

多面体鏡を用いた8次元リフレクタンスフィールドの計測とコンピュータシミュレーションフォトグラフィへの応用

田 川 聖 一^{†1} 向 川 康 博^{†1}
松 下 康 之^{†2} 八 木 康 史^{†1}

8次元リフレクタンスフィールドは、照明光の4次元光線空間に対する反射光の4次元光線空間の関係を表したものである。本稿では、8次元リフレクタンスフィールドを演算することで、合成開口撮影、リライティング、共焦点撮影など、様々なコンピュータシミュレーションフォトグラフィを実現できることを示す。リフレクタンスフィールドは、半球面上の点を通して照明光と反射光の光線強度の情報として記述することができ、その計測のためにはカメラとプロジェクタを半球面上に配置する必要がある。我々は、カメラ・プロジェクタに多面体鏡を組み合わせることで、多数の低解像度カメラ・プロジェクタを仮想的に生成できることを利用する。円錐曲線から得られる曲面に沿って平面鏡を配置することで、仮想カメラ・プロジェクタを半球面上にほぼ均一な密度で配置した。実際に作成した多面体鏡を用いた実験により、様々なコンピュータシミュレーションフォトグラフィの実現が可能であることを示す。

Measurement of 8-D Reflectance Field using Polyhedral Mirror and its Applications for Computational Photography

SEIICHI TAGAWA,^{†1} YASUHIRO MUKAIGAWA,^{†1}
YASUYUKI MATSUSHITA^{†2} and YASUSHI YAGI^{†1}

8-D reflectance field expresses a relationship between 4-D light fields of illuminations and reflections. In this paper, we show that the 8-D reflectance field can be used for a variety of computational photography techniques such as synthetic aperture, relighting, and confocal imaging. The reflectance field expresses intensities of illuminated and reflected rays which pass a hemispherical surface, and it can be measured by placing cameras and projectors on the surface. We show that many low-resolution cameras and projectors can be virtually generated by combining a polyhedral mirror with real cameras and projectors. The virtual cameras and projectors are placed on a hemisphere with nearly uniform density by locating planar mirrors along a conical surface. We confirm that several computational photography techniques can be realized by using a constructed polyhedral mirror.

1. はじめに

視点位置や照明の変化によって、シーンの見え方は大きく変化する。シーンの3次元形状や反射特性をモデル化しても、ある照明条件下において、ある視点位置からシーンはどのように見えるのかを、これらのモデルから正確に再現することは難しい。一方、シーンの3次元形状や反射特性をモデル化するのではなく、実際に様々な照明条件下で様々な視点位置から撮影した画像を用いて見え方を再現するイメージベーストレンダリング・イメージベーストライティング技術は、データ量は多くなるものの容易に写実的な画像を生成できることから、1990年代以降に急速に発展してきた¹⁾²⁾。イメージベーストな手法は、シーンに対するあらゆる照明に対するあらゆる反射光を光線の強度として記録するリフレクタンスフィールドで汎用的に記述できる³⁾。

リフレクタンスフィールドは、照明について位置と方向の4次元、反射光についても同様に位置と方向の4次元であり、あわせて8次元の情報となる。しかし、次元数が高いため、8次元のリフレクタンスフィールド（以後 8DRF と呼ぶ）を密にサンプリングすることは極めて困難である。そのため、次元数を落としたり⁴⁾⁵⁾⁶⁾、計測範囲を大幅に狭める⁷⁾⁸⁾などの工夫がなされてきた。一方、これまではそもそも 8DRF を密に計測できる装置が存在しなかったため、仮に 8DRF を計測できたとして、それをどのように活用するのかについては深く議論されていなかった。単に 8DRF の低次元のスライスを見せるイメージベーストライティング技術等が、個別に応用例として紹介されてきた。

そこで本研究では、8DRF を演算することで、合成開口撮影⁹⁾・イメージベーストライティング³⁾・共焦点撮影¹⁰⁾などのコンピュータシミュレーションフォトグラフィが同一の枠組みで説明できることを示す。また、解像度は低いものの、シーンを中心とした半球面上で実際に 8DRF を計測するために、カメラとプロジェクタに多数の平面鏡からなる多面体鏡を組み合わせた光学系の設計について述べる。さらに、8DRF を計測するために具現化した亀甲多面鏡と呼ぶ光学系¹¹⁾を紹介し、これをコンピュータシミュレーションフォトグラフィに応用した事例を紹介する。

^{†1} 大阪大学 産業科学研究所

^{†2} マイクロソフト リサーチ アジア

2. リフレクタンスフィールド

2.1 リフレクタンスフィールドの定義

視点や照明を変えると物体の見え方は変化する．この変化を表現するためには，シーンを通過する光線そのものの強度を記録すればよい．照明が一定とすれば，シーン中の光線は，図 1(a) のようにある点 (x, y, z) を通り (θ, ϕ) 方向に進む光線の強度として 5 個のパラメータで記述できる．ここで，光線の強度は空間中を進む間に変化しないと仮定すれば，図 1(b) に示すようにシーンを挟み込む 2 枚の平面を考え，その交差点 (s, t) , (u, v) で記述できる．

しかし，このような表現では 2 枚の平面に平行な光線は記述できないため，本研究では，図 1(c) に示すようにシーンを中心とする半球面上で光線空間を定義する．シーンを中心とする単位球面を仮定すれば，シーンから放射される光線は必ずこの単位球面上の 1 点と交差する．その交差点を $\mathbf{D}_R = (\theta_R, \phi_R)$ とし，通過方向を $\mathbf{C}_R = (u_R, v_R)$ とする．ここで，球の中心と球面上の交差点 $\mathbf{D}_R$ を通る直線に直交する平面を考えると， $\mathbf{C}_R$ はこの平面上の 2 次元座標を示す．シーンから放射される光線は， $F_R(\mathbf{D}_R, \mathbf{C}_R)$ として 4 次元の光線空間で記述できる．

さらに，照明が変化する場合にも同様に考えることができる．図 1(d) のように，シーンに対して入射する光線は，単位球面上の $\mathbf{D}_L = (\theta_L, \phi_L)$ を $\mathbf{C}_L = (u_L, v_L)$ の方向に通過する．従って，照明についても $F_L(\mathbf{D}_L, \mathbf{C}_L)$ として 4 次元の光線空間で記述できる．

シーンに対して，ある照明 F_L を与えた場合の反射光 F_R の関係を記述したものはリフレクタンスフィールドと呼ばれる．リフレクタンスフィールドは，4 次元の照明の光線空間に対する 4 次元の反射の光線空間を表しており，8 次元の関数として

$$F(\mathbf{D}_L, \mathbf{C}_L, \mathbf{D}_R, \mathbf{C}_R) \quad (1)$$

と記述できる．この 8 次元リフレクタンスフィールド（以後 8DRF と呼ぶ）は，その定義から，可能なあらゆる照明条件下において，シーンで反射するあらゆる光線の強度が得られるため，視点や照明を変えたときに変化するシーンの見え方を表現できる．

2.2 リフレクタンスフィールドの低次元断面

8DRF は，照明と反射に関するあらゆる情報を含む．そのため，8DRF をスライスした低次元の断面は，物体表面の反射特性や散乱特性を示す．本節では，8DRF と，BSSRDF，BTF，BRDF の関係について順に述べる．

2.2.1 BSSRDF

半透明物体では，物体表面上のある点に入射した光は物体の内部で散乱し，物体表面上の

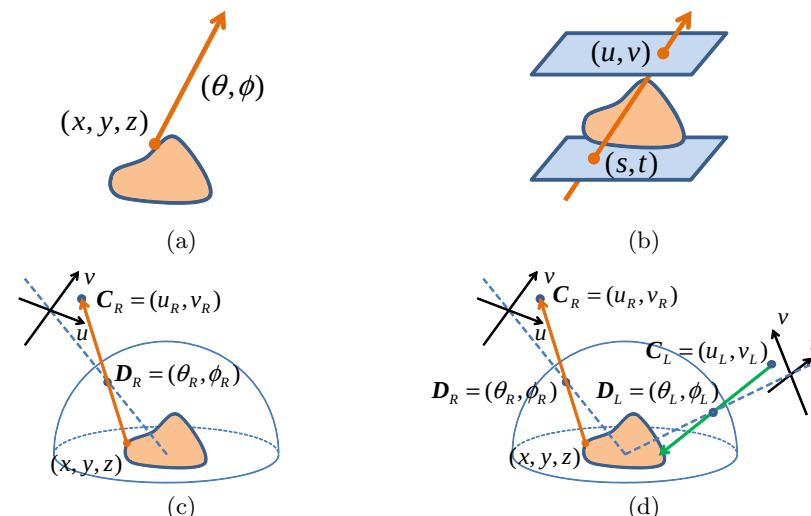


図 1 空間中の光線の記述.

別の点から出射する．この物体内部の散乱は表面下散乱と呼ばれ，双方向散乱面反射率分布関数 (Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function: BSSRDF) で表現される．

物体表面上の照明光の入射点を $\mathbf{S}_L = (x_L, y_L, z_L)$ とし，反射光の出射点を $\mathbf{S}_R = (x_R, y_R, z_R)$ とする．点 $\mathbf{S}_L$ を照明する光線が半球面上の点 $\mathbf{D}_L$ を通過する際の方向は，射影変換 P_L によって $\mathbf{C}_L = P_L(\mathbf{D}_L, \mathbf{S}_L)$ と計算できる．同様に，点 $\mathbf{S}_R$ から出射する光線が半球面上の点 $\mathbf{D}_R$ を通過する際の方向は，射影変換 P_R によって $\mathbf{C}_R = P_R(\mathbf{D}_R, \mathbf{S}_R)$ と計算できる．すなわち， $\mathbf{D}_L$ から入射した光線が $\mathbf{S}_L$ を照明し，その散乱光が $\mathbf{D}_R$ から出射して $\mathbf{S}_R$ を通過する際の強度は，次式のように BSSRDF で記述できる．

$$BSSRDF(\mathbf{D}_L, \mathbf{S}_L, \mathbf{D}_R, \mathbf{S}_R) = F(\mathbf{D}_L, P_L(\mathbf{D}_L, \mathbf{S}_L), \mathbf{D}_R, P_R(\mathbf{D}_R, \mathbf{S}_R)). \quad (2)$$

すなわち，BSSRDF は，8DRF そのものに他ならない．

2.2.2 BTF

不透明な物体では，入射した光は物体内部には到達せず，表面で反射する．そのため，入射点と出射点は一致し，物体表面上のある点における反射特性のみを考慮すればよい．この反射特性の物体表面上での分布は，双方向テクスチャ関数 (Bidirectional Texture Function:

BTF) で表現される.

BTF と前節の BSSRDF との違いは, 単に入射点と出射点は一致するかしないかだけである. 従って, 物体表面上の点を $\mathbf{S} = (x, y, z)$ とすれば, $\mathbf{D}_L$ から入射した光線が $\mathbf{S}$ を照明し, その反射光が $\mathbf{D}_R$ を通過する際の強度は, 次式のように BTF で記述できる.

$$BTF(\mathbf{D}_L, \mathbf{S}, \mathbf{D}_R) = F(\mathbf{D}_L, P_L(\mathbf{D}_L, \mathbf{S}), \mathbf{D}_R, P_R(\mathbf{D}_R, \mathbf{S})). \quad (3)$$

このように, BTF は 8DRF の 6 次元の断面であることがわかる.

2.2.3 BRDF

物体表面が不透明であり, かつ均一な反射特性を持つ場合には, 物体表面上のある 1 点の反射特性のみを考慮すればよい. この反射特性は, 双方向反射率分布関数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function: BRDF) で表現される.

前節の BTF では, 観測点 $\mathbf{S}$ は 2 自由度の変数であったが, BRDF では定数となる. 仮に, 観測点を球の中心 $(0, 0)$ とすれば, $\mathbf{D}_L$ から入射した光線が中心 $(0, 0)$ を照明し, その反射光が $\mathbf{D}_R$ を通過する際の強度は, 次式のように BRDF で記述できる.

$$BRDF(\mathbf{D}_L, \mathbf{D}_R) = F(\mathbf{D}_L, (0, 0), \mathbf{D}_R, (0, 0)). \quad (4)$$

このように, BRDF は 8DRF の 4 次元の断面であることがわかる.

2.3 リフレクタンスフィールドの演算

前節では, 8DRF をスライスすることで得られる低次元の断面について述べた. 本節では, 8DRF を演算することで, 通常のカメラでは撮影できない画像を生成できるコンピュータショナルフォトグラフィ技術が同じ枠組みで説明できることを述べる. コンピュータショナルフォトグラフィの例として, 合成開口撮影, イメージベーストライトニング, 共焦点撮影の 3 つを取り上げ, これらが 8DRF の演算という観点から統一的に表現できることを示す.

2.3.1 合成開口撮影

カメラを格子状に移動させたり, あるいは実際に多数のカメラを格子状に配置するなどして撮影された画像を足し合わせることで, 仮想的に大きな開口を合成する合成開口撮影は, 被写界深度の浅い画像を生成できる技術である. さらに, 画像を足し合わせる際に相対位置をずらすことで, 焦点の合う奥行きを自在に変えることのできるリフォーカシング技術は, 通常のカメラでは実現できない新たな撮影技法として有用である.

この合成開口撮影技術は, 8DRF によって一般化できる. 照明条件は一定であると仮定し, 図 2(a) のように合成する開口を Ω , その開口の中心を $\mathbf{D}_R$ とする. ここで, シーン中で焦点を合わせる面を自由曲面 Π として与える. 曲面 Π 上の点 $\mathbf{S} = (x, y, z)$ から出射する光線が開口 Ω を通過するか否かを, 次式に示すマスキング関数 M_R で表す.

$$M_R(\mathbf{D}_R, \mathbf{C}_R) = \begin{cases} 1 & : \text{ if the ray passes } \mathbf{S} \text{ and } \mathbf{D}_R \in \Omega \\ 0 & : \text{ otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

4 次元の反射の光線空間 F_R とマスキング関数の演算により, 合成開口撮影技術を説明することができる. 視点位置が $\mathbf{D}_R$ であり, Ω の開口を持つ仮想的なカメラで撮影される画像の $\mathbf{C}_R$ の座標の画素値 I は, 次式のように演算できる.

$$I(\mathbf{D}_R, \mathbf{C}_R, \Omega) = \int \int_{\Omega} F_R(\mathbf{D}_R, \mathbf{C}_R) M_R(\mathbf{D}_R, \mathbf{C}_R) d\mathbf{D}_R d\mathbf{C}_R. \quad (6)$$

2.3.2 イメージベーストライトニング

シーンに対して様々な照明を与えた場合の見え方を, 実際にカメラで撮影することで画像として記録しておき, それらを組み合わせることで任意照明下でのシーンの見え方を生成するイメージベーストライトニングは, データ量は大きくなるものの容易に写実的な画像を生成できる技術である.

このイメージベーストライトニング技術も, 8DRF によって一般化できる. シーンに対する照明は, 4 次元の照明の光線空間 F_L で完全に記述できる. カメラが固定されていると仮定すれば, 視点位置が $\mathbf{D}_R$ のカメラで撮影される画像の $\mathbf{C}_R$ の座標の画素値 I は, 次式のように演算できる.

$$I(\mathbf{D}_R, \mathbf{C}_R) = \int \int F_L(\mathbf{D}_L, \mathbf{C}_L, \mathbf{D}_R, \mathbf{C}_R) F_L(\mathbf{D}_L, \mathbf{C}_L) d\mathbf{D}_L d\mathbf{C}_L. \quad (7)$$

2.3.3 共焦点撮影

照明と観測の両方についてピンホールをスキャンすることで, 特定の奥行きを強く照明し, かつカメラをその奥行きにフォーカスし, その奥行きのみを鮮明に撮影できる共焦点撮影技術は, 主に顕微鏡のために利用されている技術である. 撮影だけではなく照明に関しても合成開口できるということは, 撮影と照明の両方を任意の奥行きにフォーカスできることを示している.

この共焦点撮影も, 8DRF によって一般化できる. ピンホールをスキャンすることによって合成される開口を半球面上で Ω とし, その開口の中心を $\mathbf{D}$ とする. ここで, シーン中で鮮明に可視化したい面を自由曲面 Π として与える. 曲面 Π 上の点 $\mathbf{S} = (x, y, z)$ を通過する光線が開口 Ω を通過するか否かを, 次式に示すマスキング関数 M で表す.

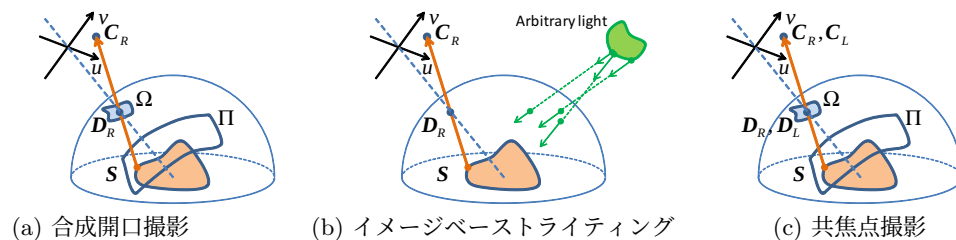


図2 コンピュータショナルフォトグラフィ.

$$M(\mathbf{D}, \mathbf{C}) = \begin{cases} 1 & \text{if the ray passes } \mathbf{S} \text{ and } \mathbf{D} \in \Omega \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

8DRF とマスキング関数の演算により、共焦点撮影技術の説明することができる。視点位置が $\mathbf{D}_R$ であり、カメラ・照明の開口が Ω である場合に、撮影される画像の $\mathbf{C}_R$ の座標の画素値 I は、次式のように演算できる。

$$I(\mathbf{D}_R, \mathbf{C}_R, \Omega) = \iiint F(\mathbf{D}_L, \mathbf{C}_L, \mathbf{D}_R, \mathbf{C}_R) M(\mathbf{D}_L, \mathbf{C}_L) M(\mathbf{D}_R, \mathbf{C}_R) d\mathbf{D}_R d\mathbf{C}_R d\mathbf{D}_L d\mathbf{C}_L. \quad (9)$$

2.4 その他のコンピュータショナルフォトグラフィ

前述のように、8DRF の演算という統一的な考え方により、さまざまなコンピュータショナルフォトグラフィを同じ枠組みで説明できることを示した。ページ数の都合で省略したが、合成開口共焦点撮影⁷⁾ や、我々が提案した半球状共焦点撮影¹¹⁾ も、同様に 8DRF の演算で説明できる。

8DRF は照明と反射に関するあらゆる情報を含むため、様々なスライスや演算方法が考えられ、そこからまったく新しいコンピュータショナルフォトグラフィが創出される可能性を秘めている。

3. 多面体鏡を用いたリフレクタンスフィールド計測

3.1 8DRF 計測の原理

8DRF の計測のためには、シーンに対して球面上の各点から様々な向きで入射する照明光を与え、それぞれの照明光に対して、同様に球面上の各点から様々な向きで出射する反射

光を計測しなければならない。

プロジェクタは、空間中のある点から様々な方向に様々な強度の光線を生成できる。つまり、2次元の照明の光線空間を生成できる照明装置と見なすことができる。したがって、プロジェクタを球面上に密に配置することで、4次元の照明の光線空間を生成できる。一方、カメラは、空間中のある点を通る様々な方向の光線の強度を計測できる。つまり、2次元の反射の光線空間を計測できるセンサである。したがって、プロジェクタと同様にカメラを球面上に密に配置することで、4次元の反射の光線空間を計測できる。すなわち、カメラとプロジェクタの両方を、球面上に密に配置すれば、原理的には 8DRF を計測することができる。

3.2 8DRF のサンプリング

原理的には球面上に配置したカメラとプロジェクタがあれば 8DRF を計測できるが、照明光と反射光の組み合わせが膨大となり、現実的には難しい。例えば、プロジェクタを用いて4次元の照明の光線空間を生成する場合、 θ, ϕ のサンプリング間隔をそれぞれ1度とし、 u, v のサンプリング間隔を XGA (1024 × 768) とすると、約 2.5×10^{10} 回もの照明が必要となり、非現実的である。

そのため、従来では、リフレクタンスフィールドの次元数を落としたり⁴⁾⁵⁾⁶⁾、計測する範囲を限定したり⁷⁾⁸⁾ して、ある程度のサンプリング密度を保ってきた。一方、本研究では、サンプリング密度を犠牲にする代わりに、半球面上においてほぼ等しいサンプリング間隔で8次元のリフレクタンスフィールドを計測することを目指す。

仮にカメラとプロジェクタの位置を表す θ, ϕ を、それぞれ一定の角度間隔でサンプリングすると、天頂方向付近で密度が高くなってしまう。そこで、 θ と ϕ を、半球面上でできるだけ均一にサンプリングすることを考える。

正多面体の頂点は、隣接する頂点との距離が一定であり、球面上での密度が均一である。つまり、正多面体の頂点上でサンプリングすれば等間隔となる。しかし、最も多くの頂点を与える正多面体は正十二面体であり、その頂点数は 20 しかなく、サンプリング間隔としては粗い。よって、これより多くのサンプリング点を得るためには、より多くの頂点を持ち、正多面体に近い多面体であるジオデシックドームを用いる。

ジオデシックドームは正二十面体から作成される多面体であり、正二十面体の正三角形面を4つの正三角形に分割し、頂点を球面に中心射影したものが、ジオデシックドームの頂点となる。分割の際に、ジオデシックドームの面は正三角形ではなくなるため、点群の厳密な等間隔性は失われてしまう。しかし、ジオデシックドームの面は極端に正三角形から外れる

ことがないため、頂点群は、ほぼ均一なサンプリング密度を与える。よって、本研究では、8DRF の計測のためにジオデシックドームの頂点位置にカメラとプロジェクタを配置する。

3.3 多面体鏡による仮想カメラ・プロジェクタの配置

実際に、ジオデシックドームの頂点位置にカメラとプロジェクタを配置しようとする、コストだけではなく物理的な干渉も問題となる。つまり、頂点数が増加すると単位球面上での密度も高くなり、カメラとプロジェクタの物理的な体積が空間的に干渉してしまう。そこで、高密度な配置を実現するため、頂点位置にカメラとプロジェクタを仮想的に配置することを考える。

カメラの前に平面鏡を配置すると、鏡面の正反射方向を撮影できる。このとき撮影される画像は、鏡面が作成する鏡像位置に配置したカメラの撮影画像を左右反転したものとなる。さらに、複数の平面鏡を配置すると、解像度の低い仮想カメラを複数作り出すことができる。プロジェクタも同様であり、解像度の低い仮想プロジェクタを複数作り出すことができる。つまり、鏡像位置がジオデシックドームの頂点位置と重なるように複数の平面鏡を配置すれば、コストを抑えつつ、かつ物理的な干渉を回避して仮想カメラ・プロジェクタをジオデシックドームの頂点位置に配置することができる。

鏡像をジオデシックドームの頂点に配置するためには、2つの条件を満たす必要がある。まず、鏡像の位置がジオデシックドームの中心から等距離となる位置に鏡を配置しなければならない。次に、すべての鏡が互いに隠れない配置でなければならない。これらの条件を満たす鏡の配置は、焦点を持ち、シーンからもカメラからもすべての点が見える、曲面に沿った配置である。

そこで、鏡面は曲面の接平面上に作成する。図3のように、接点は、ジオデシックドームの中心と頂点を通る直線と円錐曲面の交点である。この接平面に双対多面体の頂点を射影することで、鏡の形状を決定できる。

3.4 円錐曲線を用いた多面体鏡の設計

焦点を持つ曲面として、円錐曲線から得られる曲面が知られている。円錐曲線は、円・楕円・放物線・双曲線の4種類に分類できる。楕円と双曲線は2つの焦点を通る軸で回転し、放物線は対称となる軸で回転することで、それぞれ楕円面、双曲面、放物面を得られる。本節では、それぞれの形状の多面体鏡で、どのようにして仮想カメラ・プロジェクタをジオデシックドームの頂点に配置できるかについて考える。

球に沿って鏡を配置するとき、円は焦点を持たないが、中心を通過する光線が球面で反射すると再び中心を通過する性質を利用できる。光路距離は常に球の半径の2倍であるため、

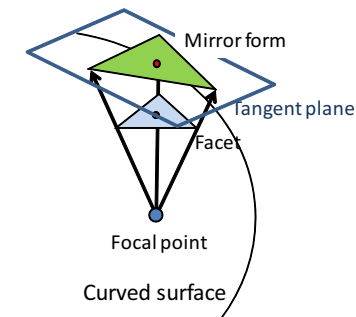


図3 鏡面形状の射影。

鏡像は2倍の半径を持つ球面上に作成される。これを利用するためには、計測対象とカメラ、プロジェクタがすべて球の中心に配置される必要がある。物理的に同じ位置に配置することはできないが、図4(a)のように、ビームスプリッタなどを用いることで光学的に実現することは可能である。

楕円面に沿って鏡を配置するとき、楕円の一方の焦点を通過する光線が面で反射すると常にもう一方の焦点を通過する。さらに、楕円は2点からの距離の和が一定である点群であるため、光線のたどる距離は常に一定となる。図4(b)のように、一方の焦点に計測対象、もう一方の焦点にカメラを配置することで、ジオデシックドームの頂点位置に仮想カメラを配置することができる。

放物面に沿って鏡を配置するとき、放物面は軸に平行な光が面で反射し、焦点に集まる性質を利用できる。放物線は軸に垂直な準線を持ち、線上の点から、準線に下ろした垂線の長さで焦点までの距離が等しくなる性質を持つ。つまり、図4(c)のように、軸に平行な光が放物面で反射して焦点に到達する距離は、準線に到達する距離に等しいため、焦点を中心とした球面上に仮想カメラを配置できる。

双曲面に沿って配置するとき、双曲面の性質を利用する。図4(d)のように、双曲面は、2つの焦点と2つの曲面を持つ。一方の焦点に対象物体を配置すると、もう一方の焦点に向かう光が曲面 α で反射して対象物体に向かう。双曲面は、2点からの距離の差が一定である点群であるので、対象物体を置かなかった方の焦点を中心とした球面上にカメラを置くことで、対象物体から等距離な位置に仮想カメラを配置することができる。

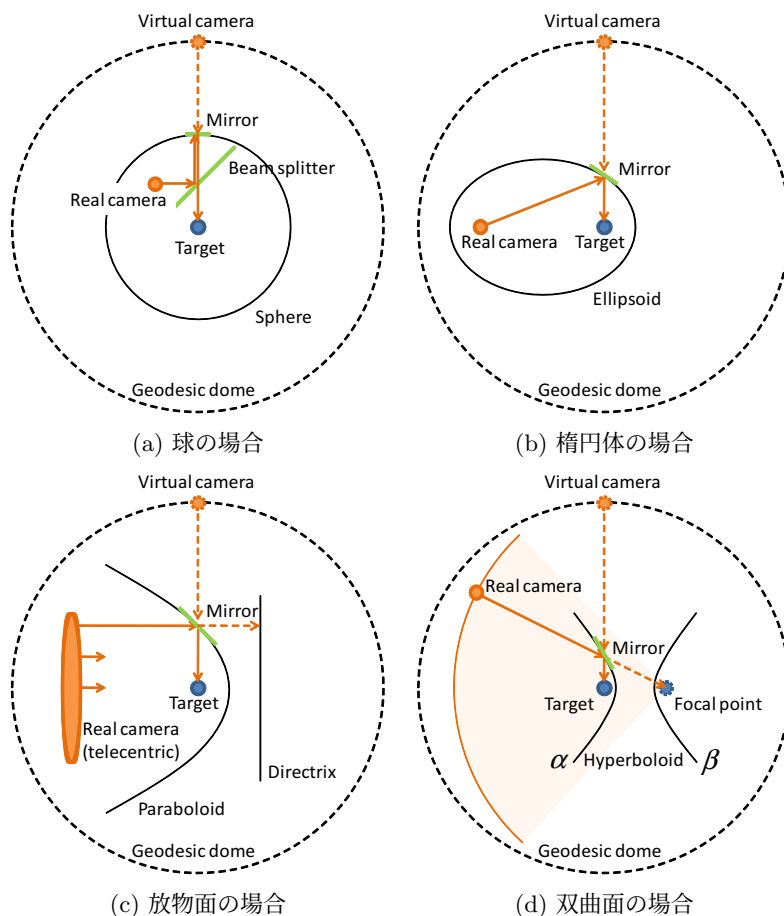


図4 円錐曲線を用いた多面体鏡の設計.

3.5 多面体鏡の実装

前節で、各円錐曲線から多面体鏡を設計したが、その計測性能や実現性は同等ではない。特に双曲線を用いた設計は、球面上から一点を見るカメラが必要であるなど、他の設計に比べて実現性が低い。球を用いた設計でも、仮想カメラを配置することができる範囲は実カ

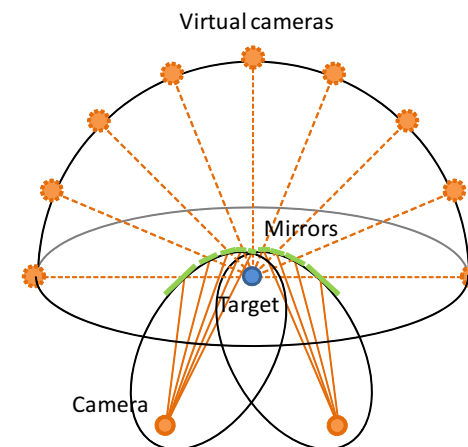


図5 2つの楕円体を用いた設計.

メラの画角に等しく、広い範囲への配置が難しい。放物線を利用した設計では、平行投影カメラが必要であるため、テレセントリックレンズが必要となる。一方、楕円を用いた設計では、一般的な中心射影のカメラに多面体鏡を組み合わせるだけでよい。

我々は、最も単純な設計である楕円を用いた設計に基づき、亀甲多面鏡と呼ぶ光学系を実装した¹¹⁾。図4(b)では、楕円面上のどの場所にも鏡を配置できるが、一部では対象物体がオクルージョンを発生させてしまう。そこで、図5のように2つの楕円面を組み合わせることで、オクルージョンを発生させずに、より広い範囲に渡り仮想カメラを配置できる。

楕円のパラメータと傾きは、鏡面の形状に大きく影響する。楕円が円に近付くと鏡が相対的に大きくなり、カメラは広い画角が必要となる。楕円の傾きを大きくすると、鏡の大きさの差が小さくなるが、対象物体が鏡を隠れさせやすくなってしまふ。そこで、我々は、一般的なカメラで効率的に計測できるように、 $\frac{x^2}{0.6} + y^2 + z^2 = 1$ の楕円面を60°傾けた設計で多面体鏡を作成した。鏡を空間中に固定するための枠の設計を図6に、実際に作成した多面体鏡を図7に示す。

4. コンピュータショナルフォトグラフィの実装

8DRFを計測できれば、さまざまなコンピュータショナルフォトグラフィを実現できることを述べた。本章では、その代表的な技術である合成開口撮影とイメージベーススライティ

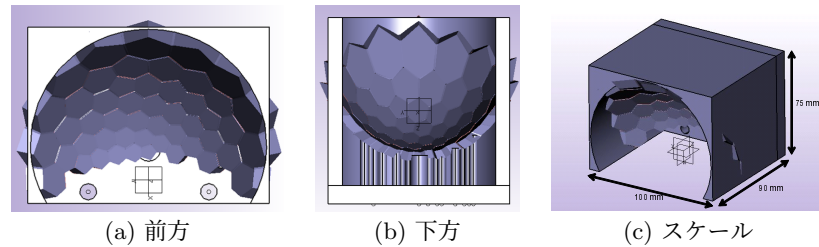


図 6 亀甲多面鏡の設計.

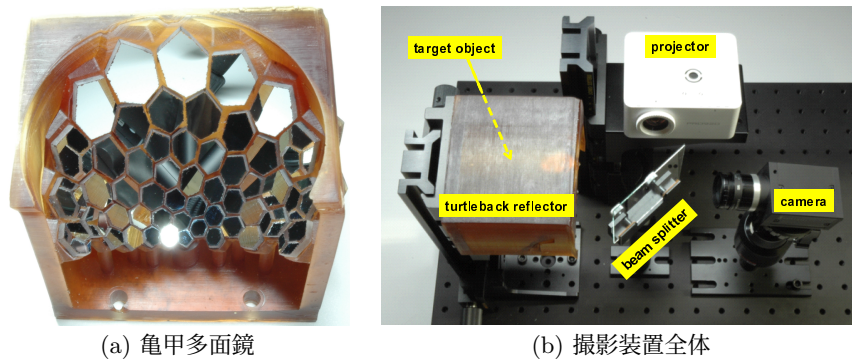


図 7 半球状共焦点撮影のための光学系¹¹⁾.

ングを我々の設計した多面体鏡を用いて実装した結果について述べる.

4.1 合成開口撮影

8DRF の演算によって、被写界深度が極端に狭くなる合成開口撮影を実現できることを示す. 図 9(a) に示すように、「ABCD」の文字が印刷された紙の上に、1mm の間隔をあけて「EFGH」の文字が印刷された透明な OHP シートが重ねられているシーンを対象とする. (b) と (c) は、それぞれ $z = 0\text{mm}$ と $z = 1\text{mm}$ にフォーカスした合成開口の例であり、被写界深度が極端に狭いために、その奥行きに配置されたテクスチャのみがはっきりと視認できる. このように、8DRF の演算で合成開口撮影を実現できることがわかる.

4.2 イメージバーストライティング

物体に対して照明を変化させたときの見え方の変化は、8DRF の演算によって再現できる. ここでは、強い鏡面反射を生じる指輪を対象として、実際に計測された 8DRF から照

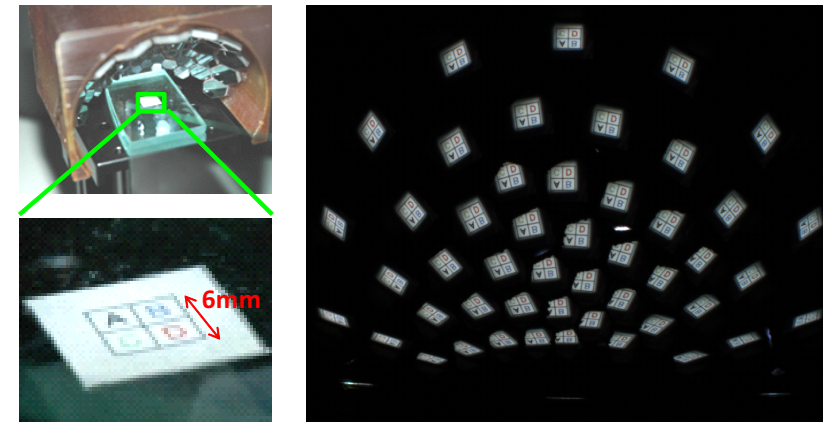


図 8 撮影画像例.

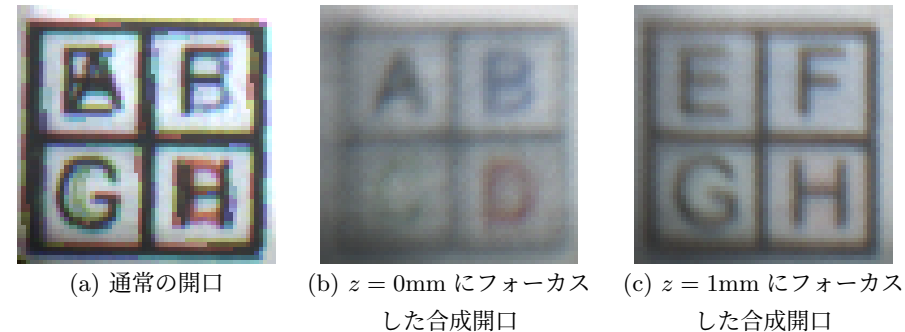


図 9 合成開口撮影の結果.

明を変化させたときの見え方を再現した. Debevec らが提供している Light Probe を用いて計測した照明環境下では、図 10 のような見え方となった. 左図のように赤みがかった照明下では、合成画像も同様の傾向がみられ、右図の屋外シーンの照明下では、全体に明るい合成画像を得られていることから、任意の照明下における指輪見え方を再現できることを確認できる.

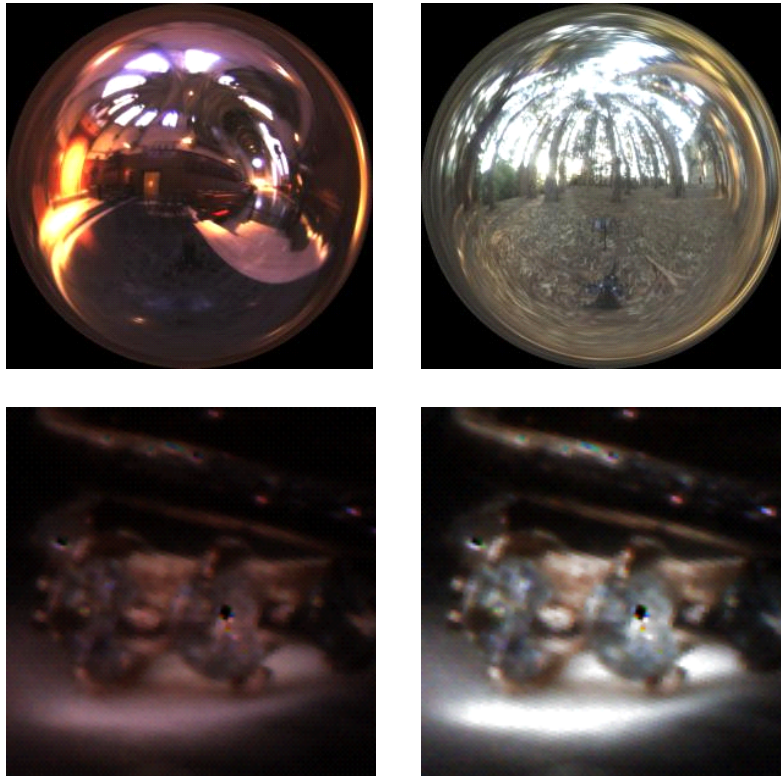


図 10 イメージベーストライトニング.
上段：照明環境 (<http://ict.debevec.org/debevec/Probes/>)，下段：合成画像.

5. おわりに

本稿では、照明と反射の関係を記述した 8DRF を演算することにより、様々なコンピュータショナルフォトグラフィに利用できることを述べた。また、サンプリング間隔は粗いものの、次元を落とすことなく、半球面上でほぼ均一のサンプリング間隔で 8DRF を計測するための多面体鏡の設計について述べた。実際に開発した多面体鏡を用いて、合成開口撮影

やイメージベーストライトニングに利用可能であることを示した。今後は、さらに応用例を広げることや、8DRF の計測の高速化に取り組む予定である。

本研究は、マイクロソフトリサーチ CORE5 プロジェクト、および科研費 (21650038) の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) M. Levoy and P. Hanrahan, “Light field rendering”, Proc. SIGGRAPH’96, pp.31–42, 1996.
- 2) P. Debevec, “Rendering Synthetic Objects into Real Scenes: Bridging Traditional and Image-based Graphics with Global Illumination and High Dynamic Range Photography”, Proc. SIGGRAPH’98, pp.189–198, 1998.
- 3) P. Debevec, T. Hawkins, C. Tchou, H. P. Duiker, W. Sarokin, and M. Sagar, “Acquiring the Reflectance Field of a Human Face”, Proc. SIGGRAPH2000, pp.145–156, 2000.
- 4) V. Masselus, P. Peers, and P. Dutré, and Y. D. Willems, “Relighting with 4D incident light fields”, Proc. SIGGRAPH2003, pp.613–620, 2003.
- 5) W. Matusik, H. Pfister, A. Ngan, P. Beardsley, R. Ziegler, L. McMillan, “Image-Based 3D Photography using Opacity Hulls”, Proc. SIGGRAPH2002, pp.427–437, 2002.
- 6) G. Müller, G. H. Bendels, and R. Klein, “Rapid Synchronous Acquisition of Geometry and Appearance of Cultural Heritage Artefacts”, Proc. VAST2005, pp.13–20, 2005.
- 7) M. Levoy, B. Chen, V. Vaish, M. Horowitz, I. McDowall, and M. Bolas, “Synthetic Aperture Confocal Imaging”, Proc. SIGGRAPH2004, pp.825–834, 2004.
- 8) O. Cossairt, S. K. Nayar, and R. Ramamoorthi, “Light Field Transfer: Global Illumination Between Real and Synthetic Objects”, Proc. SIGGRAPH2008, pp.1–6, 2008.
- 9) V. Vaish, B. Wilburn, N. Joshi, and M. Levoy, “Using Plane + Parallax for Calibrate Dense Camera Arrays”, Proc. CVPR 2004.
- 10) M. Minsky, “Microscopy apparatus”, US Patent 3013467, 1961.
- 11) 田川聖一, 向川康博, 金宰完, ラメシュラスカル, 松下康之, 八木康史, “亀甲多面鏡を用いた半球状共焦点撮影”, 第 13 回 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2010), pp.1436–1443, 2010.