

全方向視差デジタル合成ホログラムにおける 完全かつ高速な隠面消去法

Perfect and Fast Hidden Surface Removal in Full-Parallax Digitally Synthetic Holograms

松島恭治

Kyoji Matsushima

関西大学工学部先端情報電気工学科

Department of Electrical Engineering and Computer Science, Kansai University

ABSTRACT

A new method is presented for removing hidden surfaces from reconstruction of computer-generated holograms. Objects used in the method are defined in surface model, and each polygon composing the objects provides a mask for blocking the incident field into the backside of the polygon. The computational cost of the proposed method is reduced to 2 FFT/polygon by handling field transmission in Fourier space and integrating the surface diffraction method for generating fields. Reconstruction of a hologram synthesized by using the presented method is demonstrated.

Keywords: hidden surface removal, computer generated hologram, digitally synthetic hologram, surface diffraction method, polygon model

1 はじめに

デジタル合成ホログラムの光波数値合成で用いられる隠面消去アルゴリズムとしては、点光源モデル向きの幾何学的手法 [1] と、断層ホログラムで用いる波動光学的な手法 [2] が知られている。前者は莫大な計算時間を要するため、全方向視差ホログラムには適用できないことが問題点である。一方後者では物体の断面を取り扱うため陰影付けなどのレンダリング手法を用いることができない。そこで、ポリゴンモデルの物体において、各ポリゴンのシルエットをマスクとして光波遮蔽を行うシルエット近似法を提案している [3]。しかしながら、シルエット近似法は近軸光線にのみ有効な手法であり、高解像度広視域角のホログラムでは軸はずれ光線の漏洩が生じるため、完全に光波を遮蔽できない問題点があった。

そこで本研究では、より完全な隠面消去法を提案する。提案手法では、ポリゴンそのものをマスクとして光波を遮蔽するため、原理的に光波の漏洩が生

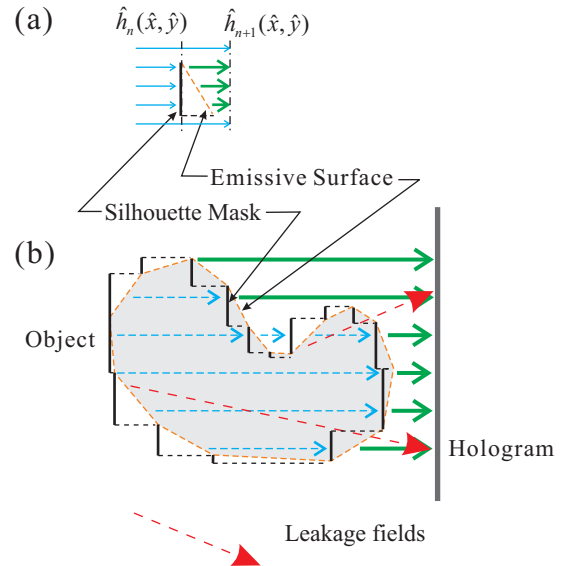


Fig. 1 The hidden-surface removal by using silhouette approximation.

松島恭治

matsu@kansai-u.ac.jp

関西大学工学部電気工学科

〒 564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

TEL/FAX 06-6368-0933

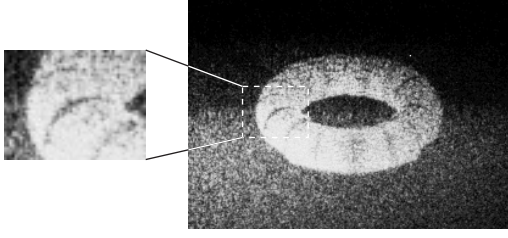


Fig. 2 Gaps owing to leakage fields between silhouette masks [3].

じず, また表面回折法による物体光波合成と併用することにより, ポリゴンあたり 2 回の FFT で計算が進むため, 高速に全方向視差ホログラムの隠面消去を行うことができる。

2 シルエット近似とその問題点

シルエット近似を用いた光波遮蔽の原理を Fig. 1 に示す。今, n 番目のポリゴンに背面より入射する光波を $\hat{h}_n(\hat{x}, \hat{y})$ とする (Fig. 1(a))。ここで, $\hat{h}_n(\hat{x}, \hat{y})$ は, ホログラムに平行でポリゴンにローカルな平面上で与えられる光波複素振幅分布とする。このポリゴンの形状を $(\hat{x}, \hat{y})$ 平面に投影して出来るシルエットを 2 値のマスク関数 $\hat{m}_{s,n}(\hat{x}, \hat{y})$ とすると, このマスク通過後の光波は

$$\hat{h}'_n(\hat{x}, \hat{y}) = \hat{h}_n(\hat{x}, \hat{y}) \hat{m}_{s,n}(\hat{x}, \hat{y}), \quad (1)$$

と表される。さらに, $\hat{h}'_n(\hat{x}, \hat{y})$ を次のポリゴン ($n+1$) が存在する平面まで伝搬すると, ポリゴン ($n+1$) の背面より入射する光波は,

$$\hat{h}_{n+1}(\hat{x}, \hat{y}) = P_{d_n}\{\hat{h}'_n(\hat{x}, \hat{y}) \hat{m}_{s,n}(\hat{x}, \hat{y})\} + O_n(\hat{x}, \hat{y}). \quad (2)$$

となる。ここで, $O_n(\hat{x}, \hat{y})$ は ($n+1$) 番目の平面における n 番目のポリゴン自体からの光波の寄与を表し, $P_{d_n}\{\cdot\}$ は距離 d_n の伝搬演算を表す。この漸化式を一番奥のポリゴンから手前のポリゴンへ順次計算することにより, ホログラム上での物体光波は

$$\hat{h}_H(\hat{x}, \hat{y}) = P_{d_N}\{\hat{h}_N(\hat{x}, \hat{y}) \hat{m}_{s,N}(\hat{x}, \hat{y})\} + O_N(\hat{x}, \hat{y}). \quad (3)$$

となる。ここで N はポリゴンの総数である。

この手法により, あるポリゴンの背面にある別のポリゴンからの光波はそのシルエットマスクの形状でクリップされ, 全体として隠面消去された物体光波が得られる。しかしながら, ホログラムの回折角が広く, 近軸領域から外れた光線が存在する場合は, シルエットマスク間の間隙を通り抜けて漏洩する光波が発生する。

Fig. 2 にシルエット近似を用いて合成したホログ

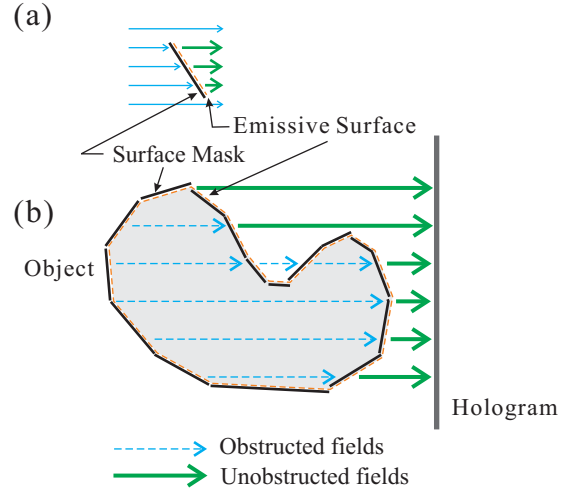


Fig. 3 The principle of complete blocking the fields that should be obstructed.

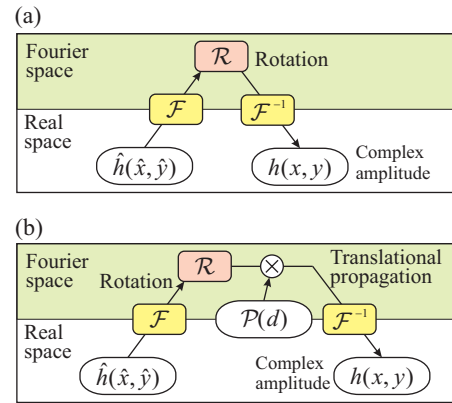


Fig. 4 A diagram for rotational transformation without (a) and with (b) translational propagation.

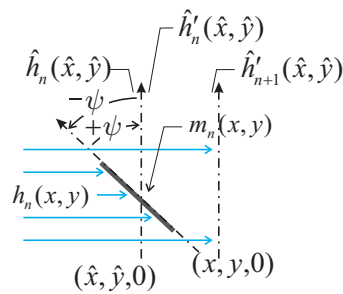


Fig. 5 The procedure for exact hidden surface removal.

ラムの光学再生像を示す。物体はトーラスである。この再生像の一部を拡大すると, ポリゴン間に空隙が存在することがわかる。これは, 光波が漏洩した結果であると考えられる。

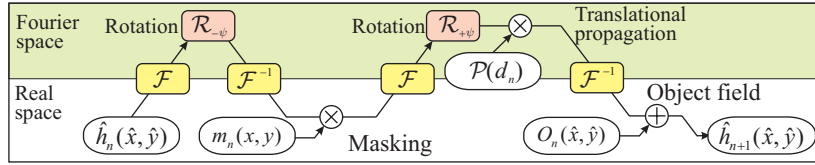


Fig. 6 The diagram for exact hidden surface removal.

3 ポリゴン自体による光波の遮蔽

シルエット近似による遮蔽は、光軸に垂直なシルエットマスクによる遮蔽であるため、通常的光波伝搬計算を用いることができ計算量的には有利であるが、漏洩光が発生する。この漏洩光を防ぐためには、光軸に垂直なシルエットマスクではなく、Fig. 3 に示すとおり、ポリゴン面そのものをマスクとして遮蔽計算を行えば良い。

このような遮蔽計算を行うためには、まず、ポリゴンが存在する平面上で光波複素振幅を得る必要があるが、一般にポリゴンは光軸に対して垂直ではないため、通常の伝搬計算ではなく、光波の回転変換を行う必要がある。平面波展開を用いた回転変換 [4] のダイアグラムを Fig. 4 に示す。図中、 $\mathcal{F}$ と $\mathcal{F}^{-1}$ はフーリエ変換、 $\mathcal{R}$ はフーリエ空間における座標回転演算を示す。(a) は原点を共有する座標系間の回転変換。また (b) は並進伝搬も含む回転変換を示す。ここで、 $P(d) = \exp[i2\pi d(\lambda^{-2} - u^2 - v^2)^{1/2}]$ は距離 d の並進伝搬のフーリエ空間における位相因子である。

このような回転変換を用い、ポリゴン面そのものをマスクとして用いて光波遮蔽する方法を Fig. 5 に示す。この方法では、まずポリゴン n の位置で光軸に垂直な平面上の光波分布 $\hat{h}_n(\hat{x}, \hat{y})$ を Fig. 4(a) の回転変換によりポリゴンが存在する傾いた平面上での光波分布 $h_n(x, y)$ に変換する。この光波にポリゴンの内側では 0、外側では 1 であるマスク関数 $m_n(x, y)$ を乗じ、Fig. 4(b) の演算を用いて逆回転とポリゴン $(n+1)$ の位置まで並進伝搬を行う。さらにポリゴン n 自体からの物体光波をこれに重畳する。以上の計算過程を Fig. 6 に示す。このような一つのポリゴンに対する処理をセグメントと呼び、多数のセグメントを連結して計算が進むことになる。

以上からわかるとおり、このようにポリゴン自体をマスクとして光波を遮蔽するためには、そのままでは、1 枚のポリゴンあたり 4 回の FFT と 2 回の座標回転演算が必要となる。

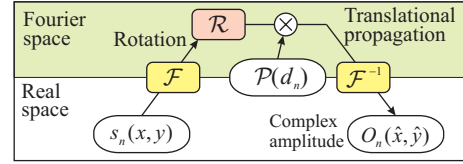


Fig. 7 A diagram of for surface diffraction method to generate fields from polygons.

4 表面光波回折法の統合とフーリエ空間における伝達を用いた計算量の削減

表面光波回折法 [5] では、ポリゴンが面発光しているとしてその光波を求める。その計算過程は、Fig. 7 に示すように、並進伝搬付き回転変換 (Fig. 4(b)) とほぼ同じになる。ここで、 $s_n(x, y)$ はポリゴン n の表面特性関数であり、その形状、テクスチャ、発散性などの情報を内包している [6]。

並進伝搬付き回転変換はポリゴンによる光波遮蔽 (Fig. 6) ではマスク処理後に用いられている。そのため、表面光波回折法を用いた場合、Fig. 6 において、最後に $O_n(\hat{x}, \hat{y})$ を重畳する代わりに、マスク乗算直後に $s_n(x, y)$ を重畳しても同じ効果が得られる。

さらに、物体光波を重畳する位置が変わった結果、一つのセグメント内の最初の処理がフーリエ変換で、最後の処理が逆フーリエ変換となる。すなわち、複数のセグメントが連続する場合、逆フーリエ変換直後にフーリエ変換を行うことになり、冗長な演算となる。そこで、セグメント間の光波の伝達をフーリエ空間で行うことにすると、一つのセグメントの計算過程は Fig. 8 であらわされ、漸化式としては

$$\begin{aligned} & \hat{H}_{n+1}(\hat{u}, \hat{v}) \\ &= \mathcal{R}_{+\psi_n} \mathcal{F} \{ \mathcal{F}^{-1} \mathcal{R}_{-\psi_n}^{-1} \{ \hat{H}_n(\hat{u}, \hat{v}) \} m_n(x_n, y_n) \\ &+ s_n(x_n, y_n) \} \times P(d_n). \end{aligned} \quad (4)$$

が得られる。この計算を物体空間の奥から手前に向かって行うことにより、隠面消去された物体光波はホログラム面上で、

$$h_H(\hat{x}, \hat{y}) = \mathcal{F}^{-1} \{ \hat{H}_{N+1}(\hat{u}, \hat{v}) \}. \quad (5)$$

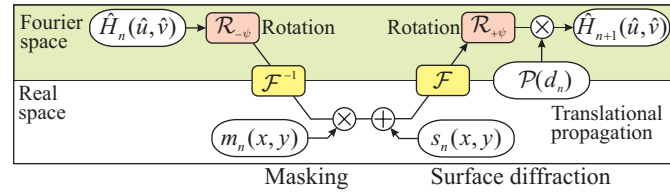


Fig. 8 The diagram for proposed hidden surface removal by using field transmission in Fourier space.

として得られる．

この結果，1枚のポリゴン进行处理するために必要なFFTの回数は2回に削減される．

5 ホログラムの作製と光学再生

本手法を検証するために，ホログラムの作製と光学再生を試みた．Fig. 9に作製したホログラムの物体モデルを示す．このモデルでは市松模様の背景の前に二つの三角形ポリゴンが垂直に立っており，ホログラム面に対してそれぞれ60[deg]，80[deg]傾いている．このホログラムを向かって右方向から覗き込んだ場合，三角形の一部は重なり合っているが，左方向から見た場合，三角形の隙間を通して背景が見えなければならない．

作製したホログラムは16384×4096ピクセルであり，各ピクセルは1.5μm×3.0μmのサイズである．作製には専用フリンジプリンタを用いた[7]．このホログラムに633nmの再生照明光を照射して光学再生した結果をFig. 10に示す．(a)は左方向，(b)は右方向から撮影した写真であり，予想通りの結果が得られていることがわかる．

6 まとめ

CGでは「絵描きのアルゴリズム (Painter's algorithm)」と呼ばれる隠面消去法がある．本研究では，類似の手法を用いて物体空間の奥から手前に向かって計算を行うことにより，隠面消去する手法を提案した．またこのとき，各ポリゴンによる光波遮蔽をシルエット近似を用いずに行うことにより，光波の漏洩のない完全な隠面消去を可能とした．さらに，表面光波回折法と組み合わせ，ポリゴン間の光波伝達をフーリエ空間で行うことにより，計算量を2FFT/polygonにまで削減した．

参考文献

- [1] 高瀬, 坂本, 青木: “光線の到来方向を考慮したzバッファによる計算機合成ホログラムの高速隠面消去”, 映像学誌, **57**, pp. 483–489 (2003).
- [2] A. W. Lohmann: “Three-dimensional properties of wave-fields”, Optik, **51**, pp. 105–117 (1978).
- [3] 近藤, 松島: “シルエット近似を用いた全方向視差CGH

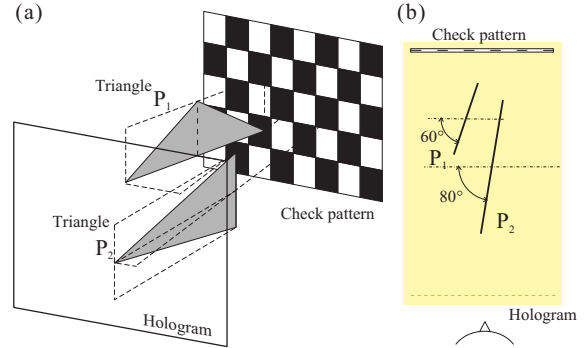


Fig. 9 The object model in bird's view (a) and top view (b).

の隠面消去”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, **J87-D-II**, pp. 1487–1494 (2004).

- [4] 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., **A20**, pp. 1755–1762 (2003).
- [5] K. Matsushima: “Computer-generated holograms for three-dimensional surface objects with shade and texture”, Appl. Opt. (2005). in press.
- [6] 松島, 近藤: “波面展開法を用いた表面モデルCGHの高速計算法II”, 3次元画像コンファレンス2002, pp. 213–216 (2002).
- [7] 山中, 松島: “デジタル合成ホログラム用高解像度プリンタの高精度化”, 映像情報メディア学会誌, **58**, pp. 1665–1668 (2004).

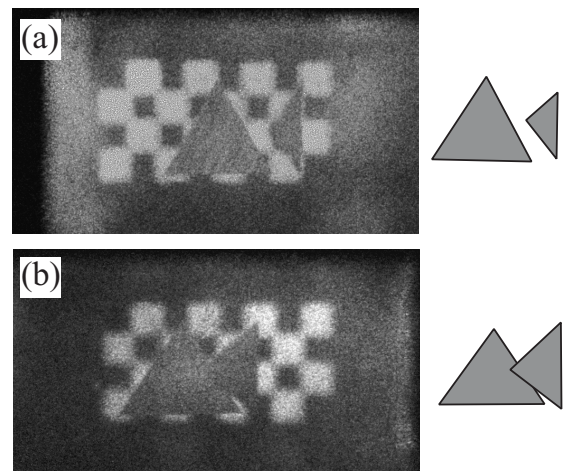


Fig. 10 Optical reconstruction of the fabricated hologram.