挙げられる．

写実性を向上させるためには，現実空間内の物体の形状と色を正しく再構成する必要がある．特に物体の色の再現については，物体表面での光の反射を，拡散反射だけでなく鏡面反射に関しても再現することが望ましい．Yu ら [1] は，多数の点光源が配置された空間において，複数枚の広視野画像を利用して空間内の物体表面の反射特性を推定する手法を提案している．しかし，Yu らの手法では，物体表面の幾何形状をすべてあらかじめ計測しておく必要があり，光源に関しても周囲を暗くして光源を直接撮影した画像を用意する必要があった．また，これまでの写実性を追求した再構成技術の研究においては，実時間性に関しては考慮されて来なかった．

一方，実時間性の向上に関しては，これまでの研究により，再構成計算を並列化することが実時間再構成のための良い方法であることが示されている [2]．しかし，[2] では空間内の物体形状の復元が対象とされており，写実性の向上に重要な反射特性の復元方法については示されていない．

そこで，本研究では [2] で提案された手法を拡張して，未知光源環境において，鏡面反射成分を含む反射特性を並列計算可能なアルゴリズムで再構成する方法を提案する．本手法では，再構成計算を並列に実行できるようにするために観測の対象空間をボクセルの集合として表現し，ボクセル毎に独立した計算で反射特性の再構成を行う．

ボクセル独立な再構成により写実性を得る手法としては，Seitz ら [3] の研究があるが，Seitz らの手法は拡散反射のみ考慮しているのに対して，本手法は鏡面反射も考慮に入れた再構成手法である．

また，物体表面での光の反射を記述するための一般的なモデルである Torrance-Sparrow 反射モデルを，拡散反射と鏡面反射に対する性質に着目してボクセル独立な再構成に適するよう変形し，そのモデルに基づいて反射特性の再構成を行う．

まず 2. 節で，対象空間とカメラモデルに付いて述べ，3. 節で，提案する反射モデルの定式化を行う．4. 節では，提案モデルに基づいてボクセル独立に物体の形状と反射特性の推定を行うための計算手法について示し，5. 節で実験結果と考察を述べる．6. 節はまとめである．

2. 対象空間とカメラモデル

まず，再構成の対象となる空間と観測に用いるカメラのモデルについて述べる．

再構成の対象となる空間を対象空間と呼び，大きさが一定の立方格子 (ボクセル) の集合として表現する．本稿では一つのボクセルを $\mathcal{V}$ で表記する．対象空間の観測に利用する n 台のカメラを $C_1, \ldots, C_n$ で表し，カメラ C_i によって撮影された画像を $\mathfrak{I}_i$ で表す．ここで，各カメラ C_i はピンホールカメラモデルで表現し，その投影変換行列は既知であるとする．

カメラ C_i によって観測可能な範囲に，ある物体 $\mathfrak{V}^{\mathrm{obj}}$ が存在するとき，物体 $\mathfrak{V}^{\mathrm{obj}}$ は必ず画像 $\mathfrak{I}_i$ 上に投影される．その投影像を $\mathfrak{I}_i$ 上の物体投影領域と呼び，$\mathfrak{R}_i^{\mathrm{obj}}$ で表す．このとき，物体 $\mathfrak{V}^{\mathrm{obj}}$ は必ず，カメラ C_i のレンズ中心を端点とし物体投影領域 $\mathfrak{R}_i^{\mathrm{obj}}$ 上の任意の点を通る半直線の集合からなる錐体状の開空間に内接して存在する．この開空間をカメラ C_i における物体存在可能空間と呼び，$\mathfrak{V}_i$ で表す (図 1)．

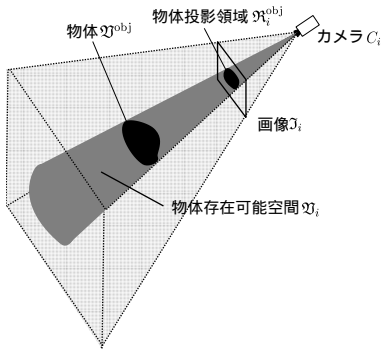


図 1　物体存在可能空間
Fig. 1　Existence Shadow Space.

3. ボクセル独立な再構成のための反射モデル

物体の色は，一般に物体表面からの反射光を観測したものである．物体表面での光の反射を表すモデルとしては，2 色性反射モデルが一般的に用いられる [4] .本稿では，その中でも自然界に存在する物体に対して良い近似を示すモデルの一つである Torrance-Sparrow 反射モデル [5] をもとに，ボクセル独立な再

構成処理に適した反射モデルの定式化を行う．以降，光の強さを R,G,B の 3 次元ベクトル$\boldsymbol{I}$で表現する．

3.1 Torrance-Sparrow 反射モデル

有限個数 m の点光源 $L_1,\ldots,L_m$からの入射光に対する反射光は，光源 L_jからの入射光の強さを$\boldsymbol{I}^{\mathrm{in}}{}_j$，観測される反射光の強さを$\boldsymbol{I}^{\mathrm{ref}}$とするとき，以下の関係式で表せる．

$$\boldsymbol{I}^{\mathrm{ref}} = \sum_{j=1}^{m} \boldsymbol{I}_j^{\mathrm{in}} \boldsymbol{k}^{\mathrm{diff}} \cos\theta(\boldsymbol{n},\boldsymbol{l}_j) + \sum_{j=1}^{m} \boldsymbol{I}_j^{\mathrm{in}} \boldsymbol{k}^{\mathrm{spec}} \frac{1}{\cos\psi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{e})} e^{-\frac{\phi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{l}_j,\boldsymbol{e})^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

ここで，$\boldsymbol{n}$は物体表面上の法線，$\boldsymbol{e}$は視点の向き，$\boldsymbol{l}_j$は光源 L_jの向きをそれぞれ表し，$\theta(\boldsymbol{n},\boldsymbol{l}_j)$ は$\boldsymbol{l}_j$が$\boldsymbol{n}$となす角，$\psi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{e})$ は$\boldsymbol{e}$が$\boldsymbol{n}$となす角，$\phi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{l}_j,\boldsymbol{e})$ は$\boldsymbol{l}_j$と$\boldsymbol{e}$を二等分するベクトル$\boldsymbol{h}$が$\boldsymbol{n}$となす角をそれぞれ表す (図 2)．$\boldsymbol{k}^{\mathrm{diff}}$, $\boldsymbol{k}^{\mathrm{spec}}$はそれぞれ拡散反射係数，鏡面反射係数であり，$\sigma$は鏡面反射光の指向性の度合いを表す．

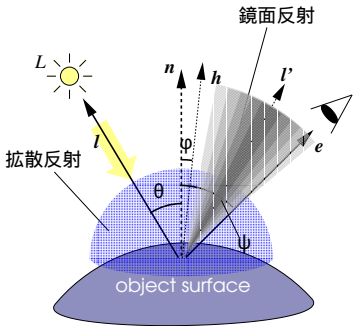


図 2　光 の 反 射
Fig. 2　Light reflection.

3.2 ボクセル独立な計算に適した反射モデル

式 (1) の拡散反射項と鏡面反射項のそれぞれについて，次の事柄に着目する．

(i)　物体表面上のある一点における拡散反射光は，任意の視点から同じ強さで観測される．

(ii)　鏡面反射光は強い指向性を持ち，物体面に対する入射光の正反射方向付近の限られた範囲でのみ集中して観測される．つまり，光源の存在が密でなければ，物体表面上のある一点においてある視点から観測される鏡面反射は，特定の一光源からのみもたらされるとみなすことができる．

これらの考察にしたがって，式 (1) をもとに，ボクセル独立な再構成に適した反射モデルを定式化する．まず，拡散反射を表す第一項には観測方向に関するパラメータ$\boldsymbol{e}$が含まれないため，値は観測方向によらず一定となる．これを拡散反射色と呼び，$\boldsymbol{I}^{\mathrm{diff}}$として表す．

次に，前述の仮定より，観測される鏡面反射の要因となる唯一の光源を L_sとすると，L_s以外の光源 L_jに関しては，$\phi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{l}_j,\boldsymbol{e}) \gg 0$ より $e^{-\frac{\phi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{l}_j,\boldsymbol{e})^2}{2\sigma^2}} \simeq 0$ が成立するから，鏡面反射を表す式 (1) の第二項は，

$$\boldsymbol{I}_s^{\mathrm{in}} \boldsymbol{k}^{\mathrm{spec}} \frac{1}{\cos\psi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{e})} e^{-\frac{\phi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{l}_s,\boldsymbol{e})^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

で近似できる．

入射光の強さ$\boldsymbol{I}_{sc}^{\mathrm{in}}$と鏡面反射係数$\boldsymbol{k}^{\mathrm{spec}}$については，まとめて単一の色$\boldsymbol{I}^{\mathrm{spec}}$として表す．すなわち，$\boldsymbol{I}^{\mathrm{spec}} = \boldsymbol{I}_s^{\mathrm{in}} \boldsymbol{k}^{\mathrm{spec}}$ で表す．以下，この$\boldsymbol{I}^{\mathrm{spec}}$を鏡面反射色と呼ぶ．

以上により，次式が導かれる．

$$\boldsymbol{I}^{\mathrm{ref}} = \boldsymbol{I}^{\mathrm{diff}} + E(\boldsymbol{n},\boldsymbol{l}_s,\boldsymbol{e})\boldsymbol{I}^{\mathrm{spec}} \quad (3)$$

ここで，

$$E(\boldsymbol{n},\boldsymbol{l}_s,\boldsymbol{e}) = \frac{1}{\cos\psi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{e})} e^{-\frac{\phi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{l}_s,\boldsymbol{e})^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

である．

観測視点の向き$\boldsymbol{e}$はカメラ位置から，法線ベクトル$\boldsymbol{n}$は物体形状からそれぞれ求められるため，物体表面上の各点における反射光の強さを表現するパラメータのうち，色の再構成において求めるべきパラメータは光源 L_sからの入射光の向き$\boldsymbol{l}_s$，拡散反射色$\boldsymbol{I}^{\mathrm{diff}}$，鏡面反射色$\boldsymbol{I}^{\mathrm{spec}}$の 3 つとなる．以下，本稿ではこれら 3 つのパラメータを色パラメータと呼ぶ．色パラメータは物体表面上の各点毎に独立であるから，この反射モデルに従えば，ボクセル独立な再構成処理が可能となる．

なお，σについては，本稿では適当な定数として扱う．

4. 物体形状と反射特性のボクセル独立な再構成

本節では，3. 節で述べた反射モデルに基づき，画像データから反射特性の再構成をボクセル独立な計算により行うための 3 段階からなる計算方法を述べる．

まず，各カメラの物体投影領域より物体表面に属するボクセルの集合を求め，各ボクセル毎に色パラメータの推定を行う．以下，物体表面に属するボクセルを表面ボクセルと呼び，表面ボクセルの集合を$\mathfrak{V}^{\mathrm{surface}}$で表記する．

次に，色パラメータを推定するのに必要な物体表面の法線を求める．本稿ではボクセル $\mathcal{V}$の法線を$\boldsymbol{n}(\mathcal{V})$で表す．

最後に，各ボクセルに対して法線が求まれば，色パラメータ，すなわち入射光の向きと拡散反射色，鏡面反射色を求めることで再構成が完了する．

4.1 視体積交差法を用いた表面ボクセルの判定

次の二つの条件を共に満たすボクセル $\mathcal{V}$ を表面ボクセルであると判定する．

(i) $\mathcal{V}$ の各画像 $\mathfrak{I}_i$ への投影領域が，全ての画像 $\mathfrak{I}_i(1 \leqq i \leqq n)$ において物体投影領域 $\mathfrak{R}_i^{\mathrm{obj}}$ 内のピクセルを含む．

(ii) $\mathcal{V}$ の各画像 $\mathfrak{I}_i$ への投影領域が，いずれかの画像 $\mathfrak{I}_i$ において物体投影領域 $\mathfrak{R}_i^{\mathrm{obj}}$ の輪郭上に存在する．

4.2 表面ボクセルの法線推定

前節の処理により得られた表面ボクセルに対し，その法線をボクセル独立な計算により推定する．

4.1節 (ii) の条件より，表面ボクセルは $\mathfrak{V}_1, \ldots, \mathfrak{V}_n$ のいずれかの表面に必ず含まれる．

表面ボクセル $\mathcal{V}$ が $\mathfrak{V}_i$ の表面に属するとき，$\mathcal{V}$ の画像 $\mathfrak{I}_i$ への投影像は，必ず物体投影領域 $\mathfrak{R}_i^{\mathrm{obj}}$ の輪郭を含む．$\mathfrak{V}_i$ の法線は図 3 のように，画像 $\mathfrak{I}_i$ 上に，物体投影領域の輪郭上の点における二次元法線として投影される．そこで，まず $\mathfrak{R}_i^{\mathrm{obj}}$ の輪郭の二次元法線 $\boldsymbol{n}^{\mathrm{img}}{}_i(\mathcal{V})$ を求める．次に，これに投影され，かつカメラ C_i のレンズ中心から $\mathcal{V}$ へ向かうベクトルに垂直なベクトルを求め，これを $\mathcal{V}$ の法線 $\boldsymbol{n}_i(\mathcal{V})$ とする．

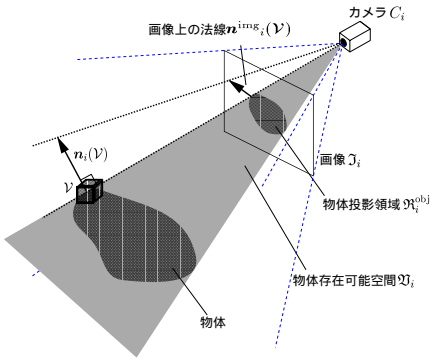


図 3 画像上の法線と表面ボクセルの法線
Fig. 3 A planar normal on image plane and a spatial normal on the surface of Existence Shadow Space.

表面ボクセル $\mathcal{V}$ が複数のカメラにおける物体存在可能空間の表面に属する場合は，それぞれにおいて求められたベクトル $\boldsymbol{n}_i(\mathcal{V})$ の平均をとることで $\mathcal{V}$ の法線 $\boldsymbol{n}(\mathcal{V})$ とする．

この推定計算は画像とカメラの透視投影変換行列のみから行えるため，他のボクセルへの参照は何ら必要ない．よって，ボクセル毎に独立な計算により法線推定を行うことができる．

4.3 色パラメータの推定

複数カメラ $C_1, \ldots, C_n$ のうち $\mathcal{V}$ を観測しているカメラを決定し，色パラメータをそれらのカメラによる反射光の観測によって得られる各ピクセル値を用いて求める方法について述べる．

4.3.1 観測色の獲得

$\mathcal{V}$ は全てのカメラによって観測されるとは限らないため，まず $\mathcal{V}$ を観測しているカメラを決定する必要がある．本手法では，$\mathcal{V}$ の中心点を通り法線ベクトル $\boldsymbol{n}(\mathcal{V})$ を持つ平面に対し，$\boldsymbol{n}(\mathcal{V})$ の正方向の側に存在するカメラを $\mathcal{V}$ の観測可能カメラと定める．以下，観測可能カメラ数を n^{obs} とし，観測可能カメラを $C_{i_k}(1 \leqq i_k \leqq n,\ 1 \leqq k \leqq n^{\mathrm{obs}})$ と表す．

次に，観測可能カメラ C_{i_k} における画像上で $\mathcal{V}$ に対応するのピクセルの値を，$\mathcal{V}$ の観測色 $\boldsymbol{I}_{i_k}$ すなわちカメラ C_{i_k} による反射光の観測値として得る．観測色 $\boldsymbol{I}_{i_k}$ は，$\mathcal{V}$ の投影像に含まれる物体投影領域 $\mathfrak{R}_{i_k}^{\mathrm{obj}}$ のピクセル値を平均することで求める．

4.3.2 複数の観測色からの色パラメータ推定

式 (3) にしたがって色パラメータを推定するためには，観測色 $\boldsymbol{I}_{i_k}$ を拡散反射を表す第一項と鏡面反射を表す第二項に分解する必要がある．このために，3.2節に挙げた鏡面反射の指向性と $\boldsymbol{I}^{\mathrm{spec}}$ にかかる係数 E の値に着目する．

式 (4) において，観測視点の向き $\boldsymbol{e}_j$ が入射光の正反射方向 $\boldsymbol{l}'$ と大きく異なる場合，$\phi(\boldsymbol{n}, \boldsymbol{l}_s, \boldsymbol{e}_i) \gg 0$ から $E \simeq 0$ となる．つまり，観測可能カメラの配置が密でないと仮定した場合，ある観測可能カメラ C_{i_k} について $\boldsymbol{e}_{i_k} \simeq \boldsymbol{l}'_s$ が成り立つとき，他の観測可能カメラでは $\boldsymbol{e}_{i_k} \simeq \boldsymbol{l}'_s$ が成り立たず $E = 0$ となるとみなせる．すなわち，ある表面ボクセル $\mathcal{V}$ に対して，$\boldsymbol{l}_s$ 方向からの鏡面反射を観測し得る観測可能カメラは，高々一つであると仮定することができる．このとき，鏡面反射を観測するカメラを鏡面反射観測カメラと呼ぶ．

観測色の拡散反射項と鏡面反射項への分解は，複数の観測可能カメラから鏡面反射観測カメラを決定することによって行う．

4.3.3 鏡面反射観測カメラの決定

$n^{\mathrm{obs}} \geqq 2$ の場合，得られた複数の観測色から，$\mathcal{V}$ の色パラメータの推定を行う．鏡面反射発生時には反射光が強くなることから，各観測色 $\boldsymbol{I}_{i_k}$ の中で，大きく突出した観測色を持つ観測可能カメラを鏡面反射観測カメラであると考える．

全ての観測可能カメラ C_{i_k} に対し観測色の突出の

評価値を求め，その中で最大値を与えるC_{i_k}を$C_{i_{\rm spec}}$とおく．$C_{i_{\rm spec}}$ の評価値が一定の閾値$\delta^{\rm spec}$を超えているとき，$C_{i_{\rm spec}}$を鏡面反射観測カメラと定める．また，鏡面反射を及ぼしている入射光を発する光源をL_sで表す．

なお，閾値を越える評価値を持つカメラが存在しない場合，または$n^{\rm obs}=1$ の場合，$\mathcal{V}$は拡散反射色のみを持つものとし，拡散反射色を全観測色の平均値で表す．

$$\boldsymbol{I}^{\rm diff} = \frac{1}{n^{\rm obs}} \sum_{k=1}^{n^{\rm obs}} \boldsymbol{I}_{i_k} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{I}^{\rm spec} = \boldsymbol{0} \tag{6}$$

4.3.4　観測色の拡散反射光と鏡面反射光への分解

4.3.2 節の議論から，鏡面反射観測カメラ以外の観測可能カメラでは，光源L_sからの鏡面反射光は観測されない．またこのとき，同様に鏡面反射の指向性から，光源L_sは，物体表面から見て観測方向の正反射方向の近傍に必ず存在する．

そこで，光源L_sの向きを観測方向の正反射方向で近似し，ボクセル$\mathcal{V}$に対する入射光の方向の推定値$\tilde{\boldsymbol{l}_s}$を次式を用いて求める．

$$\tilde{\boldsymbol{l}_s} = 2(\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{e}_{i_{\rm spec}})\boldsymbol{n} - \boldsymbol{e}_{i_{\rm spec}} \tag{7}$$

ただし，各ベクトル$\boldsymbol{n},\ \boldsymbol{e}_{i_{\rm spec}},\ \tilde{\boldsymbol{l}_s}$は単位ベクトルである．

鏡面反射観測カメラ以外の観測可能カメラにおける観測色には鏡面反射色は含まれないことから，拡散反射色$\boldsymbol{I}^{\rm diff}$を次式により求める．

$$\boldsymbol{I}^{\rm diff} = \frac{1}{n^{\rm obs}-1} \sum_{i_k \neq i_{\rm spec}} \boldsymbol{I}_{i_k} \tag{8}$$

また，入射光方向を式 (7) によって求めることにより，$\phi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{l}_s,\boldsymbol{e}_{i_{\rm spec}})=0$ となる (図 2)．よって，式 (4) は，

$$E(\boldsymbol{l}_s,\boldsymbol{e}_{i_{\rm spec}}) = \frac{1}{\cos\psi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{e}_{i_{\rm spec}})} \tag{9}$$

となる．

したがって，式 (3) から，鏡面反射色$\boldsymbol{I}^{\rm spec}$は次式により求められる．

$$\boldsymbol{I}^{\rm spec} = (\boldsymbol{I}_{i^{\rm spec}} - \boldsymbol{I}^{\rm diff})\cos\psi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{e}_{i^{\rm spec}}) \tag{10}$$

以上の処理は全て各ボクセル毎に独立であり，他のボクセルでの推定結果に依存しない．よって，本節で述べた一連の再構成計算は，ボクセル独立に行える．

5.　実験と考察

本稿で提案した再構成法によって，実際に光源環境が未知である実空間において反射特性を再構成する実験を行った．

5.1　実　　験

実験には，カメラ 8 台を使用し，約 $7m$ 四方の広さに配置した．

光沢のある塩化ビニル製の青いボール (直径約 22.5cm) と 2 体のぬいぐるみを対象とした場合の実験例を示す．対象空間$\mathfrak{S}$の大きさは$1.0(x)\times0.6(y)\times0.8(z)$[m] であり，ボクセルの一辺の長さは 5[mm]，各画像の大きさは640×480[pixel] であり，各ピクセルは R,G,B それぞれについて 0 から 255 までの値域を持つ．また，各定数値を$\sigma=0.5,\ \delta^{\rm spec}=50$ とした．

8 台のカメラ (a) ~ (h) によって物体を撮影した画像を図 4 に示す．これらの入力画像に対し，本手法を適用した．得られた再構成結果をレンダリングした様子を図 5 に示す．(i),(ii) はそれぞれ，カメラ (b),(c) と同一の視点での画像を生成したものである．(iii) は (i) と同じ視点からの画像であるが，拡散反射色のみをレンダリングした様子を示している．(iv) は実際にはカメラが存在しない視点からの画像を示す．

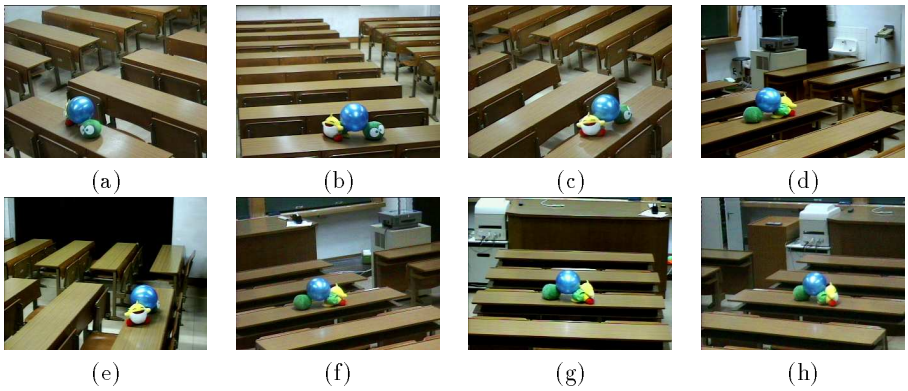
5.2　考　　察

図 5 に示す実験結果から，鏡面反射によってボールの表面に現れるハイライトが再現されており，拡散反射だけでなく鏡面反射を含めた再構成が行われていることがわかる．また，(i) と (iii) とを比較すると，ボール表面において，鏡面反射色の推定によりハイライトが現れている様子がわかる．

しかしながら，本手法では鏡面反射光の指向性を制御するパラメータである式 (1) のσを定数としているため，材質の違いによる鏡面反射の指向性の違いに対処することができない．これを推定する方法としては，画像上で，当該ボクセルの投影領域付近での物体表面の陰影の変化を解析することが考えられる．

6.　おわりに

本稿では未知光源環境において，鏡面反射成分を含む反射特性を並列計算可能なアルゴリズムで再構成する方法を提案した．再構成計算を並列に実行するため，観測の対象空間をボクセルの集合として表現し，ボクセル毎に独立した計算で反射特性の再構成を行えることが本手法の特徴である．



(a) (b) (c) (d)

(e) (f) (g) (h)

図 4　入力画像
Fig. 4　Input images.

(i) カメラ (b) からみた様子　(ii) カメラ (c) から見た様子　(iii) 拡散色のみ (カメラ (b))　(iv) 仮想視点画像

図 5　再構成結果
Fig. 5　Reconstruction results.

物体表面での光の反射の再現のために，光の反射を記述する Torrance-Sparrow モデルに基づき，新たにボクセル独立な再構成計算に適した形式の反射モデルを提案し，そのモデルに基づいて反射特性の再構成を行う手法を示した．

本手法の検証を行うため，実空間内の反射特性を再構成する実験を行った．実験により，ボクセル独立な計算によって未知光源環境で物体形状と拡散反射・鏡面反射を共に含む反射特性の再構成が行われ，鏡面反射によるハイライトも再現できることが確認された．

最後に，今回は静止画像を用いて再構成を行ったが，本手法は動画像を用いた動物体の再構成へと拡張することが可能である．今後の予定として、実際に並列計算による再構成処理システムを実装し、動画像を用いた再構成への拡張を試みることが挙げられる。

文　献

[1] Y. Yu, P. E. Debevec, J. Malik, and T. Hawkins. Inverse global illumination: Recovering reflectance models of real scenes from photograph. In *SIGGRAPH 99 Conference Proceedings*, pp. 215–224, 1999.

[2] 亀田能成, 太尾田健男, 角所考, 美濃導彦. 時空間の分割とビデオ画像のパイプライン処理による 高速三次元再構成. 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 1, pp. 13–22, 1999.

[3] S. M. Seitz and C. R. Dyer. Photorealistic scene reconstruction by voxel coloring. In *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition Conference*, pp. 1067–1073, 1997.

[4] 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳. コンピュータビジョン技術評論と将来展望. 新技術コミュニケーションズ, 1998.

[5] S. K. Nayar, K. Ikeuchi, and T. Kanade. Surface reflection: physical and geometrical perspectives. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 13, No. 7, pp. 611–634, 1991.