Vol. 42 No. 12 情報処理学会論文誌 Dec. 2001

未知光源環境での物体形状と反射特性のボクセル独立な再構成法

飯山将晃[†] 青木啓史[†,☆]
亀田能成[††] 美濃導彦[††]

並列計算に適した，未知光源環境における物体形状と鏡面反射成分を含む反射特性の再構成法を提案する．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により物体形状と反射特性の再構成を行う．物体形状の再構成には，ボクセル独立な計算が可能な視体積交差法を利用する．また，反射特性の再構成には，光の反射を記述する最も一般的なモデルの一つであるTorrance-Sparrow反射モデルに基づき，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する．本手法による再構成は，視体積交差法による物体表面に属するボクセルの抽出，画像上の法線を用いた物体表面上の法線の計算，提案反射モデルに基づく反射特性の推定の三段階の処理を個々のボクセル毎に独立に行うことで実現される．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．

A Voxel-Independent Reconstruction Method of Object Shape and Its Reflection Property under Unknown Lighting Condition

Masaaki Iiyama,[†] Hirofumi Aoki,[†,☆] Yoshinari Kameda[††]
and Michihiko Minoh [††]

We present a new approach to reconstruct 3D object shape and 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 surface voxel. Based on Torrance-Sparrow reflection model, we propose an improved reflection model suitable to the voxel-independent reconstruction. Reconstruction process consists of 3 steps. First the surface voxels are extracted. Then surface normal at each surface voxel is calculated. Finally, its reflection property is estimated. Experimental results show the validity of our method.

1. はじめに

計算機上に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視点からの画像を生成したり，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ができるという利点から，コンピュータネットワークを介した遠隔講義や遠隔会議，スポーツやコンサート等のイベント中継などにおいて，従来用いられてきた二次元映像の伝送に代わる新たな技術として期待されている．

† 京都大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University
†† 京都大学総合情報メディアセンター
Center for Information and Multimedia Stuies, Kyoto University
☆ 現在，NEC
Presently with NEC

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．写実性の向上に関しては，これまで行われてきた研究[1)~6)]により，光源環境を計測し物体の幾何形状を与えれば，多視点で撮影された複数枚の画像の組から物体表面の反射特性の推定計算が行えることが示されている．佐藤ら[5)]は，単一点光源のもとで，カラーCCDカメラとスリット光レンジファインダを用いて物体を多視点から観測し，物体の形状と反射特性を推定する手法を提案した．しかし，佐藤らの手法では，あらかじめ較正された単一点光源を用いることを仮定しており，通常の実空間における物体の再構成に

は適用が困難であった．これに対しYuら[6]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[7][8]．しかし，この研究では空間内の物体形状の復元のみ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，並列計算が可能な，未知光源環境における物体形状と反射特性の再構成法を新たに提案する．本手法では，再構成計算を並列に実行するため，空間を有限個の立方格子（ボクセル）に分割し，各ボクセル毎に独立して形状と反射特性の計算を行う．

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らの手法は物体表面で起こる反射が拡散反射で近似可能な場合にのみ利用可能であるのに対して，本手法は鏡面反射も考慮に入れた再構成手法である．

提案手法では物体形状の再構成法として，視体積交差法[7]を利用する．視体積交差法は再構成できる形状に一部制限はあるものの，ボクセル独立に計算することが可能である．物体形状の再構成法としては，視体積交差法の他にマルチベースラインステレオによる方法があるが，2つの画像間で画素の対応がとらなければならず，鏡面反射によって観測色が視点方向毎に異なる状況には適さない．

我々は，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て本手法に用いている．

本論文の構成は以下の通りである．まず2節で，空間とカメラモデルを定義し，形状の再構成に利用する視体積交差法について述べる．次いで3節では，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. ボクセル独立な形状再構成法

2.1 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$\mathcal{V}$，$\mathcal{V}$の中心の座標を$\boldsymbol{v}$で表記する．対象空間の観測に利用するカメラ台数をn台とし，各カメラを$C_1,\ldots,C_n$で表す．また，カメラC_iによって撮影された画像上の点を$\boldsymbol{p}_i$で表記する．ここで，各カメラC_iはピンホールカメラモデルで表現可能な光学系を持つとし，その三次元空間座標から画像平面座標への投影変換行列は既知であるとする．

対象空間内の点$\boldsymbol{v}$と，その画像への投影点$\boldsymbol{p}_i$の関係は，カメラC_iに固有な投影変換行列$\boldsymbol{P}_i$を用いて次式のように表される．

$$\boldsymbol{p}_i = \boldsymbol{P}_i \boldsymbol{v} \tag{1}$$

2.2 視体積交差法

次に，物体形状の再構成方法として，視体積交差法の原理を記し，そのボクセル独立性について述べる．

カメラC_iによって観測可能な空間の範囲は，カメラのレンズ中心を端点とし，画像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として表される．この開空間を視体積と呼ぶ．

視体積に物体が存在するとき，その物体は必ず画像上に投影され，投影像は二次元画像平面上の領域として得られる．この領域を物体投影領域$\mathfrak{R}_i$と呼ぶ．このとき，視体積内の物体は必ず，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ぶ．すなわち，

$$\{\boldsymbol{v} \mid \boldsymbol{p} = \boldsymbol{P}_i \boldsymbol{v},\ \boldsymbol{p} \in \mathfrak{R}_i\} \tag{2}$$

を満たす開空間である．

これらを図示すると，図1のようになる．

したがって，対象空間内の物体が複数のカメラ$C_1,\ldots,C_n$によって観測されるときには，各カメラにおける物体存在可能空間の積空間について，物体は必ずその積空間に内接して存在する(図2)．この積空間を，物体存在可能積空間と呼ぶ．

物体存在可能積空間の表面は，一般には物体表面に一致しない．しかし実際的には，十分な数のカメラを用いれば，物体形状を十分近似するに足る物体存在可能積空間を得ることが可能である．よって，以下本稿では物体存在可能積空間を物体の再構成形状とする．

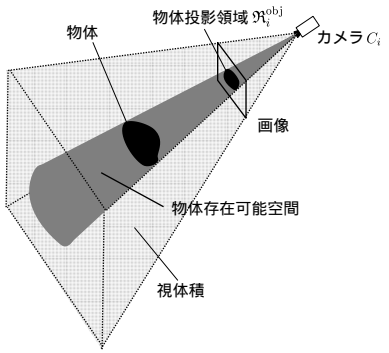


図 1 視体積と物体存在可能積空間
Fig. 1 Viewing volume and existence shadow space.

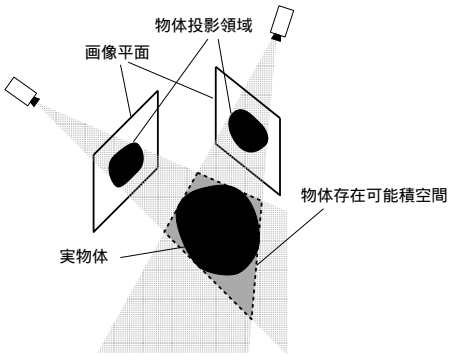


図 2 物体存在可能積空間と物体形状
Fig. 2 Cumulative existence shadow space and object shape.

なお，十分な数のカメラを用いるとの仮定の下で，物体表面上の点が視体積交差法によって再構成可能であるためには，その点を通る接線の中で，接点以外で物体と交差しないものが存在することが必要十分条件となる[9]．そのため，物体表面のうち窪んだ凹面については，カメラを増やしてもその部分を再構成することはできないことに注意する必要がある．

2.3 視体積交差法のボクセル独立性

式 2 と物体存在可能積空間の定義から，対象空間内の任意の点 $\boldsymbol{v}$ は，次式を満たすときに物体存在可能積空間に含まれる．

$$\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{v} \in \mathfrak{R}_i,\ \forall\ i = 1, \ldots, n \qquad (3)$$

したがって，$\boldsymbol{v}$ が物体存在可能積空間に含まれるかどうかの判定は，対象空間内の他の点の判定結果には全く依存しない．このことより，視体積交差法はボクセル独立な三次元再構成を実現するものであると言える．

但し，視体積交差法はボクセルについての独立計算性は持つものの，複数のボクセルが画像上の同じピクセルを参照することから，画像についての独立計算性は持たない．しかしながら，画像データの量は 3 次元空間のボクセル表現に要するデータ量と比較すると少なく，画像に対する独立計算性の欠落は画像データを並列数と同じ数だけ複製することで対処することが可能である[7]．

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，反射光を鏡面反射と拡散反射の 2 つの反射成分の和として表す 2 色性反射モデルが一般的に用いられる[10]．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[11] 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 $\boldsymbol{I} = (I_R, I_G, I_B)^\top$ 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 $\boldsymbol{I}^{\mathrm{in}}{}_j = (I^{\mathrm{in}}{}_{jR}, I^{\mathrm{in}}{}_{jG}, I^{\mathrm{in}}{}_{jB})$，観測される反射光の強さを $\boldsymbol{I}^{\mathrm{ref}} = (I^{\mathrm{ref}}{}_R, I^{\mathrm{ref}}{}_G, I^{\mathrm{ref}}{}_B)$ とするとき，以下の関係式で表せる．

$$I_c^{\mathrm{ref}} = \sum_{j=1}^{m} I_{jc}^{\mathrm{in}} k_c^{\mathrm{diff}} \cos\theta(\boldsymbol{n}, \boldsymbol{l}_j) + \sum_{j=1}^{m} I_{jc}^{\mathrm{in}} * k_c^{\mathrm{spec}} \frac{1}{\cos\psi(\boldsymbol{n}, \boldsymbol{e})} e^{-\frac{\phi(\boldsymbol{n}, \boldsymbol{l}_j, \boldsymbol{e})^2}{2\sigma^2}} \qquad (c = R, G, B) \quad (4)$$

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 3)．$k^{\mathrm{diff}}{}_c$, $k^{\mathrm{spec}}{}_c$ はそれぞれ拡散反射係数，鏡面反射係数であり，σ は鏡面反射光の指向性の度合いを表す．

3.2 ボクセル独立な計算に適した反射モデル

式 4 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 σ によって規定される強い指向性を持ち，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

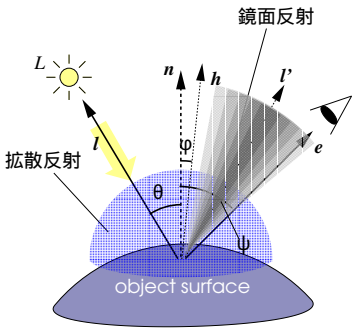


図 3 光の反射
Fig. 3 Light reflection.

るとみなすことができる．

これらの考察にしたがって，式 4 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 4 の第二項は，

$$I_{sc}^{\mathrm{in}} k_c^{\mathrm{spec}} \frac{1}{\cos\psi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{e})} e^{-\frac{\phi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{l}_s,\boldsymbol{e})^2}{2\sigma^2}} \quad (c = R, G, B) \qquad (5)$$

で近似できる．

入射光の強さ I_{sc}^{in} と鏡面反射係数 k_c^{spec} については，まとめて単一の色 I_c^{spec} として表す．すなわち，$I_c^{\mathrm{spec}} = I_{sc}^{\mathrm{in}} k_c^{\mathrm{spec}} \quad (c = R, G, B)$ である．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．

$$\boldsymbol{I}^{\mathrm{ref}} = \boldsymbol{I}^{\mathrm{diff}} + E(\boldsymbol{n}, \boldsymbol{l}_s, \boldsymbol{e}) \boldsymbol{I}^{\mathrm{spec}} \qquad (6)$$

ここで，

$$E(\boldsymbol{n}, \boldsymbol{l}_s, \boldsymbol{e}) = \frac{1}{\cos\psi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{e})} e^{-\frac{\phi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{l}_s,\boldsymbol{e})^2}{2\sigma^2}} \qquad (7)$$

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，この反射モデルは，本研究の目的であるボクセル独立な再構成処理に利用できる．

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，2 節で述べた形状再構成法と 3 節で述べた反射モデルに基づき，画像データから物体形状と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 段階からなる処理手順について述べる．

まず，2.2 節で述べた視体積交差法を利用して，物体表面に属するボクセルの集合を求め，それらボクセル毎に色パラメータの推定を行う．本研究では，物体存在可能積空間の表面に属するボクセルを表面ボクセルと呼ぶ．2.2 節で述べたように，物体存在可能積空間の表面は一般には物体表面に一致しないため，表面ボクセルが物体表面に属するボクセルと一致するとは限らない．特に，物体表面のうち凹面については十分な数のカメラを用意してもその部分を再構成することはできないため，表面ボクセルの位置と法線ベクトルが正しく求まらないことに注意する必要がある．

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．

これらの三段階の処理について，以下で順に述べる．

4.1 表面ボクセルの判定

表面ボクセルの集合を，ボクセル毎に独立した処理により求める．

ボクセル $\mathcal{V}$ が表面ボクセルであるかどうかの判定は，次の 2 つの条件が共に成立するかどうかを調べることで行える．

(i) $\mathcal{V}$ の各画像への投影領域が，全ての画像において物体投影領域 $\mathfrak{R}_i$ 内のピクセルを含む．これは，$\mathcal{V}$ が物体存在可能積空間に含まれることを意味する．

(ii) $\mathcal{V}$ の各画像への投影領域が，いずれかの画像において物体投影領域 $\mathfrak{R}_i$ の輪郭上である．これは，$\mathcal{V}$ があるカメラにおける物体存在可能空間の表面に位置することを意味する．

ここで，$\mathfrak{R}_i$ の輪郭とは，$\mathfrak{R}_i$ に属するピクセルのうち，4 近傍ピクセルのいずれかが $\mathfrak{R}_i$ に含まれないピクセルの集合とする．

この判定は，カメラ C_i の透視投影変換行列 $\boldsymbol{P}_i$ と

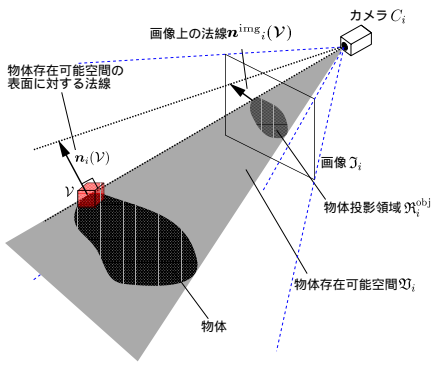


図 4 画像上の法線と物体存在可能積空間の表面上の法線
Fig. 4 A planar normal on image plane and a spatial normal on the surface of Existence Shadow Space.

画像上の物体投影領域 $\mathfrak{R}_i$ のみから行えるため，これはボクセル独立な計算である．

ここで表面ボクセルであると判定されたボクセルについてのみ，以降に述べる法線推定と色パラメータ推定を行う．また，表面ボクセルでないと判定されたボクセルのうち，(i) の条件を満たさないボクセルを空ボクセル，(i) の条件は満たすが (ii) の条件を満たさないボクセルを内部ボクセルと呼ぶ．

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．

視体積交差法によって再構成される物体存在可能積空間は，各画像 $\mathfrak{I}_i$ から求められる物体存在可能空間の積であることから，物体存在可能積空間の表面上の点は，各カメラにおける物体存在可能空間のいずれかの表面に必ず含まれる．すなわち，物体存在可能積空間の表面の法線を求めることは，各カメラにおける物体存在可能空間のいずれかの表面の法線を求めることと同値である．

表面ボクセル $\mathcal{V}$ の画像への投影像は，必ず物体投影領域 $\mathfrak{R}_i$ の輪郭を含む．カメラ C_i における物体存在可能空間の法線は図 4 のように，画像上に，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，それらの間の関係は透視投影変換行列 $\boldsymbol{P}_i$ によって表される．そこで，まず $\mathcal{V}$ の画像への投影像において $\mathfrak{R}_i$ 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．

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

式 6 の反射モデルに従えば，各表面ボクセル $\mathcal{V}$ は色パラメータ $\boldsymbol{l}_s$, $\boldsymbol{I}^{\mathrm{diff}}$, $\boldsymbol{I}^{\mathrm{spec}}$ をそれぞれ唯一通り持つ．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探索し，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求める必要がある．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 $C_{i_k}(1 \leq i_k \leq n,\ 1 \leq k \leq n^{\mathrm{obs}})$ 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 $\mathfrak{R}_{i_k}$ 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 6 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 7 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，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 $E = 0$ 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われる．

4.3.3 鏡面反射観測カメラの決定

$n^{\mathrm{obs}} \geq 2$ 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．本手法においては，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．

まず，各観測色に対して，他の観測色の平均値からの差 $\boldsymbol{d}_{i_k}$ を次式より求める．

$$\boldsymbol{d}_{i_k} = \boldsymbol{I}_{i_k} - \frac{1}{n^{\mathrm{obs}}-1}\sum_{j\neq k}\boldsymbol{I}_{i_j} \tag{8}$$

次に $\boldsymbol{d}_{i_k}$ の R,G,B 各成分の平均値を求め，これをもって，観測色 $\boldsymbol{I}_{i_k}$ の突出の評価値 $b(\boldsymbol{I}_{i_k})$ とする．

全ての観測可能カメラ C_{i_k} に対し $b(\boldsymbol{I}_{i_k})$ の値を求め，その中で最大値を与える i_k を i_{spec} とおく．$C_{i_{\mathrm{spec}}}$ の評価値 $b(\boldsymbol{I}_{i_{\mathrm{spec}}})$ が一定の閾値 δ^{spec} を超えているとき，$C_{i_{\mathrm{spec}}}$ 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，条件が満たされない場合，または $n^{\mathrm{obs}}=1$ 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．

$$\boldsymbol{I}^{\mathrm{diff}} = \frac{1}{n^{\mathrm{obs}}}\sum_{k=1}^{n^{\mathrm{obs}}}\boldsymbol{I}_{i_k} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{I}^{\mathrm{spec}} = \boldsymbol{0} \tag{10}$$

このように拡散反射色のみを持つボクセルを，単色ボクセルと呼ぶ．これに対し，拡散反射色と鏡面反射色の両方の色パラメータを持つボクセルを複色ボクセルと呼ぶ．

4.3.4 複色ボクセルの色パラメータ推定

$\mathcal{V}$ が複色ボクセルである場合，4.3.2 節の議論から，$C_{i_{\mathrm{spec}}}$ 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することにより，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．

$$\tilde{\boldsymbol{l}_s} = 2(\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{e}_{i_{\mathrm{spec}}})\boldsymbol{n} - \boldsymbol{e}_{i_{\mathrm{spec}}} \tag{11}$$

ただし，各ベクトル $\boldsymbol{n}$, $\boldsymbol{e}_{i_{\mathrm{spec}}}$, $\tilde{\boldsymbol{l}_s}$ 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 $\boldsymbol{I}^{\mathrm{diff}}$ を次式により求める．

$$\boldsymbol{I}^{\mathrm{diff}} = \frac{1}{n^{\mathrm{obs}}-1}\sum_{i_k\neq i_{\mathrm{spec}}}\boldsymbol{I}_{i_k} \tag{12}$$

また，入射光方向を式 11 によって求めることにより，$\phi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{l}_s,\boldsymbol{e}_{i_{\mathrm{spec}}})=0$ となる (図 3)．よって，式 7 は，

$$E(\boldsymbol{l}_s,\boldsymbol{e}_{i_{\mathrm{spec}}}) = \frac{1}{\cos\psi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{e}_{i_{\mathrm{spec}}})} \tag{13}$$

となる．

したがって，式 6 および式 8 から，鏡面反射色 $\boldsymbol{I}^{\mathrm{spec}}$ は次式により求められる．

$$\begin{aligned}\boldsymbol{I}^{\mathrm{spec}} &= (\boldsymbol{I}_{i^{\mathrm{spec}}} - \boldsymbol{I}^{\mathrm{diff}})\cos\psi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{e}_{i^{\mathrm{spec}}}) \\ &= \boldsymbol{d}_{i^{\mathrm{spec}}}\cos\psi(\boldsymbol{n},\boldsymbol{e}_{i^{\mathrm{spec}}})\end{aligned} \tag{14}$$

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物体形状と反射特性を再構成する実験を行った．まず 5.1 節で実験内容と実験結果を示し，次に 5.2 節で考察を行う．

5.1 実　　験

実験環境としては，本学講義室の一つを用いた．講義室に対する世界座標系とカメラレイアウトを図 5 に示す．

再構成対象物体として，光沢のある塩化ビニル製の青いボール (直径約 22.5cm) を使用した場合の実験例を示す．対象空間の大きさは $0.6(x)\times0.6(y)\times0.6(z)$[m] であり，ボクセルの一辺の長さは 0.005[m]，総ボクセル数は $120\times120\times120 = 1,728,000$[voxel] である．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 $\sigma=0.5$, $\delta^{\mathrm{spec}}=50$ 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 6 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様々な視点からレンダリングした様子を図 7 に示す．(i) は再構成された形状のみを表示したものである．(ii),(iii) はそれぞれ，カメラ (e),(f) と同一の視点での画像を生成したものである．(iv) は (ii) 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．(v) から (viii) にかけては，実際にはカメラが

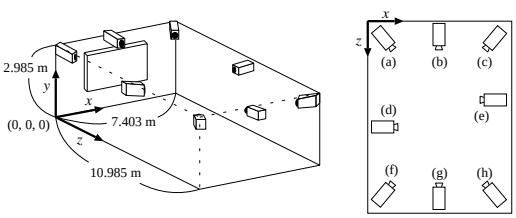


図 5 カメラレイアウト
Fig. 5 Camera layout.

表 1 全ボクセルの統計
Table 1 Statistics of all reconstructed voxels.

ボクセルの種類	ボクセル数	処理時間 [μsec]	総処理時間 [sec]
空ボクセル	1665348	2.0486	3.4116
内部ボクセル	45169	14.6772	0.6630
単色ボクセル ($n^{\mathrm{obs}} = 1$)	26	68.2692	0.0018
単色ボクセル ($n^{\mathrm{obs}} \geq 2$)	12085	77.6035	0.9378
複色ボクセル ($n^{\mathrm{obs}} \geq 2$)	5372	86.4092	0.4642

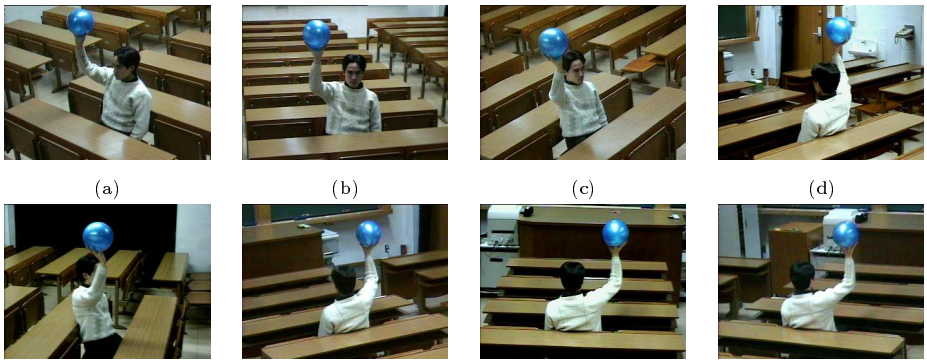


図 6 入力画像
Fig. 6 Input images.

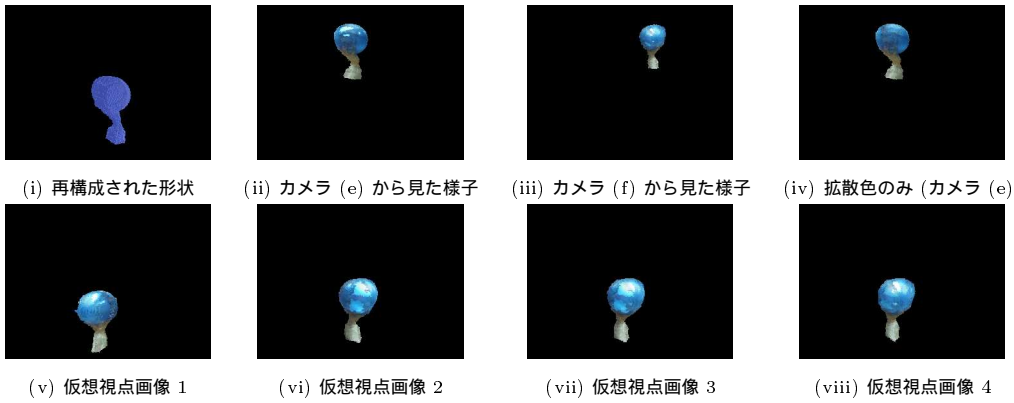


図 7 再構成結果
Fig. 7 Reconstruction results.

存在しない視点からの画像を示す．また，このとき再構成された全ボクセルの種類と処理に要した時間の統計を表 1 に示す．表中の処理時間および総処理時間は，Sun Ultra2 Model2300 (UltraSPARC-II 300MHz CPU) 上で再構成処理を実行させた場合の，1 ボクセルあたりの平均処理時間および全ボクセルの総処理時間を示している．

5.2 考 察

図 7 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，(ii) と (iv) との比較から，ボール表面において，ハイライトの現れていることから鏡面反射色が推定されている様子がわかる．

しかし，図 7 の仮想視点画像のうち，(vii) は (vi) と (viii) のほぼ中間の視点からの画像であるが，(vi) と (viii) においてそれぞれ現れているハイライトが共に結合したような形でハイライトが現れており，不自然さがある．この現象は，実際には入射光の方向が観測方向の正反射方向からずれている場合に弱い鏡面反

射が観測されたとき，入射光の方向が観測方向の正反射方向であると近似していることが原因であると考えられる．

入射光の方向推定をより正確に行うための手段の一つとしては，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参照することが今後の検討課題として挙げられる．また，入射光方向の推定精度には法線の推定精度が影響するため，その対策として，対象物体形状が丸みを帯びていることを仮定した法線の補間計算などが考えられる．

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 4 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．

また，カメラの台数および配置の問題として，鏡面反射光の指向性が強い場合，鏡面反射を観測するためにはカメラの配置を密にしなければならないが，その場合，指向性が弱い面が存在すると鏡面反射光を観測するカメラが複数になってしまうという問題が存在する．この問題の解決には，適切に定めた σ に応じてカメラの配置の密度を考慮する必要がある．

ある 2 つのカメラが同じ鏡面反射光を観測するかどうかは，それぞれのカメラの観測視点の向きがどれだけ異なるかを計測することによって，ある程度予測が可能である．このことから，別の解決法として，この予測を利用しカメラの配置が密の場合でも鏡面反射観測カメラを複数決定し，そこから鏡面反射成分を推定することが考えられる．

処理時間については，表 1 から，空ボクセルの 1 ボクセルあたりの処理時間は少ないが，ボクセル数が非常に多いため，結果として計算時間を費やしていることがわかる．これに対しては，ピラミッド法の応用によって処理の高速化及び高精度化を図ることができる．また，太尾田ら[7] が示した処理の並列化手法を適用することにより実時間処理が可能になると考えられる．

6. おわりに

本論文では，並列計算に適した，未知光源環境における物体形状と反射特性の再構成法を提案した．観測の対象空間を有限個の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によって対象空間内の物体形状と反射特性の再構成を行えることが本手法の特徴である．

物体形状の再構成には，視体積交差法を利用した．また，未知光源環境での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一般的な反射モデルの一つである 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，そのモデルパラメータの推定によって反射特性の再構成を行った．これらによって，ボクセル独立な計算による物体形状と反射特性の再構成を実現した．

本手法の検証を行うため，実空間内の物体形状と反射特性とを再構成する実験を行った．実験結果から，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を確認した．今後は，再構成結果の定量的な評価に取り組んでいきたい．

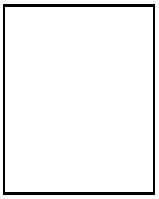
本手法は動画像を用いた動物体の再構成へと拡張することが可能である．十分に速い計算機と手法の改良によって，将来は実時間での物体形状と鏡面反射を含む反射特性の再構成が可能となろう．

参考文献

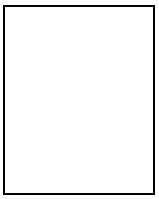
1) Levoy, M. and Hanrahan, P.: Light Field Rendering, *SIGGRAPH 96 Conference Proceedings*, pp. 31–42 (1996).
2) Gortler, S. J., Grzeszczuk, R., Szeliski, R. and M.F.Cohen: The Lumigraph, *SIGGRAPH 96 Conference Proceedings*, pp. 43–54 (1996).
3) Seitz, S. M. and Dyer, C. R.: Photorealistic Scene Reconstruction by Voxel Coloring, *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition Conference*, pp. 1067–1073 (1997).
4) Yu, Y. and Malik, J.: Recovering Photometric Properties Of Architectural Scenes From Photographs, *SIGGRAPH 98 Conference Proceedings*, pp. 207–217 (1998).
5) Sato, Y., Wheeler, M. D. and Ikeuchi, K.: Object Shape and Reflectance Modeling from Observation, *SIGGRAPH 97 Conference Proceedings*, pp. 379–387 (1997).
6) Yu, Y., Debevec, P. E., Malik, J. and Hawkins, T.: Inverse Global Illumination: Recovering Reflectance Models of Real Scenes from Photograph, *SIGGRAPH 99 Conference Proceedings*, pp. 215–224 (1999).
7) 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).
8) ウ小軍, 東海彰吾, 和田俊和, 松山隆司: PC クラスタを用いた身体動作の実時間 3 次元映像化, 情報処理学会研究報告, Vol. 2000-CVIM-121, pp.

65–72 (2000).
9) Laurentini, A.: How Far 3D Shapes Can Be Understood from 2D Silhouettes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 17, No. 2, pp. 188–195 (1995).
10) 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, chapter 5 (1998).
11) Nayar, S. K., Ikeuchi, K. and Kanade, T.: Surface reflection: physical and geometrical perspectives, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 13, No. 7, pp. 611–634 (1991).

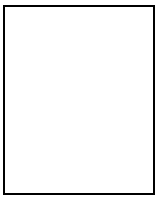
(平成 2000 年 07 月 26 日受付)
(平成 2001 年 10 月 16 日採録)



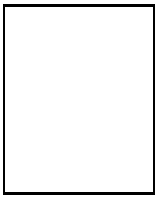
飯山 将晃 (学生会員)
平成 12 年京都大学大学院情報学研究科知能情報学専攻修士課程修了. 現在, 同博士後期課程在学中. モデルベースドビジョンの研究に従事. 情報処理学会会員.



青木 啓史
平成 12 年京都大学大学院情報学研究科知能情報学専攻修士課程修了. 平成 12 年より NEC. 在学中, 画像処理, 及び画像理解の研究に従事. 現在, 動画像符号化に関する研究に従事. IEEE 会員.



亀田 能成 (正会員)
平成 3 年京都大学工学部情報工学科卒業. 平成 8 年京都大学大学院工学研究科情報工学専攻博士後期課程単位取得退学. 同年京都大学工学部助手, 平成 10 年京都大学総合情報メディアセンター助手. 平成 13 年マサチューセッツ工科大学客員研究員. 画像認識とその応用, 人体を対象とするモデルベースドビジョン, 分散協調視覚, マルチメディアの研究に従事. 工博. IEEE, 情報処理学会, 電子情報通信学会各会員.



美濃 導彦 (正会員)
昭和 53 年京都大学工学部情報工学科卒業. 昭和 58 年同大大学院博士課程修了. 同年工学部助手, 昭和 62 年 ~ 63 年マサチュセッツ州立大学客員研究員, 平成元年京都大学工学部附属高度情報開発実験施設助教授, 平成 7 年同教授, 平成 9 年同大学総合情報メディアセンター教授, 現在に至る. 画像処理, 人工知能, 知的コミュニケーション関係の研究に従事. 3 次元モデルの処理とそれを用いたモデルベース CV, 講義室における CV 技術と遠隔講義, 映像処理を利用した CV, データベース, インタフェース, 等に興味を持つ. 工博, IEEE, ACM, 情報処理学会, 電子情報通信学会, 画像電子学会, 日本ロボット学会各会員. 著書「並列画像処理」コロナ社 (単著),「情報メディア工学」オーム社 (共編著) 他.