CG を利用した CGH の隠面処理改善とディスクホログラムへの応用

Improvement of Hidden-Surface Removal for Computer-Generated Holograms from Computer Graphics and its Application to Disk Holograms

学生会員 藤井 知彦[†], 正会員 山口 健[†], 正会員 吉川 浩[†]

Tomohiko Fujii[†], Takeshi Yamaguchi[†] and Hiroshi Yoshikawa[†]

Abstract For practical 3-D computer-generated holograms (CGH), it is important to display surface model shaded images like computer graphics (CG). We have developed a simple process that is used to obtain 3-D data for CGH from two CG images. The first image is a shaded CG image. The second image is a depth-cued image, i.e., image intensity is modulated by the depth of the object. We use a Z-buffer, which is usually used for hidden-surface removal, to make the depth-cued image. We have improved the process to eliminate the problem of the absence of the hidden surface's data, which should appear when a viewer moves. We adapted our process so that it can be used to make a master disk hologram, meaning that, CGHs from processed 3-D Data are displayed on a disk hologram.

キーワード：ホログラム，計算機合成ホログラム，シェーディング，隠面処理，ディスクホログラム

1. ま え が き

ホログラフィによる立体表示方法の一つに，計算機合成ホログラム (CGH : Computer-Generated Hologram) がある。CGH は実際の物体だけでなく，架空の物体をも 3 次元情報を持ったホログラムとして表示可能である。一般に，架空の物体をフレネル型 CGH¹⁾ の入力にするには，3 次元の情報を持つポリゴン形式などのファイルを，点光源の集合に変換する必要がある。この方法で物体を陰影付けされた面で表現しようとする時，背後の面の隠面処理が必要となる。従来 CGH では，この隠面処理に幾何光学近似を用いた方法²⁾³⁾，幾何光学近似を CG における Z-バッファを拡張することで高速化した方法⁴⁾，またシルエット近似法による波動光学的方法⁵⁾ などが提案されている。ただし，これらの手法は陰影付けされた面を隠面処理するために，複雑なプログラムを独自に実装する必要がある。そこで，著者らは輝度情報および奥行情報を持たせた 2 枚の 2 次元画像データから，CGH 計算のためのデータを簡易に生成する手法を提案した⁶⁾。この手法を用いれば，3 次元コ

ンピュータグラフィックス (3DCG : 3-Dimensional Computer Graphics) を基に既存の 3D-API を用いて直接，フレネル型 CGH に必要な隠面・シェーディング処理された点光源集合を生成することができる⁷⁾。この手法は，単視点情報から点光源を生成するため，隠れ面の欠落や重ね合わせが発生し問題となった。この問題は，多視点からの透視変換画像を利用することで改善することができるが，以前の報告では，ホログラムの分割数が 9 枚と少ないために，再生像に不自然さがあった⁷⁾。そこで本論文では，本手法をより汎用的に CGH の隠面処理に適用させるため，透視変換画像の視点数を増やし，その汎用性を示すために，隠面処理改善の結果をディスクホログラムを作製し検討した成果を報告する。ディスクホログラムとは，円盤状のホログラムを水平に置いて，真上から照明すると，その周囲 360 度から 3 次元像が観察できるホログラムである⁸⁾。以前に報告されている円筒型のフレネル型 CGH⁹⁾ も被写体を 360 度見ることができるが，ディスクホログラムは平面状の材料に記録するため画素数が少なく，また反射型ホログラムのため，再生が容易である。そこで本論文では，ディスクホログラムに多視点において隠面処理された点光源データを利用した¹⁰⁾。ディスクホログラムにおけるマスターホログラムの出力装置として，当研究室で研究を行っているフリンジプリンタ¹¹⁾を用いた。

2007 年 2 月，映像情報メディア学会映像表現 & CG 研究会で発表

2007 年 6 月 13 日受付，2007 年 10 月 15 日最終受付，2007 年 10 月 31 日採録

[†] 日本大学 理工学部 電子情報工学科

(〒 274-8501 船橋市習志野台 7-24-1, Tel 047-469-5391)

[†] Department of Electronics, College of Science and Technology, Nihon University

(7-24-1, Narashino-dai, Funabashi-shi, Chiba 274-8501, Japan)

2. 原 理

2.1 CGHのための簡易シェーディング法

まず、通常のCGと同様に3次元のオブジェクトを隠面処理、シェーディング処理し、2次元のディスプレイ面に投影する(図1(a))。CGHの計算に用いられている物体データの形式は点光源の3次元座標と輝度および位相情報であらわされる。そのためCGHを製作するには、2次元のディスプレイ(カラーバッファ)に投影された隠面、シェーディング処理されたオブジェクトを図1(b)のように再び3次元座標上に変換する必要がある。OpenGLやDirectXでは隠面処理に利用したZ-バッファに、その画素に対応した奥行き値が保持されているので、2次元に投影されたオブジェクトを図1(b)のように3次元に逆変換することが可能になる。以下に実装したアプリケーションによるCGHの具体的なデータ生成方法を示す。

オブジェクトのデータ(CGソフトLightWave3DのLwoファイル形式など)を読み込み、OpenGLを使用して隠面処理、シェーディング処理を行いPC上でリアルタイムレンダリングする。はじめに、テクスチャAに2次元に投影されたオブジェクトの奥行き情報を描画する。次にテクスチャBに2次元に投影されたオブジェクトの輝度情報を描画する。また、アプリケーションを利用するユーザの確認用として、内部のテクスチャだけでなくフレームバッファにもオブジェクトを描画する。最後に輝度と奥行き情報の2枚の画像を参照し、各画素の輝度の値を調べる。輝度情報の画素値にゼロ以外のデータが存在すれば、点光源データに変換するためにその画素のディスプレイ上での位置と奥行き情報を調べ、(1)式を用いてスクリーン座標からオブジェクト座標への透視変換の逆変換を行い、CGH計算に必要な3次元の点光源集合を生成する。なおOpenGLでは、3次元のオブジェクト座標(頂点座標)を2次元のスクリーン座標に変換するために図2の行列演算を行っている¹²⁾。

$$\begin{pmatrix} obj_x \\ obj_y \\ obj_z \\ w \end{pmatrix} = (PM)^{-1} \begin{pmatrix} 2(win_x - x)/width - 1 \\ 2(win_y - y)/height - 1 \\ 2win_z - 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし、 $(obj_x, obj_y, obj_z, w)^t$ はオブジェクト座標、 M はModel-View Matrix、 P はProjection Matrix、 (win_x, win_y) はスクリーン座標、 win_z はZ-バッファ値、 (x, y) はビューポートの左下隅の画素、 $(width, height)$ はビューポートサイズの画素数とし、またZ-バッファの値は0から1の範囲に収めるものとする。

2.2 隠れ面の欠落・重なり改善

1で述べたように本論文のフレネル型CGHは物体を点光源の集合とし、その各点光源の光は全方向に伝搬する。そのため、ある位置に再生される点光源は、すべての観察領域から見ることができ、また、点光源が再生されない場所

図1 カラーバッファへの透視変換と逆変換
Perspective projection and inverse projection.

図2 頂点変換ステージ
Stages of vertex transformation.

図3 視点移動による隠れ面の欠落
Absence of the hidden surface's data.

はすべての観察領域で点光源が再生されない。よって、前節の簡易シェーディング法を用いて、1視点の透視画像からCGHを生成すると、再生像の観察者が視点を移動させた場合、背後にある物体の点光源とその手前にある物体の点光源が重なる、また本来見えなければならない点光源が欠落する現象が発生する(図3)。そこで、このような場合、ホログラムを複数の領域に分割し、それぞれの領域の中央を視点とする透視画像を使って、領域ごとにホログラム計算のための形状データを生成することで近似的に解決した。なお、光学的なフレネルホログラムの場合、物体表面は光

が発散すると同時に他の物体表面からの光を遮蔽する働きがあるため、このような現象は発生しない。

2.3 ディスクホログラムへの応用

図4にオブジェクト作製の原理を示す。本研究で作製したディスクホログラムは、図4(a)のように観察位置は、像の真上を0度として、そこから垂直方向に約15から22度の間、また、水平方向には全周囲の360度を観察することができる。図4(a)のようにディスクホログラムは、ホログラム面上にオブジェクトが配置される。簡易シェーディング法は、CGをレンダリングするためのカメラが、ホログラム面上になければならない制約がある。そのため、ディスクホログラムでは、カメラ位置がオブジェクト内部となり、CGを正しく生成することができない。ただし、まずマスターホログラムを作製し、次にそのトランスファホログラムを作製するという2段階の作業とすれば、マスターホログラムはフレネルホログラムと同様に、ホログラム面とオブジェクトが離れて配置されているので、図4(b)の構成で簡易シェーディング法を用いることができる。

簡易シェーディング法における、隠面処理改善のための、ホログラムの最適分割について以下に詳述する。図4(c)のように、計算する点光源を決め、その他のオブジェクトを点光源から発散する光線を遮蔽するものとする。ここでは、遮蔽オブジェクトはObject Aのみとする。まず、Viewpoint1で簡易シェーディング法で使用するCGをレンダリングする。Viewpoint1からは、Object Aに隠れ、計算する点光源を見ることができない。次に、視点をViewpoint1から移動して、遮蔽オブジェクトに隠された点光源が見える位置Viewpoint2を探す。ホログラムを計算する際、こ

の位置で、簡易シェーディング法で生成した点光源データを切り替えない場合、再生像に点光源の欠落が発生する。すなわち、Viewpoint2がホログラムを分割する位置となる。ただし、ホログラム分割位置は、点光源とその遮蔽オブジェクトの距離に依存するため、遮蔽オブジェクトがObject Bの場合には、点光源位置が上記と同じでも、Viewpoint3となる。そのため、最適な分割数は、計算に用いる3Dオブジェクトによって異なる。そこで本研究では、実際に計算したホログラムを小領域に分割し、各領域ごとにフーリエ変換を行うことで、各視点の再生像をシミュレーションし、隠面処理の不整合がないかを確認することで、マスターホログラム面上の視点数を縦と横各70とした。またマスターホログラムの分割数は、視点数と同数になるため縦と横各70となる。

ホログラムとオブジェクトの配置は、サンプリング定理を満たすために、以下の式を満たす必要がある。

$$2d(\sin \theta_{out} - \sin \theta_{in}) = \lambda \quad (2)$$

ここで、 d はホログラム干渉縞の画素ピッチ、 λ は計算に用いるレーザの波長、 θ_{out} はホログラムでの回折光の出射角、 θ_{in} は照明光のホログラムへの入射角である。本研究で使用するフリンジプリンタの画素ピッチは $0.87 \mu\text{m}$ であり、また、トランスファホログラムを 633 nm のレーザで撮影するため、計算に用いるレーザの波長は 633 nm とする。(2)式を満たすように、記録面からオブジェクトまでの距離を 70 mm (図4(b))、記録面から点光源までの距離を 120 mm 、ホログラムのサイズを $79 \text{ mm} \times 79 \text{ mm}$ とする。はじめに、上記の結果から仮想的なOpenGLのカメラ、オブジェクトを同様の位置に設定し、オブジェクトをレンダリングする。また、図4(b)のようにホログラム全体を一つのカメラではなく、隠面処理の改善を適用するため、図4(d)のようにカメラをAからBに移動させ、各視点から見たオブジェクトの点光源データを生成する。1列終了したらCの方向に一行移動し、同じことを行う。これをCまで繰り返す。次に、生成した点光源データの干渉縞を計算する。計算した干渉縞は視点位置ごとに分割されているので、図4(d)のように、オブジェクトの撮影と同じ流れで配置し、結合させる。こうして、乾板に記録する一つの干渉縞を得ることができる。これにより角度を変えて観察したときに、角度に対応した像が再生される。これを回転させることで360度からの観察ができる。

2.4 フリンジプリンタ

2.3で述べたディスクホログラムのマスターホログラムを出力する装置として、我々が研究しているフリンジプリンタ¹¹⁾を用いる。フリンジプリンタは、液晶パネル(LCoS: Liquid Crystal on Silicon)に表示させた干渉縞を記録材料に露光するが、そのまま露光すると、干渉縞の周期が長く画素数も不十分である。そこで、LCoSに表示した画像をレンズを用いて縮小することにより、干渉縞の周期を短

図4 多視点のためのセグメント分割
Segmented hologram plane to viewing blocks.

表 1 フリンジプリンタの仕様
Specification of the fringe printing system.

Fringe Printer	Moving Distance[mm]	100 × 100
	Focal Length (L3)[mm]	150
	Focal Length (L4)[mm]	12.5
	Demagnification Rate	1/12
	Writing Wavelength (laser)[nm]	473
LCos	Resolution[pixel]	1,400 × 1,050
	Pitch[μm]	10.4
	Grayscale Level[bit]	8

くする。また、干渉縞を分割して部分ごとに表示・露光を行うことでホログラムの大型化を実現させている。本研究に用いたフリンジプリンタの光学系を図5に示す。レンズL3とレンズL4の間にある絞りは、LCoSの画素構造による回折成分をカットするために設けた。縮小倍率は、レンズL3とレンズL4の焦点距離の比によって決めることができ、本研究では縮小倍率を1/12に設定する。表1にフリンジプリンタの仕様を示す。

2.5 トランスファホログラムの光学系の設計

撮影時の光学系を図6に示す。この図ではMはミラー、CLはコリメートレンズ、OLは対物レンズ、HWPは1/2波長板、PBSは偏光ビームスプリッター、Fは空間フィルター、H1はマスターホログラム、H2はディスクホログラムを記録する乾板を表す。再生像の位置は干渉縞計算時に設定した乾板からオブジェクトまでの距離となり、今回の場合70 mmだけCLから離れた位置に再生される。また、マスターホログラム面上の中心付近は空間周波数が低く、照明光を当てても鮮明な再生像が得られない。そのため、マスターホログラム面上の中心付近には空間フィルタをかけ、再生像に余計な光が入るのを防いでいる。

3. 結果

本研究で提案した方法で3DモデルのCGから3次元の点光源の集合を生成しホログラムを作製した。今回用いたオブジェクトを図7(a)に示す。ホログラム面の中央に視点を置いた場合のOpenGLで隠面処理、シェーディング処理したときのカラーバッファの画像を図7(b)に示す。光源の設定よりオブジェクトの面それぞれに陰影が表現され、また

図 5 フリンジプリンタの光学系
Schematic of the fringe printing system.

図 6 トランスファホログラムの光学系
Schematic setup of the transfer hologram.

(a) 撮影に使用した 3D オブジェクト (b) カラーバッファ画像

(c) Z-バッファ画像 (d) 点光源集合

図 7 逆変換で生成した点光源集合
Converted hologram data represented as collection of point sources.

Z-バッファ法による隠面処理によって視点から隠れる面は消去されていることが確認できる。このときのZ-バッファのデータを、輝度に対応させると図7(c)のようになる。ただし図7(c)は、視点からの距離が近いほど輝度が強くなるような表現になっている。図7(b)と図7(c)の二つの2次元データを透視変換して3次元の点光源集合を生成する。その3次元データを透視変換して2次元で表示した結果は図7(d)に示す。これから2次元の透視画像が正しく3次元に逆変換されていることが確認できる。次に、単視点と多視点の二つの方法で図7(a)のオブジェクトの隠面処理された点光源データ（平均点光源数 5,000）を生成およびホログラムの計算を行い、その視点ごとの再生像をシミュレーションした（図8）。ホログラムの計算に使用した各パラメータを表2に示す。また点光源の生成とホログラムの計算に使用したPCのスペックは、CPUはIntel Xeon 3.4GHz x2、メモリーは2GB、GPUはnVIDIA Quadro FX 4500である。図8(a)ではマスターホログラム面の外周部分に視点を置いた場合の再生像をシミュレーションしているが、隠面処理された点光源のデータ生成には図4(b)のようにホログラム中央からの単視点を利用しているため、再生像にはオ

図 8 各セグメントの再生像シミュレーション
 Simulation of the reconstructed images using single-view and multi-view rendering.

図 9 マスターホログラムの再生像
 Reconstructed image of the master hologram from 4 view-points.

図 10 トランスファホログラムの再生像
 Reconstructed image of the transfer hologram from 4 view-points.

表 2 ホログラム計算のパラメータ
Parameters used for calculation of the hologram.

Coordinate of Reference beam[mm]	x	0
	y	0
	z	120
Parameter of Hologram	Resolution[pixel]	89,600 × 89,600
	Size[mm ²]	79 x 79
	Object Offset[mm]	70
	Object Size[mm ³]	7.4 × 17.8 × 12.8
	Pitch[μm]	0.87
	Wavelength[nm]	633

プロジェクトの欠落・重ねを見つけることができる。図 8(b)では、図 4(d) のようにホログラムの計算領域ごとにその中心を視点として多視点で隠面処理された点光源データを生成している。再生像にオブジェクトの欠落や重ねを見つけないことができず、図 8(a) と比べて画質を改善できたことがわかる。図 9 は、実際に作製したディスクホログラムのマスターホログラムの再生像である。視点位置を 90 度ずつ変化させている。各視点の像が鮮明に再生され隠面処理も正確である。像の再生には波長 633 nm の半導体レーザを用いた。記録材料としては VRP-M を用いた。計算の各パラメータは上述のシミュレーションと同様に表 2 となる。隠面処理を改善するために、ホログラム面の縦と横のセグメント数は各 70 とする。そのため、合計 4,900 視点から隠面処理された点光源データを生成し、ホログラムを計算した。点光源データ生成には 13 分、またホログラム計算には約 54 時間を必要とした。ただし、本研究では PC による並列計算を行い、常時ネットワークに繋がった PC を 5 台利用することで計算時間は約 12 時間となった。計算が完了したホログラム画像は 89,600 × 89,600 pixel となり、それをフリンジプリンタを使用して 79 mm × 79 mm のマスターホログラムに撮影した。図 10 にトランスファホログラムの白色光（ハロゲンランプ）での再生像を示す。トランスファホログラムの撮影では、記録材料に ULTIMATE PLATES を使用した。トランスファホログラムのサイズは 17 mm × 10 mm となった。像が鮮明に再生され隠面処理も正確である。

4. む す び

本研究により、フレネル型 CGH において 4,900 個の視点からの透視変換画像を利用することで再生像の隠面処理を改善することができた。また、本手法よりディスクホログラムのマスターホログラムを作製し、CGH の隠面処理に汎用的に適用することができた。今回は、フレネル型 CGH の隠面処理を改善したが、今後はイメージ型 CGH の隠面処理を改善することを行っていきたい。

本研究を進めるにあたり、3D オブジェクトの作成及びホログラムの撮影に協力いただいた本木裕介（平成 18 年度卒研生）に感謝する。

〔文 献〕

- 1) J.P.Waters : "Holographic image synthesis utilizing theoretical method", Appl. Phys. Lett., bf9, pp. 405-407, 1966
- 2) John Underkoffler : "Occlusion Processing and Smooth Surface Shading for fully Computed Synthetic Holography", in *Practical Holography XVI*, S. A. Benton, ed., Proc. SPIE **4659A**, pp. 196-204, 1997
- 3) 松丸誠, 吉川浩 : "電子ホログラフィックディスプレイのためのシェーディングにおける影処理", 信学技報, IE93-71 (1993)
- 4) 高瀬, 坂本, 青木 : "光線の到来方向を考慮した z バッファによる計算機合成ホログラムの高速隠面除去", 映像学誌, **57**, pp. 483-489,
- 5) K.Matsushima : "Exact hidden-surface removal in digitally synthetic full-parallax holograms", in *Practical Holography XIX*, Tung H. Jeong, Hans I. Bjelkhagen, ed., Proc. SPIE **5742**, pp. 25-32, 2005
- 6) 吉川浩, 林昌宏 : "CG を用いたフレネルホログラムの簡易シェーディング処理", 映像学技報, **60**, 22, AIT98-40, pp. 21-24 (1998)
- 7) 藤井知彦, 吉川浩 : "CG を利用したフレネルホログラムのシェーディング処理", ディスプレイ・アンド・イメージング, 8, 3, pp. 225-231 (2000)
- 8) James Kim, Jason R. Hill, John Honack, William F. Roth, Ron Roberts, Edward Villasenor, Orlando Gonzales, and Everett Baker : "360-deg-viewable flat hologram", in *Fifth International Symposium on Display Holography*, Tung H. Jeong, ed., Proc. SPIE **2333**, pp. 418-423, 1995
- 9) 山口健, 藤井知彦, 吉川浩 : "計算機合成円筒ホログラム", 映像学技報, **30**, 63, AIT2006-164, pp. 59-64 (2006)
- 10) 藤井知彦, 山口健, 吉川浩 : "CG を利用した計算機合成ホログラムの隠面処理改善", 映像学技報, **31**, 10, AIT2007-27, pp. 147-152 (2007)
- 11) 三井一成, 吉川浩 : "フリンジプリンタによるホログラムの製作と評価", 映像学技報, **30**, 43, AIT2006-129, pp. 23-26 (2006)
- 12) OpenGL Architecture Review Board, Dave Shreiner, Mason Woo, Jackie Neider, and Tom Davis : "OpenGL Programming Guide", Addison-Wesley Professional (2005)

ふじい ともひこ
藤井 知彦 1999 年、日本大学理工学部電子情報工学科卒業。2001 年、日本大学大学院理工学研究科博士前期課程電子工学専攻修了。同年、三洋電機株式会社入社。2006 年、日本大学大学院理工学研究科博士後期課程入学。計算機合成ホログラムの研究に従事。学生会員。

やまぐち たけし
山口 健 2004 年、日本大学理工学部電子工学科卒業。2006 年、日本大学大学院理工学研究科博士前期課程電子工学専攻修了。同年、同大副手。現在、同大助手。計算機合成ホログラムの研究に従事。正会員。

よしかわ ひろし
吉川 浩 1985 年、日本大学大学院理工学研究科博士課程修了。同年、同大学助手。現在、同大学教授。1988 年～1990 年、MIT メディアラボ客員研究員。電子ホログラフィックディスプレイ、計算機合成ホログラムなどの研究に従事。工学博士。正会員。