

高解像度計算機合成ホログラムにおける 点光源法とポリゴン法 の速度・画質比較

Comparison of computation time and image quality between high-definition CGHs calculated by the point cloud and polygon-based method

中辻憲昭¹ 松島恭治¹ 伊藤智義² 下馬場朋禄²

Noriaki Nakatsuzi¹ Kyoji Matsushima¹ Tomoyoshi Ito² Tomoyoshi Shimobaba²

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 千葉大学大学院 工学研究科

²Graduate School of Engineering, Chiba University

ABSTRACT

The point-based method or point cloud is commonly used for calculating object fields of computer-generated holograms (CGH). However, many high-definition CGHs, composed of more than billion pixels, were created by using the polygon-based method, because the point cloud was generally too time-consuming to calculate this kind of high-definition CGHs. However, recently, performance of GPUs has been increasing more and more and allow us to generate CGHs by point cloud much faster. In addition, the reconstructed surfaces look noisy in the conventional high-definition CGHs. We suspect that random phase used in the polygon-based method for diffusing light from surfaces causes the noises in optical reconstruction. Therefore, there is a great interest in a comparison of computation time and image quality between the polygon-based method and point cloud. In this paper, we measure computation time of object fields for quasi high-definition CGHs with the same 3D scene by the point cloud using one of the newest GPU and the polygon-based method using CPU. We actually fabricate these CGHs and compare the quality of optical reconstructed surfaces.

Keyword: CGH, GPU, 高速計算アルゴリズム

1. はじめに

近年, 計算機能力の向上と微細加工技術の進展により, “The Venus”[1]や“Brothers”といった光学ホログラフィに近い高解像度の計算機合成ホログラム(CGH)が作成されるようになった. 従来, 計算時間の問題のため, これらのCGHは一般にポリゴン法によって計算されていた. しかしこれらのCGHの再生像を良く見てみると, 再生された物体の表面がざらついているように見える. これは, ポリゴン法でポリゴン光波を拡散するために用いるランダム位相が原因と推測されている. しかし, 根本的に原理の異なる点光源法では, 従来このような大規模なCGHを計算できなかったため再生像を比較できず, これがポリゴン法に起因する問題かどうかは検証できなかった.

一方, 点光源法も, 差分法[2]やN-LUT法[3]といった高速化手法が提案されている. また, GPU(Graphics Processing Unit)による高速化の効果が大きく[4], GPU自体の性能も急速に向上している. そこで本研究では, GPUを用いた点光源法とCPUを用いたポリゴン法で, 同じシーンの準高解像度CGHを作成し, その計算時間と光学再生像の比較を行った.

2. 比較の手法

2.1 物体モデル

本研究で用いた物体モデルと座標系をFig.1に示す. このモデルのCGHを点光源法とポリゴン法により計算し, その再生像を比較した. (a)は平面のモデルで, その表面にはバイナリテクスチャとして文字がある. 一方, (b)は十二面体による立体モデルであり, やはり, その表面にはバイナリテクスチャとして文字がある. この様なモデルのCGHを計算し, 実際にそれを作成した. このCGHは32K×32Kの準高解像度のものである.

中辻憲昭

nakatsuzi@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

2.2 パラメータの設定

点光源法とポリゴン法は根本的に原理が異なるため、速度比較には公平なパラメータを設定する必要がある。速度比較に大きく影響するのは、主として点光源法の光源数である。ポリゴン法の計算時間もポリゴン数で変わるが、点光源法の光源数ほどの影響はない。そこで本研究では、人の視覚が有する視角に基づいて点光源数を決定し、両手法に公平なパラメータを設定した。

視力 1.0 の人が持つ眼の視角が 1/60 度であることから、視力 1.0 の観察者が CGH の前方に設置した再生照明光源と同じ距離から再生像を観察すると仮定し、その場合に点光源が分離して見えない最低の光源密度を設定した。具体的には、観察者は CGH から 25 cm 離れた位置から再生像を観察すると仮定した。実際に用いたその他のパラメータを Table 1 に示す。

3. CGHの計算手法

3.1 点光源法

この手法では、よく知られているとおり、仮想物体の表面に点光源を敷き詰めて、各光源から放出される球面波をホログラム面上で重ねあわせる。本研究では、 n 番目の点光源から放出される球面波を、ホログラム上のサンプリング点 $(x_i, y_j, 0)$ で

$$U_n(x_i, y_j) = \frac{a_n}{r_n(x_i, y_j)} \exp[ikr_n(x_i, y_j) + \phi_n] \quad (1)$$

とした。ここで、 a_n は振幅、 k は波数、 ϕ_n は初期位相である。また $r_n(x_i, y_j)$ は n 番目の点光源とホログラム面上のサンプリング点との距離

$$r_n(x_i, y_j) = \sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_j)^2 + z_n^2} \quad (2)$$

である。点光源数を N とすると、光波分布は

$$U(x_i, y_j) = \sum_{n=1}^N \frac{a_n}{r_n(x_i, y_j)} \exp[ikr_n(x_i, y_j) + \phi_n] \quad (3)$$

となる。従って、点光源法では総点光源数とホログラムの総ピクセル数の積だけ距離計算を行う必要があり、計算が長時間化するため、短縮化の手法が不可欠である。本研究では、差分法と N-LUT 法を試みた。

(1) 差分法 [2]

フレネル近似と同じ考え方で(2)式を近似すると

$$r_{n,i,j} \cong z_n^2 + \frac{(x_n - x_i)^2}{2z_n} + \frac{(y_n - y_j)^2}{2z_n} \quad (4)$$

となる。これを利用し、隣接したサンプリング点における距離計算を、加算のみの漸化式で距離計算する手法である。

ホログラム面上の隣接したサンプリング点 $(x_i, y_j, 0)$ 、 $(x_{i+1}, y_j, 0)$ の距離差分を $\Delta r_{n,i,j}$ 、 $\Delta r_{n,i,j}$ と $\Delta r_{n,i+1,j}$ の差分を C とすると、 $r_{n,i+1,j}$ は $r_{n,i,j}$ から以下のように求められる。

$$r_{n,i+1,j} = r_{n,i,j} + \Delta r_{n,i,j} \quad (5)$$

$$\Delta r_{n,i+1,j} = \Delta r_{n,i,j} + C \quad (6)$$

$$C = \Delta r_{n,i+1,j} - \Delta r_{n,i,j} = \frac{p_x^2}{z_n} \quad (7)$$

ここで、 p_x はホログラムの x 軸方向のピクセル間隔である。

(2) N-LUT 法 [3]

初期位相を無視して、(1)式を実部と虚部に分け、

$$U_n = a_n \{T_{\cos}(x_i, y_j; z_n) + iT_{\sin}(x_i, y_j; z_n)\} \quad (8)$$

とする。ここで、

$$T_{\cos}(x_i, y_j; z_n) = \frac{1}{r_n(x_i, y_j)} \cos[kr_n(x_i, y_j)] \quad (9)$$

$$T_{\sin}(x_i, y_j; z_n) = \frac{1}{r_n(x_i, y_j)} \sin[kr_n(x_i, y_j)] \quad (10)$$

である。 z_n を適当な間隔の区間に分けてこのようにテーブル化し、事前計算してメモリに格納する。このテーブルを参照し、各点光源の座標 (x_n, y_n, z_n) に応じてシフト

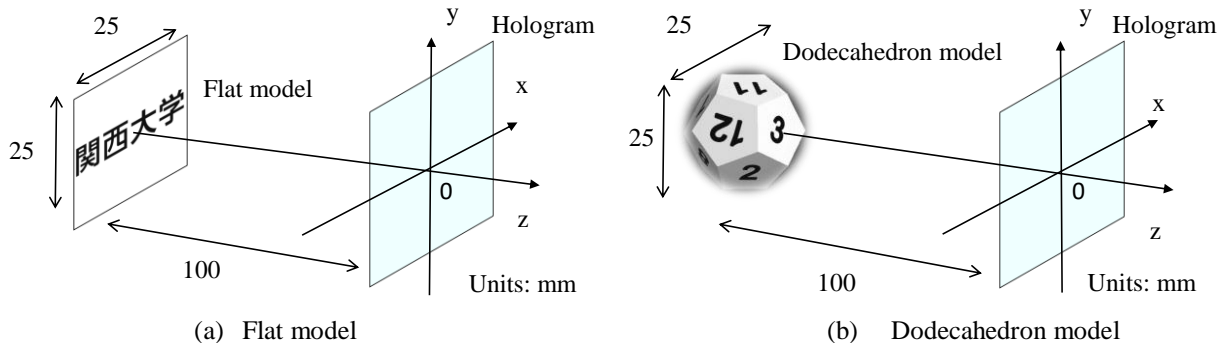


Fig.1 3D scenes of the CGHs.

しながら, 以下のように球面波を求める手法である.

$$U = \sum_{n=1}^N a_n \left\{ T_{\cos}(x_i - x_n, y_j - y_n; z_n) + iT_{\sin}(x_i - x_n, y_j - y_n; z_n) \right\} \quad (11)$$

なお, この手法では原理的に初期位相を設定することができないため, 初期位相の乱数化が必要な高解像度 CGH の生成には使えない. 本研究では, 点光源法の性能指数の測定においてのみ用いた.

3.2 ポリゴン法 [1,5]

仮想物体の表面をポリゴン形状の面光源と考え, 各面光源からの光波をホログラム上で重ね合わせる手法である.

面光源は表面関数と呼ばれる複素関数

$$h_n(x_n, y_n) = a_n(x_n, y_n) \exp[i\varphi_n(x_n, y_n)] \quad (12)$$

で表される. ここで, $a_n(x_n, y_n)$ は面光源の形状やテクスチャを表し, $\varphi_n(x_n, y_n)$ はポリゴン光波を拡散させる拡散位相である. これを光波と見なしてホログラム面に平行な光波複素振幅分布となるように回転変換する. また, 物体光波が光軸と平行に進むようにそのキャリア周波数をシフトする. この処理には, 2 回の FFT と補間処理が必要である.

4. 速度比較

4.1 計測環境

計測環境をTable 2に示す. 各手法が最大限の性能を発揮できるようにするため, 点光源法では, 最新のGPUを使用し, ポリゴン法では, 大規模なメモリを搭載できるサーバー用CPUを使用した.

4.2 点光源法の性能指数

点光源法とポリゴン法の速度比較の前に, 事前実験として点光源法の性能指数を測定した. 点光源法の計算時間は, 一般に

$$T = \tau \times (\text{光源数}) \times (\text{ピクセル数}) \quad (13)$$

となる. τ は比例係数であり計算手法の性能を表す. そこで, 点光源法の性能指数を $1/\tau$ と定義した. 性能指数 $1/\tau$ の単位は [1/sec] であり, 1秒間に可能な距離計算の回数を示す.

点光源法を単純に計算する場合 (Normal), 差分法 (Difference), N-LUT法の3つの手法の性能指数を測定した. 測定に用いたマシンはTable 2で示したPC2である.

測定ではFig.1(a)のFlat modelを用いた. しかし, Fig.1の本来のサイズでは時間がかかりすぎるため, 同じピクセル間隔のままピクセル数を $8K \times 8K$ に縮小し, それに比例して

Table 1 Parameters of the test CGHs.

Number of pixels	32,768 × 32,768	
Pixel pitches	0.8 μm × 0.8 μm	
Design wavelength	632.8 nm	
Model	Flat	Dodecahedron
Number of point sources (Point cloud)	60516	80962
Number of polygons (Polygon-based method)	200	72

Table 2 Parameters of PCs used for calculation.

PC1 (polygon-based method)	
CPU	Intel Xeon E5-2690 v2 (3.00 GHz)
Main memory	512 GB
Number of real cores	20
Software*	MKL 11.2/WFL 3.3.2/PSL 1.5
PC2 (point cloud)	
GPU	NVIDIA GeForce GTX TITAN X (1.08 GHz)
Global memory	12 GB
Number of CUDA cores	3072
Software	CUDA 7.5
Host CPU	Intel Core i7-5930K (3.50 GHz)

* WFL/PSL are software library distributed in our site.

Fig.1(a)のモデルサイズや観察位置の関係を縮小した. 従って, 光源数は変化せず60516である. また, 計算時間にはGPUへのデータ転送やテクスチャマッピング等に必要なおバーヘッドを含んでいる. また前述のとおり, N-LUT法では初期位相の設定ができないため, 単純計算と差分法でも, 初期位相を0とした. なお, 物体空間のどこに点光源があっても良いように, N-LUT法の各テーブルの大きさを $16K \times 16K$ に設定したため, テーブルのバイト数は2048MBとなった.

性能指数の測定結果をFig.2に示す. この結果から差分法が一番高速であることが分かった. また, N-LUT法が単純に計算する場合よりも遅いことが分かった. この原因として, GPUのSMM(Streaming Multiprocessor Maxwell)でキャッシュミスが生じ, グローバルメモリを参照している割合が大きいと考えられる.

この結果から, 本研究では(i)単純点光源法, (ii)差分法, (iii)ポリゴン法で計算した場合の3種類において, Fig.1で示

したシーンを再生するCGH

の計算時間を計測し, その光学再生像を確認した.

4.3 点光源法とポリゴン法の計算時間比較

計算時間の計測結果をFig.3に示す. 平面物体ではポリゴン法が, 十二面体では差分法が一番速く計算できることが分かった. 平面物体では回転変換が不要なため, 光波伝搬計算のみを行うポリゴン法の方が速く計算できたと考えられる.

5. CGH光学再生像の画質比較

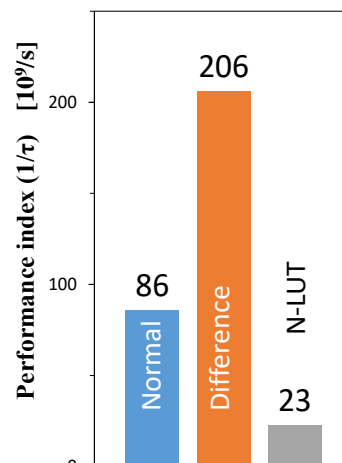


Fig.2 Measured performance index.

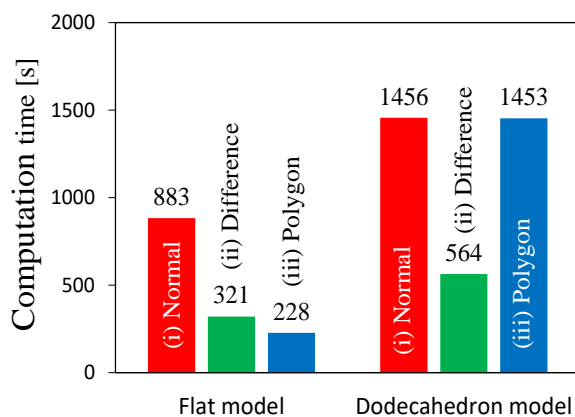


Fig.3 Measured computation time.

実際にFig.1のモデルの光波を計算し, 参照光と数値的に干渉してレーザーソングラフィでバイナリ振幅CGHを作成した. レーザー照明光源による光学再生像をFig.4に示す. この図から分かるように, いずれの手法でも再生像はほとんど変わらないことが確認できた.

6. まとめ

本研究では, 同じシーンを再生するCGHを点光源法とポリゴン法により作成し, その計算時間と画質の比較を行った. その結果, ホログラム面に平行な平面の物体のように回転変換が必要のない物体ではポリゴン法が, 十二面体のような複雑な物体は差分法が一番速く計算できることが分かった. 光学再生像においては, いずれの手法も見た目では変わらず, 再生像表面のノイズがポリゴン法に特有のものではないことがわかった.

7. 謝辞

本研究は, 日本学術振興会の科研費(15K00512), 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] K. Matsushima, S. Nakahara: "Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method", *Appl. Opt.* **48**, H54-H63 (2009).
- [2] 岩瀬進, 吉川浩: "差分法に基づくホログラムの高速計算法", *映情学誌* **52**, 899-901(1998).
- [3] S. C. Kim and E. S. Kim: "Effective generation of digital holograms of three-dimensional objects using a novel look-up table method", *Appl. Opt.* **20**, D55-D62 (2008).
- [4] N. Masuda, T. Ito, T. Tanaka, A. Shiraki, and T. Sugie: "Computer generated holography using a graphics processing unit", *Opt. Express* **14**, 603-608(2006).
- [5] K. Matsushima: "Computer-generated holograms for three-dimensional surface objects with shade and texture", *Appl. Opt.* **44**, 4607-4614(2005).

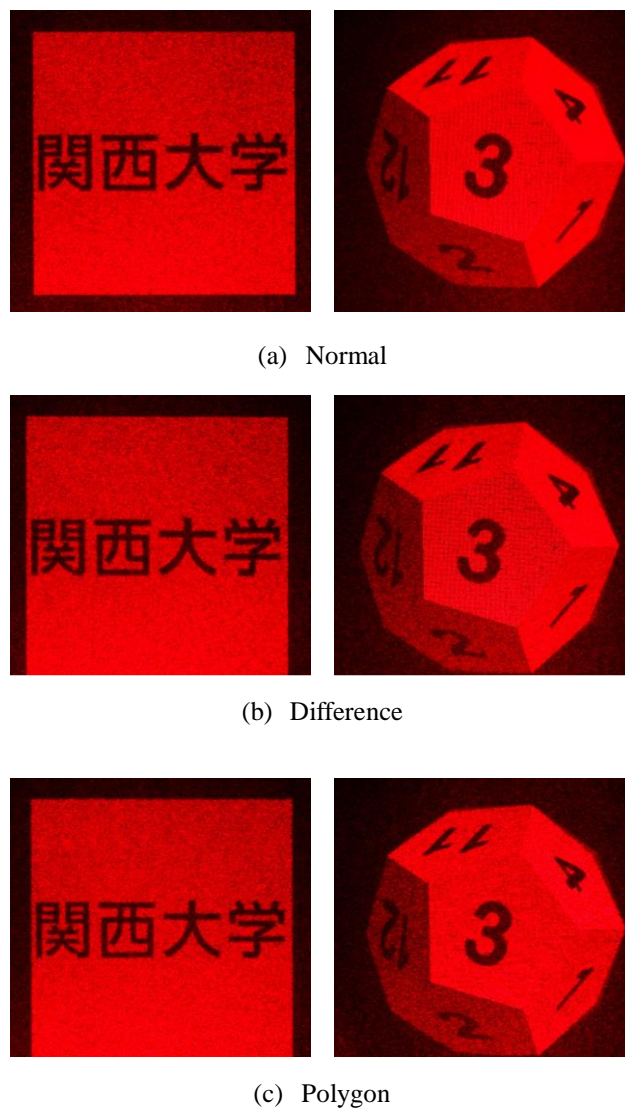


Fig.4 Optical reconstruction of CGHs.