

厳密な光波遮蔽法の 高解像度計算機合成ホログラムへの適用 Rigorous Light-Shielding for High-Definition Computer Holography

増田幸勇¹

松島恭治¹

中原住雄²

Sachio Masuda¹

Kyoji Matsushima¹

Sumio Nakahara²

¹関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

¹Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

²関西大学 システム理工学部 機械工学科

²Department of Mechanical Engineering, Kansai University

ABSTRACT

In high-definition (HD) computer holography, the silhouette method plays an important role to shield light behind objects and prevent the objects from being reconstructed as see-through images. Furthermore, the switch-back method has been proposed to speed-up the silhouette light-shielding polygon by polygon. However, since HD-CGHs has very high physical resolution and thus large diffraction angles, off-axis light is sometimes not shielded by the silhouette masks and causes leakage light and occlusion errors. To remove the leakage light generally caused in the silhouette method, another technique has been already proposed for more rigorous light-shielding. However, this rigorous technique has never been applied to HD-CGHs, because the rotational transform required in the rigorous technique is very time-consuming in HD computer holography. In this paper, a new technique is proposed for applying the rigorous light-shielding to HD computer holography and verified by simulated reconstruction of the object field calculated by the proposed technique.

Keywords: computer holography, computer-generated hologram, hidden-surface removal

1. はじめに

近年のアルゴリズム、コンピュータ、微細加工技術の発展により、光波の回折と干渉をシミュレートしてホログラムの干渉縞パターンを数値的に求め、描画することが可能となった。この技術はコンピュータホログラフィと呼ばれ[1]、次世代のデジタル3D技術として注目されている。この技術により作成されたホログラムは計算機合成ホログラム(Computer-Generated Hologram : CGH)と呼ばれ、レーザーリソグラフィ技術とポリゴン法[2]に基づく高解像度 CGH では古典的なホログラムに匹敵するほどの美しい空間像が再生できる[3, 4].

現状の高解像度コンピュータホログラフィでは、後方からの光波が前方の物体に透けないようにする光波遮蔽処理として、シルエット法が用いられている[5, 6]. シルエット法とは、物体のシルエットをホ

ログラムと平行な平面に投影したマスクを用いて光波を遮蔽する近似的手法である。シルエット法をポリゴン単位で用いた場合は、自己オクルージョンを処理できるため、バビネの原理と部分光波伝搬を用いてポリゴン単位シルエット法を高速に処理できるスイッチバック法が提案されている[7]. しかし高解像度 CGH では、最大回折角が大きいため、シルエットマスク間を通り抜ける軸はずれ光波が生じ、オクルージョンエラーが生じる問題があった[6, 8].

一方、このような軸外れ光波も除去できる厳密な光波遮蔽法も提案されている[9]. この手法では、ポリゴンと同一平面上での光波分布を回転変換[10, 11]を用いて計算し、ポリゴン形状のマスクで遮蔽する。そのため原理的に光波の漏れは発生しない。しかし高解像度 CGH においては光波全体の回転変換の計算コストが非常に高いため、高解像度 CGH に対してこの手法が用いられたことはなかった。

そこで本研究では、厳密な光波遮蔽を高解像度 CGH に適用しスイッチバック法によって隠面消去するための手法を提案する。

増田幸勇

<masuda@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)

2. 厳密な光波遮蔽法[9]

この手法では、ポリゴンが存在する平面上で背景光波をポリゴン自身で遮蔽するため、原理的にオクルージョンエラーは起こらない。この処理を実現するには、ホログラムと平行な平面上での光波分布である背景光波を回転変換し、傾いたポリゴン平面上での背景光波を求める必要がある。以下、回転変換の手順を要約する。

2.1 光波の回転変換

座標系 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ の平面 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z} = 0)$ で与えられる光波を $\hat{h}(\hat{x}, \hat{y})$ とし、この座標系と原点を共有する傾いた座標系 (x, y, z) の平面 $(x, y, z = 0)$ での光波は $h(x, y)$ で表されるとする。以下では、 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z} = 0)$ を平行平面、 $(x, y, z = 0)$ を傾いた平面と呼ぶ。このとき回転変換は、

$$\begin{aligned} h(x, y) &= \text{Rot}\{\hat{h}(\hat{x}, \hat{y})\} \\ &= F^{-1}\{R\{F\{\hat{h}(\hat{x}, \hat{y})\}\}\} \end{aligned} \quad (1)$$

と表される。ここで $F\{\}$ はフーリエ変換であり、

$$\hat{H}(\hat{u}, \hat{v}) = F\{\hat{h}(\hat{x}, \hat{y})\} \quad (2)$$

とする。ここで、 (\hat{u}, \hat{v}) と (u, v) はそれぞれ平行平面と傾いた平面での空間周波数である。二つの座標系間の回転変換行列を、

$$\begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{pmatrix} = \mathbf{T} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \mathbf{T} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{pmatrix} \quad (3)$$

とすると、フーリエ空間での座標回転演算 $R\{\}$ は、

$$\begin{aligned} R\{\hat{H}(\hat{u}, \hat{v})\} &= \hat{H}(a_1u + a_2v + a_3w(u, v), a_4u + a_5v + a_6w(u, v)) \\ &= H(u, v) \end{aligned} \quad (4)$$

と表される。ここで $w(u, v) = \sqrt{\lambda^{-2} - u^2 - v^2}$ は傾いた平面に垂直な z 方向の空間周波数であり、 $H(u, v)$ は傾いた平面上での光波スペクトルである。最終的に傾いた平面上の光波分布は逆フーリエ変換を用いて、

$$h(x, y) = F^{-1}\{H(u, v)\} \quad (5)$$

で与えられる。

2.2 傾いた平面での遮蔽処理

Fig.1 にポリゴンによる背景光波の遮蔽手順を示す。光波遮蔽のためのマスク関数は、ポリゴンの存在する傾いた平面上で乗算する必要がある。そのため、上述の光波 $\hat{h}(\hat{x}, \hat{y})$ を背景光波とし、(a)に示すように、回転変換により傾いた平面上での背景光波を計算する。従って、ポリゴン形状マスクによる遮蔽処理は、

$$h'(x, y) = \text{Rot}\{\hat{h}(\hat{x}, \hat{y})\} \times m(x, y) \quad (6)$$

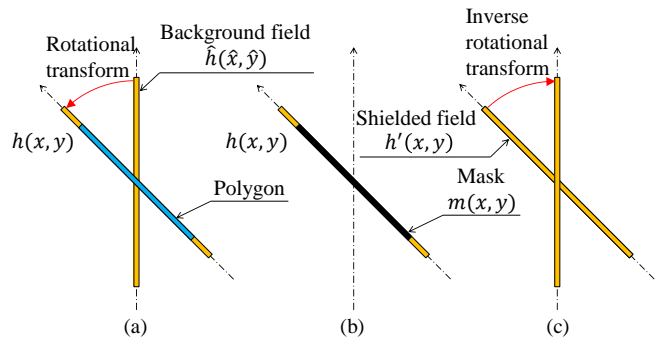


Figure 1. The procedure for rigorous light-shielding.

と表される。ここでマスク関数 $m(x, y)$ は傾いた平面上での 2 値関数であり、

$$m(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{inside polygon} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

と定義する。(c)に示すように、平行平面における遮蔽された背景光波は逆回転変換によって求められる。

$$\begin{aligned} \hat{h}(\hat{x}, \hat{y}) &= \text{Rot}^{-1}\{h'(x, y)\} \\ &= \text{Rot}^{-1}\{\text{Rot}\{\hat{h}(\hat{x}, \hat{y})\} \times m(x, y)\} \end{aligned} \quad (8)$$

3. 厳密な遮蔽処理の高解像度 CGH への適用

以上のように、厳密な光波遮蔽は 2 回の回転変換を必要とするため、数億のサンプリング点を持つ高解像度 CGH では計算コストが非常に大きくなる。本研究では、その計算コストを削減するために以下に示す手法を用いている。

3.1 背景光波のクリッピング

一般にポリゴンは背景光波よりもはるかに小さいため、ポリゴンによって遮蔽される部分は背景光波のほんの一部である。従って、背景光波全体ではなく、必要な範囲のみクリッピングして回転変換を行うことで、計算コストの削減が可能となる。ここで、背景光波の必要な範囲とは、ポリゴンに入射し光波遮蔽によって影響を受ける部分である。本研究では Fig.2 に示すように、この範囲をポリゴンからの光波の最大回折範囲としている。最大回折範囲はポリゴンの頂点座標と、背景光波のサンプリング間隔で決まる最大回折角 θ_{\max} で決定される範囲である[3]。

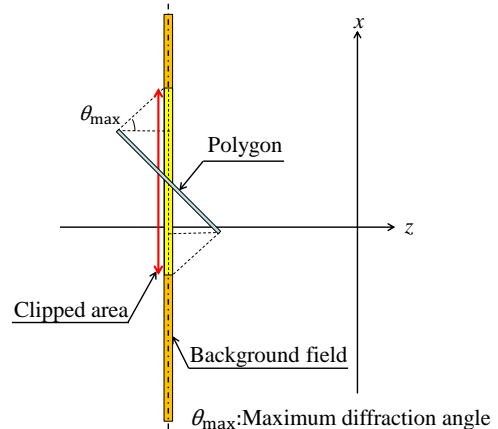


Figure 2. Clipping area of the background field.

3.2 スイッチバック法で必要なサンプリング範囲

Fig.3 に示すように、傾いた平面でのサンプリング範囲はクリッピングした部分の背景光波が回折する範囲を全て含んでいる必要がある。これはクリップした光波の情報喪失を防ぐためであるが、ポリゴンが平行平面に対して大きな傾き ϕ を持つ場合には、このサンプリング範囲は非常に大きくなり、無限大になる場合もある。しかし本研究では、遮蔽処理手順としてスイッチバック法を用いているため、この問題が生じない[7].

これは、スイッチバック法では Babinet の原理に基づいて遮蔽処理を行うため、Fig.4 に示すように、光波遮蔽を(a)に示すマスクではなく、(b)に示す開口を用いて行うためである。これにより傾いた平面で必要な光波は開口に入射する部分のみに限定されるため、回折光波全体を計算する必要がなくなる。

3.3 逆回転処理の最適化

Fig.5 は回転変換によるフーリエ空間でのサンプリング領域の推移を示す。(a)に示すように、FFT を用いるためフーリエ空間でのサンプリング領域の形状は矩形となる。しかしながら、(b)に示すように、(4)式の座標回転演算 $R\{\}$ によりこのサンプリング領域は歪み、スペクトル $H(u, v)$ は大きくシフトする。これをそのまま逆 FFT するのは効率が悪いので、回転変換ではシフト座標系、

$$(\tilde{u}, \tilde{v}) = (u - u_0, v - v_0) \quad (9)$$

を導入している。ここで、 $(u_0, v_0) = (a_7 / \lambda, a_8 / \lambda)$ である。従って、傾いた平面での光波は次のように表される[10].

$$h(x, y) = F^{-1}\{\tilde{H}(\tilde{u}, \tilde{v})\} \exp[i2\pi(u_0x + v_0y)] \quad (10)$$

その結果、(c)に示すようにスペクトル $\tilde{H}(\tilde{u}, \tilde{v})$ は原点付近に位置するが、光波 $h(x, y)$ にはキャリア成分である平面波因子が生じ、これを含めて処理しなければならない。しかしこの平面波因子は非常に高い空間周波数となる問題点がある。そこで、本研究ではスペクトル $\tilde{H}(\tilde{u}, \tilde{v})$ の逆フーリエ変換 $F^{-1}\{\tilde{H}(\tilde{u}, \tilde{v})\}$ について、

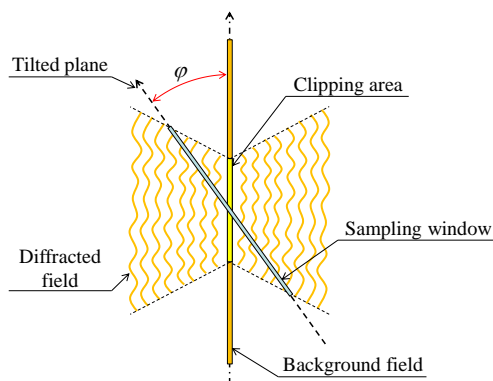


Figure 3. The sampling window required for avoiding information loss in the tilted plane.

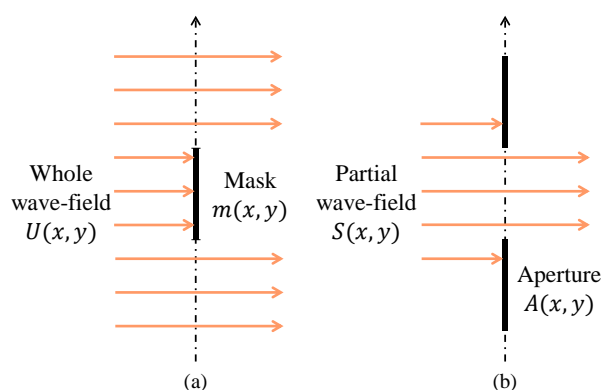


Figure 4. Light-shielding by the mask (a) and aperture (b). These can be equivalent to each other by using Babinet's principle and a partial field propagation [12]

$$\tilde{h}'(x, y) = F^{-1}\{\tilde{H}(\tilde{u}, \tilde{v})\} \times m(x, y) \quad (11)$$

として遮蔽処理する。省略した平面波因子は逆回転変換のフーリエ変換で復活し、

$$F\{h'(x, y)\} = F\{\tilde{h}'(x, y) \exp[i2\pi(u_0x + v_0y)]\} = H'(u + u_0, v + v_0), \quad (12)$$

とする。ここで、 $H'(u, v) = F\{\tilde{h}'(x, y)\}$ である。これにより高周波のキャリア成分を直接扱うことなく、シフト処理のみで計算ができる。(e)のシフトしたス

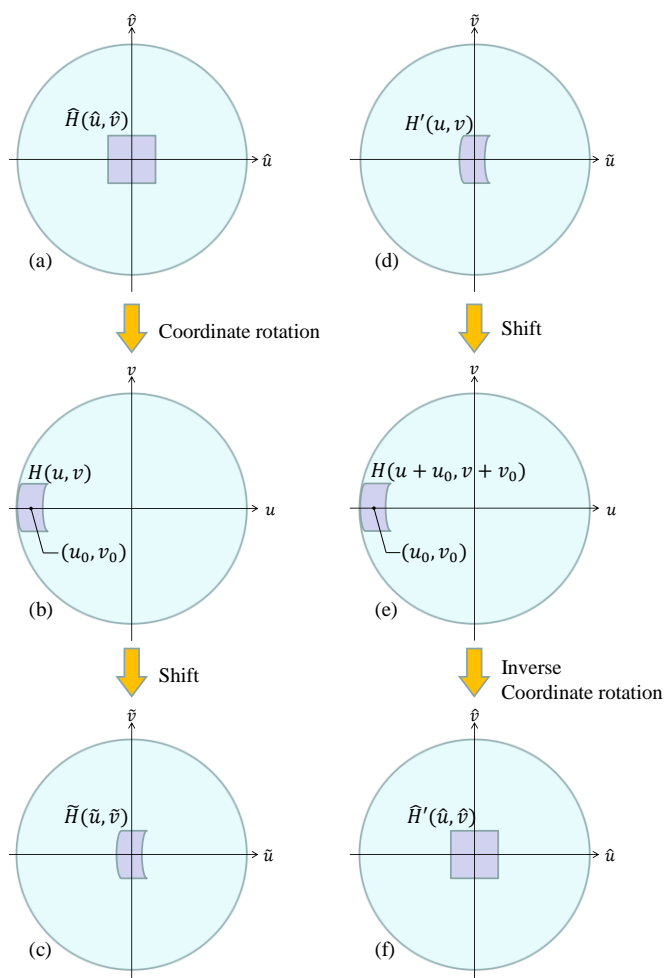


Figure 5. Transition of sampling area in Fourier space.

謝辞

本研究は、日本学術支援振興会の科研費(24500133)、および平成23年度関西大学学術研究助成金(共同研究)の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] K. Matsushima, H. Nishi, and S. Nakahara, "Simple wave-field rendering for photorealistic reconstruction in polygon-based high-definition computer holography," *J. Electron. Imaging* **21**, 023002 (2012).
- [2] K. Matsushima, "Computer-Generated Holograms for Three-Dimensional Surface Objects with Shade and Texture," *Appl. Opt.* **44**, 4607-4614(2005).
- [3] K. Matsushima, and S. Nakahara, "Extremely High-Definition Full-Parallax Computer-Generated Hologram Created by the Polygon-Based Method," *Appl. Opt.* **48**, H54-H63 (2009).
- [4] K. Matsushima, and S. Nakahara, "Stepping closer to the perfect 3D digital image," *SPIE Newsroom*, (6 Nov. 2012). DOI:10.1117/2.1201210.004526.
- [5] K. Matsushima, and A. Kondoh, "A Wave Optical Algorithm for Hidden-Surface Removal in Digitally Synthetic Full-Parallax Holograms for Three-Dimensional Objects," *SPIE Proc.* **5290**, 90-97(2004).
- [6] A. Kondoh, and K. Matsushima, "Hidden Surface Removal in Full-Parallax CGHs by Using the Silhouette Approximation," *The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers J87-D-II*, 1487-1494(2004).
- [7] 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隠面消去法," 3次元画像コンファレンス, **66-69**(2011).
- [8] K. Matsushima, Y. Arima, and S. Nakahara, "Digitized holography: modern holography for 3D imaging of virtual and real objects," *Appl. Opt.* **50**, Iss 34, H278-H284 (2011).
- [9] K. Matsushima, "Exact Hidden-Surface Removal in Digitally Synthetic Full-Parallax Holograms," *SPIE Proc.* **5742**, 25-32(2005).
- [10] K. Matsushima, "Formulation of the Rotational Transformation of Wave Fields and Their Application to Digital Holography," *Appl. Opt.* **47**, D110-D116 (2008).
- [11] K. Matsushima, H. Schimmel, and F. Wyrowski, "Fast Calculation Method for Optical Diffraction on Tilted Planes Using the Angular Spectrum of Plane Waves," *Journal of the Optical Society of America* **A20**, 1755-1762 (2003).
- [12] 中村将樹, 松島恭治, 中原住雄, "超高解像度 CGH におけるBabinetの原理と部分光波伝搬を用いた隠面消去法," 映像学誌 **66**, 5, J136-J143 (2012).

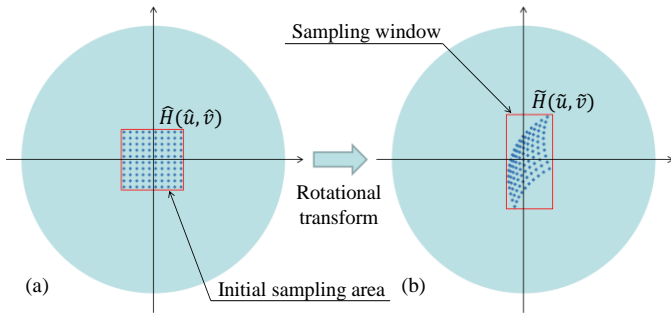


Figure 6. Optimization of sampling window in Fourier space.

ペクトルは、実際には(f)に示すように、逆座標回転演算 R^{-1} により2回目のFFTに適した矩形サンプリング領域に復元する。

また、Fig.6に示すように、回転角が大きい場合、フーリエ空間におけるサンプリング範囲は大きく変形する。そこで本研究では、Fig.6(a)に示すように、FFTによって与えられる初期状態のサンプリング領域に50×50の代表点を設定し、回転変換によるこれらの点群の位置を追跡し、全代表点を含む最小限の範囲をサンプリングする範囲としている。

4. 提案手法による光波遮蔽の効果

提案手法の有効性の確認するため、Fig.7に示す3Dシーンの光波を計算した。物体は140ポリゴンの円環体である。光波は、サンプリング数65,536×65,536、サンプリング間隔1μmである。従来のスイッチバック法と提案法で数値合成した光波の結像再生シミュレーションをFig.8に示す。この結果より、提案法による漏れ光波の減少を確認できる。

5. まとめ

高解像度のコンピュータホログラフィにおいて厳密な光波遮蔽法を適用する手法を提案した。この手法を用いた場合、遮蔽漏れ光波やオクルージョンエラーを低減できることが確認できた。

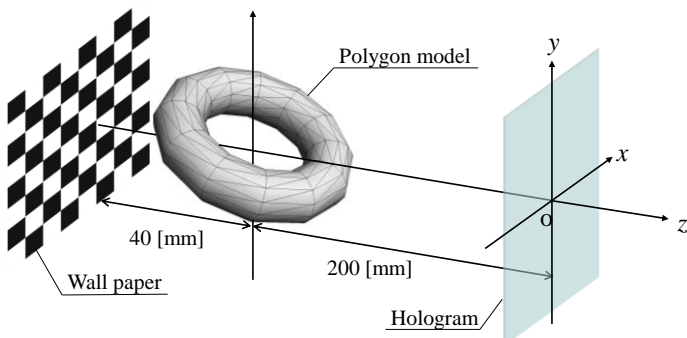
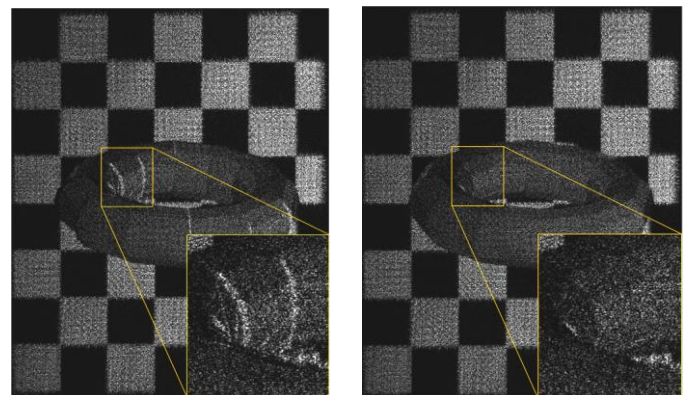


Figure 7. The 3D scene used for the examination of light-shielding.



(a) Conventional silhouette method

(b) This work

Figure 8. Comparison of two light-shielding techniques.