全方向視差CGHにおける Babinetの原理による隠面消去 Hidden Surface Removal by Babinet's Principle in Computer-Generated Full-Parallax Holograms

近藤暁靖 松島恭治

Akinobu Kondoh and Kyoji Matsushima

関西大学工学部電気工学科

Department of Electrical Engineering, Kansai University

ABSTRACT

A novel method for hidden-surface removal is suggested in computer-generated holograms (CGHs) with full parallax. In this method, the Babinet's principle and wave optical calculation of diffraction simplifies the hidden-surface removal processing, and prevents its computation time from remarkably increasing. Optical reconstruction of holograms fabricated by using the method is demonstrated.

Kyewords : CGH, Digital hologram, Hidden surface removal, Babinet's principle

1 はじめに

計算機合成ホログラム(以下 CGH)では,3次 元仮想物体からの光波の数値合成法として点光源モ デルの光線追跡法 [1, 2]が現在最もよく用いられて いる.その理由は断層ホログラム等の他の手法に比 べて単純で立体物のレンダリングに適しているため であり,特に縦方向視差を放棄した CGH では大き な成果をあげている.一方,全方向視差 CGH では, その演算時間 T_c はホログラムのピクセル数を M_p , 仮想物体表面上に配置された点光源数を N_s として,

$$T_c = \tau M_p N_s \tag{1}$$

と表される [3].ここで τ はアルゴリズムや CPU の 性能に依存した係数である.この性質のため,10³ 個程度の点光源を有する表面モデル物体の数平方セ ンチ程度の CGH を作成した場合,一般にその計算 時間は数十時間にも達する.そのため,全方向視差 CGH において隠面消去処理をすることは容易では ない.

縦方向視差を放棄した CGH では,点光源とその 光線を遮蔽する物体との幾何学的配置に基づく隠面

近藤暁靖

関西大学工学部電気工学科

消去法 [4] が用いられるが,全方向視差 CGH では その処理過程が複雑過ぎ,遮蔽を求めるために莫大 な演算時間を必要とする.また,観察者がホログラ ムを見る位置を変化させるとその見え方も変化する ため,2次元 CG で用いられている Z バッファ法な どの単純なアルゴリズムだけでは自然な隠面処理は 困難である [5].そこで本論文では,Babinetの原理 を利用し,実用的な演算時間で波動光学的に隠面消 去する手法について報告する.

2 Babinet の原理

本研究で用いた Babinet の原理について説明する [6] . いま, Fig. 1 のように 3 つの開口があると する. (a) は全開口 S, (b) は (a) の中に島状のマス ク M_a が存在する開口 S_a , (c) は (b) の M_a に相当 する部分が切り抜かれた開口 S_b である.このとき $S_a \geq S_b$ は相補的な関係となっており,

$$S = S_a + S_b \tag{2}$$

が成り立っている.ここで開口 S の背面より光波 u_M が入射したときの開口 S によるホログラム面 における回折光の複素振幅 u_H は Fresnel-Kirchhoff の回折積分で与えられるので,

$$u_H = \frac{i}{\lambda} \iint_S \frac{u_M}{r} \exp(-ikr) dS \tag{3}$$

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

^{〒 564-8680} 大阪府吹田市山手町 3 丁目 3 番地 3 5 号

TEL 06-6368-1121(大代表) 内線 5722

(3D Image Conference 2002)



Fig 1: Apertures for Babinet's principle: a frame aperture (a), an aperture with an island mask (b) and its complementary aperture (c).

となる.ここで λ は波長, r は開口 S からホログラ ム面までの距離, k は波数である. (3) 式は (2) 式 の関係を適用すると

$$u_{H} = \frac{i}{\lambda} \iint_{S_{a}+S_{b}} \frac{u_{M}}{r} \exp(-ikr) dS$$
$$= u_{H_{a}} + u_{H_{b}}$$
(4)

と変形される u_{H_a} , u_{H_b} は単独の開口 S_a , S_b に よる回折光の複素振幅である.つまり開口 S から の回折光の複素振幅 u_H は S における相補的な開口 S_a と S_b からの回折光の複素振幅の和となる.これ が Babinet の原理である.

3 Babinet の原理を用いた波動光学的隠面消去

Fig. 3 に本研究で用いる座標系と 3 次元表面モデ ル仮想物体の配置を示す.二つの仮想物体 $O_1 \ge O_2$ は,それぞれ $z = z_O \ge z = z_M$ に位置しており, ホログラムは z = 0 に位置しているものとする.こ れらの物体モデルの表面に点光源を稠密に配置し, 光線追跡法によりホログラム上で計算した物体光波 の複素振幅を,それぞれ $u_{O1}(x, y) \ge u_{O2}(x, y) \ge$ すると,二つの物体全体からの光波は

$$u_O(x,y) = u_{O1}(x,y) + u_{O2}(x,y)$$
(5)

となる.しかしながら, $u_{O1}(x,y)$ の計算において 前方の物体 O_2 による隠蔽を考えていないため, $u_O(x,y)$ を再生すると,Fig. 2のように後方の物 体 O_1 が前方の物体 O_2 に透けて見える,いわゆる



Fig 2: An example of a phantom image in optical reconstruction.



Fig 3: Definition of coordinates and setup for synthesizing object waves from two pieces of objects.



Fig 4: A complementary aperture M' to a mask, which corresponds to the silhouette of the object O_2 , and diffraction by the aperture.

ファントムイメージとなる.

そこで本研究では, $u_O(x,y)$ から,物体 O_2 によっ て遮蔽される光波の成分を取り除くため,前述の Babinet の原理を用いている. すなわち, Fig. 3 に 示すとおり,物体 O2 の重心付近をとおり,ホログ ラムに平行な平面 Tを考える.この平面 T上で物 体 O_2 のシルエットMを求め,これを Babinetの 原理における島状マスク M_a と等価な物として用い る. つまり, Fig. 4 に示すように, シルエット M によるマスクと相補的な開口 M'を設定する.物 体 O_1 からの光波の開口M'面上における複素振幅 $u_{O1}(x, y, z_M)$ を光線追跡法で数値合成し,さらに 開口 M'を通過した物体 O_1 の光波を,フレネル回 折等により波動光学的に回折・伝搬させることによ リ,後方の物体 O1 の光波のうち,前方の物体 O2 で遮蔽されている光波の成分 $u_b(x,y)$ をホログラム 面上で求める.シルエット M でマスクされた物体 O_1 の光波を $u_a(x,y)$ とする時,前述の Babinetの

(3D Image Conference 2002)



Fig 5: Optical reconstruction images of CGHs for an object O_1 and only a mask corresponding to the silhouette of O_2 without O_2 itself (d)–(f), and schematic outlines (a)–(c).

原理により,

$$u_{O1}(x,y) = u_a(x,y) + u_b(x,y)$$
(6)

となる.従って,前方の物体 O_2 による隠蔽を考慮 した物体光波 $u'_O(x,y)$ は,

$$u'_{O}(x,y) = u_{a}(x,y) + u_{O2}(x,y)$$

= $u_{O1}(x,y) - u_{b}(x,y) + u_{O2}(x,y)$
= $u_{O}(x,y) - u_{b}(x,y)$ (7)

となる.

(7) 式からわかるとおり,この方法では,前方の 物体による隠蔽を考慮した物体光波 $u'_O(x,y)$ を求 めるために必要な計算時間は,隠蔽を全く考慮しな い場合に対して, $u_b(x,y)$ の計算に必要な時間だけ 増加することになる.しかしながら,前方の物体が それほど大きな物でない場合,開口 M'に含まれる サンプリング点の数はホログラムのピクセル数に比 べてかなり少ないため,(1)式より,光線追跡によ る計算時間はそれほど大きなものにはならない.ま た,開口 M' が複雑な形状であっても,開口を含む 最小の長方形領域で複素振幅を計算してから開口形 状のマスクをピクセル毎に乗算することにより開口 の形状に合わせて複素振幅分布を切り抜くことが出 来る.そのため,計算領域の判定等は必要ない.さ らに開口 M'からの回折光波の計算には一般に FFT を用いることができるため,開口 M'の面積が小さ い場合にはそれほど長い計算時間を要しない.

4 本手法により作成したホログラムの再生像

まず, Babinet の原理による遮蔽の効果を確認す るため,物体 O_2 を配置せずにそのシルエットによ るマスク M と物体 O_1 のみを配置して,マスク Mによって遮蔽された光波 $u_a(x,y)$ のホログラムを作 成した.Table I に用いたパラメータ,また Fig. 5 (d)~(f) にその CGH の光学再生像を示す.CGH のピクセル数は 8192×4096 で,ピクセルピッチは $2 \times 4\mu$ m であり,物体 O_1 として $z_O = 150$ [mm] の 位置に実サイズ 5mm の立方体を配置している.な お立方体表面には密度 1×10^4 個/cm² で点光源を並 べている.また点光源の振幅を面毎に変調すること により,ホログラム面 H となす角度に応じて変化 する輝度の補正とシェーディング [7] を行っている.

一方,物体 O_2 としては,ホログラム面からの距 離 $z_M = 50$ [mm] にやはり実サイズ 5mm の立方体 を仮定し, (x, y, z_M) 平面に投影したそのシルエッ トに対応したマスクのみを配置し, O_2 そのものは 配置していない.Fig. 5 (a) ~ (c) は再生像 (d) ~ (f) の物体とマスクの配置を示している.再生像を観 察する視点は (d) 左, (e) 正面, (f) 右と変化させて いる.

Fig. 6 (d) ~ (f) は,シルエットによるマスクだけ でなく,物体 O_2 を実際に配置して作成したホログ ラムの光学再生像である. O_2 は O_1 と同じ点光源 密度で輝度補正・シェーディングをしている.Fig. 5 と同様,視点を変化させると後方に配置された物体 が前方の物体により隠されていくことが分かる.ま た (e) は (d) や (f) に比べて下方へ視点を移動させ ているが,縦方向の視差があるため,その場合でも 自然な重なりが再生されていることが分かる.

(3D Image Conference 2002)



Fig 6: Optical reconstruction images of CGHs for two pieces of objects O_1 and O_2 (d)–(f), and schematic outlines (a)–(c).

Fig. 7 は, Fig. 6 と同じ CGH の光学再生像であ るが, (a) では前方の物体 *O*₂ に, また (b) では後 方の物体 *O*₁ にカメラの焦点を合わせて記録してい る.前方の物体に焦点を合わせた (a) では,後方の 物体がぼけ,また,そのぼけ像が前方の物体に遮蔽 されていることから2つの物体の奥行き方向の位置 関係がわかる.

5 まとめ

全方向視差 CGH において Babinet の原理を用い た隠面消去を試みた.その結果,この手法で作成し た2つの仮想物体を含むホログラムの光学再生像 は,後方物体からの光波を前方物体が適切に遮蔽 し,水平方向にも垂直方向にも自然な重なりを再現 しているものであることが分かった.

参考文献

- J. P. Waters: "Holographic image synthesis utilizing theoretical methods", Appl. Phys. Lett., 9, pp. 405–407 (1966).
- [2] A. D. Stein, Z. Wang and J. J. S. Leigh: "Computer-generated holograms: A simplified ray-tracing approach", Computers in Physics,

Table I: Parameters used to fabricate CGHs.

Number of pixels	$8192{ imes}4096$
Sampling pitches	$2 \times 4 [\mu m]$
Reconstruction wavelength	632.8[nm]
Surface density of point sources	$10^4 [{\rm cm}^{-2}]$
z-position of object O_1	150[mm]
z-position of mask and object O_2	50[mm]
Dimension of objects(x-width)	5[mm]

6, pp. 389–392 (1992).

- [3] K. Matsushima and M. Takai: "Recurrence formulas for fast creation of synthetic threedimensional holograms", Appl. Opt., **39**, pp. 6587–6594 (2000).
- [4] J. Underkoffler: "Occlusion processing and smooth surface shading for fully computed synthetic holography", SPIE Proc. Practical Holography XI, **3011**, pp. 19–29 (1997).
- [5] 藤井, 吉川: "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", 3 次元画像コンファ レンス'99, pp. 299–304 (1999).
- [6] 村田: "光学", 第5.2章, サイエンス社 (1979).
- [7] 松島,本荘: "陰影付けした表面モデル3次元物 体の全方向視差計算機合成ホログラム",映像情 報メディア学会誌,56,pp.986-992 (2002).



Fig 7: Optical reconstruction images of a fabricated CGH: the object O_2 is in focus while O_1 is out of focus (a), and vice versa (b).