

# コンピュータホログラフィにおける スイッチバック法を用いた隠面消去の高速化手法

増田 幸勇<sup>†</sup> 松島 恭治<sup>†</sup> 中原 住雄<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

<sup>‡</sup> 関西大学 システム理工学部 機械工学科

〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

E-mail: masuda@laser.ee.kansai-u.ac.jp

**あらまし** コンピュータホログラフィで深い奥行き感を持つ三次元像を再生するためには、オクルージョン処理のために適切な隠面消去が不可欠であり、その手法としてスイッチバック法が提案されている。スイッチバック法では物体モデルを奥行き方向に分割することで計算時間が削減されるが、分割したサブモデルでは全光波伝搬が必要になるため分割数には最適値がある。本報告では、従来より高精度の最適分割数推定手法とその精度について述べる。

**キーワード** 計算機合成ホログラム, コンピュータホログラフィ, 隠面消去

## Acceleration of the switch-back technique for fast occlusion processing in computer holography

Sachio MASUDA<sup>†</sup> Kyoji MATSUSHIMA<sup>†</sup> Sumio NAKAHARA<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

<sup>‡</sup> Department of Mechanical Engineering, Kansai University

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

E-mail: masuda@laser.ee.kansai-u.ac.jp

**Abstract** Appropriate occlusion-processing is absolutely necessary for reconstruction of fine 3D images in computer holography. A method called the switch-back technique allows us to drastically reduce computation time of the occlusion-processing based on the polygon-by-polygon silhouette light-shielding. In this technique, further reduction of computation time can be achieved by splitting an object to some sub-objects along with depth direction. However, the number of numerical propagations between the sub-objects increases with increasing the number of sub-objects. As a result, there is an optimum number of sub-objects. In this paper, we propose a novel technique to estimate more accurate optimal number of sub-objects than that by the conventional technique.

**Keyword** CGH, Computer holography, hidden surface removal

### 1. はじめに

計算機合成ホログラム(以下, CGH)で美しい空間像を再生するためには, 物体後方からの光波が物体を透過しないようにする光波遮蔽処理が必要不可欠であり, その波動光学的手法としてシルエット法が提案されている[1]. 従来我々は, 高解像度 CGH では物体単位で遮蔽処理を行ってきた[2]. しかし, この方法では自己オクルージョンを処理できないため, 近年, ポリゴン単位シルエット法の計算量を削減したスイッチバック法を提案している[3,4].

スイッチバック法では, バビネの原理に基づき, シルエットマスクの代わりにシルエット開口を用いる事

で大幅に計算量を削減している. しかし, 物体が奥行き方向に長い場合, 光波の回折のため計算時間が長くなる問題がある. その場合は物体モデルを奥行き方向に分割することで, 計算時間の削減が可能であるが, 一方で分割されたサブモデル間では, 全光波伝搬が必要になるため, 物体モデルの分割数には最適値がある. そのため, 計算量を推定することにより, 事前に最適な物体モデル分割数を推定する手法を提案している[5]. しかしながら, この手法では条件によっては推定の精度が低くなる問題があった. そのため本報告では, より精度の高い最適分割数推定手法を提案し, 計測されたその精度について述べる.

## 2. スイッチバック法と物体分割

スイッチバック法では、バビネの原理に基づき、従来用いられた2値シルエットマスクを反転したシルエット開口を用いる[3,4]。この手法では開口を通過する光波のみの伝搬計算で遮蔽が行えるため、高速に光波遮蔽が可能な利点がある。

しかしながら Fig.1(a)に示すように、物体モデルが奥行方向に長い場合、光波の回折範囲が広がってしまうため、遮蔽処理に必要なサンプリング数が増加する問題がある。そのため Fig.1(b)に示すように、物体モデルを奥行方向に複数のサブモデルに分割し、最も奥のサブモデルについてスイッチバック法を用いて物体光波を計算し、次のサブモデルまで伝搬計算する。以上の手順を繰り返すことで、回折範囲を減少させ、計算時間を削減できる。しかし、物体モデル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、物体モデルごとに最適な物体分割数が存在する。

この最適分割数は3Dシーンによっても異なる。スイッチバック計算を行う物体全体の背景光波がある場合、畳み込み積分を用いた伝搬計算法では、縁の効果による誤差を防ぐためにサンプリング数の4倍拡張が必要になり、伝搬計算の計算量が大幅に増加する[5]。

## 3. 最適分割数の推定

本研究では、全体の計算量を高速フーリエ変換(以下FFT)の計算量として推定を行った。以下、サンプリング数が $M$ のFFTの計算量を

$$\text{FFT}(M) = M \log_2 M \quad (1)$$

と表記する。スイッチバック法の総計算量は

$$C_{\text{all}} = C_{\text{sw}} + C_{\text{prop}} \quad (2)$$

と表すことができる。ここで $C_{\text{sw}}$ は各サブモデルにおけるスイッチバック法の計算量であり、 $C_{\text{prop}}$ はサブモデル間の伝搬計算の計算量である。

### 3.1. 中間伝搬計算の計算量

サブモデル間の伝搬計算は光波全体の伝搬計算であるため、畳み込み積分による伝搬計算を用いた場合、その計算量は

$$C_{\text{prop}} = 2\text{FFT}(M) \times (N_{\text{div}} - 1) \quad (3)$$

と表せる。ここで $M$ は光波全体のサンプリング数、 $N_{\text{div}}$ は物体モデル分割数である。2節で述べたとおり、物体後方に背景を設定するなどした場合には、光波がサンプリング窓全域に広がるため、サンプリング数を4倍に拡張する必要がある。そのため(3)式において $M$ が $4M$ となる。

## 3.2. サブモデルに対するスイッチバック法の計算量

サブモデルに対するスイッチバック法の計算量は、ポリゴン光波の最大回折範囲を覆うように設定したサンプリング窓に対する、光波の往復2回の伝搬計算と2回のFFTを必要とするポリゴン光波自体の計算によって決定される。すなわち、このサンプリング窓内のサンプリング数を $N$ とすると、一つのポリゴンに対する計算量は $6\text{FFT}(N)$ と与えられる。従ってこの $N$ を推定することが必要である。

### 3.2.1. 平均外接直方体と平均ポリゴン

最大回折範囲を推定するためのモデルを Fig.2 に示す。本研究では、(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のおおよその平均距離を、

$$\bar{d} \approx \frac{1}{4} \frac{W_z}{N_{\text{div}}} \quad (4)$$

とした。ここで、 $W_z$ は物体モデル全体の外接直方体の $z$ 軸方向の大きさである。また、物体モデルの全ポリゴンの外接直方体の平均値を求め、(b)に示すように、この平均外接直方体の中央部に、ホログラムと平行な2等辺三角形を考え、これをこの物体モデルの平均ポリゴンとした。

### 3.2.2. 平均サンプリング数による手法(従来法)

平均ポリゴンの最大回折範囲を求める方法を Fig.3 に示す[2]。初めに(a)に示すように、平均ポリゴンの各頂点からの光波の回折矩形を求める。この回折矩形の大きさは、(b)に示すように、光波の最大回折角

$$\theta_x = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2\delta_x}\right), \theta_y = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2\delta_y}\right) \quad (5)$$

および平均距離 $\bar{d}$ から

$$\bar{d}_x \times \bar{d}_y = 2\bar{d} \tan \theta_x \times 2\bar{d} \tan \theta_y \quad (6)$$

と表せる。ここで、 $\delta_x, \delta_y$ は光波のサンプリング間隔である。平均ポリゴンからの光波の最大回折範囲の大きさは、(c)に示すように、

$$\bar{D}_x \times \bar{D}_y = (\bar{W}_x + \bar{d}_x) \times (\bar{W}_y + \bar{d}_y) \quad (7)$$

と表せる。ここで $\bar{W}_x$ と $\bar{W}_y$ は平均外接直方体の幅と高さである。これをサンプリング間隔で除算し、最小の2のべき乗に丸めたものがサンプリング数となる。従

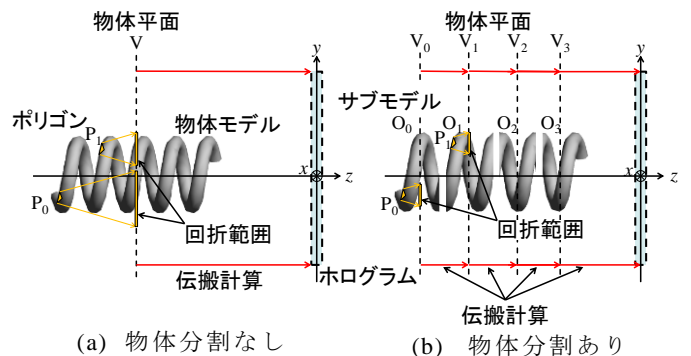


Fig.1 物体分割による高速化の原理

って、

$$N_{ave} = \text{CEIL}\left(\frac{\overline{D_x D_y}}{\delta_x \delta_y}\right) \quad (8)$$

となる．ここで  $\text{CEIL}(s)$  は、実数  $s$  を  $s$  以上で最小の 2 のべき乗整数に切り上げる処理を表す．

この手法では、平均ポリゴンに対する計算量にポリゴンの総数を乗算したものを、サブモデルに対するスイッチバック法の計算量  $C_{sw}$  とする[6]．従って、

$$C_{sw} = 6\text{FFT}(N_{ave}) \times N \quad (9)$$

となる．ここで  $N$  は可視ポリゴンの総数である．

### 3.2.3. 個別サンプリング数による手法(提案法)

前節の手法は、4 倍拡張を行わない場合には良好な推定結果を与える．しかし 4 倍拡張が必要な場合の精度は高くなかった．そのため平均ポリゴンから個別ポリゴンのサンプリング数を推定する手法を考案した．

この手法における計算量は

$$C_{sw} = \sum_{p=0}^{N-1} 6\text{FFT}(N_p) \quad (10)$$

と表せる．ここで、 $N_p$  はポリゴン  $p$  に対する推定サンプリング数である．この手法では、前節と同様に平均ポリゴンを用いるが、個別のポリゴン  $p$  の最大回折範囲をそのポリゴンと物体平面の実際の距離  $d_p$  から求める．すなわち、ポリゴン  $p$  の頂点の回折矩形を

$$d_{x,p} \times d_{y,p} = 2d_p \tan \theta_x \times 2d_p \tan \theta_y \quad (11)$$

とする．そのためポリゴン光波の最大回折範囲は

$$D_{x,p} \times D_{y,p} = (\overline{W_x} + d_{x,p}) \times (\overline{W_y} + d_{y,p}) \quad (12)$$

となる．そして先程と同様に、

$$N_p = \text{CEIL}\left(\frac{D_{x,p} D_{y,p}}{\delta_x \delta_y}\right) \quad (13)$$

としてサンプリング数を推定する．

## 4. 計算時間の測定

Fig.4 に示す各物体モデルを用い、物体分割数を変えてスイッチバック法により物体光波を計算し、その計算時間を測定した．これらのモデルは Fig.5 に示す 3D

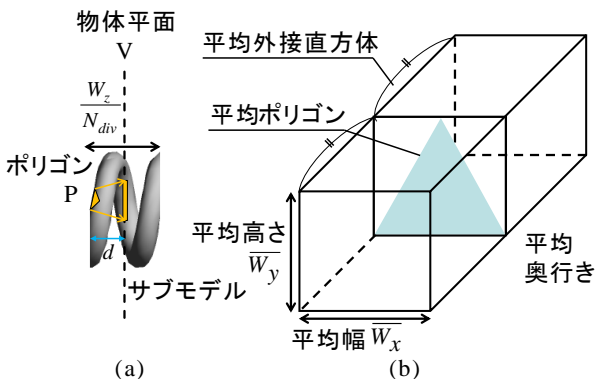


Fig.2 サブモデルに対する計算量推定のモデル

シーンに配置している．この時、いずれのモデルについても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．これらのモデルの詳細なパラメータは文献[7]で述べている．

計算した CGH では、サンプリング数  $65,536 \times 65,536$ 、サンプリング間隔  $0.8 \mu\text{m}$  である．計測に用いたハードウェア環境は CPU が Xeon X5680 (3.33GHz)  $\times 2$  であり、物理コアの総数は 12 である．メモリは 288G bytes 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．

物体分割数を変化させた時の計算時間の計測結果を Fig.6 に示す．また各手法の誤差を相対的計算時間誤差

$$\Delta T = \frac{(T_{\text{measure}} - T_{\text{estimate}})}{T_{\text{measure}}} \quad (14)$$

$T_{\text{measure}}$ : 真の最適分割数による計算時間

$T_{\text{estimate}}$ : 推定した最適分割数による計算時間

として Fig.7 に示す．

さらに、CGH のサンプリング数を変化させ、推定誤差  $\Delta T$  の平均値の変化を調べた．この測定では、Fig.5 中の距離とサイズを CGH サイズに比例して変化させている．ただし、ポリゴン数とサンプリング間隔は同一のままである．この結果を Fig.8 に示す．

以上の結果より、4 倍拡張がない場合は分割数を 10 程度以上分割すると計算時間はほぼ一定となるが、4 倍拡張がある場合は分割数を必要以上に増加させるとむしろ計算時間が長くなることがわかる．また 4 倍拡張を行う場合の最適分割数の推定では、提案法で推定した場合には、真の最適分割数による計算時間との相対誤差が最大で 5%、平均約 1.7% となることがわかった．一方、従来法では最大誤差 24%、平均 9.8% となるため、大幅な精度の向上が見られた．また、Fig.8 に示されている通り、電子ホログラフィのように CGH のサンプリング数が少ない場合においても、提案法による推定の精度が良好な結果を示した．ただし、提案法

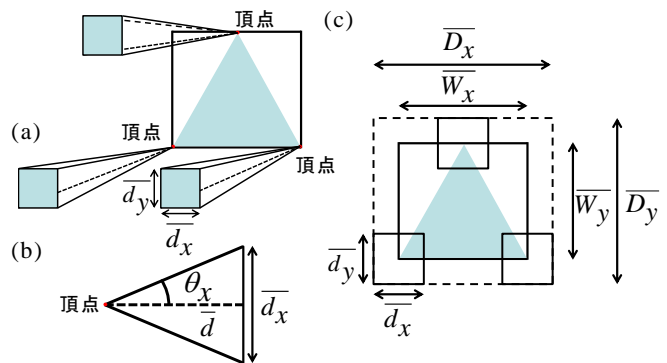


Fig.3 ポリゴン光波の最大回折範囲の推定

による推定は、式(10)自体の計算時間が物体モデルのポリゴン数に比例するため、短時間での推定が重要な場合には問題がある。

## 5. まとめ

本研究では、スイッチバック法における最適な物体分割数を推定する手法を示した。提案法は、従来法に比較して推定自体の計算時間は長くなるものの推定精度が高いことを示した。

### 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。

## 文 献

- [1] 近藤暁靖, 松島恭治, 電子情報通信学会論文誌 **J87-D-II**, (2004).
- [2] K. Matsushima, and S. Nakahara, *Appl. Opt.* **48**, H54-H63 (2009).
- [3] 中村将樹, 松島恭治, 中原住雄, 3次元画像コンファレンス 2011 講演論文集, **66-69**(2011).
- [4] 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).
- [5] K. Matsushima, T. Shimobaba, *Optics Express* **17**, 19662-19673 (2009).
- [6] 増田, 松島, 中原, 3次元画像コンファレンス 2014 講演論文集, **107-110** (2014).

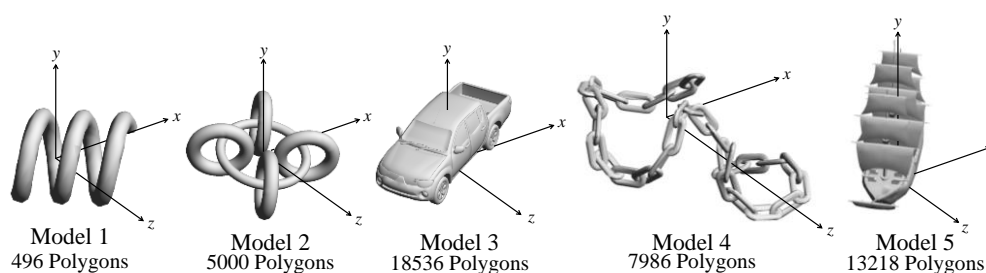


Fig.4 測定に用いたモデル

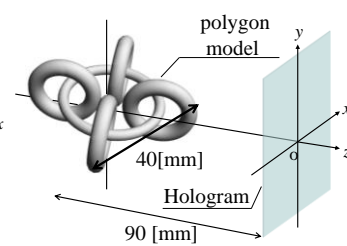
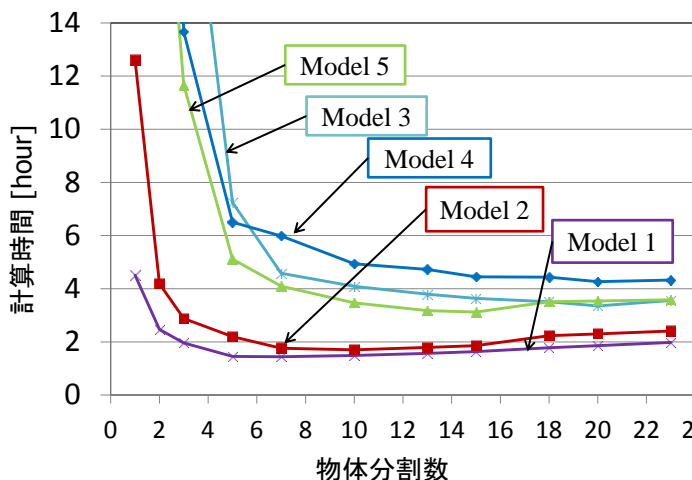
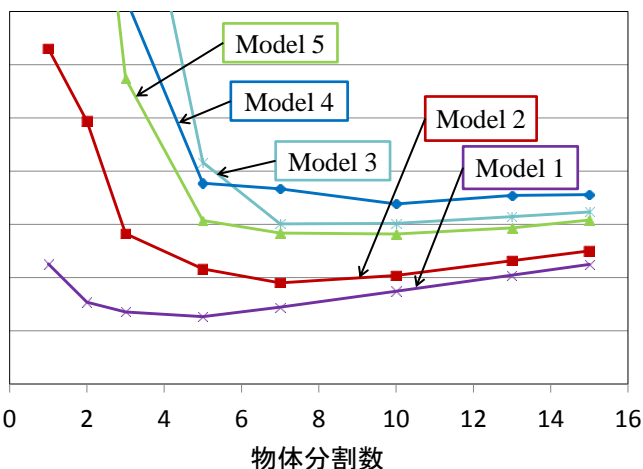


Fig.5 測定に用いた3Dシーン



(a)4倍拡張なし



(b)4倍拡張あり

Fig.6 物体光波計算時間の測定結果

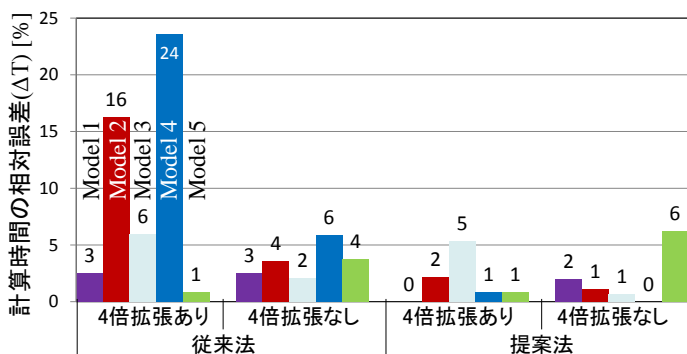


Fig.7 最適分割数の推定値による計算時間の相対誤差

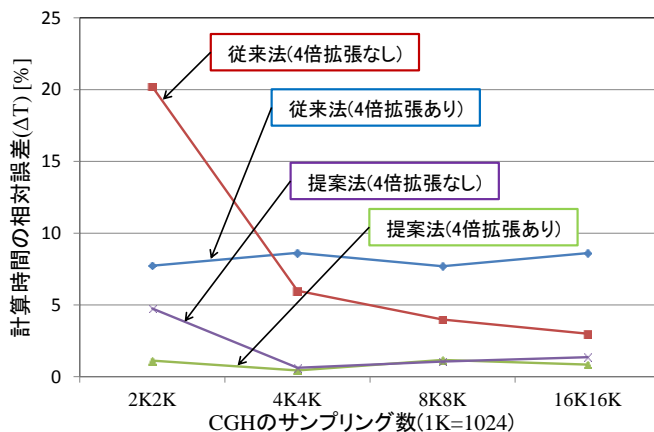


Fig.8 CGHのサンプリング数による平均誤差の変化