

# ポリゴン法 CGH における拡散位相のスペクトル制御による鏡面性表面の再生

## A specular surface rendered by modulating diffuser spectrum in polygon-based CGH.

○西寛仁, 松島恭治

○Hirohito Nishi and Kyoji Matsushima

関西大学電気電子情報工学科

Department of Electrical and Electronic Eng., Kansai Univ.

E-mail: nishi@laser.ee.kansai-u.ac.jp

The Polygon method is a powerful technique for rendering surface-modeled objects in full-parallax high-definition CGHs for display purposes. However, only diffusive surfaces are reconstructed in the polygon method. In this report, a novel technique based on control of spectrum of surface functions is presented for rendering specular surfaces in the polygon method.

### 1. はじめに

計算機合成ホログラム(CGH)は仮想物体のホログラムを作成でき、次世代の3次元ディスプレイへの応用が期待されている。CGHの数値合成法にはいくつか種類があるが、我々はポリゴン法<sup>1,2)</sup>を提案している。ポリゴン法は仮想物体表面を面光源で構成する手法で、光波伝搬計算にFFTが使用でき比較的短い時間で表面物体の全方向視差CGHが数値合成できる。しかしながら、従来のポリゴン法のレンダリングでは拡散性の表面しか再生できず、艶やかな表面やメタリックな材質は再生できなかった。鏡面性表面の反射光を計算する手法としてはFDTDを用いて金属表面をシミュレートする手法<sup>3)</sup>がすでに提案されているが、長い計算時間が必要で実用性に乏しい問題があった。そこで本研究では、ポリゴン法で用いられる拡散位相のスペクトルを適切に制御する事で高速に鏡面性表面をレンダリングする手法を提案する。

### 2. Phongの鏡面反射モデルに基づくスペクトル帯域の制限

ポリゴン法では、ポリゴン面に沿った表面関数 $h(x, y) = a(x, y) \exp[i\phi(x, y)]$ でそのポリゴンを表現する。一般に振幅 $a(x, y)$ によりポリゴン形状の表現とシェーディングを行い、位相 $\phi(x, y)$ により光を拡散させる。従来、非鏡面性の拡散面を再生するため、この位相には広帯域の擬似ランダム位相<sup>4)</sup>を用いていた。

しかし、ポリゴンが発する光波の発散度合いは拡散位相のスペクトル帯域に依存している。そのため、鏡面性表面を表現するには拡散位相のスペクトル帯域を狭帯域化する必要がある。本研究では、Phongの鏡面反射モデルに基づいて拡散位相のスペクトル形状を決定した。

Phongの鏡面反射モデルとはCGにおいて鏡面表面反射特性をモデル化したものであり、Fig. 1のように視線ベクトル $\vec{v}$ の方向から観察した表面輝度を

$$I(\vec{v}) = k_s (\vec{R} \cdot \vec{v})^\alpha \quad (1)$$

で与える。ここで、 $k_s$ は鏡面反射率、 $\alpha$ は光沢度、 $\vec{R} = (R_x, R_y, R_z)$ は入射方向で決まる反射ベクトルである。いま視線ベクトル $\vec{v}$ を平面波の波動ベクトルに対応させ、 $(x, y)$ 面に沿った空間周波数 $(u, v)$ を用いる

と $\vec{v} = 2\pi/\lambda (u, v, (\lambda^{-2} - u^2 - v^2)^{1/2})$ であるため、(1)式は

$$I(\vec{v}) = I(u, v) = k_s \left[ \lambda \left( R_x u + R_y v + R_z (\lambda^{-2} - u^2 - v^2)^{1/2} \right) \right]^\alpha \quad (2)$$

となる。これは反射光の強度スペクトル分布を表すと解釈できるので、反射光の複素スペクトルは、

$$\sqrt{I(u, v)} = A_s(u, v) \exp[i\Phi(u, v)] \quad (3)$$

$$A_s(u, v) \equiv (k_s I_i)^{1/2} \left[ \lambda \left( R_x u + R_y v + R_z (\lambda^{-2} - u^2 - v^2)^{1/2} \right) \right]^{1/2}$$

と表される。しかし、ポリゴン法では表面関数の振幅はポリゴン形状等を表すため、位相分布 $\exp[i\phi(x, y)]$ のスペクトルの振幅が上式の $A_s(u, v)$ と一致するように、Bräuerらの拡散位相生成法<sup>4)</sup>と同様のIterative Fourier Transform Algorithm (以下IFTA)を使用して位相分布の帯域制限を行なった。

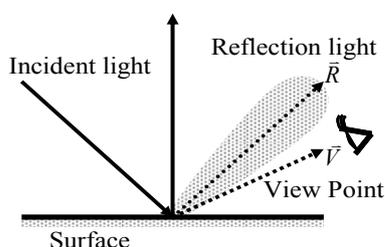


Fig.1 The Phong model for specular reflection.

### 3. キャリア周波数による光波の伝搬方向の制御

前節の手法により  $\bar{R}$  が示す任意の方向への反射特性を持つ拡散位相を生成できる。しかし、複数枚のポリゴンからなる曲面をレンダリングする場合、反射ベクトル  $\bar{R}$  が Fig. 2 のようにポリゴン毎に異なるため、この方法ではポリゴン毎に IFTA による帯域制限処理が必要になり計算時間が長くなる問題点がある。そこで、本研究ではキャリア周波数により光波の伝搬方向をシフトさせる手法を提案する。拡散位相の複素スペクトル  $G(u, v)$  は(3)式より、

$$G(u, v) = \sqrt{I(u, v)} = A_s(u, v) \exp[i\Phi(u, v)] \quad (4)$$

となる。今、反射ベクトルが拡散面に垂直として  $\bar{R} = (0, 0, 1)$  とすると、スペクトルの振幅分布は

$$A_s(u, v) = \left[ \lambda(\lambda^2 - u^2 - v^2)^2 \right]^{\alpha/2} \text{ となる。IFTA を用いてこの帯域制限を行ない、スペクトル } G'(u, v) \text{ が得られたとする。この時、拡散位相は } \exp[i\phi'(x, y)] = F^{-1}\{G'(u, v)\} \text{ となる。}$$

反射光が垂直以外の任意の  $\bar{R}$  方向に進むようにするためには、 $(x, y)$  平面で平面波位相  $\exp[ik\bar{R} \cdot \bar{r}] = \exp[ik(R_x x + R_y y)]$  を拡散位相に乗算すれば良い、すなわちシフト則により、

$$\exp[i\phi'(x, y)] \exp[ik\bar{R} \cdot \bar{r}] = F^{-1} \left\{ G' \left( u - \frac{R_x}{\lambda}, v - \frac{R_y}{\lambda} \right) \right\} \quad (5)$$

となり、事前に求めておいた  $G'(u, v)$  をシフトするだけで任意の反射方向の位相が得られる。

### 4. 反射特性のシミュレーション

提案手法の確認のために結像再生シミュレーション<sup>5)</sup>を行った。拡散位相のサンプリングピッチを  $1\mu\text{m}$  とし、光沢度  $\alpha = 5, 10$  として IFTA を 100 回反復させ拡散位相  $G'(u, v)$  を生成した。初期位相と生成した 2 つの拡散位相のフーリエスペクトルの振幅分布を Fig. 3 に示す。

次に、反射角を  $-5$  度として(6)式に従って  $G'(u, v)$  をシフトし、直径  $5\text{mm}$  の円形ポリゴンからの光波を計算した。このポリゴンの中心を注視点とし、視線を  $0.5$  度ずつ変化させ結像再生シミュレーションを行い、円形ポリゴンの中心部分の平均振幅値を調べた。用いたパラメータを Tabel 1 に示す。

シミュレーションの結果を Fig. 4 に示す。光沢度  $\alpha$  の値が大きいほど拡散位相のスペクトル帯域が狭くなるため、反射光の指向性が高くなる。また、ピーク位置が設定どおりの  $-5$  度であることから、提案手法で反射方向を任意の方向に設定できることが確認できた。光沢度  $\alpha = 50$  の拡散位相を使用した 1 辺の長さ  $5\text{mm}$  の正三角形の再生像を Fig. 5 に示す。 $-5$  度の正反射方向から見たときが最も明るく、観察角度を変えると急激に輝度が変わることがわかる。

### 5. まとめ

本研究ではポリゴン法 CGH における鏡面性表面のレンダリング手法を提案した。その結果、スペクトルの帯域とキャリア周波数を制御することにより、光波の拡散性と反射方向を制御できることを確認できた。

本研究は日本学術振興会の科研費(21500114)の助成を受けたものである。

### 文献

- 1) K. Matsushima, Appl. Opt. **44**, 4607-4614 (2005).
- 2) K. Matsushima, S. Nakahara, Appl. Opt. **48**, H54-H63 (2009).
- 3) 市川, 坂本, 3次元画像コンファレンス 2009 講演文集, 21-24 (2010).
- 4) R. Bräuer, F. Wyrowski, and O. Bryngdahl, J. Opt. Soc. Am. **A8**, 572-578 (1991).
- 5) 村上, 圓山, 松島, 3次元画像コンファレンス 2009 講演論文集, 105-108 (2009).

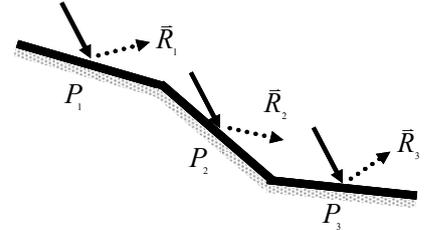


Fig. 2 Reflection in a curved surface

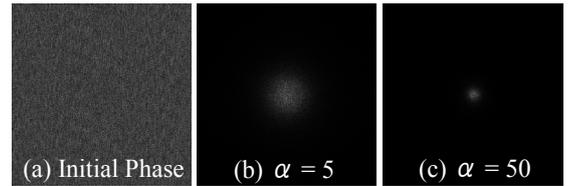


Fig. 3 Amplitude images of spectrum of generated phase distribution.

Table 1 Parameters used for simulation.

Diameter of Object	5[mm]
Number of samplings	8192x8192[pixel]
Sampling pitch	1.0[μm]
Wavelength	632.8[nm]

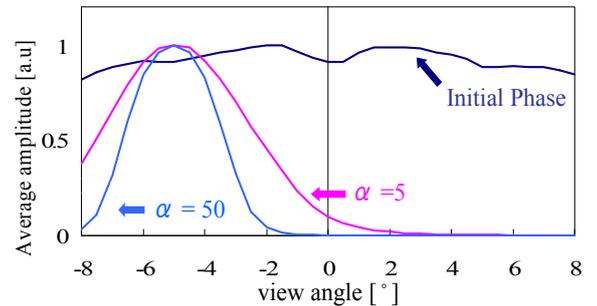


Fig. 4 Directivity of reflected light.

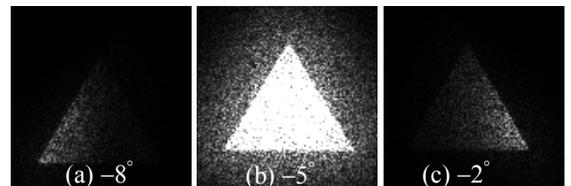


Fig. 5 Simulated reconstruction of a triangular polygon. ( $\alpha = -5^\circ$ )