

計算機合成ホログラムにおけるポリゴンモデルを用いた反射特性付与法  
 Calculation of Reflectance Distributions for Computer-Generated Holograms  
 by using Polygon Models

山口 一弘<sup>†</sup>                      市川 翼<sup>†</sup>                      坂本 雄児<sup>†</sup>  
 Kazuhiro Yamaguchi    Tsubasa Ichikawa    Yuji Sakamoto

### 1 はじめに

近年、多種多様な立体表示ディスプレイ(3Dディスプレイ)が研究・開発されている。この技術の1つである計算機合成ホログラム(CGH: Computer-generated hologram)は、ホログラフィにおける記録過程を計算機のシミュレーションによって行うことで、ホログラムデータを作成する技術である[1]。CGHはホログラフィと同様に自然な立体像を再生でき、また計算機で作成された仮想物体を表示することができるという特徴を持つ。このため、将来の3Dディスプレイ技術として期待されているが、実用化までの課題が数多く報告されている。

我々はこれまでに、CGHにおける再生像のリアリティ向上を目的として、CGHにおけるレンダリング技法について研究してきた[2]。この手法は、コンピュータグラフィックスの分野で確立された、Blinn・Torrance-Sparrow反射モデルをCGHへと応用したものである。反射モデルに応じた反射特性を生成することができ、任意の幅をもつ鏡面反射を生成することが可能となった。本研究では、この手法を改善し、ポリゴンモデルを用いた反射特性付与法を提案する。

### 2 反射特性

反射特性とは、物体表面における反射光の強度分布を示すものであり、一般に拡散反射と鏡面反射によって表現されている。物体表面の材質に応じて反射特性は決定され、紙や石膏の物体表面では反射光が一様に散乱する拡散反射が生じる(Fig. 1(a))。一方、金属表面では、反射光はある幅を持った正反射方向へと進む鏡面反射が生じる(Fig. 1(b))。

CGHでは、光を複素振幅分布として扱い、物体表面における入射光の複素振幅分布に対して、位相を付与することで反射特性を表現している。一般的には、この位相に白色性雑音を位相差として付与する方法[3]、位相差を付与しない方法が知られている。これらの従来手法では、物体表面を完全拡散反射、完全鏡面反射の反射特性でしか表現することができないという問題点があった。近年、Phongの反射モデルを用いて鏡面反射を実現する手法[4]が提案されたが、光源からの入射角により反射特性を生成しているため、周囲の物体から入射する光波が必要とされる映り込み特性を考慮するのが困難という問題がある。

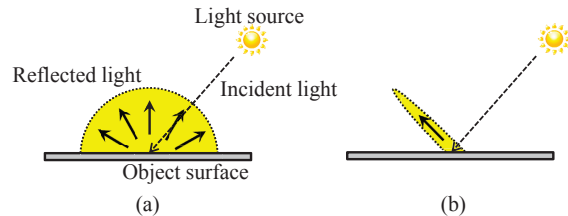


Fig. 1 Reflectance distributions: (a) diffuse reflection, and (b) specular reflection.

### 3 提案手法

先行研究[2]では、物体表面における凹凸形状をBlinn・Torrance-Sparrow反射モデルを用いて構築し、生成された物体表面の凹凸形状に応じた位相差を入射光へと付与することで反射特性を表現している。物体表面の凹凸形状を調整することで、反射特性が変化する。この手法における反射光の複素振幅分布 $g'(\xi, \eta)$ は、物体表面の座標系 $(\xi, \eta)$ において、

$$g'(\xi, \eta) = g(\xi, \eta) \exp[j\phi(\xi, \eta)] \quad (1)$$

で計算される。ここで、 $g(\xi, \eta)$ は入射光の複素振幅分布、 $\phi(\xi, \eta)$ は物体表面の凹凸に応じた位相差である。

提案手法では、先行研究で考慮していなかった3D物体表示を対象とし、ポリゴンモデルを用いて3D物体に対して反射特性付与を行う。ポリゴンモデルでは、3D物体は多数の平面ポリゴンの集合で定義される。そこで、それぞれのポリゴンからの光波を計算し、それらをホログラム面上で統合することで、3D物体からの光波を得る。3D物体を構成する $N$ 個のポリゴンのうち、 $i$ 番目のポリゴンからの光波を $g'_i(\xi, \eta)$ とすると、ホログラム面 $(x, y)$ における3D物体の光波 $u(x, y)$ は、

$$u(x, y) = \sum_i^N P[g'_i] \quad (2)$$

で計算される。ここで、 $P[\ ]$ は、ポリゴンからホログラム面への光波伝搬計算を表す。

本研究における光波伝搬計算では、Shifted-AS法[5]を用いた伝搬計算を行っている。ポリゴンにおける入射光の複素振幅分布を光源に応じて設定し、この分布から先行研究の位相付与計算を行い反射光を得る。その後、FFT(Fast Fourier Transform)を用いて、角スペクトルへと変換し、光波の回転変換、Shifted-AS法によるホログラム面への伝搬計算を行う。そして、IFFTを用いて物体光へと変換し、参照光との干渉をホログラムデータとして出力する。

<sup>†</sup> 北海道大学大学院 情報科学研究科  
 Graduate School of Information Science and Technology,  
 Hokkaido University

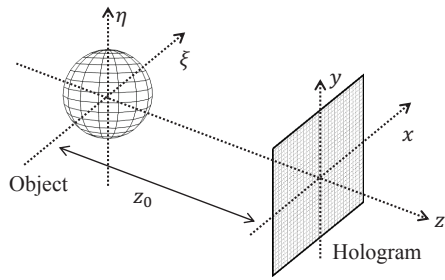


Fig. 2 Setup of computer simulation.

#### 4 実験と結果

提案手法の有効性を確認するため、計算機シミュレーションを行った。計算機シミュレーションでは、ホログラム面上で得られた光波から、仮想レンズを用いて結像をシミュレートしたものである。観察位置として、ホログラム正面から観察した際の再生像を出力した。

計算機シミュレーションのセットアップを Fig. 2 に、パラメータを Table 1 に示す。対象物体はポリゴンモデルで定義した球とし、光源として  $x, y$  軸に対して 45 度ずつ傾いた平面波をホログラム面側から入射した。

結果を Fig. 3 に示す。(a) は従来手法の白色性雑音を位相付与した場合の再生像であり、拡散反射のみとなっている。そのため、球全体が一様に観察される。一方、(b, c) は提案手法の場合の再生像であり、鏡面反射のみとなっている。鏡面反射であるため、光源の位置に対応した、球の一部分のみ観察できることがわかる。(b) よりも (c) のほうが、完全な鏡面に近づくように設定しているため、観察できる球の範囲が、(c) の方が狭くなっていることがわかる。これらの結果より、ポリゴンモデルにおいて、反射特性付与が可能なが確認できた。

また、拡散反射と鏡面反射の物体光を重ね合わせることで、両者を考慮することも可能である。一例を (d-f) に示す。(d) は、拡散反射と鏡面反射の両者を考慮したものである。(a)

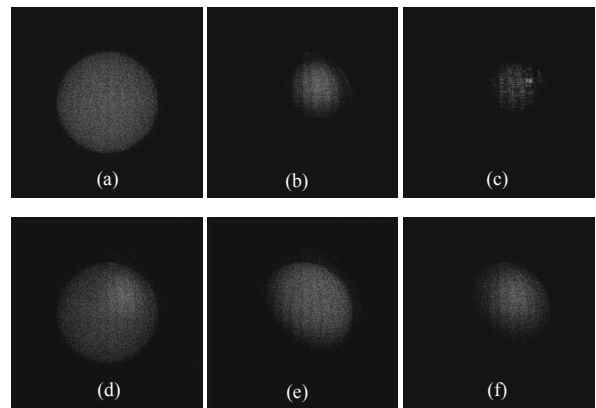


Fig. 3 Computational reconstructed images of sphere. (a) diffuse reflection, (b, c) specular reflection, (d) diffuse and specular reflections, (e) diffuse reflection with flat shading, and (f) diffuse reflection with flat shading and specular reflection.

の拡散反射に加えて、(b) の鏡面反射部分が同時に観察できる。そして、(e) は拡散反射の計算時に、平行光源におけるフラットシェーディングを考慮したものである。最後に、(f) がフラットシェーディングされた拡散反射と、鏡面反射を考慮したものである。

#### 5 まとめ

本研究では、ポリゴンモデルを考慮した計算機合成ホログラムにおける反射特性付与法を提案した。提案手法は、物体表面の凹凸形状を生成し、凹凸形状に応じた位相差を反射光に付与することで、凹凸形状に応じた反射特性を表現できる。ポリゴンモデルを用いることで、3D 物体に対して反射特性を付与することが可能となった。

本研究は文部科学省グローバル COE プログラム「知の創出を支える次世代 IT 基盤拠点」の支援を受けた。

#### 参考文献

- [1] J. P. Waters, "Holographic image synthesis utilizing theoretical methods", *Appl. Phys. Lett.*, **9**, pp. 405–407, 1966.
- [2] K. Yamaguchi, Y. Sakamoto, "Computer generated hologram with characteristics of reflection: reflectance distributions and reflected images", *Appl. Opt.* **48**, H203–211, 2009.
- [3] R. Bräuer, F. Wyrowski, O. Bryngdahl, "Diffusers in digital holography", *J. Opt. Soc. Am. A*, **8**, pp. 572–578, 1991.
- [4] H. Nishi, K. Higashi, Y. Arima, K. Matsushima, S. Nakahara, "New techniques for wave-field rendering of polygon-based high-definition CGHs", *Proc. SPIE 7957*, 79571A, 2011.
- [5] K. Matsushima, "Shifted angular spectrum method for off-axis numerical propagation", *Opt. Express* **18**, pp. 18453–18463, 2010.

Table 1 Parameters in computer simulation

Hologram plane	
Number of pixels	1024×1024 [pixels]
Pixel pitch	9.5×9.5 [μm]
Size	9.7×9.7 [mm]
Propagation distance $z_0$	150 [mm]
Wavelength	632 [nm]
Incident light ( $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y$ )	(45.0, 45.0) [degree]
Object plane	
Number of pixels	1024×1024 [pixels]
Pixel pitch	0.3×0.3 [μm]
Size	0.3×0.3 [mm]
Sphere	
Number of polygons	512
Radius	1.3 [mm]
Origin ( $\xi, \eta, z$ )	(0.0, 0.0, 0.0) [mm]