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1 中原住雄2

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 Eng., Kansai Univ. ²関西大学システム理工学部機械工学科 ²Department 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 segmentailized 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 立体感を与えている.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は莫 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

松島恭治

matsu@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 吹田市山手町 3-3-35 TEL/FAX 06-6368-0933 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ュアを 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.

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

| Table 1. | Parameters | used for | creation o | f the CGH |
|----------|------------|----------|------------|-----------|
| | | | | |

*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 µm 四方の正方形であるので,CGHの大きさは約 6.5×6.5 cm²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ュアを表現して 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う 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Δx 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λ 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 どうかを求めることにより、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



Destination plane 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畳している. 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.