

ポリゴン法 CGH における透明物体のレンダリングの基礎研究

西 寛仁[†] 松島 恭治[†] 中原 住雄[‡]

[†] 関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

[‡] 関西大学 システム理工学部 機械工学科

〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

E-mail: [†] nishi@laser.ee.kansai-u.ac.jp, [†] matsu@kansai-u.ac.jp

あらまし ポリゴン法 CGH において透明物体をレンダリングする手法が提案されている。この手法では光の屈折を波動光学的に取扱い、物体を切断した近似モデルを用いてポリゴン単位で光波の屈折現象を計算することで透明物体の光波を計算している。この手法で計算した CGH のシミュレーション再生像が示されている。

キーワード CGH, 透明物体, レンダリング

A basic research for rendering of transparent objects in polygon-based computer-generated hologram

Hirohito NISHI[†] Kyoji MATSUSHIMA[†] Sumio NAKAHARA[‡]

[†] Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

[‡] Department of Mechanical Engineering, Kansai University

Yamate-cho 3-3-35, Suita, Osaka 564-8680, Japan

E-mail: [†] nishi@laser.ee.kansai-u.ac.jp, [†] matsu@kansai-u.ac.jp

Abstract A novel rendering technique is attempted for reconstructing transparent objects in polygon-based method. In this technique, refraction of light is treated by a method based on wave-optics. The transparent objects are approximated to a half-cutting model and their refractive light is obtained by the proposed method polygon by polygon. A CGH is calculated by the proposed technique and its simulated reconstruction is demonstrated.

Keyword CGH, Transparent objects, Rendering

1. はじめに

近年、LCD や DMD などの表示デバイスの発達により、自宅で気軽に 3D 映像を楽しめるようになった。しかし、現在普及している 3D 方式は両眼視差を利用した疑似的な 3D 映像であり、長時間視聴すると眼精疲労などの副作用を引き起こしてしまう。そのため、次世代の 3D 方式として、完全な立体像を再生できる計算機合成ホログラム(Computer-generated hologram : CGH)が注目を集めている。

CGH では、従来のホログラフィとは違いコンピュータモデルとして表現された仮想シーンのホログラムを作製できる。また、干渉縞をイメージセンサによって記録するデジタルホログラフィにより、古典的なホログラムのように実物体の CGH も作製できる[1]。以上のような様々な利点を有する CGH だが、2つの重大な問題を有している。

1 つ目の問題は、干渉縞の数値合成における計算時

間の長さである。CGH ではホログラム面上の微細な干渉縞パターンを計算する必要があるため、数値合成に莫大な計算時間が必要になる。仮想物体の光波の数値合成には物体上にいくつもの点光源を敷き詰める点光源法がよく知られている。しかし、この手法では計算量が点光源数とホログラムピクセル数の積に比例するため、超高解像度 CGH の計算に時間を要する。そのため、我々は光波の数値合成にポリゴン法[2]を使用している。この手法は物体面上にポリゴン形状の面光源を敷き詰める手法である。ポリゴン法は伝搬計算に FFT が使用でき、ポリゴン数が点光源よりも圧倒的に少なくすむため容易に超高解像度 CGH を計算できる。また、CGH の隠面消去法の一つであるシルエット法[2]との親和性も高いため、従来の CGH では隠面消去が困難だった複雑な自己オクルージョンを有する仮想物体の隠面消去をおこなう手法も報告されている[3]。

2 つ目の問題として、CG のようにレンダリング技術

が確立してないことがある。従来のポリゴン法のレンダリングではザラザラとした石膏の様な表面しか再生できず、キラキラした金属表面を再生することができなかった。そこで我々は、ポリゴン法で用いられる表面関数のスペクトルを適切に制御することで高速に鏡面性表面をレンダリングする手法を提案している[4]。また、この手法では光波の方向をポリゴン単位でしか制御しておらず角張った金属面しか再生できないことから、表面関数を分割することで鏡面性表面のスムーズシェーディングを行う手法も提案している[5]。

以上のように我々は様々な CGH のレンダリング法を提案してきた。本研究ではさらに、CGH の質感表現のバリエーションを増やすため、ポリゴン法での透明物体のレンダリングを試みた。

CG での透明物体のレンダリングの場合、光の屈折を考慮せずに背景の輝度と物体の輝度を適当な割合で足し合わせるアルファブレンディングや、レイトレーシングにより屈折を考慮してレンダリングする方法などがある。CGH でも CG と同様に、屈折を考慮する方法と考慮しない方法の 2 種類が考えられる。屈折を考慮しない場合、隠面消去を行わずに背景からの光波と物体の光波を適当な割合で足し合わせるだけでよく、非常に簡単にレンダリングが行える。屈折を考慮する方法としては、点光源法でレイトレーシングと同様の処理を行う手法が考えられるが、この方法では光源数が増えると計算量が莫大になってしまう。そこで本研究では光波の屈折現象を波動光学的にシミュレートすることで透明物体の再生する方法を試みた。

2. ポリゴン法で用いる座標系と表面関数

ポリゴン法における表面物体のレンダリングでは、図 1 のようにグローバル座標系 $\hat{\mathbf{r}} = (\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ を定義し、仮想物体のポリゴン(面光源)毎に 2 種類のローカル座標を用いる[2,3]。ポリゴン n に対して定義したポリゴンと平行な傾いたローカル座標系を $\mathbf{r}_n = (x_n, y_n, z_n)$ とし、ポリゴンを $(x_n, y_n, 0)$ 平面上に置く。この時、ポリゴン n は、傾いたローカル座標系上で定義される表面関数と呼ばれる複素関数

$$h_n(x_n, y_n) = a_n(x_n, y_n) \exp[i\phi_n(x_n, y_n)] \quad (1)$$

で表される。 $a_n(x_n, y_n)$ と $\phi_n(x_n, y_n)$ はそれぞれ振幅分布と位相分布であり、振幅分布 $a_n(x_n, y_n)$ でポリゴンの形状やシェーディング・テクスチャを表し、位相分布 $\phi_n(x_n, y_n)$ で光波に散乱性を与える。もう一つの座標系は、グローバル座標に平行で傾いたローカル座標系と原点が一致する平行なローカル座標系 $\hat{\mathbf{r}}_n = (\hat{x}_n, \hat{y}_n, \hat{z}_n)$ である。

ポリゴン法では、表面関数に回転変換[6]を行なって平行なローカル座標系で $(\hat{x}_n, \hat{y}_n, 0)$ 平面上の光波を求

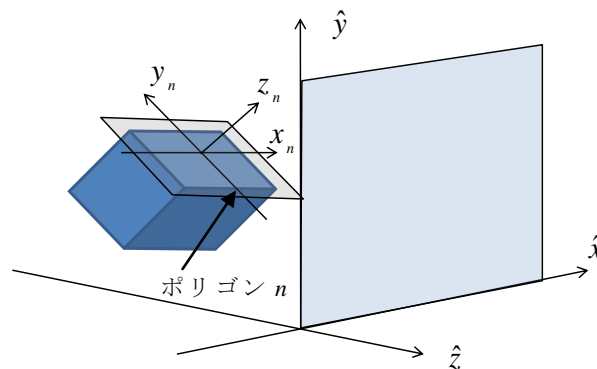


図 1 ポリゴン法での座標系

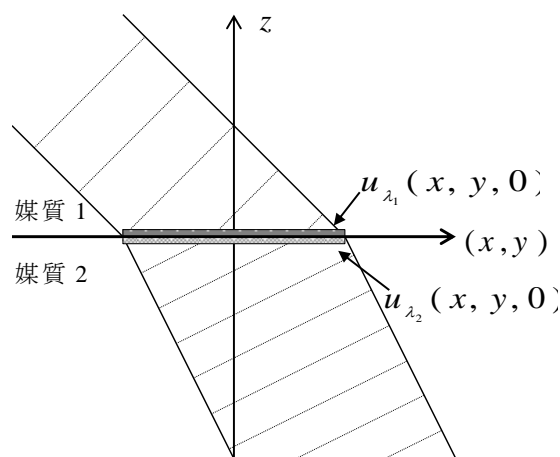


図 2 屈折現象

め、それをホログラム平面 $(\hat{x}, \hat{y}, 0)$ まで伝搬する。

3. 透明物体のレンダリングの原理

3.1. 屈折光の計算方法

図 2 のように、光波が媒質 1 から媒質 2 に入射する場合を考える。媒質 1, 2 内で波長をそれぞれ λ_1, λ_2 とし、境界面に入射する直前の光波を $u_{\lambda_1}(x, y, 0)$ 、境界面を透過した直後の光波を $u_{\lambda_2}(x, y, 0)$ とする。この時、光波振幅はフレネルの公式に従って境界面で線形に変化するが、位相は連続であり変化しない。そのため、これらの光波の関係は、

$$u_{\lambda_1}(x, y, 0) \propto u_{\lambda_2}(x, y, 0) \quad (2)$$

となる。つまり、境界面の両側で、媒質によって波長を変化させるだけで屈折光を数値計算できる。本研究では、計算の簡略化のため $u_{\lambda_1}(x, y, 0)$ と $u_{\lambda_2}(x, y, 0)$ の振幅を同一とする。

3.2. 物体モデルの近似

通常の仮想物体は図 3(a)のように複雑な形状をしており、背面に入射する際の屈折効果も考える必要がある。しかし、今回は計算の簡略化のため、図 3(b)のように物体の後側半分を切り捨てた物体を考える。この時、物体外の波長を λ_0 とし、屈折率から求まる物体内

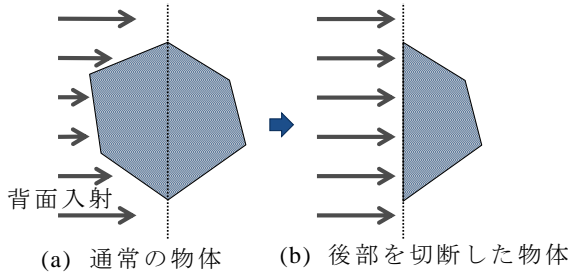


図3 物体の簡略化

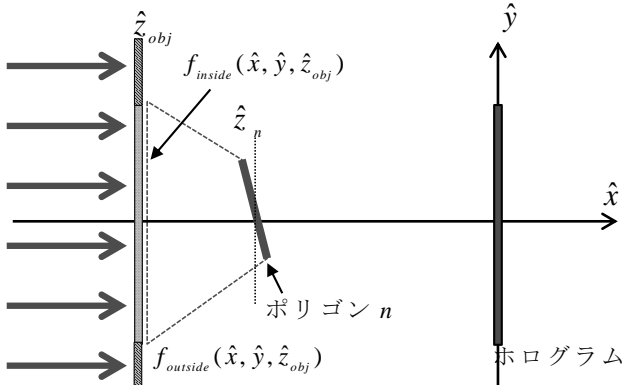


図4 レンダリングの簡略図

の波長 λ_i とする。

3.3. 物体外の光波計算

いま背面から物体に入射する光波を $f(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}_{obj})$ とする。レンダリングを行うには、物体を通過する光波 $f_{inside}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}_{obj})$ と通過しない光波 $f_{outside}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}_{obj})$ をわける必要がある。そのため、

$$\begin{aligned} f_{outside}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}_{obj}) &= f(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \times M(\hat{x}, \hat{y}) \\ f_{inside}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}_{obj}) &= f(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \times A(\hat{x}, \hat{y}) \end{aligned} \quad (3)$$

とする。ここで $M(\hat{x}, \hat{y})$ は物体内を通過する光波を遮蔽する2値のマスク関数であり、一方 $A(\hat{x}, \hat{y})$ は物体外を通過する光波を遮蔽するやはり2値のマスク関数である。 $M(\hat{x}, \hat{y})$ は物体のシルエットに一致しており、 $A(\hat{x}, \hat{y})$ とは

$$M(\hat{x}, \hat{y}) = 1 - A(\hat{x}, \hat{y}) \quad (4)$$

の関係にある。

ここで、ホログラムと平行な光波をグローバル座標の \hat{z} の平面まで回折伝搬する処理を演算子 $\mathbf{P}_{\hat{z}}[\]$ で表し、光波の回転変換を演算子 $\mathbf{R}[\]$ で表す。物体外を通過する光波 $f_{outside}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}_{obj})$ はそのままホログラム平面まで到達するので、

$$f_{outside}(\hat{x}, \hat{y}, 0) = \mathbf{P}_0[f_{outside}(\hat{x}, \hat{y}, 0)] \quad (5)$$

としてホログラム面 $(\hat{x}, \hat{y}, 0)$ まで伝搬させる。

3.4. 物体内の光波計算

次に、物体内を伝搬する光波を考える。いま物体内

を透過してポリゴン n から出射する光波を考える。

まず、計算の無駄を省くためポリゴン n の $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z} = \hat{z}_{obj})$ 面での回折範囲を求める。そのため、 x, y 軸方向の最大回折角 θ_x, θ_y を

$$\begin{aligned} \theta_x &= \sin^{-1} \frac{\lambda_i}{2\Delta x} \\ \theta_y &= \sin^{-1} \frac{\lambda_i}{2\Delta y} \end{aligned} \quad (6)$$

により求める[2]。ここで、 Δx と Δy は x, y 軸方向のサンプリングピッチである。(6)式よりポリゴン n の各頂点からの回折範囲を求め、その全ての回折範囲を内包するようにポリゴン n の最大回折範囲を決定する。そして、光波 $f_{inside}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}_{obj})$ よりポリゴン n の最大回折範囲の部分光波を切り出して波長を物体内の値に変えて $f_{n, \lambda_i}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}_{obj})$ とする。すなわち、3節で述べたとおり境界面では位相、振幅とも変化しないものとする。次に

$$\hat{h}_{n, \lambda_i}(\hat{x}_n, \hat{y}_n, 0) = \mathbf{P}_{\hat{z}_n}[f_{n, \lambda_i}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}_{obj})] \quad (7)$$

の伝搬計算を行って平行ローカル座標系の $(\hat{x}_n, \hat{y}_n, 0)$ 平面での光波を求める。ここで \hat{z}_n はポリゴン n の平行ローカル座標系原点の奥行き位置をグローバル座標で表したものである。次に、

$$h_{n, \lambda_i}(x_n, y_n, 0) = \mathbf{R}[\hat{h}_{n, \lambda_i}(\hat{x}_n, \hat{y}_n, 0)] \times A_n(x_n, y_n) \quad (8)$$

として、回転変換により傾いたローカル座標系の $(x_n, y_n, 0)$ 平面でのポリゴン n の光波を求め、ポリゴン n の形状に一致する開口関数 $A_n(x_n, y_n)$ を乗算しポリゴン外を通過する光波を遮蔽する。以上の操作により、ポリゴン n を通過する光波の表面関数 $h_{n, \lambda_i}(x_n, y_n, 0)$ を得る。

ポリゴン n の境界面で先ほどと同じように波長を変えて $h_{n, \lambda_0}(x_n, y_n, 0) = h_{n, \lambda_i}(x_n, y_n, 0)$ とし

$$\hat{h}_{n, \lambda_0}(\hat{x}_n, \hat{y}_n, 0) = \mathbf{R}^{-1}[h_{n, \lambda_0}(x_n, y_n, 0)] \quad (8)$$

のように、逆回転変換を行なってポリゴンから出射する光波を求め、ホログラム面まで伝搬してホログラムに足し合わせる。

以上の操作を物体の全ポリゴンにたいして行うことでレンダリングが完了する。

4. 実際の CGH の計算

3 節の手法を利用して CGH の計算をおこなった。この CGH の 3D シーンを図 5 に示し、パラメータを表 1 に示す。計算には、Intel 製 CPU の XEON E7540 (2.0 GHz) を 4 つ搭載し、メモリが 256GB のマシンを使用した。全計算時間は約 3.5 時間であった。

提案法を確認するため、計算した CGH に対して波動光学的シミュレーションを行った[7]。図 6 は、CGH のシミュレーション再生像である。提案法により光波の屈折を観察することができる。しかし、物体の縁に黒い枠のようなものが観察される。これは回転変換による影響と考えられる。また、屈折角が大きいとホログラム全体に十分に光波が伝搬されず、ポリゴンの視域が狭くなることがわかった。

5. まとめ

本研究では、ポリゴン単位で屈折現象をシミュレートする手法を提案した。そして、実際に提案法を利用して CGH を計算し、提案法により屈折現象が再生されることを確認した。しかし、回転変換の影響により、物体の縁が暗くなることや、屈折角が大きいとホログラム全体に十分に光波が伝搬されず、ポリゴンの視域が狭くなることがわかった。

謝辞

本研究は日本学術支援振興会の科研費(215001114)の助成を受けたものである。

文 献

- [1] 有馬恭旭, 松島恭治, 中原住雄, “デジタル化ホログラムによる実物体と仮想物体の混合 3 次元再生,” 3 次元画像コンファレンス 2011 講演論文集, 182-185(2011).
- [2] K. Matsushima, S. Nakahara: “Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method,” Appl. Opt. **48**, H54-H63(2009).
- [3] 中村将樹, 松島恭治, 中原住雄, “全方向視差 CGH におけるポリゴン単位の高速度隠面消去法,” 3 次元画像コンファレンス 2011 講演論文集, 66-69(2011).
- [4] H. Nishi, K. Higashi, Y. Arima, K. Matsushima, and S. Nakahara, “New techniques for wave-field rendering of polygon-based high-definition CGHs,” SPIE Proc. #7957, (2011) in press.
- [5] 西寛仁, 松島恭治, 中原住雄, “ポリゴン法 CGH における鏡面性曲面のレンダリング,” 3 次元画像コンファレンス 2011 講演論文集, 70-73(2011).
- [6] K. Matsushima, H. Schimmel, and F. Wyrowski, “Fast calculation method for optical diffraction on tilted planes by use of the angular spectrum of plane waves,” J. Opt. Soc. Am. A **20**, 1755-1762(2003).
- [7] 村上和也, 松島恭治, “計算機合成ホログラムの波動光学的再生シミュレーション,” HODIC Circular **29**, No. 3, 7 (2009).

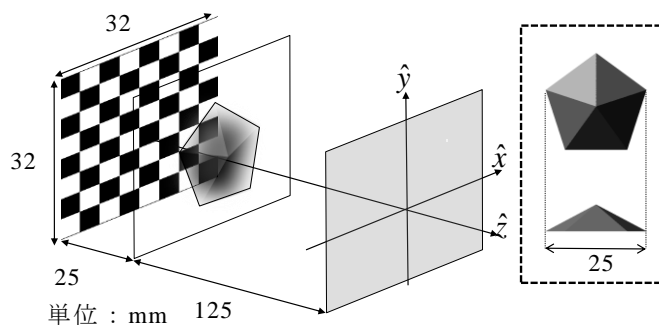
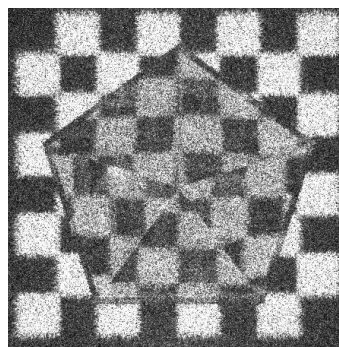


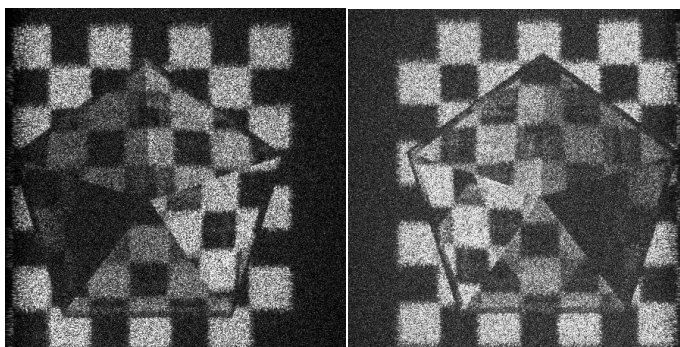
図 5 3D シーン

表 1 計算した CGH のパラメータ

ホログラム	
ピクセル数	32,768 x 32,768 pixel
サンプリングピッチ	1.0 μm x 1.0 μm
波長	632.8 nm
pentagon	
ポリゴン数(前面)	5
屈折率	
空間	1.0
物体内	1.5



(a) Center



(b) Left

(c) Right

図 6 シミュレーション再生像