

コンピュータホログラフィにおけるサーフェスマスクを用いた精密な隠面消去法

Exact Occlusion Processing Using Surface-Masks in Computer Holography

中本健太

松島恭治

Kenta Nakamoto

Kyoji Matsushima

関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

ABSTRACT

In the switch-back technique, proposed to perform silhouette light-shielding efficiently, the fields behind polygons are shielded by binary mask patterns, called silhouette masks. The masks are generated by orthogonal projection of the polygon shape. As a result, there are many small gaps between neighboring masks. Background fields sometimes leak out from the gaps, and are perceived by viewers as many cracks caused in surfaces of the reconstructed object. To get over the problem, exacter algorithm than silhouette light-shielding, called surface light-shielding, has been proposed using rotational transform of wave-fields, but it was too time-consuming to be applied for large-scale CGHs. In this report, we propose a novel occlusion processing technique using improved surface light-shielding to calculate large-scale CGHs without any cracks. Actual large-scale CGHs are demonstrated to confirm validity of the algorithm.

Keywords: Computer holography, Computer-generated hologram, Occlusion processing

1. はじめに

計算機を用いてホログラムを作製するコンピュータホログラフィ(Computer holography:以下 CH)では、実在物体の光波を記録するアナログホログラフィとは異なり、CG モデルから計算機合成ホログラム(Computer-generated hologram:以下 CGH)を作製できることが利点である。このような物体光波数値合成手法の一つにモデルを構成する各ポリゴンを面光源とみなすポリゴン法がある¹⁾。この手法は、モデル表面に点光源を充填する点光源法とは異なり、テクスチャマッピングやシェーディングを実施しても高速に物体光波の数値合成を実行できる利点がある。

ポリゴン法では、オクルージョン処理にマスクベースのシルエット法を用いる²⁾。シルエット法は物体後方から

の光波を二値のマスクにより遮蔽する手法であり、物体毎に一つのマスクを用いる物体単位シルエット法とポリゴン毎にマスク処理を行うポリゴン単位シルエット法に分類される。一般に前者の方が単純な処理であり、高速計算できるが、物体自身が遮蔽関係を持つ自己オクルージョンを処理できない欠点がある。一方、後者は自己オクルージョンを有する複雑な形状の計算に向いているが、処理が遅い問題があった³⁾。

しかし、Babinet の原理に基づき、マスクの代わりにその相補パターンである開口を用いることでポリゴン単位シルエット法を高速に実行するスイッチバック法により²⁾、近年“Sailing Warship II”や“Toy Train”など、複雑な3D モデルを用いた 700 億～1000 億画素の大規模CGH が計算され、作成されている⁴⁾。

このようなマスク(あるいは開口)によって光波の遮蔽効果を模擬するシルエット法では、光波を遮蔽する物体(あるいはポリゴン)を正投影したシルエット形状のマスク(開口)を用いてホログラムと平行な平面上で遮蔽が行われる。しかし、CGH の大規模化が進むにつれ、ポリゴ

中本健太

<nakamoto@laser.ee.kansai-u.ac.jp>

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

TEL 06-6368-1121(内線 5722)

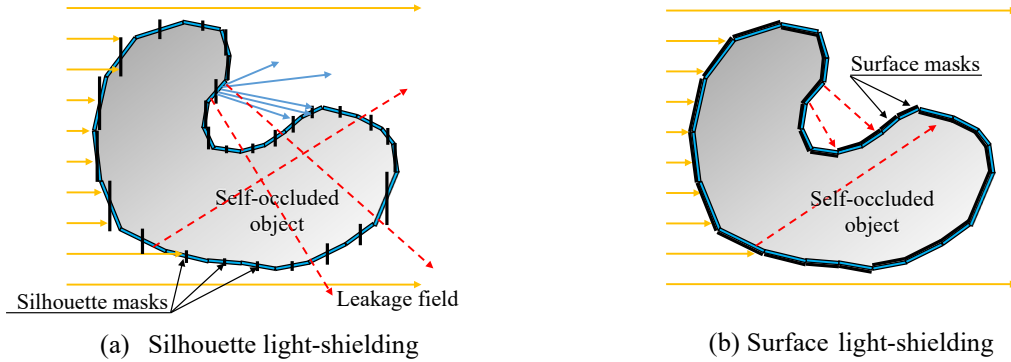


Fig.1 Comparison of polygon-by-polygon light-shielding with (a) silhouette masks, and (b) surface masks.

ン単位シルエット法であっても、マスク間に生じる隙間から光波が漏洩し、それが物体表面の割れ目として観察される問題が顕在化してきた。

一方、このような問題が生じない精密な隠面消去法の原理が以前より提案されている⁵⁾。この手法ではサーフェスマスクと呼ばれるポリゴン形状のマスクを用いてポリゴン面に沿って光波遮蔽を行うため、光波の漏洩が原理的に生じない。しかし、この手法は光波の回転変換と呼ばれる伝搬計算手法により実現されるため、シルエット法と比較して計算時間が長大化する問題があった。そこで、本研究ではアルゴリズムを最適化することで精密な隠面消去法を高速化し、それによって実際に計算・作製した CGH について報告する。

2. 隠面消去法

ポリゴン単位シルエット法と、サーフェスマスクを用いる精密な隠面消去法による光波遮蔽をそれぞれ Fig.1 (a)と(b)に示す。この様に、ポリゴン単位シルエット法では、シルエットマスク間から背景光波が漏洩する。精密な隠面消去法では、(b)に示したようにポリゴン面に沿ったサーフェスマスクを導入することでこの問題を解決している。

この精密な隠面消去法は、Fig. 2 に示すように光波の回転変換を 2 回用いることで実現される。ここで、光波

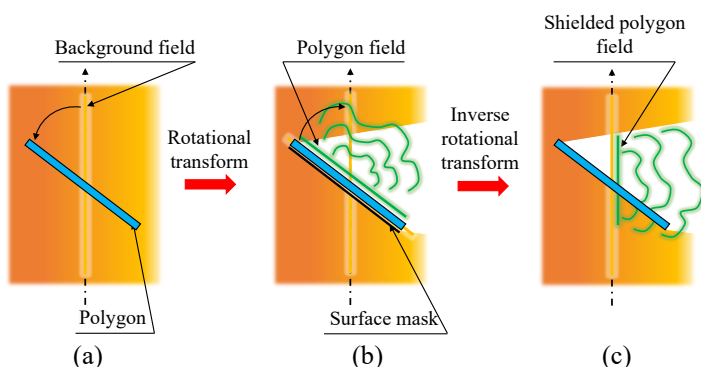


Fig.2 The principle of light-shielding with a surface-mask.

の回転変換とは非平行な平面間の伝搬計算手法であり^{6,7)}。平行平面間の伝搬計算理論である角スペクトル法を応用した手法である。精密な隠面消去法では、先ずホログラム面と平行な平面上の光波から、回転変換を用いることにより、傾いたポリゴン面上での光波を計算する。次に、この光波にサーフェスマスク関数を乗算し、光波遮蔽を行う。遮蔽後の光波にポリゴン光波を加算し、再度回転変換を行うことで背景光波を遮蔽処理したポリゴン光波を最初の平行平面上で求める。

この精密な隠面消去法では、実際には、スイッチバック法と同様、マスクの代わりに開口を用いる。これらは相補的なパターンであり、Babinet の原理により同じ結果に帰着させることができる。開口を用いる最大の利点は、開口付近の光波のみを扱えばよいことである。一般に各ポリゴンはホログラムに対して非常に小さく、開口を用いるとその近傍のみの計算で済むため、マスクを用いた場合に比べて計算量を削減し、物体光波計算を高速化できる。

3. 光波の回転変換の高速化

光波の回転変換の説明に用いる座標系を Fig.3 に示す。伝搬元座標系の $(x, y, 0)$ 面で与えられた光波 $g(x, y; 0)$ から、原点は共有しているが座標軸周りにそれぞれ角度 θ_x , θ_y , θ_z 回転した観測座標系の $(\hat{x}, \hat{y}, 0)$

面上の光波分布 $f(\hat{x}, \hat{y}; 0)$ を求めるものとする。

回転変換では、Fig.4 (a)に示すように、まず FFT により元光波のフーリエスペクトル $G(u, v)$ を求める。ここで、 u と v はそれぞれ x, y 方向の空間周波数である。一方、観測面でのフーリエスペクトルを $F(\hat{u}, \hat{v})$ 、その空間周波数を (\hat{u}, \hat{v}) とすると、Fig.4 (b)に示すようにフーリエ座標 (u, v) の原点は観測面では (\hat{u}_0, \hat{v}_0) に写像される。このようにスペクトルは原点から大きく離れた位置に移動する

ことになるため、回転変換では Fig.4 (c)に示すようにシフト座標系 $(\hat{u}, \hat{v}) = (\hat{u} - \hat{u}_0, \hat{v} - \hat{v}_0)$ を導入して補間処理を行っている⁷⁾。これは光波を再構築する際に用いる2回目のFFTの標本窓を小さくし、計算を高速化するためである。最後に、補間により計算した $F(\hat{u}, \hat{v})$ に再度FFTを用いて逆フーリエ変換することで観測面での光波分布 $f(\hat{x}, \hat{y}; 0)$ が計算される。本研究ではFFTパッケージとしてIntelのMath Kernel Library (MKL)のFFTを用い、補間には高精度で低速なbicubic補間を用いていることもあって全体の計算時間の中でFFTが占める割合は小さく、実測によるとスペクトルの補間処理がその回転変換計算時間の約80%を占める。したがって、精密な隠面除去法を高速化するにはこの補間計算にかかる時間を短縮する必要がある。

ここで、フーリエスペクトルの成分は、高周波になるほどホログラムの端へ回折する光の平面波成分になる。ホログラムを観察する際は、観察者は一般にそれほど大きく視点を振らず、主に光波の低周波成分を観察している。そのため、高周波成分を精度よく計算することにあまり意味はないと考えた。したがって、Table 1に示したように高周波成分の補間法には、低周波成分の補間法よりも計算精度が低く高速なものを採用した。本研究で用いた高周波・低周波領域の定義をFig.5に示す。ここで、 δ_x と δ_y はホログラム面と平行な平面上の光波分布の標本間隔である。本研究では、遮蔽処理に関係がない二回目の回転変換の補間法には、一回目の補間法より精度の低いものを用いている。

4. 精密な隠面除去法の効果とその計算時間

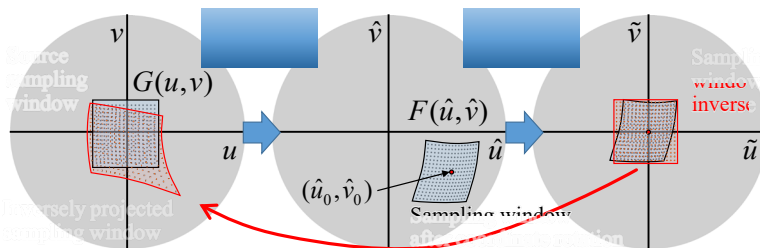


Fig.4 Distortion of sampling windows of spectrum in three Fourier coordinates used for rotational transform.

Table 1 Interpolation methods for rotational transform used for surface light-shielding.

	1st rotational transform	2nd inverse rotational transform
Low frequency region	bicubic	bilinear
High frequency region	bilinear	nearest-neighbor

今回、提案法の効果を確認するために実際にCGHを作製した。本CGHでは、Fig.6に示す通り、ホログラム面から30mm離れた位置に物体の中心があり、そこからさらに30mm離れた位置に白色の壁紙を設置した3Dシーンを想定している。これは、提案法によるオクルージョン処理の効果を分かりやすくするためである。Table 2は計算に用いたパラメータである。このパラメータで作製したCGHの光学再生像をFig.7に示す。従来法で発生していた光波の漏洩が、提案法で作製したCGHの再生物体の表面に一切表れていないことが確認できる。

Table 3に示した計測環境で計測した計算時間をFig.8に示している。本手法の精密な隠面除去を行うと、シルエット法と比較して約2.4倍の計算時間が必要となることがわかった。

5. まとめと展望

ポリゴンと同じ形状のサーフェスマスクでポリゴン面に沿って光波遮蔽を行う精密な隠面除去法が提案されていたが、シルエット法と比較して非常に計算時間が長く、大規模CGHの計算は困難であった。そこで、この隠面

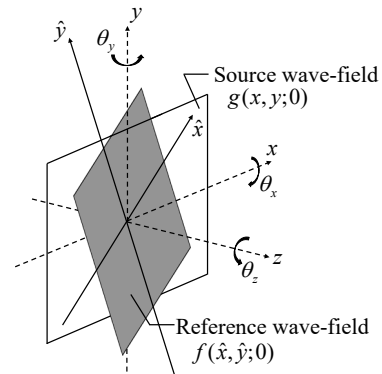


Fig.3 Definition of the two coordinate systems used for rotational transform.

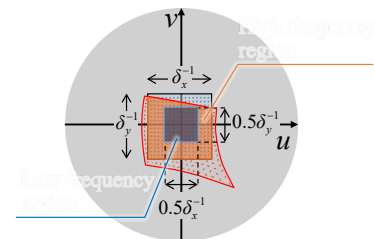


Fig.5 Definition of high and low frequency regions.

消去法に用いられる光波の回転変換を最適化し、計算時間増大の抑制を試みた。その結果、大規模 CGH の計算に精密な隠面消去法を適用することに成功した。その光学再生像では、シルエット法で計算した CGH で発生していた光波の漏洩は一切確認されず、精密なオクルージョン処理が実現できることを確認した。計測された計算時間は従来のシルエット法の 2.5 倍以下であり、この程度の増加は許容範囲と考える。

6. 謝辞

本研究は、日本学術振興会科研費 18H03349 の助成を受けたものである。

参考文献

[1] K. Matsushima: Computer-generated holograms for three-dimensional surface objects with shade and texture, *Appl. Opt.* **44**, 4607-4614 (2005).

[2] K. Matsushima, M. Nakamura, and S. Nakahara: Silhouette method for hidden surface removal in computer holography and its acceleration using the switch-back technique, *Opt. Express* **22**, 24450-24465 (2014).

[3] K. Matsushima, A. Kondoh: A wave optical algorithm for hidden-surface removal in digitally synthetic full-parallax holograms for three-dimensional objects, *Proc. SPIE* **5290**, 90-97(2004).

[4] K. Matsushima: Very large-scale computer-generated hologram for 3D display, 11th International Conference on Optics-photonics, Design & Fabrication, 30S4-02 (2018).

[5] K. Matsushima: Exact hidden-surface removal in digitally synthetic full-parallax holograms, *Proc. SPIE* **5742**, 25-32 (2005).

[6] K. Matsushima, H. Schimmel, 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).

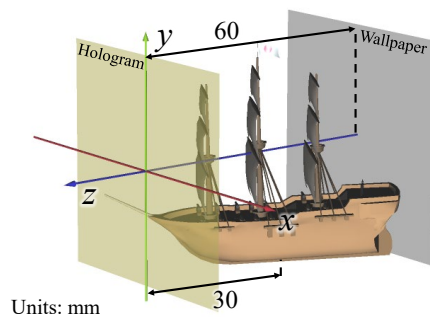


Fig.6 3D scene for the test CGH.

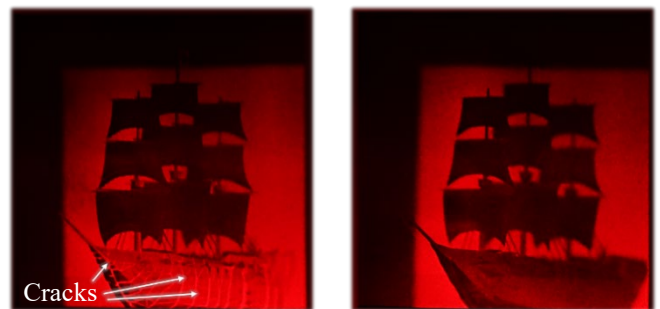


Fig.7 Comparison of optical reconstruction between the silhouette light-shielding and surface light-shielding.

Table
Parameter
Size of object (W × H)
Number of pixels of object
Design wavelength [nm]
Number of visible pixels
Pixel pitches of CGH [mm]

Table
Operating system
CPU
CPU Clock
Number of real cores
Size of memory

- [7] K. Matsushima: Formulation of the rotational transformation of wave fields and their application to digital holography, *Appl. Opt.* **47**, D110-D116 (2008).