

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

Computer-Generated Full-Parallax Holograms
for Three-Dimensional Surface-Objects with Shading

正会員 松島 恭治[†], 本荘 和巳^{†*}

Kyoji Matsushima[†] and Kazumi Honjyo^{†*}

Abstract A method has been developed for synthesizing full-parallax binary-amplitude holograms that can shade three-dimensional objects expressed in a surface model. The brightness of plane surfaces formed with point sources of light is modeled based on radiometry. A procedure is used to compensate for the change in brightness as the direction of observation changes. A masking technique is used to modify the brightness of the plane surfaces and to shade reconstructed images of binary holograms. Optically reconstructed three-dimensional images of objects with shading were demonstrated using this method.

キーワード：3次元画像，立体画像，計算機合成ホログラム，CGH，表面モデル，シェーディング

1. ま え が き

物体からの光波およびその干渉を計算機でシミュレートする計算機合成ホログラム (Computer-Generated Hologram, 以下 CGH) の研究は長い歴史を有している¹⁾²⁾。しかしながら，過去多くの文献で取り上げられている CGH は，物体が 2 次元の画像であり³⁾⁻⁶⁾，一般的な意味での 3 次元立体画像とは言い難い。CGH の研究が 2 次元画像に限定されていた理由は，物体からホログラム上へ伝搬する光波の計算に高速フーリエ変換法を利用することができ，比較的短時間に計算を終えることができたからである。これを用いて断層ホログラムを構成して立体像を得る方法も知られているが¹⁾，この方法では本質的に物体の隠面・隠線消去や陰影付けが困難であることが多い。

一方，物体からの光波を求める別の方法として，物体を点光源の集合として考え，各点光源からの球面波をホログラム面上で重畳する方法がある⁷⁾。これは CGH における光線追跡法と呼ばれる⁸⁾。この方法では，より柔軟に物体の隠面・隠線消去や陰影付けを行える可能性があるが，一方で莫大な演算時間が必要であり，縦方向の回折，従って

縦方向視差を放棄することによってのみ，レンダリングを施した実用的な立体像が得られている⁹⁾⁻¹²⁾。一方，ホログラム本来の完全な立体画像という利点を生かした，縦方向視差を放棄しない全方向視差の CGH は，計算時間の問題のため，ワイアフレーム等の単純な物体を対象として作成されるに留まっている。しかし近年，テーブル参照法¹³⁾や差分による近似計算法¹⁴⁾¹⁵⁾，著者らによる漸化式を用いた近似計算法¹⁶⁾，対称性を利用する方法¹⁷⁾，あるいはコンピュータグラフィックス (以下 CG) 用のハードウェアを利用する方法¹⁸⁾，CGH 専用の計算機の構築¹⁹⁾⁻²³⁾ など様々な計算時間短縮手法が研究・提案されている。これらを用いて，CG ライブラリを利用した表面モデル全方向視差 CGH の簡易的なレンダリングも報告されている²⁴⁾。しかしながら，点光源を面状に配置した表面モデル光線追跡法 CGH では，光学再生時の面の輝度など，不明な点が多く，全方向視差 CGH において，CG と同様の拡散反射モデルによる陰影付けを行った表面モデル 3 次元物体の CGH は作成されていない。

CGH を作製する際には，電子線描画装置²⁵⁾ やリソグラフィ技術，また視域は乏しいものの，より手軽にはレーザープリンタ²⁶⁾ や，印刷製版用のイメージセッタ²⁷⁾，あるいはそれらの出力の写真縮小が用いられる。これらの出力結果は一般に 2 値画像であるため，計算した物体光波を 2 値の振幅 (あるいは位相) 分布で近似するためのコーディングが必要である。2 次元画像を物体とするフーリエホログラムにおいて用いられた反復フーリエ変換法³⁾⁴⁾等は，

1996 年 11 月 15 日，映像表現研究会，平成 11 年，関西連大 (G375) で発表
2001 年 7 月 23 日受付，2002 年 1 月 21 日再受付，2002 年 2 月 14 日採録
† 関西大学 工学部 電気工学科

(〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35, TEL 06-6368-0933)

* 現在，ローム (株)

† Department of Electrical Engineering, Kansai University
(Yamate-cho 3-3-35, Suita 564-8680, Japan)

* ROHM CO., LTD.

位相自由度のない3次元物体のフレネルホログラムでは利用困難であり、また単純な閾値法による2値化では点光源の振幅が再生されない問題があるため、表面モデル3次元物体のホログラムに適したコーディング法が必要である。

そこで本論文では、個々の点光源ではなく、それによって形成される面に着目し、陰影付けした表面モデル3次元物体の全方向視差2値振幅変調型CGHの作成を報告する。本論文では、まず点光源で構成した物体表面の輝度の性質について理論的な検討を行った。また、このような表面モデルのホログラムに特化したコーディング方法として、面ごとの連続値ホログラムのマスキング法を考案し、この方法で作製したCGHにより、陰影付けした表面モデル3次元物体が再生されることを示す。

2. 計算機合成ホログラムにおける光線追跡

ホログラムを光線追跡法を用いて数値合成する原理と座標系を図1に示す。ホログラムは xy 平面上にあり、 z 軸は奥行き方向に正値をとるものとする。CGHにおける光線追跡法では、物体表面に点光源が密に分布していると考え、それぞれの点光源からの球面波をホログラム面上で重ねることにより、物体全体からの光波の複素振幅を求める。物体表面上の p 番目の点光源の振幅を a_p とすると、この点光源の複素振幅 $u_p(x, y)$ は、ホログラム上では

$$u_p(x, y) = \frac{a_p \exp[-i\{kr_p(x, y) + \phi_p\}]}{r_p(x, y)} \quad (1)$$

である。ここで、 $r_p(x, y)$ は点光源 p とホログラム上の座標 $(x, y, 0)$ の距離であり、点光源 p の座標 (x_p, y_p, z_p) を用いて

$$r_p(x, y) = \sqrt{(x_p - x)^2 + (y_p - y)^2 + z_p^2} \quad (2)$$

と表される。また、 ϕ_p はこの点光源の初期位相である。本研究では、各平面は散乱面として取り扱うので、 ϕ_p には点光源毎に異なる乱数値を与えている。物体を構成する点光源数を N とするとき、物体全体からの光波 $O(x, y)$ はすべての球面波の複素振幅の総和を取ることにより、

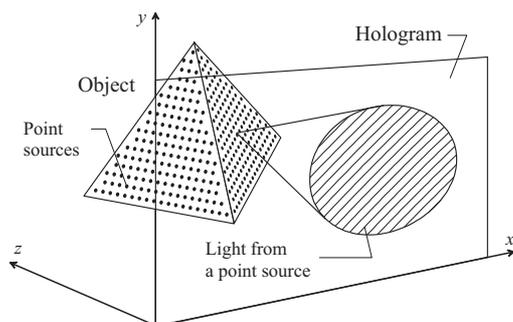


図1 座標系の定義と3次元物体の光線追跡法CGHの原理
Coordinate system used for synthesis and a schematic diagram of ray tracing for synthesizing CGHs for three-dimensional objects.

$$O(x, y) = \sum_{p=1}^N u_p(x, y) \quad (3)$$

として与えられる。

通常のホログラムと同様、入射角度 θ_r でホログラム面に入射する xz 平面と平行な参照光を考え、参照光波を $R(x, y) = R_0 \exp[-ikx \sin \theta_r]$ とし、物体像の再生には寄与しない項を除くことにより、干渉縞強度を

$$I(x, y) = 2\text{Re}[O(x, y)R^*(x, y)] \quad (4)$$

と定義する。 $I(x, y)$ は正負両方の値をとるので、物理的な干渉縞強度や光強度とは一致しないが、複素数値の演算を必要としないので、CGHの作成にはよく用いられる。さらに、本研究で合成を行ったインラインホログラムでは、 $\theta_r = 0$ であるので、干渉縞強度は

$$I(x, y) = 2R_0 \text{Re}[O(x, y)] \propto \sum_{p=1}^M \frac{a_p \cos[kr_p(x, y) + \phi_p]}{r_p(x, y)} \quad (5)$$

となる。なお、最終的に0から1の間にスケーリングした干渉縞強度をホログラムの透過率分布 $t(x, y)$ とするため、第2段目では係数 $2R_0$ を省略している。

3. 拡散反射モデルによる陰影付け

3.1 完全拡散面と拡散反射モデル

心理的な立体感を与えるため、CGにおいては一般に陰影を付けるのが普通である。このためには、光源の位置を設定し、それによって照明された物体の各面がどのような明るさ(陰影)を有するかを決定しなければならない。

CGにおける最も基本的な陰影付け手法は、拡散反射モデルに基づくものである。本論文でも同じモデルで陰影付けを行う。このモデルではまず、(i)物体表面を完全拡散面であると仮定する。したがって、物体表面の輝度は観測する方向に依らず一定であるとする。次に、(ii)物体表面に入射する照明光の入射角から、拡散反射による物体表面の明るさを決定する。すなわち、完全拡散面を仮定するため、物体表面の法線と角度 $\hat{\theta}_q$ をなす方向の無限遠にある照明光源で照明される物体表面 q の輝度は、Lambertの余弦則から

$$\hat{L}_q = L_0(\cos \hat{\theta}_q + l_e) \quad (6)$$

で与えられ、観測方向に依存せず一定であるとする。なお上式では、照明光が垂直に入射する場合の物体表面の輝度を L_0 とし、照明光源の位置に無関係に物体周辺に存在する環境光の寄与を $L_0 l_e$ としている。 l_e はホログラム作成者が表現したい再生像に応じて決めるものであり、 l_e が小さいと陰影のコントラストが強く、また大きいとコントラストが弱く、陰影が薄くなる。本研究では、式(6)で表される \hat{L}_q を作成者が作品に与えたい陰影であるとしている。

物理的実体を持たないCGでは、物体表面を完全拡散面と仮定し、照明の光源の位置を設定して式(6)で物体表面の明るさ(陰影)を求め、2次元画像上にそれを反映して描画するだけで陰影付けとなる。しかしながら、一定振幅の点光源を一定密度で配置して面を形成する計算機合成ホログラムでは、以下に示すとおり、光学再生時の面の輝度は観測方向あるいは面の向きに依存して変化する。したがって、本来陰影がほとんどない物体を再生したい場合でも、予期せぬ陰影がついて見えたり、陰影付けを行った物体の陰影が、ホログラム作成者の意図とは異なって見えることがおこる。

そのため、拡散反射モデルに基づくCGHの陰影付けでは、光学再生時の面の輝度補正を行うと共に、式(6)で与えられる陰影が光学再生時に観測されるようにホログラムのコーディングを行わなければならない。

3.2 点光源で形成した平面の放射輝度

点光源で形成した平面の輝度の性質を求めるための理論的モデルを図2に示す。なお、以下では物理量との関連付けを容易にするため、用語として放射量を用いているが、ホログラムは一般に単一波長で再生するため、測光量と放射量は線形な関係にあると考えてよい。

今、物体を構成している平面のうち、 q 番目の平面を考える。平面上には同じ振幅 a_q の点光源が面密度 σ_q で均等に配置されているものとする。平面を構成する点光源の1つからの球面波を $u(r) = a_q \exp[-i(kr + \phi)]/r$ で表す。ここで r は点光源からの距離である。 $|u(r)|^2$ が光強度、すなわち単位面積を通過するパワーに等しくなるように a_q の物理的次元を定めると、距離 r で光線と直交する面積 dS の微小平面を通過する放射束 $d\Phi$ は

$$d\Phi = dS|u(r)|^2 \quad (7)$$

で与えられる。放射強度は単位立体角あたりの放射束として定義されるので、この微小平面が作る立体角に対して、放射強度 $d\Phi/d\Omega$ は

$$d\Phi/d\Omega = a_q^2 \quad (8)$$

となる。表面が面として発光しているとみなせる程度に点光源の面積密度が十分に高いとすると、その平面は有限の

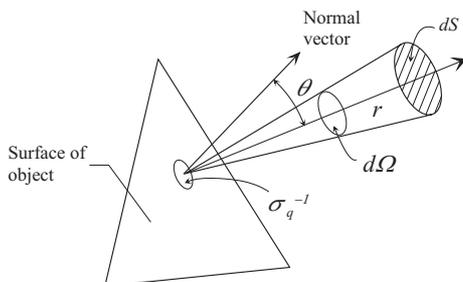


図2 点光源で形成した平面のモデル

A theoretical model of a plane formed with point sources of light.

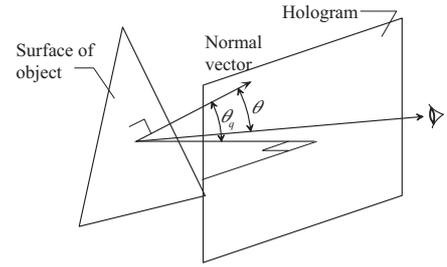


図3 ホログラムと平面の角度 θ_q による視線の角度 θ の近似
An approximation of angle θ_q formed between a plane and the hologram to an observation angle θ .

大きさを持つ放射源と考えることができ、平面の放射輝度を定義することができる。今、その中に1つだけ点光源を含む面積 σ_q^{-1} の微小平面を考え、この平面の法線と角度 θ を為す方向への放射を考えると、放射輝度 L は放射強度 $d\Phi/d\Omega$ を用いて、

$$L(\theta) = \frac{d\Phi/d\Omega}{\sigma_q^{-1} \cos \theta} = \frac{L_q}{f(\theta)} \quad (9)$$

$$L_q \equiv \sigma_q a_q^2 \quad (10)$$

で与えられることがわかる。ここで $f(\theta) = \cos \theta$ であり、 L_q は面の法線方向で観測される輝度である。

この結果から、点光源で形成された面の放射輝度は、 θ が増加するに従って増大し、視線に平行な面では無限大となることがわかる。これは、 θ が大きくなると見かけ上の点光源密度が増加するためとして説明できる。ホログラム作成時点では、光学再生時に観測者が再生物体の表面を観測する方向を知ることはできない。したがって、このような輝度変化を完全に補正することは不可能である。しかし実際には、図3に示した通り、一般にCGHの観測者は $z \ll 0$ に位置しているため、平面 q とホログラムが為す角度 θ_q を用いて観測方向を $\theta \approx \theta_q$ と近似できることが多い。この時には、 $L(\theta_q)$ を一定にするため、

$$L_q \propto f(\theta_q) \quad (11)$$

となるように面 q の点光源密度と振幅を変化することにより、観測方向による輝度の変化を近似的に補正できる。この補正を行った場合、面 q は明るさが面の方向に依らない拡散面となる。この意味で $f(\theta)$ を輝度補正因子と呼んでいる。

3.3 補正量の制限

式(11)の補正を行った場合、ホログラム面と垂直な面($\theta_q = \pi/2$)は $L_q = 0$ となり、見えなくなる。これは、式(9)の放射輝度が $\theta \rightarrow \pi/2$ のとき発散し、表面の輝度が計算上無限大となるのを補正しているためである。しかしながら、前節までの議論は、点光源で平面を形成した場合に観測される光波に関する理論的な考察である。実際にはコーディングを行ってそのような光波を近似的に生成するCGHを作成しなければならない。実際に作製したCGH

の後方より再生光を照射して再生した場合、その CGH を透過する光量は有限であるため、再生物体の面の輝度は無限大にはなり得ない。実際に再生可能な面の輝度の上限は CGH の作製方法と光学再生の方法に依存している。

垂直な面が見えなくなる要因は、輝度補正因子が $f(\pi/2) = 0$ の性質を持つためである。これを防ぐため、本研究では先見的に定数 γ を導入し、 $f(\theta) = \cos \theta + \gamma$ とした。さらに、法線方向の輝度が L_q のままであるように、すなわち $f(0) = 1$ となるように、

$$f_\gamma(\theta) = (\cos \theta + \gamma)/(1 + \gamma) \quad (12)$$

とした。したがって、式 (9) から輝度補正を導くのではなく、式 (9) の $f(\theta)$ を $f_\gamma(\theta)$ で置き換え、

$$L_\gamma(\theta) = \frac{L_q}{f_\gamma(\theta)} = \frac{(1 + \gamma)}{\cos \theta + \gamma} \sigma_q a_q^2 \quad (13)$$

を点光源で形成した面の輝度を表す式として補正に用いた。定数 γ は輝度が計算上発散して過補正になることを防いでいるので、これを補正制限値と呼んでいる。式 (13) では、法線方向の輝度は式 (9) と同様 L_q で与えられ、 $\theta_q = \pi/2$ では、法線方向の輝度に対して L_q/γ 増加するだけである。この補正制限値 γ は、実際の CGH の作製・再生方法とそれによって決まる回折効率等の特性に応じて実験的に決定されなければならない。

4. 連続値ホログラムのマスキングによる輝度の制御

4.1 マスキング

前節の議論でわかる通り、法線方向の輝度は点光源密度と点光源の振幅によって決まるため、そのいずれかを変化して陰影を付けなければならない。しかしながら、点光源密度が減少し過ぎると面として視認できなくなり、また増加しすぎると計算時間が膨大になるなど点光源密度の変調は簡単ではない。また、点光源の振幅変化は、単純閾値法によってコーディングした 2 値のホログラムでは正確に再生されない。これは、図 4 を見ればわかる。図 4 は、点光源が一つの場合の干渉縞強度を 1 次元 ($y = 0$) で描いたものである。この干渉縞強度は $+a_1$ から $-a_1$ の値を取るもので、0 を閾値として 2 値化するのが一般的である。しか

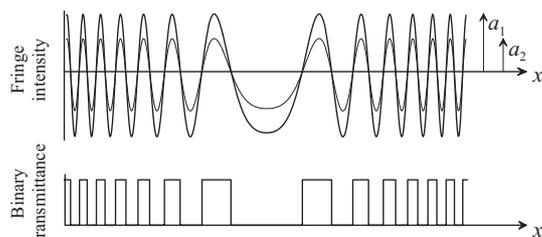


図 4 干渉縞の 2 値化による 1 次元 CGH の透過率分布
Transmittance of an one-dimensional CGH given by hard clips of fringe intensity

しながら図 4 からわかる通り、0 を閾値として 2 値化した場合、異なる振幅 a_2 に対しても、得られる 2 値のホログラムは同一になる。多数の点光源で平面を形成した場合は多少様相が異なるが、振幅変化が正確に再生されないことは同じである。そのため、本研究では点光源密度および振幅は平面に依らず一定とし、以下に述べるマスキングにより再生される平面の輝度そのものを変化した。

式 (5) を平面 q にのみ適用して求められる干渉縞強度分布を 0 から 1 にスケールして得られる連続値ホログラムの透過率分布を $t_q(x, y)$ とし、模式的に図 5(a) に示す。なおここでは、白を透過率 1 に、黒を 0 に対応させてグレイスケールで透過率分布を表している。今もしもこのホログラムを光学再生するものとする、明らかに平面 q の再生時の明るさはホログラム全体を透過する光の量に比例している。そこで本研究では、図 5(b) に示したように各ピクセルが透過率 0 または 1 の値を取る、2 値のマスク画像 $m_q(x, y)$ を平面毎の連続値ホログラム $t_q(x, y)$ に乗算することにより、面 q のホログラムの平均透過率を減少して再生時の光量を制限し、面 q の再生時の明るさを変化した。すなわち、この 2 値マスク画像の平均透過率を M_q とすると、光学再生時の平面 q の輝度は $M_q L_\gamma(\theta_q)$ に比例するので、これを光学再生したい輝度 \hat{L}_q と等しく置いた。つまり、

$$\hat{L}_q = M_q L_\gamma(\theta_q) \quad (14)$$

とした。これは、言い換えれば、一定の面密度と振幅を持つ点光源で形成した平面の光学再生時の明るさが、そのままでは $L_\gamma(\theta_q)$ となるため、マスク画像によって再生時の面の明るさを変化させ、CG の拡散反射モデルで与えられる明るさ (陰影) と一致するように制御していると言える。

なおここで、不要な回折像の発生を防ぐために、2 値マスク画像 $m_q(x, y)$ は乱数によって発生し、その透過率の期待値が M_q と一致するようにしている。

式 (6) と (13) を式 (14) に代入することにより、

$$M_q = f_\gamma(\theta_q) \hat{L}_q / L_q = \frac{(\cos \hat{\theta}_q + l_e)(\cos \theta_q + \gamma)}{1 + \gamma} \quad (15)$$

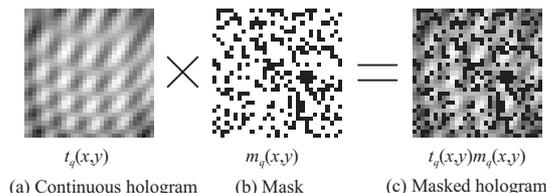


図 5 表面輝度変調のための連続値ホログラムのマスキング処理。(a) 連続値ホログラム。(b) マスク画像。(c) マスキングしたホログラム。

Masking of a continuous hologram for modifying surface brightness in CGHs. (a) A hologram in continuous transmittance. (b) A mask image. (c) A hologram multiplied by the mask image.

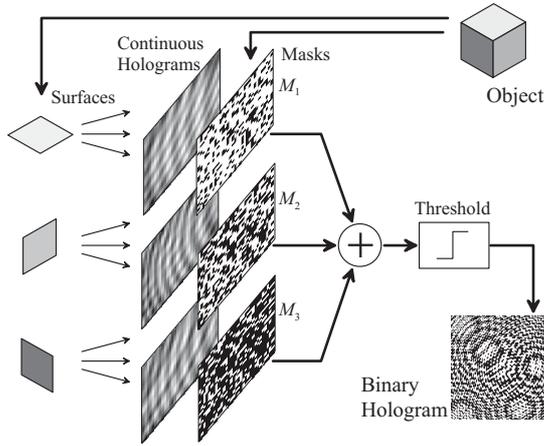


図 6 表面モデルで表現された物体の CGH 合成の手順
The procedure for synthesizing a CGH for an object expressed in a surface model.

を得る．ここで，点光源の振幅と密度を一定としたので $L_q \equiv L_0$ とした．したがって，照明光源から光が垂直に入射し，かつホログラムと平行な平面に対して $M_q = 1$ となる．

なお，このコーディング方法では， $M_q \sim 1$ の場合にはほぼ M_q に比例した明るさが得られると考えられるが， M_q が 0 に近づいた場合，回折率が著しく低下し，面の輝度と M_q の関係が線形でなくなる恐れがあることには注意しなければならない．

4.2 CGH 合成の手順

マスキングを用いて CGH を数値合成する手順を図 6 に示す．まず，表面モデルの物体を平面に分解し，平面毎に照明光源の入射角 $\hat{\theta}_q$ ，さらにその平面とホログラム面との角度 θ_q を求め，マスクの透過率を式 (15) より算出する．なおこの時，隠面は取り除いている．また，マスク透過率 M_q の最大値が 1 以下の場合には，光学再生時の陰影のコントラストを強調するため， M_q の最大値が 1 になるようにすべての面の M_q を線形に拡大している．次に，各平面からの干渉縞強度分布を式 (5) を用いて計算し，この干渉縞強度分布を 0 から 1 の間にスケールして平面 q の連続値ホログラム $t_q(x, y)$ を得る．このホログラムに，やはり各平面毎に発生したマスク $m_q(x, y)$ を乗算し，これを全平面について重畳する．すなわち，物体全体の連続値ホログラム

$$T(x, y) = \sum_{q=1}^Q m_q(x, y)t_q(x, y) \quad (16)$$

を求める．ここで Q は物体を構成する平面の枚数である．最後に $T(x, y)$ を 2 値化することにより CGH を得ている．

5. CGH の光学再生像

5.1 ホログラムの作成と光学再生

前項までで述べた手順に従い，実際の CGH を作製し，光学再生実験を行った．作製した CGH に共通するパラメー

表 1 イメージセッターを用いて作製した CGH の主要なパラメータ

Common parameters for CGHs fabricated by use of an image setter.		
Number of pixels	4800 × 4800	
Sampling pitches	6.25 × 6.25	[μm^2]
Reconstruction wavelength	633	[nm]
Surface density of point sources	6000 ²	[m^{-2}]
z-position of objects	200	[mm]
Dimension of objects (x-width)	5	[mm]

タを表 1 に示す．CGH の作製には，解像度 4064dpi のイメージセッターを用い，2 値の透過率分布を透明フィルム上に印刷した．ピクセルサイズ(サンプリング間隔)は $6.25\mu\text{m}$ であるので，波長 633nm の He-Ne レーザを用いてこのホログラムを赤色光で再生した場合，視域角は約 5.8 度となる．そのため，ホログラムはインライン型とし， x 方向の幅約 5mm の物体をホログラム背面 200mm の位置に配置して CGH の合成を行った．また，CGH は 4800×4800 pixel で作製したため，その実サイズは $30 \times 30 \text{mm}^2$ である．なお，球面波の複素振幅計算には著者らが開発した漸化式による数値計算法¹⁶⁾を用いた．

光学再生には，出力 1mW の He-Ne レーザを光源として用い，空間フィルターを通した後，直径 100mm 焦点距離 400mm のコリメータレンズで平行光としてホログラム背面より垂直に入射した．再生像はホログラム前面に配置したデジタルカメラを用いて記録した．

5.2 輝度補正の効果

図 7 は， \hat{L}_q を一定として，陰影のない立方体を合成した CGH の光学再生像である．したがって，拡散面が再生されれば，この立方体のいずれの面も，陰影のない同一の明るさに見えなければならない．図 7(a) は，さらに $f_\gamma(\theta_q) \equiv 1$ とし輝度補正を一切行わなかった場合である．すなわち，

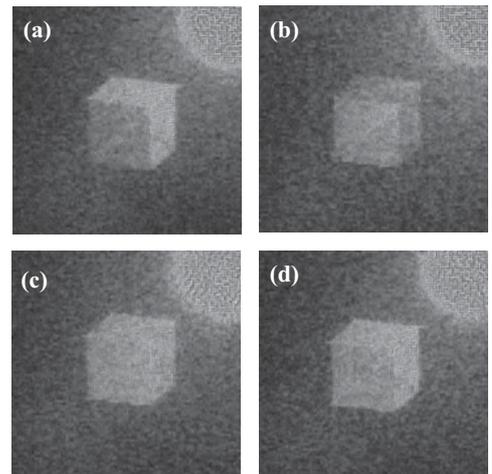


図 7 陰影付け無しの立方体の再生像．(a) 輝度補正無し．それぞれ (b) $\gamma = 0$ ，(c) $\gamma = 0.6$ ，(d) $\gamma = 1.5$ で輝度補正．

Optical reconstruction images of CGHs for a cubic without shading. The CGHs were synthesized without compensation of brightness (a), with compensation in $\gamma = 0$ (b), $\gamma = 0.6$ (c), and $\gamma = 1.5$ (d), respectively.

マスク処理は一切行わず，単純に定振幅・定密度の点光源で平面を形成している．しかしながら，この再生像では明瞭に陰影が観察できる．これは，3.2節で述べた効果によりホログラム面と為す角度 θ_q の大きな面の輝度が高く見えるためである．一方，図 7(b) は，補正制限値 $\gamma = 0$ として補正処理した陰影のない立方体の再生像である．この場合の面の輝度も同一ではなく，しかも (a) とは逆の傾向があることがわかる．これは補正量を制限していないため，過剰補正になり θ_q の大きな面が逆に暗くなっているためである．図 7(c) と (d) は，それぞれ $\gamma = 0.7$ と 1.5 とした場合の再生像である．(c) では面の輝度が完全に同一となり，もはや面の境界が識別できないことがわかる．一方，(d) もほぼ補正されているが，わずかに境界が識別できる．この結果により，本研究では以下， $\gamma = 0.7$ を補正制限値として用いている．

5.3 陰影付けの効果

図 8 は， $\gamma = 0.7$ として補正を行った上，物体の照明光源を設定して \hat{L}_q 値を決定し，陰影付けを施して合成したホログラムの再生像である．仮定した照明光の方向は図 1 の座標系におけるベクトルの成分として示し，図中の矢印で簡易的に表示している．環境光はいずれも $l_e = 1$ としている．図 8(a) はホログラムの観察者の頭上より奥行き方向斜め下へ向かって物体を照明している．また図 8(b) では

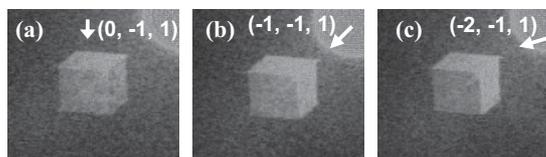


図 8 陰影付けした立方体の再生像．いずれも $\gamma = 0.7$ ， $l_e = 1$ ．
Optical reconstruction images of CGHs for a cubic with shading. All CGHs were synthesized in $\gamma = 0.7$ and $l_e = 1$.

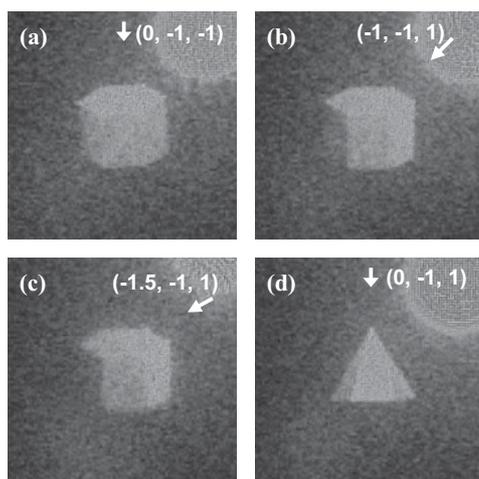


図 9 (a)–(c) 六角柱の再生像．(d) 六角錐の再生像．いずれも $\gamma = 0.7$ ， $l_e = 2$ ．
Optical reconstruction images of CGHs for a hexagonal cylinder (a)–(c), and a hexagonal pyramid (d). All CGHs were synthesized in $\gamma = 0.7$ and $l_e = 2$.

観察者の頭上右手方向より照明しており，(a) に比べると立方体の右側面と上面の明るさが増している．図 8(c) では照明光源の位置が (b) よりもさらに右手に移動しているため，陰影がより深くなっていることがわかる．

図 9 は，同様に輝度補正と陰影付けを施した CGH の再生像である．図 9(a)–(c) は， $l_e = 2$ として作成した六角柱の再生像である．(a) は観察者の頭上から，(b) と (c) は頭上右手より照明しており，(c) は (b) より照明光源の位置がより右手に移動している．それぞれ照明の位置の変化に応じた陰影が表現されていることがわかる．図 9(d) は観察者頭上に照明光源を設定して作成した六角錐である．なお，環境光の比率 l_e は何通りか試みて，最も見易い光学再生像が得られる値に決定している．

6. む す び

本研究では，CG と同様の拡散反射モデルによって陰影付けした表面モデルの物体に対して全方向視差を有する計算機合成バイナリホログラムの作成を試みた．そのために，まず点光源で形成した平面の輝度が観測する方向により変化することを明らかにし，これを補正するための方法を示した．さらに，一般に再生時の明るさを変調することが困難である 2 値の振幅変調型 CGH において，個別に合成した平面の連続値ホログラムをマスキングすることにより平面の輝度を制御する手法を提案した．

これらの手法を実装し，分解能 4064dpi のイメージセッタにより 4800×4800 ピクセルの CGH を作製し，光学再生を試みた．その結果，面の輝度補正が行えることを示し，さらに輝度補正を行った場合には，通常の CG と同様の陰影付けにより陰影のある再生像が得られることを確認した．

イメージセッタによる CGH の作製に関して有益なご助言をいただいた甲子園大学梶木克則先生，ならびに CGH における光線追跡法の歴史的文献についてご教授頂いた日本大学吉川浩先生に深謝いたします．また，本研究を遂行するにあたって，有益な議論とご支援を頂いた関西大学高井正弘先生に感謝いたします．

〔 文 献 〕

- 1) T. S. Huang: "Digital holography", Proc. of IEEE, **59**, pp. 1335–1347 (1971)
- 2) G. Tricoles: "Computer generated holograms: an historical review", Appl. Opt., **26**, pp. 4351–4360 (1987)
- 3) F. Wyrowski and O. Bryndahl: "Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography", J. Opt. Soc. Am., **A 5**, pp. 1058–1065 (1988)
- 4) F. Wyrowski: "Iterative quantization of digital amplitude holograms", Appl. Opt., **28**, pp. 3864–3870 (1989)
- 5) M. A. Seldwitz, J. P. Allebach and D. W. Sweedney: "Synthesis of digital holograms by direct binary search", Appl. Opt., **26**, pp. 2788–2798 (1987)
- 6) L. Legeard, P. Réfrégier and P. Ambs: "Multicriteria optimally for iterative encoding of computer-generated holograms", Appl. Opt., **36**, pp. 7444–7449 (1997)
- 7) J. P. Waters: "Holographic image synthesis utilizing theoretical methods", Appl. Phys. Lett., **9**, pp. 405–407 (1966)
- 8) A. D. Stein, Z. Wang and J. J. S. Leigh: "Computer-generated holograms: A simplified ray-tracing approach", Computers in

- Physics, **6**, pp. 389–392 (1992)
- 9) P. St.-Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente, J. Underkoffler and H. Yoshikawa: “Electronic display system for computational holography”, SPIE Proc. Practical Holography IV, **1212**, pp. 174–182 (1990)
 - 10) P. St.-Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente, J. Underkoffler and H. Yoshikawa: “Real-time holographic display: Improvements using a multichannel acousto-optic modulator and holographic optical elements”, SPIE Proc. Practical Holography V, **1461**, pp. 254–261 (1991)
 - 11) J. Underkoffler: “Occlusion processing and smooth surface shading for fully computed synthetic holography”, SPIE Proc. Practical Holography XI, **3011**, pp. 19–29 (1997)
 - 12) 北村, 浜野, 吉川: “EB 描画によるイメージ型バイナリ CGH(3) —陰面消去・陰影付けによる立体感の向上—”, 3次元画像コンファレンス’99, pp. 314–319 (1999)
 - 13) M. Lucente: “Interactive computation of holograms using a look-up table”, J. Electronic Imaging, **2**, pp. 28–34 (1993)
 - 14) 岩瀬, 吉川: “差分法に基づくフレネルホログラムの高速計算法”, 映像学誌, **52**, pp. 899–901 (1998)
 - 15) H. Yoshikawa, S. Iwase and T. Oneda: “Fast computation of Fresnel holograms employing difference”, SPIE Proc. Practical Holography XIV and Holographic Materials VI, **3956**, pp. 48–55 (2000)
 - 16) K. Matsushima and M. Takai: “Recurrence formulas for fast creation of synthetic three-dimensional holograms”, Appl. Opt., **39**, pp. 6587–6594 (2000)
 - 17) J. L. Juárez-Pérez, A. Olivares-Pérez and R. Berriel-Valdos: “Nonredundant calculation for creating digital Fresnel holograms”, Appl. Opt., **36**, pp. 7437–7443 (1997)
 - 18) A. Ritter, J. Böttger, O. Deussen, M. König and T. Strothotte: “Hardware-based rendering of full-parallax synthetic holograms”, Appl. Opt., **38**, pp. 1364–1369 (1999)
 - 19) 田中, 高橋, 志水: “リアルタイム電子ホログラフィの画質改善”, 3次元画像コンファレンス’96, pp. 219–224 (1996)
 - 20) 西川, 岡田, 松本, 吉川, 佐藤, 本田: “フレネルホログラム計算のハードウェア化の検討”, 3次元画像コンファレンス’95, p. 7 (1995)
 - 21) T. Ito, T. Yabe, M. Okazaki and M. Yanagi: “Special purpose computer holography HORN-1 for reconstruction of virtual image in three dimensions”, Comput. Phys. Commun., **82**, pp. 104–110 (1994)
 - 22) T. Ito, H. Eldeib, K. Yoshida, S. Takahashi, T. Yabe and T. Kunugi: “Special purpose computer for holography HORN-2”, Comput. Phys. Commun., **93**, pp. 13–20 (1996)
 - 23) 下馬場, 阿部, 伊藤: “ホログラフィ専用計算機 HORN-3”, 3次元画像コンファレンス’99, pp. 81–86 (1999)
 - 24) 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)
 - 25) N. Yoshikawa, M. Itoh and T. Yatagai: “Binary computer-generated holograms for security applications from a synthetic double-exposure method by electron-beam lithography”, Optics Lett., **23**, pp. 1483–1485 (1998)
 - 26) A. J. Lee and D. P. Casasent: “Computer generated hologram recording using a laser printer”, Appl. Opt., **26**, pp. 136–138 (1987)
 - 27) 梶木: “マルチ照明法による計算機合成バイナリホログラムの視域の拡大”, 3次元画像コンファレンス’99, pp. 293–294 (1999)



まつしま きょうじ
松島 恭治 1984年, 大阪市立大学工学部応用物理学科卒業. 1990年, 同大学院博士課程修了. 同年 関西大助手, 1996年, 同大専任講師. 2000年, ドイツ Friedrich-Schiller Jena 大学客員研究員. 光励起遠赤外レーザー, 計算機合成ホログラム, 回折光学素子の研究に従事. 工博. 正会員.



ほんじょう かずみ
本庄 和巳 1998年, 関西大学工学部電気工学科卒業. 2000年, 同大学院前期博士課程電気工学専攻修了. 同年, ローム(株)入社.