

ポリゴン法 CGH における 透明物体のレンダリング手法 Rendering technique of transparent objects in polygon-based computer-generated hologram

西 寛仁 松島恭治

Hirohito Nishi Kyoji Matsushima

関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

Department of Electrical, Electronic and Information Engineering, Kansai University

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

E-mail: h_nishi@kansai-u.ac.jp

あらまし ポリゴン法 CGH における透明物体のレンダリング法を改善する新手法を提案する。従来法は物体形状の制限として物体背面を 1 枚の平面で構成する必要があった。新手法では背面ポリゴンから入射した光波を物体の中間面に伝搬することでこの制限を緩和した。また、物体を分割することで計算時間を短縮する手法についても提案を行う。

Abstract A novel technique is proposed to improve the method for rendering transparent objects in the polygon-based method. The previous method strictly restricted the object shape whose backside must be a plane. The new method gets rid of the restriction by employing an intermediate plane where all incident wavefields entering through the backside polygons are superposed. Moreover, a technique, dividing an object into sub-models, is proposed to reduce the computation time.

キーワード 計算機合成ホログラム, 全方向視差, 質感表現

Keywords Computer-generated hologram, Full-parallax, Realistic rendering

1. はじめに

近年の技術進歩により、1000 億画素を超える全方向視差計算機合成ホログラム (Full-parallax computer-generated hologram, 以下 FP-CGH) の製作が可能となり、深い奥行きを有する美しい 3D 物体を再生できるようになった [1]。これに伴い様々なレンダリング手法が提案され、FP-CGH の質感の表現力も向上している。その内、透明物体についても複数の手法が提案されており、その一つに光線サンプリング面 (Ray-Sampling plane: 以下 RS 面) を利用した手法がある [2]。これは、多視点画像をフーリエ変換して光線情報を波面情報に変換し RS 面上に複数枚並べることで 3D 像を再

生させる手法である。この手法は、CG の高度なレンダリング手法を用いることができ大規模 FP-CGH も作製可能である。一方、RS 面から遠い物体の再生像が不鮮明になる問題がある。この他にも CG のレイトレーシングを点光源法に応用した手法も提案されている [3]。この手法は様々な材質を表現できる可能性があるが、計算時間が膨大となり大規模な FP-CGH を数値合成することは困難である。一方、我々はポリゴン法と呼ばれる仮想物体にポリゴン形状の面光源を貼り付け、この光源毎に計算を行う手法を提案している。本手法は非平行間の伝搬計算が必要でありソフトウェア実装が難しいものの、大規模な FP-CGH を作

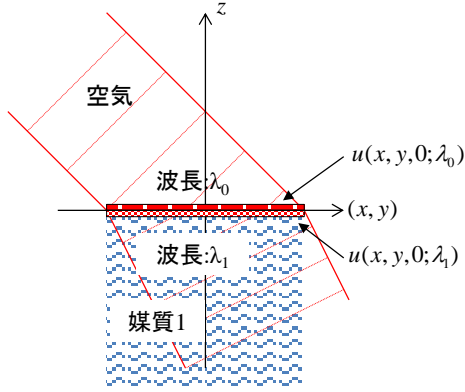


図 1. 媒質への光波の入射

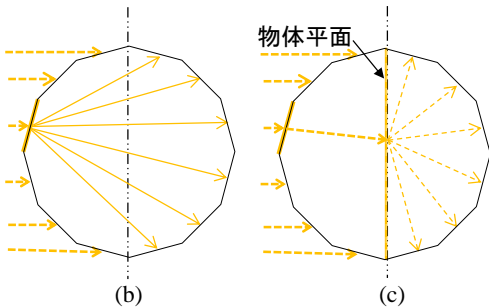
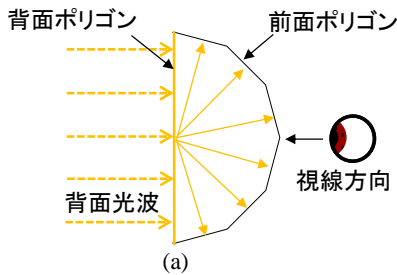


図 2. 物体形状の制限によるポリゴン間の伝搬回数の削減

成することが可能である。また、ポリゴン単位で計算するため隠面消去法との相性が良い。

我々は本手法に基づく質感表現レンダリングとして、鏡面反射のレンダリング手法を提案しており大規模 FP-CGH の作製に成功している [4]。一方、以前に提案した透明物体のレンダリングの手法では、計算時間の短縮のために物体背面が平面である必要があり実用性に乏しかった[5]。そこで、この制約を緩和する手法、及び物体分割により計算量を削減する高速化手法を提案している[6,7]。なお、本稿ではこれらの手法を詳述する。

2. 波動光学における透明物体レンダリング

ポリゴン法では 3 種類の座標系，グローバル座標系，平行なローカル座標系，傾いたローカル座標系を用いている。個々のポリゴン毎に定義した 2 つのローカル座標系の原点は一致しており，ポリゴン平面上にある。

2.1. 屈折光の計算原理

図 1 の様に，空気中から媒質 1 に光波が入射し波長が λ_0 から λ_1 に変化するとし，境界面に入射する光波を外側で $u(x, y, 0; \lambda_0)$ ，内側で $u(x, y, 0; \lambda_1)$ とする。この時，光波の振幅成分はフレネルの公式に従い線形的に変化する。一方，波動の連続性のため位相は変化せずに光波の波長のみが変化する。そのため，

$$u(x, y, 0; \lambda_0) \propto u(x, y, 0; \lambda_1) \quad (1)$$

となる。なお，簡単化のため本研究では境界面で生じる反射については考慮せず，(1)式の比例係数を 1 とする。

2.2. 物体形状の制限

以前の手法では，図 2(a)のように背面を平面にする必要があった。しかし，本手法ではこの制限を緩和し，自己オクルージョンが無く(凹部が無く)，断面積が最大となる平面(以下，物体平面)の前後で背面ポリゴンと前面ポリゴンを判別可能なモデルを条件とする。この場合，(b)の様に背面ポリゴンから入射する光波をそれぞれ前面ポリゴンに伝搬計算して出射させる必要がある。そのため，背面ポリゴン数を N とし，前面ポリゴン数を M としたとき，そのままでは伝搬計算の回数は $N \times M$ 回となり計算量が膨大になる。一方，今回の新手法では図 2(c)の様に背面ポリゴンからの光波をまず物体平面まで伝搬して重畳し，それを全ての前面ポリゴンに伝搬計算する。この場合，伝搬計算回数は $N + M$ 回となり，大幅に計算量を削減することができる。

2.3. ポリゴン単位の計算手順

光波が背面ポリゴン P_n に入射した場合の計算手順を図 3 に示す。(a)の様に，入射光波を $f_n(\hat{x}_n, \hat{y}_n; \hat{z}_n, \lambda_0)$ とする。ここで， \hat{z}_n はポリゴ

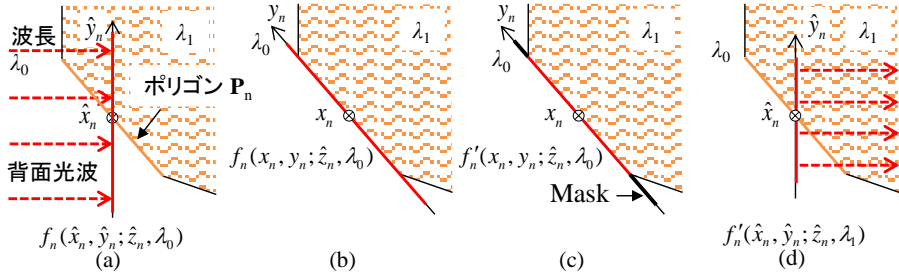


図3. ポリゴン単位の計算手順

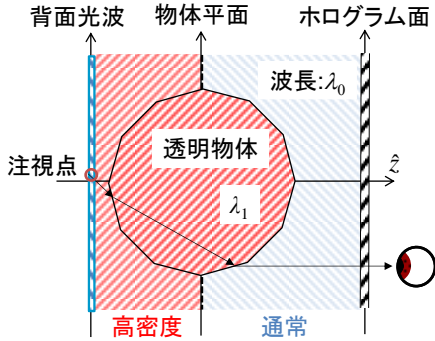


図4. 屈折による影響と高密度サンプリングが必要な領域

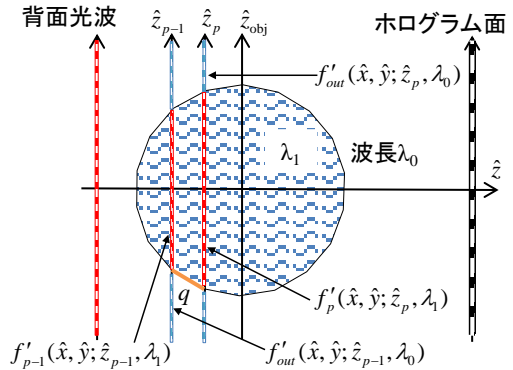


図5. サブモデル単位の計算手順

ン P_n のグローバル座標系での z 座標を表す。(b)に示すとおり、ポリゴン面と平行になるようにこの光波の回転変換を行う。

$$f_n(x_n, y_n; \hat{z}_n, \lambda_0) = R_n^{-1} [f_n(\hat{x}_n, \hat{y}_n; \hat{z}_n, \lambda_0)] \quad (2)$$

ここで、 $R_n^{-1}[\cdot]$ はポリゴン P_n の平行なローカル座標の $(\hat{x}_n, \hat{y}_n, 0)$ 面の光波を傾いた $(x_n, y_n, 0)$ 面に伝搬する光波回転変換を示す ([1]Sect.9)。次に、(c)の様に、物体内に入射しない余分な光波をカットするためにポリゴン形状のマスクを乗算する。

$$f'_n(x_n, y_n; \hat{z}_n, \lambda_0) = A(x_n, y_n) f_n(x_n, y_n; \hat{z}_n, \lambda_0) \quad (3)$$

ここで、 $A(x_n, y_n)$ はポリゴンの内側で 1、外側で 0 となるマスク関数である。この後は、透明媒質内の光波として扱い、(d)の様に、波長を媒質内の波長に変化させて再度回転変換を行い、ホログラムと平行な媒質内光波を求める。

$$f'_n(\hat{x}_n, \hat{y}_n; \hat{z}_n, \lambda_1) = R_n [f'_n(x_n, y_n; \hat{z}_n, \lambda_0)] \quad (4)$$

原理的には、この光波を物体平面まで伝搬計算するが、次節で述べるとおり高速化のため分割処理を行うため、実際にはサブモデルの境界面まで伝搬計算を行なう。なお、前面

ポリゴンから出射する光波の計算は、波長の変化が逆になること以外は同じため省略する。

3. 計算の高速化

3.1. 屈折現象で生じる問題

屈折光をレンダリングするためには通常よりも広い空間スペクトルを有した光波を計算する必要がある。図4に示すように透明物体越しに背景を観察した場合、屈折の影響により大きく斜行する光波を扱うため、波長の半分程度の微細なサンプリング間隔で光波計算を行う必要がある。一方で、全ての領域で微細な間隔を設定する必要はなく、物体前方に他の透明物体がなければ図4に示す赤色の範囲のみが高密度のサンプリングが必要な範囲となる。ただし、この処理でも計算量の増大が問題となるため、本研究では次節の物体分割を活用して計算量を更に削減している。

3.2. 物体分割による高速化

本研究では図5のように物体を奥行き方向に複数のサブモデルへ分割することで、個々のポリゴンの計算量が減少させた。全体の計算手順は、このサブモデル間の伝搬計算の繰

り返しとなる．ここでは，サブモデル p の背面の \hat{z}_{p-1} 平面から前面の \hat{z}_p 平面までの物体内外の光波の計算手順を述べる． \hat{z}_{p-1} 平面の光波 $f'_{p-1}(\hat{x}_n, \hat{y}_n; \hat{z}_{p-1}, \lambda_1)$ を \hat{z}_p 平面まで伝搬計算し，更に前述の方法でサブモデル p の各ポリゴンから入射する光波も同 \hat{z}_p 平面に伝搬させる．

$$f_p(\hat{x}, \hat{y}; \hat{z}_p, \lambda_1) = \text{Prop}_{\hat{z}_p} \left[f'_{p-1}(\hat{x}, \hat{y}; \hat{z}_{p-1}, \lambda_1) \right] + \sum_q \text{Prop}_{\hat{z}_p} \left[f'_q(\hat{x}_q, \hat{y}_q; \hat{z}_q, \lambda_1) \right] \quad (5)$$

ここで， $\text{Prop}_{\hat{z}_p}[\cdot]$ は \hat{z}_p 平面への伝搬計算を示す． q はサブモデル p に含まれるポリゴンの番号である．このままでは，物体外に出てしまう光波が含まれるため，

$$f'_p(\hat{x}, \hat{y}; \hat{z}_p, \lambda_1) = A_p(\hat{x}, \hat{y}; \hat{z}_p) f_p(\hat{x}, \hat{y}; \hat{z}_p, \lambda_1) \quad (6)$$

のようにサブモデル p の出射側の \hat{z}_p 面において，物体内で 1，外で 0 のマスク関数 $A_p(x, y; \hat{z}_p)$ を乗算する．

物体の外側を伝搬する光波も求める必要があるため， \hat{z}_{p-1} 平面の物体外光波 $f'_{out}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}_{p-1}; \lambda_0)$ を \hat{z}_p 平面まで伝搬計算して余分な光波を反転マスク $[1 - A_p(x_n, y_n; \hat{z}_p)]$ で除去し， \hat{z}_p 平面の物体外光波 $f'_{out}(\hat{x}, \hat{y}; \hat{z}_p, \lambda_0)$

$$= [1 - A_p(\hat{x}, \hat{y}; \hat{z}_p)] \sum_{n'} \text{Prop}_{\hat{z}_p} \left[f'_{out}(\hat{x}, \hat{y}; \hat{z}_{p-1}, \lambda_0) \right] \quad (7)$$

を求める．以上がサブモデル間の伝搬計算の手順である．この手順を繰り返すことで物体内外を伝搬する光波を計算することができる．ただし， \hat{z}_{obj} 平面（物体平面）以降は，波長の関係が反転するので注意が必要である．

4. CGH の光学再生

提案法の確認のために FP-CGH を作製し CG のレンダリングとの比較を行った．この 3D シーンを図 6，計算パラメータを表 1 にそれぞれ示す．図 7 の CG イメージと FP-CGH の再生像は一致しており，提案法が正しいことを確認できる．

5. まとめ

本研究では，ポリゴン法の透明物体レンダリング法における従来法の物体形状の制約を無くし，更に，計算を高速化する手法を提案している．実際に FP-CGH を作製し提案法により正しくレンダリングが行えていることを確認した．

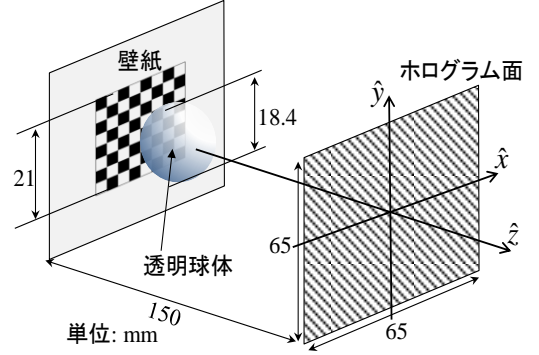


図 6. 作製した FP-CGH の 3D シーン

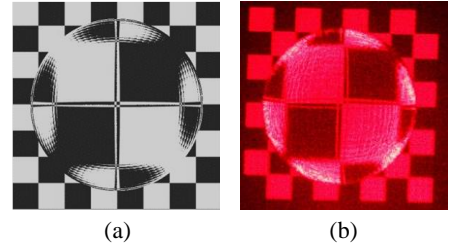


図 7. 作製した FP-CGH, (a)CG イメージ, (b)CGH の光学再生像

表 1 作製した FP-CGH のパラメータ

ピクセル数	65,536 × 65,536
ピクセル間隔	1 μm × 1 μm
波長	632.8 nm
透明球体の屈折率	1.5

謝辞

本研究は，日本学術振興会科研費 22H03712 の助成を受けたものである．

文献

- [1] K. Matsushima, Introduction to Computer Holography, Sect. 1.3 (Springer, 2020).
- [2] S. Wakunami, and M. Yamaguchi, Opt. Express. **19**, 9086-9101 (2011).
- [3] T. Ichikawa, K. Yamaguchi, and Y. Sakamoto, Appl. Opt. **52**, A201-A209 (2013).
- [4] H. Nishi, and K. Matsushima, Appl. Opt. **56**, F37-F44 (2017).
- [5] H. Nishi, and K. Matsushima, Information Photonics 2017, IP-21PM-1-8 (2017).
- [6] 西寛仁, 松島恭治, 3次元画像コンファレンス 2022, 10-1(2022).
- [7] H. Nishi, and K. Matsushima, Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2022, Tu1A.4(2022).