

# ポリゴン法による大規模な全方向視差CGH 作成のための分割計算手法

Segmental Computation of Large-Scale Full-Parallax  
Computer-Generated Holograms in the Polygon Method

松島恭治<sup>1</sup> 中原住雄<sup>2</sup>

Kyoji Matsushima<sup>1</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 Eng., Kansai Univ.

<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 Eng., Kansai Univ.

## ABSTRACT

Novel techniques are presented for segmentation of frame buffer used for calculating large-scale CGHs by polygon method. In the techniques, wave fields of virtual objects are calculated in the segmentalized frame buffers and propagated by using the shifted Fresnel method. As a result, large CGHs can be calculated even in the case that the whole wave field can not be stored in main memory. To verify the techniques, a full-parallax CGH with the size of four billion pixels is calculated and fabricated by a laser lithography system. The CGH reconstructs truly fine 3D images of a smooth surface object accompanied with a large depth of sensation. Optical reconstruction of the CGH is demonstrated.

**Keywords:** CGH, ポリゴン法, シルエット法, 隠面消去, 全方向視差, 空間像

## 1. はじめに

多くの立体画像では、人が立体物を認知する様々な要因の一部のみを用いることにより観察者に生理的な立体感を与えていた。それに対して、計算機合成ホログラム(以下 CGH)は光の波面そのものを再現するため究極の3次元立体ディスプレイとして研究が進んでいる。

しかしながら、従来の CGH から得られた光学再生像は、その潜在的な能力を示すものとは言えなかった。その理由は、十分な画像サイズと視域を得るために莫大な解像度が必要であり、オクルージョンが生じるような表面モデル物体に対してそのような大規模な全方向視差 CGH の計算を行うことが困難なためであった。

CGHにおいて仮想物体からの光波を計算するためには点光源法がしばしば用いられている。この手法は実装が簡単であるため、表参照法、差分法、漸化式法などのアルゴリズムや、専用プロセッサや GPU を用いた高速化手法が種々提案されている。また並列分散処理がしやすい利点も有している。しかし、表面モデルの物体に対して全方向視差 CGH を計算した場合、点光源数とピクセル数の積が巨大な値となるため、演算には長時間を要する。また、さらに問題であるのは光波の遮蔽処理を簡単に行えないため、オクルージョンを生じる

CGH を計算できないことである。

一方、著者らは面光源を用いるポリゴン法[1]を提案している。この手法で物体表面を構成するポリゴンの数は点光源に比べて圧倒的に少なくて済むため、計算が高速になる利点がある。そのため、この手法を発展させ、3 角形ポリゴンに限定し、面の拡散性やテクスチャを犠牲にすることによりポリゴン法の計算をさらに高速化する手法もすでに提案されている[2,3]。

しかしながら、ポリゴン法は波動光学的手法であり、回折伝播計算を多用することから点光源法に比べて分割計算が難しいという問題点があった。そこで、本報告では光波を格納するフレームバッファを分割することによりポリゴン法で大規模な CGH を計算する手法を述べる。

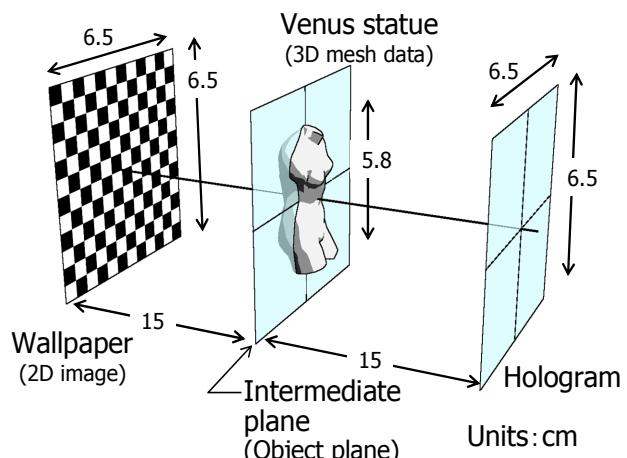


Fig.1 The 3D scene of “The Venus” CGH.

Table 1. Parameters used for creation of the CGH

Hologram	
Pixel sizes	$65,536 \times 65,536$ pixels
Pixel pitches	$1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$
Hologram type	Binary amplitude
Reconstruction wavelength	632.8 nm
Venus stature*	
Number of polygons (front-face only)	718
Dimensions (W × H × D)	$26.7 \times 57.8 \times 21.8 \text{ mm}^3$
Wallpaper	
Pixel sizes of texture image	$256 \times 256$ pixels
Dimensions (W × H)	$65.5 \times 65.5 \text{ mm}^2$

\*The mesh data of the Venus object is provided courtesy of INRIA by the AIM@SHAPE Shape Repository.

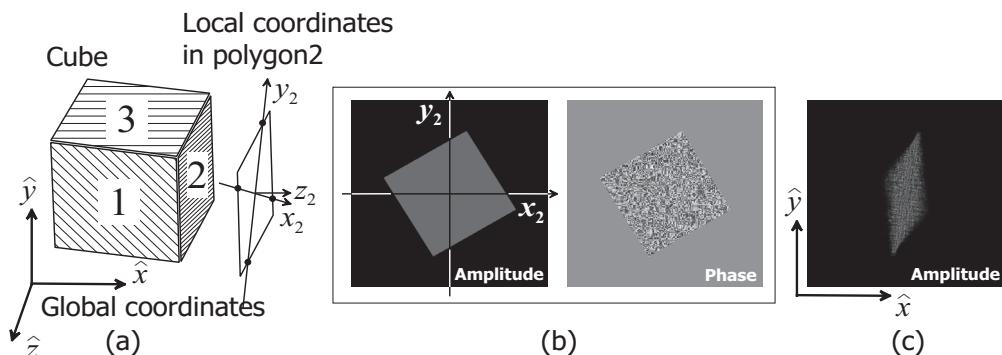


Fig.2. An example of calculating polygon fields; (a) a polygon of a cubic object, (b) the surface function in local coordinates, (c) the resultant wave field in global coordinates.

また本手法による大規模な CGH の一例として、同じく著者らが提案している波動光学的遮蔽計算法であるシルエット法[4,5]を用いて遮蔽計算を行い、レーザーリソグラフィ技術で作製した 40 億ピクセル規模の全方向視差 CGH を紹介する。この CGH は両眼視が可能であり、簡易的ではあるが相互オクルージョンを示すため、観察者に強い印象を与えるものになっている。

## 2. 計算機合成ホログラム “The Venus”

“The Venus”と名づけた CGH の構成を Fig.1 に示し、主なパラメータを Table 1 に示す。この CGH では、総ピクセル数が 40 億ピクセルに達する。1 ピクセルは  $1 \mu\text{m}$  四方の正方形であるので、CGH の大きさは約  $6.5 \times 6.5 \text{ cm}^2$  である。ビーナス像は 718 ポリゴンのメッシュデータで表現されている。ビーナス像の背後には立体感を増強するために市松模様の背景画像(壁紙)を配置している。

## 3. ポリゴン法

ポリゴン法は、点光源ではなく、ポリゴン形状の面光源光波を計算する手法である[1]。Fig.2 では例として立方体側面のポリゴン 2 の複素振幅分布を求めていている。この手法ではまずポリゴン 2 と同一平面上に複素振幅分布を設定する。Fig.2(b)に示すように、この分布は振幅がポリゴン形状とテクスチャを表現しており、位相が散乱性を与えている。この光波分布を回転変換[6]およびキャリア周波数のシフト[1]により、(c) に示すようなホログラムと平行な面内での光波分布に変換している。この手法ではポリゴン 1 枚につき 2 回

の FFT と 1 回の補間演算が必要である。

ビーナス像の光波はビーナス像を横切る中間面内で計算している。これは、ホログラム面のようにポリゴンから離れた面上では光の拡散により計算範囲が広がり、計算時間が不要に長くなるためである。また、これは次節で述べるシルエット法による光波遮蔽を行ったためでもある。

## 4. シルエット法

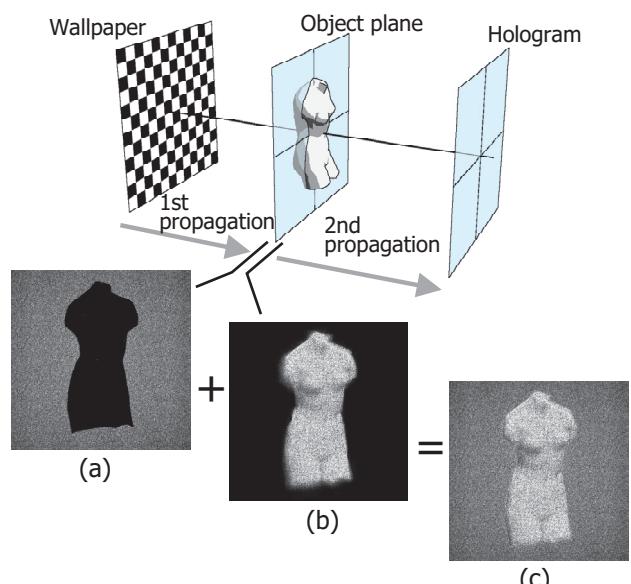


Fig.3. The silhouette-masking method; (a) the masked wave field of wallpaper, (b) the object field, (c) the combined wave field. All images are the amplitude image in the intermediate plane.

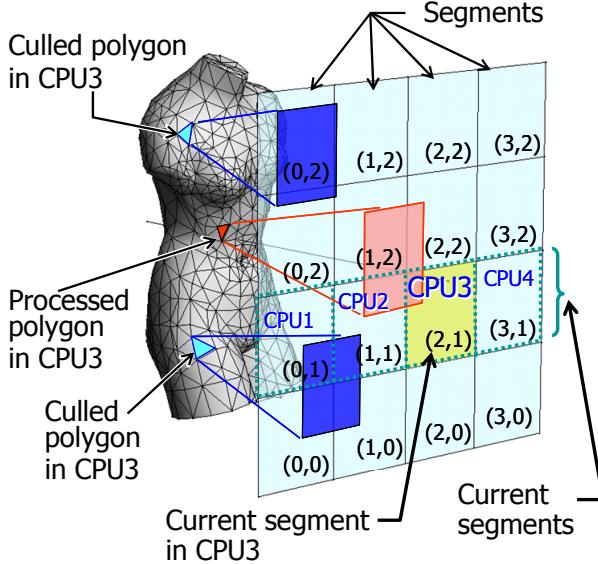


Fig.4 Calculation of the object field in the segmentalized frame buffer.

背景画像からの光波とビーナス像の光波をホログラム上で重畳することにより全光波を求めるが、この時そのまま加算するとビーナス像が半透明のファントムイメージとなって再生されてしまう。これを避けるため、Fig. 3 に示すとおり、光波伝搬処理を分割している。まず背景画像の光波を中間面まで伝搬している。次に、(a)に示すとおりビーナス像のシルエットをマスクとしてそれを遮蔽している[4,5]。その後にビーナス像自体の光波(b)を加算し、ホログラム面まで再度伝搬している。

## 5. 分割計算手法

### 5.1 フレームバッファの分割

The Venus ホログラムの複素振幅分布を収容するフレームバッファのメモリサイズは 32GB になる。そのため、通常の PC ではその全てをメモリに格納することはできない。そのため、Fig.4 に示すとおり、フレームバッファを同じサイズの複数のセグメントに分割している。実際にメモリに格納されているのはフレームバッファの一部のセグメントだけであり、メモリ上にあるセグメントの数は計算に用いる CPU の数と同じである。すなわち、各 CPU がそれぞれのカレントセグメントを持ちそれを並列的に処理している。

### 5.2 ポリゴンのカリング処理

物体光波の合成においては、フレームバッファは中間面の複素振幅を収容している。各 CPU はまず物体を構成する全てのポリゴンを走査し、カレントセグメントに光波が到達するポリゴンだけをより分けて、そのポリゴン光波を計算する。Fig.4 の例では、CPU3 のカレントセグメントでは腹部のポリゴンは計算されるが、脚部および胸部のポリゴンは処理されない。

このとき、あるポリゴンからの光波がカレントセグメントに到達するか否かの判定にはホログラムのピクセルピッチで決まる最大回折角を用いている。 $x$  方向に対するピクセルピッチが  $\Delta x$  である時、 $x$  方向の最大回折

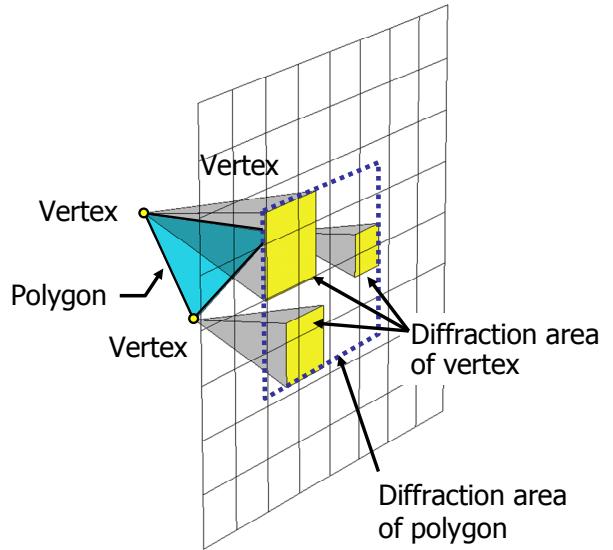


Fig.5 The maximum diffraction area of a polygon.

角は

$$\theta_x = \sin^{-1} \left( \frac{\lambda}{\Delta x} \right)$$

となる。ここでは  $\lambda$  は波長である。 $y$  方向に対しても同様であるので、Fig.5 に示すように、ポリゴンの一つの頂点から放出される光波が到達可能な範囲は中間面上では矩形となる。従って、全ての頂点からの光波の矩形領域を包含する矩形領域を求めるとそれがそのポリゴンからの光波が到達可能な最大回折範囲となる。

この最大回折範囲がカレントセグメントと重なるかどうかを求ることにより、そのポリゴンのカリングを決定している。この処理はポリゴン光波の計算に比較するとはるかに高速に行えるため、各 CPU はそれぞれのカレントセグメントについて全ポリゴンを走査してカリング処理を行っている。

### 5.3 分割フレームバッファにおける伝播計算

分割フレームバッファにおいて、伝播距離が十分に長い場合、伝播元のフレームバッファの全てのセグメントからの光波が伝播先の各セグメントに到達する。そのため、Fig.6 に示すように、伝播元の全セグメントから伝播先のカレントセグメントへの光波伝播を

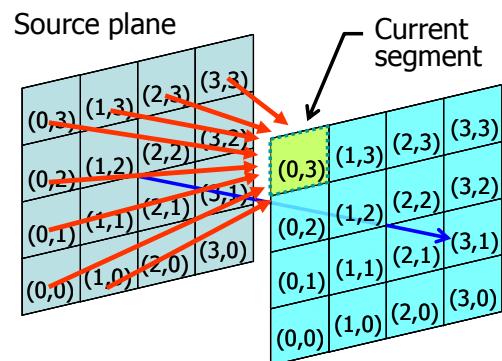


Fig.6 Numerical propagation in segmentalized frame buffers.

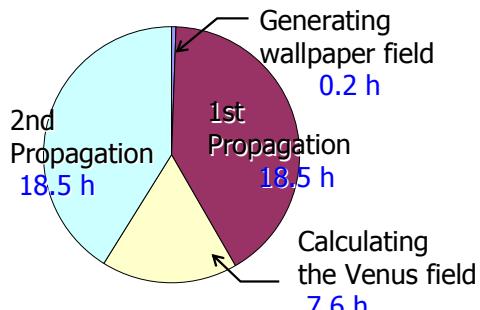


Fig. 7 Itemized computation time.

計算し、カレントセグメント上でそれを重畠している。本研究では、この伝播計算には近年提案されているシフトフレネル計算法[7]を用いている。

## 6. CGHの計算と作製

The Venus ホログラムの計算には AMD Opteron 852 (2.6GHz)プロセッサを4個搭載したPCを用いた。このPCは全CPUで共有される32GBのメインメモリを有している。ソフトウェアは我々が開発した波動光学計算ライブラリ WaveFieldを用いて実装されている。またFFTパッケージとしてはIntel MKLを用いている。The Venusの総計算時間は約45時間であった。計算時間の内訳をFig.7に示す。

CGHの作製には Heidelberg Instruments 社製のDWL-66 レーザーリソグラフィシステムを用いた。この装置で描画を行い、石英基板上のクロム膜をエッチングすることにより干渉縞パターンを作製した。

## 7. 光学再生像とまとめ

本研究ではポリゴン法とシルエット法を用いたCGH計算において分割計算の手法を提案し、大規模な

CGHの作成を行った。作成したCGHの光学再生像を様々な方向から撮影した写真をFig.8に示す。このCGHは両眼視が可能であり、全方向視差を有する完全な空間像を再生している。そのため、観察者に強い立体感を与える物となっている。

本研究は日本学術振興会の科研費(21500114)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] L. Ahrenberg, P. Benzie, M. Magnor, and J. Watson: “Computer generated holograms from three dimensional meshes using an analytic light transport model,” Appl. Opt. **47**, 1567–1574 (2008).
- [3] H. Kim, J. Hahn, and B. Lee: “Mathematical modeling of triangle-mesh-modeled three-dimensional surface objects for digital holography,” Appl. Opt. **47**, D117–D127 (2008).
- [4] 近藤、松島: シルエット近似を用いた全方向視差 CGH の隠面消去, 信学論 **J87-D-II**, 1487–1494(2004).
- [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] K. Matsushima: “Formulation of the rotational transformation of wave fields and their application to digital holography”, Appl. Opt. **47**, D110–D116(2008).
- [7] R. P. Muffoletto, J. M. Tyler, and J. E. Tohline: “Shifted Fresnel diffraction for computational holography,” Opt. Express **15**, 5631–5640 (2007).

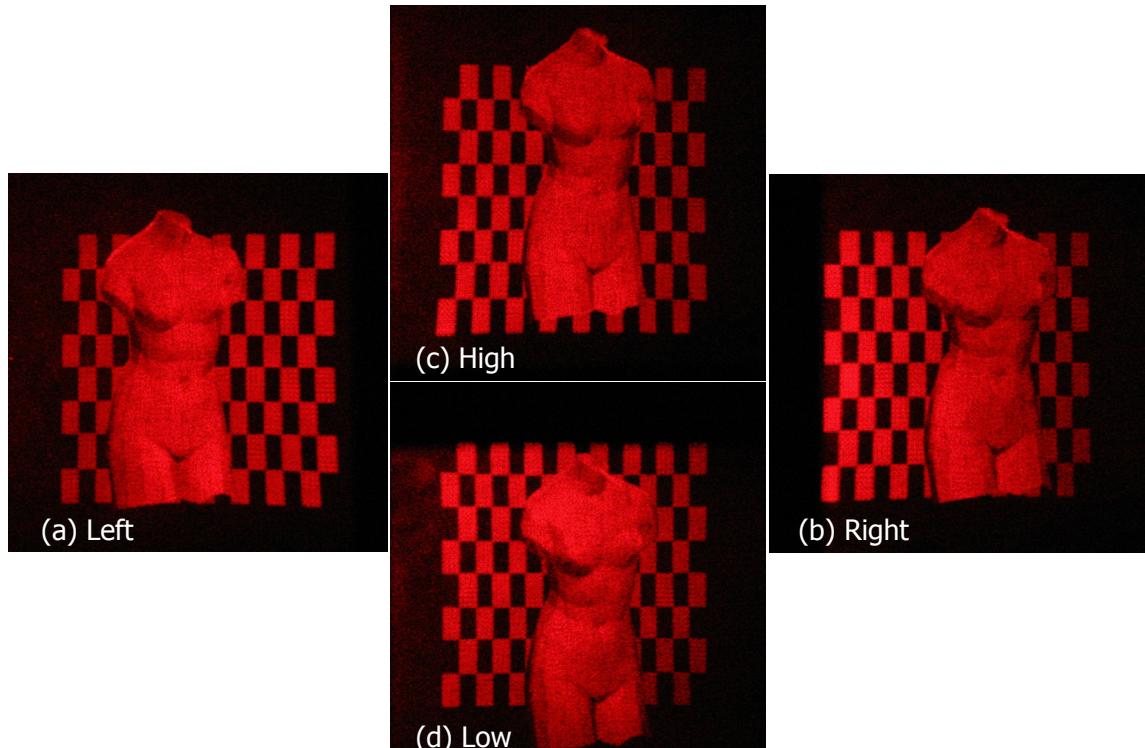


Fig. 8. Photographs of optical reconstruction of “The Venus” CGH taken from various angles.