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, 10^3 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 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 と 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,

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

近藤暁靖

 $\hbox{E-mail: xiaojing@laser.ee.kansai-u.ac.jp}$

関西大学工学部電気工学科

〒 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

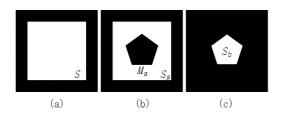


Fig 1: Apertures for Babinet's principle: a frame aperture (a), an aperture with an island mask (b) and its complementary aperture (c).

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_a 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 と O_2 は,それぞれ $z=z_O$ と $z=z_M$ 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 $u_{O1}(x,y)$ と $u_{O2}(x,y)$ とすると,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, $\operatorname{Fig.}\ 2$ 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

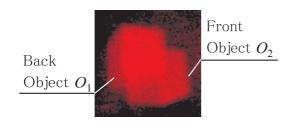


Fig 2: An example of a phantom image in optical reconstruction.

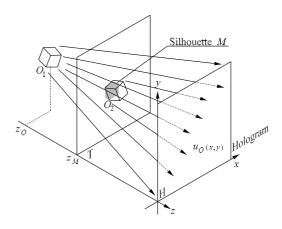


Fig 3: Definition of coordinates and setup for synthesizing object waves from two pieces of objects.

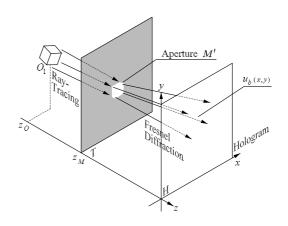


Fig 4: A complementary aperture M' to a mask, which corresponds to the silhouette of the object O_2 , and diffraction by the aperture.

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 O_2 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 O_1 の光波のうち,前方の物体 O_2 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

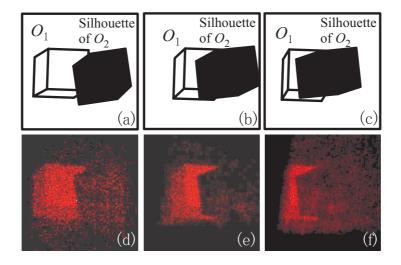


Fig 5: Optical reconstruction images of CGHs for an object O_1 and only a mask corresponding to the silhouette of O_2 without O_2 itself (d)–(f), and schematic outlines (a)–(c).

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 $2 \times 4 \mu \mathrm{m}$ であり,物体 O_1 として $z_O = 150 \mathrm{[mm]}$ の位置に実サイズ $5 \mathrm{mm}$ の立方体を配置している.なお立方体表面には密度 $1 \times 10^4 \mathrm{dd/cm^2}$ 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 $z_M=50 [\mathrm{mm}]$ にやはり実サイズ $5\mathrm{mm}$ 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) \sim (c) は再生像 (d) \sim (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.

 ${
m Fig.~6~(d)}\sim ({
m f})$ 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. ${
m Fig.~5}$ 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.

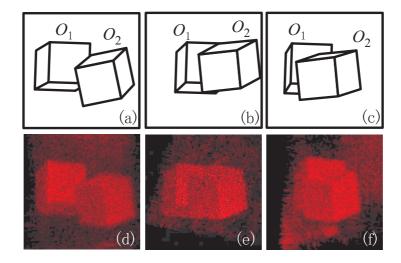


Fig 6: Optical reconstruction images of CGHs for two pieces of objects O_1 and O_2 (d)–(f), and schematic outlines (a)–(c).

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

- [1] 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	8192×4096
Sampling pitches	$2 \times 4 [\mu m]$
Reconstrucion wavelength	$632.8[\mathrm{nm}]$
Surface density of point sources	$10^4 [{\rm cm}^{-2}]$
z-position of object O_1	$150[\mathrm{mm}]$
z-position of mask and object O_2	$50[\mathrm{mm}]$
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).

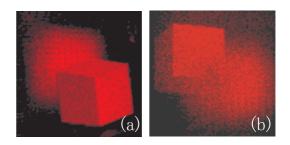


Fig 7: Optical reconstruction images of a fabricated CGH: the object O_2 is in focus while O_1 is out of focus (a), and vice versa (b).