

# スイッチバック法を用いた ポリゴン単位隠面消去処理の性能とその改良

## Performance of polygon-by-polygon hidden surface removal using the switch-back technique and its improvement

増田幸勇<sup>1</sup>Sachio Masuda<sup>1</sup>松島恭治<sup>1</sup>Kyoji Matsushima<sup>1</sup>中原住雄<sup>2</sup>Sumio Nakahara<sup>2</sup><sup>1</sup>関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科<sup>1</sup>Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University<sup>2</sup>関西大学 システム理工学部 機械工学科<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Kansai University

### ABSTRACT

In high-definition 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. The light-shielding had been done for the whole object in the conventional technique to reduce computation time. However, this type of silhouette method is not valid for self-occluded objects; occlusion errors commonly occur. Definitely, polygon-by-polygon (P-P) silhouette light shielding is more effective than conventional object-by-object (O-O) shielding. However, P-P shielding is very time-consuming because the conventional P-P shielding requires the same number of whole-field propagation as the obstacles, i.e. the polygons in this case. In order to solve the problem, a new technique called the switch-back technique has been proposed for reducing the computation time. This research reports the performance of the switch-back technique, especially in cases where an object is divided into sub-objects.

**Keywords:** computer holography, computer-generated hologram, hidden-surface removal, silhouette method

### 1. はじめに

我々が近年報告しているレーザーリソグラフィ技術とポリゴン法[1]に基づく高解像度計算機合成ホログラム(Computer-Generated Hologram : 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[2, 3].このような高解像度コンピュータホログラフィの特徴は、ステレオグラムと違って深い奥行感が得られることであり、オクルージョンが生じるシーンにおいて連続的な運動視差が再生されることがこれに寄与していると考えられる.

この様なオクルージョンを再生するためには、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が不可欠であり、我々の高解像度 CGH では、シルエット法[4, 5]を用いて物体単位で遮蔽を行ってきた[2].しかし、モデルに自己オクルージョンがある場合には、物体単位では完全な遮蔽はできず、ポリゴン単位での遮蔽処理が必要となる.

しかしながら、シルエット法ではマスクの数だけ光波の

伝搬計算処理が必要であるため、ポリゴン単位の処理では計算時間が長大化する問題があった.その問題を解決するために、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と呼ぶ手法が提案されており[6], この手法では物体を分割することにより計算時間が短縮できると考えられる[7].そこで本研究では、複数の物体モデルで物体を分割した場合について、スイッチバック法とポリゴン法を用いた物体光波計算時間の短縮の効果を測定し、その計算量から推定される最適な分割数について報告する.

### 2. スイッチバック法

スイッチバック法は、従来のシルエット法で用いられる2値シルエットマスクを逆転したシルエット開口を用いる手法である. ポリゴン単位遮蔽の場合、ポリゴンのシルエット面積は全光波に比べて極めて小さく、シルエット開口による遮蔽では開口部分の光波のみが必要であるため、伝搬計算に必要なサンプリング数を大きく削減できる. マスクの代わりに開口を用いても、バビネの原理により従来のシルエット法と等価な処理が行えることが示されている[6].

本研究で用いた座標系とスイッチバック法の手順をFig.1 に示す. いま、物体近傍にホログラムと平行な平面を設定する.これを物体平面 V と呼び、この物体平面上

---

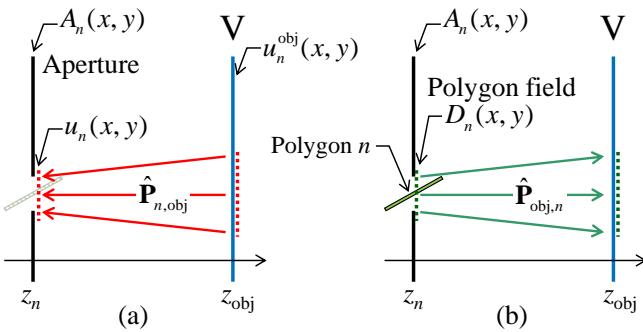
増田幸勇

<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)



**Fig. 1** The procedure for the single step of the switch-back technique.

で物体光波を求める。物体が  $N$  個のポリゴンから成り、ポリゴンが物体空間の奥から順に  $n=0, \dots, N-1$  として番号付けされているとすると、スイッチバック法による光波遮蔽の 1 ステップは次の連立漸化式で記述される[8]。

$$u_n(x, y) = \hat{\mathbf{P}}_{n, \text{obj}} \{u_n^{\text{obj}}(x, y)\} \quad (1)$$

$$u_{n+1}^{\text{obj}}(x, y) = u_n^{\text{obj}}(x, y) + \hat{\mathbf{P}}_{\text{obj}, n} \{D_n(x, y) - A_n(x, y)u_n(x, y)\} \quad (2)$$

ここで、(1)式は Fig.1(a)に対応しており、 $u_n^{\text{obj}}(x, y)$  は光波遮蔽した上で得られる  $0 \sim n-1$ までのポリゴンの物体平面上での物体光波を表している。記法  $\hat{\mathbf{P}}_{n, \text{obj}} \{u_n^{\text{obj}}(x, y)\}$  は、その物体光波のうちポリゴン  $n$  による遮蔽の影響を受ける部分のみをポリゴンが存在する奥行き位置  $z_n$  の平面に逆伝搬する演算処理を表しており、これがポリゴン  $n$  の背面より入射する光波  $u_n(x, y)$  となる。(2)式は Fig.1(b)に対応しており、 $D_n(x, y)$  は  $z_n$  での平面上で与えられるポリゴン光波、 $A_n(x, y) = 1 - M_n(x, y)$  は従来のシルエットマスク関数  $M_n(x, y)$  を逆転した開口関数である。(2)式では、入射光波を開口で遮蔽し、ポリゴン光波から減算し、物体平面へ順方向伝搬させてそれまでの物体光波に加算している。 $\hat{\mathbf{P}}_{\text{obj}, n}$  は  $z_n$  の位置の光波を物体平面  $V$  へ伝搬させる演算を表している。

この手法では、物体自体の背景光波が無い場合はポリゴン数  $N$  に対して伝搬計算回数は  $2N-1$  回、背面光波がある場合は  $2N$  回となる。単純なシルエット法における伝搬計算は  $N$  回であり計算回数自体は増えているが、スイッチバック法では全光波の一部のみを伝搬計算するため伝搬計算の計算時間は極めて短くなる。

### 3. 物体モデルの分割とその計算量の推定

#### 3.1 物体モデルの分割

以上で述べたようにスイッチバック法は従来のシルエット法と比べた利点は伝搬計算に必要なサンプリング数が少ないことである。しかしながら物体平面がポリゴンよりも遠いと、物体平面上でのポリゴン光波が回折により広がってしまうため必要なサンプリング数が増加してしまう。そのため Fig.2(a)に示すように、物体平面を物体モデルの中央付近に配置することで平均伝搬距離を減少させ、計算量を削減している。

しかしながら、物体モデルが奥行方向に長い場合は計算量の増加を避けられない。そのため、(b)に示すように物体を分割し複数の物体平面を設定する。まず一番奥のサブ

モデル  $O_0$  でスイッチバック法を用いて物体平面  $V_0$  上でのサブモデルの物体光波を求める。この物体光波を物体平面  $V_1$  上に全光波伝搬し、これをサブモデル  $O_1$  の背景光波として再び  $O_1$  についてスイッチバック法を行う。以下、順次これを繰り返す。これにより、物体平面とポリゴン間の平均距離が短くなるため、計算時間の削減が可能となる。しかし、物体の分割数を増やすとサブモデル間の全光波伝搬計算の回数も増加するため、一概に増やせばいいわけではなく、最適な物体分割数は物体モデルの形状に強く依存していると言える。

#### 3.2 物体分割した場合の計算量

前節で述べたように最適な物体分割数は対象の物体モデルの形状に強く依存すると考えられる。そこで、本研究では理論的に計算量を求めて最適な分割数の決定を試みた。

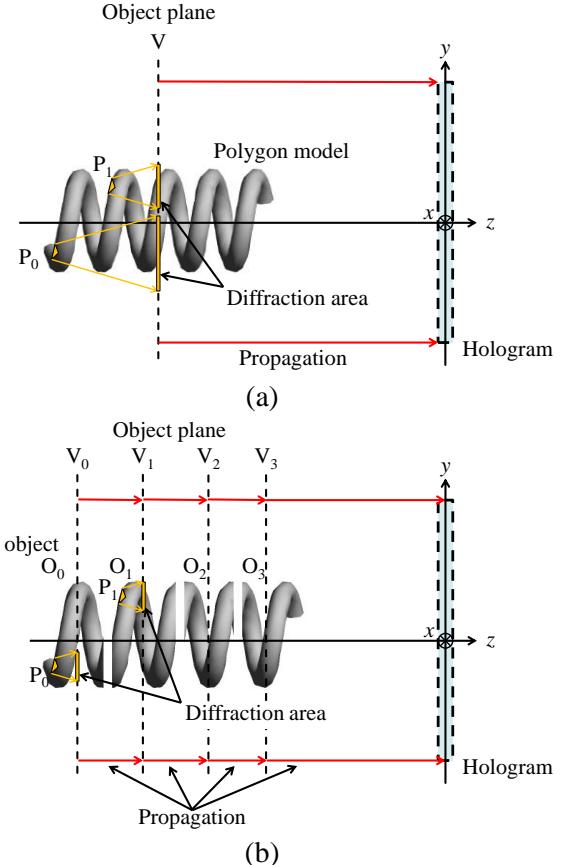
サンプリング数が  $M$  の高速フーリエ変換の計算量は、よく知られているように

$$\text{FFT}(M) = M \log_2 M \quad (3)$$

で表される。畳込み積分を用いた伝搬計算では 2 回の FFT と周波数領域における乗算処理からなるが、今回は FFT のみの計算量の検討を行う。物体分割を行なった場合の計算量  $C_{all}$  は

$$C_{all} = C_{sw} + C_{prop} \quad (4)$$

と表すことができる。ここで  $C_{sw}$  は各サブモデルにおけるスイッチバック法による隠面消去処理を行なった物体光波



**Fig. 2.** The principle of speedup of computation by splitting an object.

計算の計算量であり,  $C_{prop}$  はサブモデル間の並進伝搬計算の計算量であり, これは光波分布全体の伝搬計算であるため,

$$C_{prop} = 2\text{FFT}(M) \times (N_{div} - 1) \quad (5)$$

と表せる. ここで  $M$  は光波分布全体のサンプリング数で,  $N_{div}$  は物体分割数である. 今回の測定では物体後方の背景光波の設定をしていないが, 背景光波を設定する場合はその背景光波がサンプリング窓の全域に広がる場合がある. その場合はサブモデル間の伝搬計算においてエイリアシングを避けるため, サンプリング数を 4 倍に拡張する必要がある. そのため, その場合は(5)式において  $M$  が  $4M$  となる.

$C_{sw}$  の計算量を推定するためのモデルを Fig.3 に示す. (a) に示すように各サブモデルにおけるポリゴンと物体平面間の平均的距離は, モデルに外接する直方体の各軸方向の大きさを  $W_x \times W_y \times W_z$  とすると,

$$d = \frac{1}{4} \frac{W_z}{N_{div}} \quad (6)$$

となる. 次に, 簡単化のため, 対象物体の全ポリゴンの外接直方体の大きさの平均値を求め, そのような平均外接直方体に収まる典型的なポリゴンを  $P_{ave}$  で表した. これを用いてスイッチバック法における光波伝搬の際の平均サンプリング数  $N_{ave}$  を関数

$$N_{ave} = \xi(P_{ave}, d, \delta) \quad (7)$$

で表す. この関数は, ポリゴン  $P_{ave}$  から距離  $d$  離れたホログラムと平行な平面上における光波の最大回折範囲, およびその平面上での光波のサンプリング間隔  $\delta$  から, その最大回折範囲に含まれるサンプリング数を与えるもので

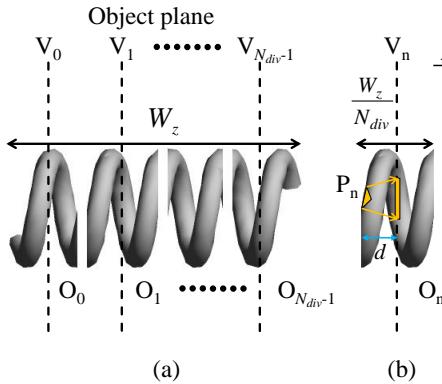


Fig. 3. Estimation of the computational complexity in the case of object splitting.

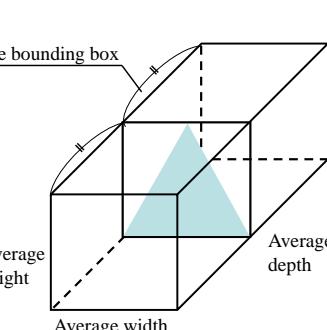


Fig. 4. Definition of the average polygon ( $P_{ave}$ ).

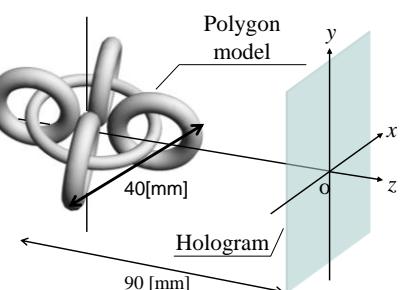


Fig. 6. The 3D scene used for performance measurements.

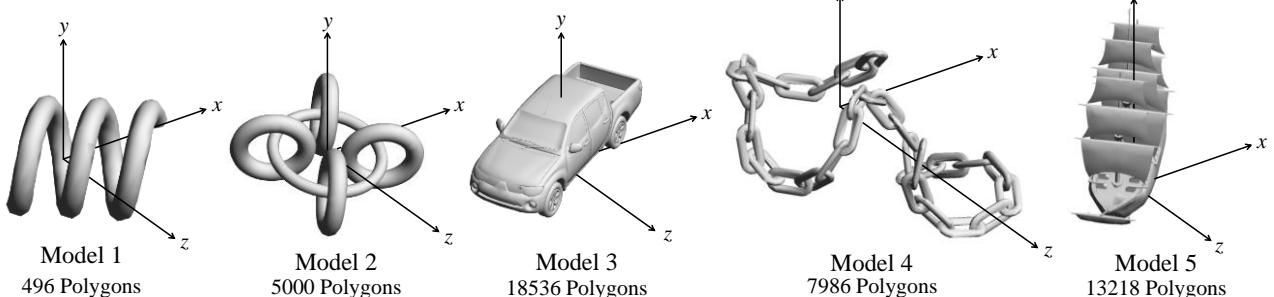


Fig. 5. Models used for performance measurements.

ある. ここで FFT を用いることを考慮して, 求まったサンプリング数は最小の 2 のべき乗に丸めている. なお, ポリゴン光波の最大回折範囲は, 文献[2]の方法により容易に推定することができる.

簡単化のため,  $P_{ave}$  はホログラムと平行であるとし, Fig.4 に示すように, その物体モデルに含まれるポリゴンの平均外接直方体の奥行き方向の中心に位置する二等辺三角形を  $P_{ave}$  と設定した.

以上により, スイッチバック法における計算量  $C_{sw}$  は, 順方向と逆方向の 2 回の伝搬計算とポリゴン光波の計算に必要な計算量として

$$C_{sw} = 6\text{FFT}(N_{ave}) \times N \quad (8)$$

と表せる. ここで  $N$  は可視ポリゴンの総数である.

#### 4. 計算時間の測定

Fig.5 に示す各モデルを用い, 物体分割数を変えて物体光波を計算し, その計算時間を測定した. これらのモデルは Fig.6 に示す 3D シーンに配置している. この時, どのモデルについてもモデルの横幅, すなわちモデルの外接直方体の横幅が 40 mm になるように大きさの規格化を行なっている. これらのモデルのパラメータを Table.1 に示す. 一方, 光波はサンプリング数  $65,536 \times 65,536$ , サンプリング間隔  $0.8\mu\text{m}$  としている. 計測に用いたハードウェア環境は CPU が Xeon X5680 (3.33GHz) × 2 であり, 物理コアの総数は 12 である. またメインメモリとして 288G bytes を搭載している. FFT のライブラリパッケージとしては Intel MKL 10.0 を用い, 計測プログラムは Microsoft Visual Studio 2008 を用いてコンパイルしている.

物体分割数を変化したときの計算時間の計測結果を Fig.7 に示す. またそれぞれのモデルにおける計算量  $C_{all}$  を Fig.8 に

示す。

以上の結果よりポリゴン数が多く複雑な形状を持つモデルや奥行き方向に大きなモデルにおいてもモデルを10程度以上に分割すると計算時間はほぼ一定になることが分かった。また、分割数を必要以上に増やした場合の計算時間の増加もほとんどないことがわかった。なお、どのモデルにおいても概ね2~4時間程度で計算が可能であった。

## 5.まとめ

本研究では、スイッチバック法において奥行き方向に物体を分割することにより計算時間を短縮できることを示した。この時、分割数には最適値があると考えられるが、計測および計算量の計算結果から、ある程度以上に分割すれば良く、分割数の最適値はそれほど重要でないことがわかった。ただし、これは物体に背景光波が無いことを想定した場合であり、それがある場合には、サンプリング数の4倍拡張により異なった結果になる可能性がある。

## 謝辞

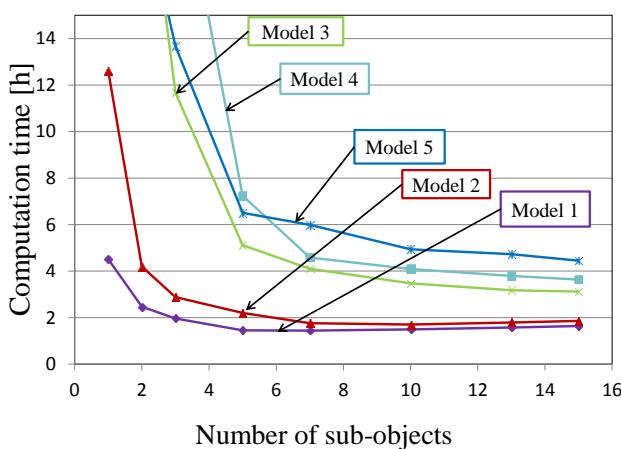
本研究は、日本学術振興会の科研費(24500133)、および文部科学省私立大学戦略基盤研究形成支援事業(平成25年~平成29年)の助成を受けたものである。

## 参考文献

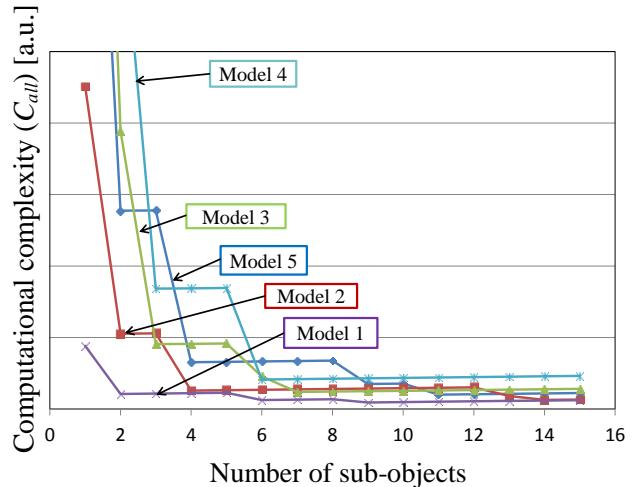
- [1] K. Matsushima, "Computer-Generated Holograms for Three-Dimensional Surface Objects with Shade and Texture," *Appl. Opt.* **44**, 4607-4614(2005).
- [2] K. Matsushima, and S. Nakahara, "Extremely High-Definition Full-Parallax Computer-Generated Hologram Created by the Polygon-Based Method," *Appl. Opt.* **48**, H54-H63 (2009).
- [3] K. Matsushima, and S. Nakahara, "Stepping closer to the perfect 3D digital image," SPIE Newsroom, (6 Nov. 2012). DOI:10.1117/2.1201210.004526.
- [4] 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).
- [5] 近藤暁靖、松島恭治、"シルエット近似を用いた全方向視差CGHの隠面消去," 電子情報通信学会論文誌 **J87-D-II**, (2004).
- [6] 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 2011, **66-69**(2011).
- [7] K. Matsushima, S. Nakahara, et al. "Recent Techniques for Hidden Surface Removal in Computer Holography," The 3rd Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP2013), Daejeon, (2013).
- [8] K. Matsushima, M. Nakamura, S. Nakahara: "Silhouette methods for hidden-surface removal in computer holography and its acceleration by switch-back technique" (to be published).

**Table 1.** Parameters of object models.

Name	Number of polygons	Number of visible polygons	Sizes of bounding box of object model ( $W_x \times W_y \times W_z$ )	Sizes of average polygon ( $P_{ave}$ ) ( $W_x \times W_y$ )
Model1	978	496	$40.0 \times 27.3 \times 33.5 \text{ mm}^3$	$33.469 \times 2.006 \text{ mm}^2$
Model2	5000	2500	$40.0 \times 26.2 \times 39.2 \text{ mm}^3$	$1.033 \times 0.950 \text{ mm}^2$
Model3	18536	9373	$40.0 \times 17.7 \times 31.8 \text{ mm}^3$	$0.554 \times 0.444 \text{ mm}^2$
Model4	7986	4008	$40.0 \times 25.0 \times 59.7 \text{ mm}^3$	$0.824 \times 0.870 \text{ mm}^2$
Model5	13218	6757	$40.0 \times 39.1 \times 40.8 \text{ mm}^3$	$0.784 \times 0.648 \text{ mm}^2$



**Fig. 7.** Measured computation time.



**Fig. 8.** Estimated computational complexity.