



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	計算機合成ホログラムにおける微小面集合を用いた反射特性の表現法
Author(s)	山口, 一弘; 坂本, 雄児
Citation	映像情報メディア学会誌 : 映像情報メディア, 63(12), 1846-1852
Issue Date	2009-12-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/58023
Type	journal article
File Information	CGH_20096312.pdf



計算機合成ホログラムにおける微小面集合を用いた反射特性の表現法

Calculation Method Using a Set of Microfacets for Computer-Generated Hologram Considering Reflectance Distributions

学生会員 山口一弘[†], 正会員 坂本雄児[†]

Kazuhiro Yamaguchi[†] and Yuji Sakamoto[†]

Abstract Computer-generated hologram (CGH) is a technology that makes hologram data using a simulation of the recording process of holography. However, there are still many problems with CGH. We describe a calculation method that takes into consideration the reflectance distribution of object surfaces for CGH to improve the reality of reconstructed images. This method is based on the Blinn, or the Torrance-Sparrow, reflection models in CG. In these models, object surfaces are divided into a set of mirror-like microfacets. By calculating the phase differences of object surfaces with these models, various reflectance distributions for CGH are expressed. We did computer-simulated experiments, which compared the light intensity distribution of simulated values on each reflectance factor. We also did optical reconstruction experiments. These experiments showed that the proposed method makes various reflectance distributions of reconstructed images.

キーワード：計算機合成ホログラム，反射特性，Blinn の反射モデル

1. ま え が き

計算機合成ホログラム (CGH : Computer-Generated Hologram) は、ホログラフィにおける記録の過程を計算機内の数値シミュレーションによって行うことでホログラムデータを作成する技術である¹⁾。このデータをディスプレイやフィルム等のデバイスに出力することで立体像が再生できる。また CGH は、ホログラフィと同様に、人間の目の生体機能を満足した立体像を再生でき、計算機内で作成された仮想物体を再生できる点から、将来の 3 次元ディスプレイ技術として注目されている。この CGH は、従来のホログラフィに比べると、レーザやレンズ等の高額かつ精密な光学機器や暗室等の設備を必要とせず、計算機のみでホログラムデータを作成するため、容易にホログラムを作成できる。しかしながら CGH の実用化には、数多くの問題点が報告されており、その中でも特に、計算時間と再生像のリアリティの低さが挙げられる。再生像のリアリティの低さに関しては重大な問題であり、同じように仮想物体

を表示できる技術であるコンピュータグラフィックス (CG : Computer Graphics) のようにきれいな像を作り出すのは困難である。これは、様々なレンダリング技術が CG では確立されているためであり、非常に高い精度の画像・動画が表示可能である。例えば、隠面消去は物体が複数存在している場合の奥行き感を発生させ、シェーディング技術は光源の位置に対応する表示物体の自然な明暗を、反射特性は様々な物体の材質・質感を表現している²⁾。これらの技術を組合せることによって、実写と見間違ふかのような映像が作成されている。これに対し、CGH におけるレンダリング技術に関する研究は数少なく³⁾⁴⁾、リアリティの向上のためにはレンダリング技術の確立が必要不可欠である。特にレンダリング技術の一つである反射特性に関して、現在の CGH 技術で考慮された例は少ない。反射特性は物体の表現に密接な関係があり、同じ物体でも反射特性が異なれば、表面が紙のような物体、プラスチック・金属のような物体と、物体の表現の幅が広がる。そのため、近年の CG に見られるような様々な物質を CGH で表現するためには、この反射特性が確立されなければならない。

本論文では、CGH のリアリティの向上を目的として、反射特性を考慮した新たな CGH 計算法を提案する。提案手法は、CG の分野で確立されている Blinn の反射モデル・Torrance-Sparrow の反射モデルをもとに、物体表面を多数の微小面に分割することで、反射特性を CGH の位相付

2008 年 8 月 29 日受付, 2009 年 7 月 8 日最終受付, 2009 年 9 月 16 日採録

[†]北海道大学 大学院 情報科学研究科

(〒060-0814 北海道札幌市北区北 14 条西 9 丁目, Tel 011-706-6507)

[†]Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

(N14, W9, Kita-ku, Sapporo 060-0814, Japan)

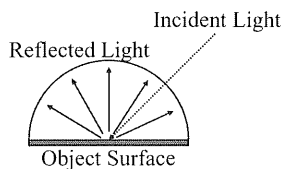


図 1 拡散反射
Diffuse reflection.

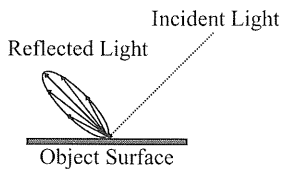


図 2 鏡面反射
Specular reflection.

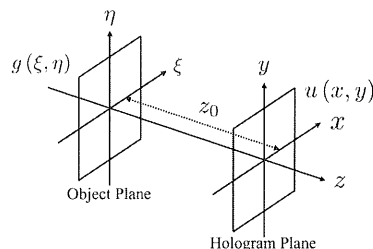


図 3 座標系
Coordinates systems.

与計算に適用したものである。従来の反射特性付与法では、完全鏡面・拡散反射しか表現できなかったり、それらの中間を表現できるものの光源の位置に応じた計算が必要といった問題があった。本手法は、物体表面の形状に応じた位相差を付与することで、理論的には完全鏡面反射から完全拡散反射までの反射特性を表現可能であり、物体や光源の位置が変化したとしても再計算が必要なく、物体表面の特性を変更しているだけなので、他の様々な計算と組み合わせることが可能という利点がある。また、計算機シミュレーションによる光波強度の比較実験、光学再生実験による肉眼での確認および再生像の輝度値とシミュレーション値との比較により、反射特性が表現できていることを確認した。

2. 反 射 特 性

反射特性は、物体表面における反射光の輝度分布を示したものであり、物体の質感や材質を表現するのに用いられている。この分布は、物体に応じて非常に複雑なものとなるが、CG ではこれを簡略化されたモデルとして表現しており、反射特性を拡散反射（図 1）と鏡面反射（図 2）に分割することで表現している。代表的な例では、反射特性を鏡面反射成分と拡散反射成分の比で表す経験則的反射モデルである Phong の反射モデル⁵⁾、幾何光学を用いて粗さのある物体表面における鏡面反射光の反射過程をモデル化した Blinn の反射モデル⁶⁾と Torrance-Sparrow 反射モデル⁷⁾、さらにこれらを拡張し、金属表面の反射を表すのに適した Cook-Torrance 反射モデル⁸⁾などが挙げられる。CG では、これらの反射モデルを材質に応じて使用することで、様々な物体を表現している。

3. CGH 計 算 法

CGH では、物体面からホログラム面へと伝搬する光波を計算し、ホログラム面上での光波と参照光と呼ばれる光との干渉縞を計算することでホログラムデータを作成している。本論文では、光波の伝搬計算として、高速フーリエ変換（FFT：Fast Fourier Transform）を用いて高速な計算が可能である、角スペクトルを用いた手法⁹⁾を用いている。以下、図 3 の座標系に示すように、物体面における複素振幅分布を $g(\xi, \eta)$ 、ホログラム面における複素振幅分布を $u(x, y)$ として説明する。

CGH では光波を複素振幅分布として定義し、光波の振幅・位相を保持することで物体表面での反射計算・ホログ

ラム面までの伝搬計算・参照光との干渉計算を行っている。ここで、振幅は光波の強度を表し、位相が光波の方向を表している。平面物体から CGH を計算する場合は、まず平面の入力画像の輝度値を $g(\xi, \eta)$ の振幅として初期化する。次に反射特性を付与するため、位相差 $\phi(\xi, \eta)$ を加える。

$$\hat{g}(\xi, \eta) = g(\xi, \eta) \exp[-j\phi(\xi, \eta)] \quad (1)$$

ここまでの物体表面での反射計算である。次に物体面からホログラム面へと伝搬するために、反射特性を付与した後の光波分布 $\hat{g}(\xi, \eta)$ に対して、2次元 FFT を行い、物体面における光波を平面波に分解する。

$$G(f_x, f_y) = \mathcal{F}[\hat{g}(\xi, \eta)] \quad (2)$$

ここで、 $\mathcal{F}$ は 2 次元フーリエ変換、 f_x, f_y はそれぞれ x, y 軸方向の空間周波数を表す。次にそれぞれの平面波を物体面からホログラム面へと伝搬する。

$$U(f_x, f_y) = G(f_x, f_y) \exp[j2\pi z_0 f_z] \quad (3)$$

ここで、 z_0 は物体面とホログラム面との距離を表す。また、 f_z は z 軸方向の空間周波数をあらわし、次式を満たす。

$$f_z = \sqrt{(1/\lambda)^2 - f_x^2 - f_y^2} \quad (4)$$

そして、ホログラム面における平面波を重ね合わせる。

$$u(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[U(f_x, f_y)] \quad (5)$$

ここで、 $\mathcal{F}^{-1}$ は 2 次元逆フーリエ変換を表す。上記の計算により、物体面からホログラム面へと光波が伝搬し、ホログラム面における複素振幅分布が得られる。最後に、これをホログラムデータとするために、参照光との干渉を計算する。ホログラム面における参照光の複素振幅分布を $r(x, y)$ とすると、ホログラム面における干渉縞の強度 $I(x, y)$ は、

$$I(x, y) = |u(x, y) + r(x, y)|^2 \quad (6)$$

と表される。このホログラムデータをデバイスに出力することでホログラムを作成し、像を再生することができる。

4. CGH における反射特性付与

4.1 従来手法

CGH では式 (1) に示したように、物体表面の複素振幅

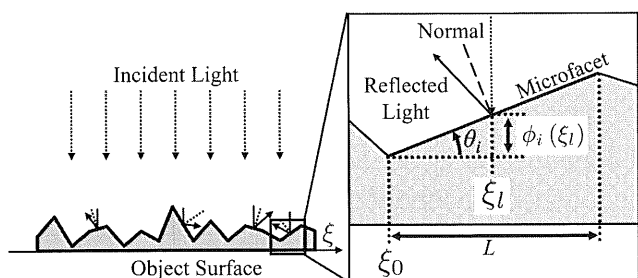


図4 物体表面での反射と微小面での反射
Reflections on the object surface and the microfacet.

分布に対して位相差を付与することで反射特性を付与している。この位相差は、物体表面に入射した光が反射した際の位相のずれを意味しており、位相差によって反射した光が進む方向が変化する。この位相差を付与しない場合は、物体表面で反射した光（物体光）は位相がそろうために、同じ方向へと進む光のみしか存在しない。このため、物体表面は完全な鏡面と定義したものととなり、反射特性は完全鏡面反射の分布を示す。一般的には、物体表面の複素振幅分布に対して、白色性雑音による位相差を付与する方法が用いられている¹⁰⁾。このようにすることで、物体光は様々な方向へと進む光となり、物体表面は完全拡散反射の反射特性を示す粗い物体面と定義される。

このほかに、Cook-Torrance 反射モデルを CGH に適用した研究も報告されている¹¹⁾。この手法は、伝搬関数自体に反射特性を畳み込みすることでホログラムを計算しており、金属カラーの表現ができていたものの、物体面の角度または光源の位置が変わるごとに計算しなおす必要があった。そのため、光源が一つあるいは入射光が平行光波という条件であれば反射特性の表現が可能であるが、多重反射など他の物体から様々な角度で光が入射してくる場合には困難であった。また、完全拡散反射の反射光分布をもとに、拡散する割合を制限することで反射特性を表現しているため、鏡面反射の表現には適していなかった。このように従来手法では、完全鏡面反射と完全拡散反射しか表現できなかったり、拡散反射の調整はできるものの光源の位置に応じた計算が必要という問題があった。そこで新たな反射特性の付与法を提案する。

4.2 提案手法

提案手法では、光源の位置に依存せず、完全鏡面反射・完全拡散反射以外の反射特性の付与を目的とし、Blinn の反射モデル、Torrance-Sparrow 反射モデルをもとにして CGH への適用を行い、完全鏡面反射から完全拡散反射までの反射特性を表現する。Blinn や Torrance-Sparrow 反射モデルは、粗さのある物体表面における鏡面反射光を表現したものであり、鏡面反射光の広がり調整することで反射特性を表現している。これらのモデルでは、図4に示すように、物体表面を多数の微小な鏡面の集まりとして考え、物体表面での反射光をそれぞれの微小な鏡面による鏡

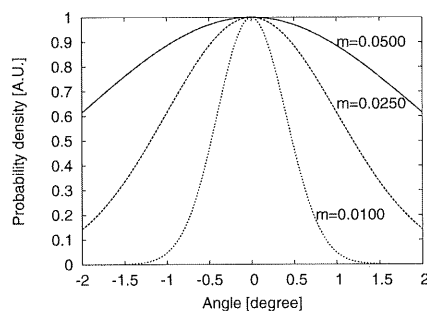


図5 ガウス分布関数
Gaussian distribution function.

面反射の合成として扱っている。これらの微小面は、微小面勾配分布関数によってそれぞれの微小面の傾き角が生成される。微小面の傾き角によって反射光の進む方向が決まるため、反射特性はこの関数によって決定されることとなる。Blinn や Torrance-Sparrow 反射モデルでは、物体表面における反射過程を同様に扱っているが、各々の反射モデルで異なった微小面勾配分布関数を用いている。本論文では微小面勾配分布関数 $D(\theta)$ として、Torrance-Sparrow 反射モデルで用いられている最もシンプルな、次式で表される標準ガウス分布関数を用いた（図5）。

$$D(\theta) = \exp[-(\theta/m)^2] \quad (7)$$

ここで、 θ は微小面の傾き角、 m は反射係数を表す。CG では、ある方向へと進む光線の輝度値に対して、 $D(\theta)$ を乗算することでそれぞれの方向の輝度値を変更し、視点位置に応じた反射特性を表現していた。一方 CGH の場合、観察者の視点位置によって再生像の見え方が変化するため、CG と同様にするだけでは視点に対応した反射特性は表現できない。ここで微小面がある角度 θ で傾いたとき、その微小面での反射光は、その微小面における傾き角と入射光によって決定される正反射方向へと進む。これより、微小面の傾き角からこの微小面における位相差を計算し付与することで、傾き角に応じた方向へ進む物体光を計算できる。図4左に示すように、入射光の複素振幅分布を $g(\xi, \eta)$ とすると、反射光の複素振幅分布 $\hat{g}(\xi, \eta)$ は、

$$\hat{g}(\xi, \eta) = g(\xi, \eta) \exp[-j2\phi_M(\xi, \eta)] \quad (8)$$

と表される。ここで、 $\phi_M(\xi, \eta)$ は微小面の傾きによる位相差である。式(8)より、微小面の傾きによる位相差 $\phi_M(\xi, \eta)$ がわかれば、その微小面での反射光が計算できる。説明の簡略化のため図4のように、物体面に垂直な断面を考える。このとき、大きさが L 、傾き角が θ_i である i 番目の微小面での反射を考えると、この微小面の端の ξ 座標を ξ_0 、微小面中の任意の ξ 座標を ξ_l とすると、この微小面中での位相差 $\phi_i(\xi_l)$ は、

$$\phi_i(\xi_l) = \phi_i(\xi_0) + \frac{2\pi}{\lambda} (\xi_l - \xi_0) \tan \theta_i \quad (9)$$

となる。ここで、 λ は光波の波長を表す。これより、微小

表 1 セットアップ (計算機シミュレーション)
Setup parameters (computer simulation).

Object, Hologram and calculation	
Size	1.6 [mm]
Number of pixels	8192 [pixels]
Sampling pitch	0.18 [μm]
Propagation distance z_0	0.017 [m]
Wavelength λ	632 [nm]
Microfacet size L	256 [pixels]

面の数を M とすると, $\phi_M(\xi)$ は,

$$\phi_M(\xi) = \sum_i^M \phi_i(\xi) \quad (10)$$

となる。ただし,

$$\phi_i(\xi) = \begin{cases} \phi_i(\xi_{0i}) + \frac{2\pi}{\lambda} (\xi - \xi_{0i}) \tan \theta_i, & \xi_{0i} \leq \xi < \xi_{0(i+1)} \\ 0, & \text{その他} \end{cases} \quad (11)$$

であり, $\xi_{0i} = (i-1)L$ を表す。この ϕ_M は, 微小面の法線方向における位相差であり, 理論的に鏡面における反射光というのは, 入射光に対して正反射方向へと進む。そのため, この微小面からの物体光は, $2\phi_M(\xi)$ の位相差が付与されることになる。 η 軸についても同様に計算できる。以上をまとめると, 微小面の傾き角を式 (7) に示す傾き角分布となるように生成し, この微小面における物体光の位相差 $2\phi_M(\xi, \eta)$ を計算し, 式 (8) を用いて入射光の位相に付与することによって, 反射特性を表現することが可能である。

この提案手法による反射特性は, 光波としての性質を満たした反射特性となっている。CG では光線として反射を考えるため, 微小面の傾き角の分布が反射特性を示す。一方, CGH では波としての性質を考えるため, 回折の影響で CG とは異なる反射特性を示す。具体的には, 幅 L の微小面 (鏡) からの反射は, $\Delta\theta \simeq \lambda/L$ の広がり角を持つことになる。このため, 反射特性は CG と比較して, 角度方向になだらかに変化する。

5. 実験と結果

提案手法の有効性を確認するために, 計算機シミュレーションによる反射特性の比較および光学再生実験による確認を行った。

5.1 計算機シミュレーション

提案手法が所望の反射特性を表現できているか確認するために, 計算機シミュレーションによって, 提案手法を用いた場合のホログラム面上における光波強度分布の計算を行った。このとき, 光源は無限遠からのコヒーレントな平面波と仮定した。このシミュレーションでは図 6 に示すように, ξ 軸方向に幅 0.2mm の物体表面を仮定し, この物体表面を幅 0.05mm の微小面によって生成し, z 軸方向に 17mm 離れた位置のホログラム面上における光波強度を計算した。そして物体表面中心からの角度とホログラム面にお

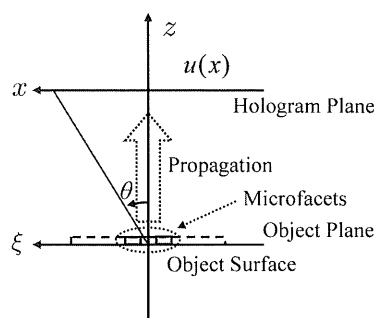


図 6 計算機シミュレーションの設定
Setup of computer simulation.

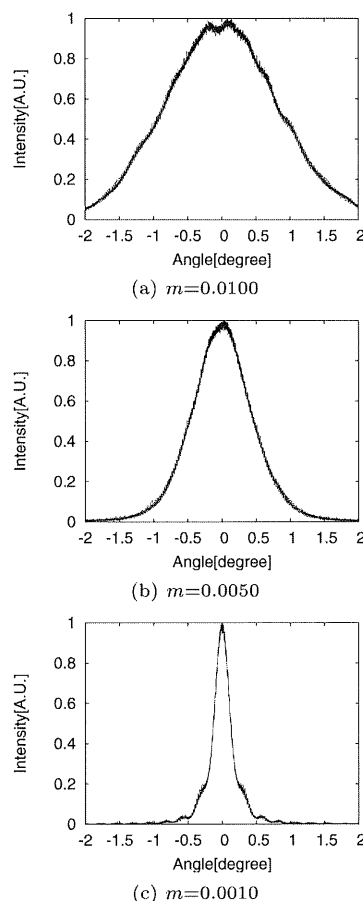


図 7 提案手法による光波強度分布
Intensity distribution by using the proposed method.

ける物体光の光波強度の割合を求めた。このときのパラメータを表 1 に示す。なお, このシミュレーションでは, 微小面は紙面垂直方向に対して無限遠に続くものとしている。また, コヒーレント光を想定しているため, 光波強度分布にはスペックルノイズが含まれている。そのため, 光波強度分布を出力する際には, 各々の値を 1000 回計算し平均化して出力した。実際に人が再生像を見る場合には, 1 回の位相付与計算によって得られた光波分布から生成される像を観察しているが, 一般的に LED 等のインコヒーレント光源を使用して像を再生するため, 時間的インコヒーレントとして人は再生像を観察する。このシミュレーションでは, 完全コヒーレント光を想定しているため, 人が再生像

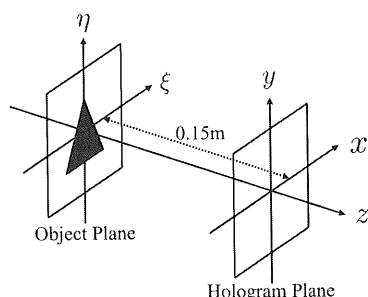


図 8 実験座標系

Coordinate systems of optical reconstruction experiments.

表 2 セットアップ (光学再生実験)
Setup parameters (Optical image reconstruction experiments).

Object, Hologram and calculation	
Size	19 × 19 [mm]
Number of pixels	2048 × 2048 [pixels]
Sampling pitch	9.5 × 9.5 [μm]
Propagation distance z_0	0.15 [m]
Wavelength λ	632 [nm]
Microfacet size L	8 × 8 [pixels]
4K2KLCD	
Size	39 × 21[mm]
Number of pixels	4096 × 2160 [pixels]
Sampling Pitch	9.5 × 9.5 [μm]

を観察する場合の環境に近づけるため、複数回の位相付与計算による光波分布の平均値によって比較している。

その結果を図 7 に示す。図 7 は、図 6 に示すように、物体面中心を基準としたホログラム面に対する角度 θ と、その角度における光波強度の割合を出力したものであり、それぞれの光波強度の最大値で割っている。(a), (b), (c) はそれぞれ、 $m = 0.0100, 0.0050, 0.0010$ の場合である。

図 7 を比較すると、反射係数 m に応じて、光波強度の広がり幅が変化していることが確認される。 m を大きくすると微小面の傾き角が大きくなるため様々な方向へと反射光は進み、光波強度の広がり幅は大きくなる。一方 m を小さくした場合は、微小面は先ほどに比べ傾き角が小さいものが増える。このため、光波は広い角度に広がらなくなることから、完全鏡面反射に近づいていくこととなる。これらより、微小面の傾き角の分布を反射係数 m によって調整することで、完全拡散反射から完全鏡面反射までの反射特性の可能性が示せていることがわかる。

5.2 光学再生実験

次に、提案手法を用いて計算したホログラムデータを用いて、光学再生実験を行った。比較対象の従来手法は白色性雑音を用いた手法とし、従来手法、提案手法ともに光源の位置は、 x, y 軸に対して 0 度の方向、つまり z 軸の正の方向から平行光波が来ると仮定している。また、出力するデバイスとして反射型液晶パネルを使用し、液晶の性能および計算のパラメータは表 2 の通りであり、図 8 に示す座標系で入力画像として、1 辺の長さが 1cm である平面の正三角形を用いた。再生照明光として赤色 LED を使用し、再

生像をデジタルカメラによって撮影したものを図 9～12 に示す。

ここで、図 9 は従来手法の白色性雑音を位相に付与した場合、図 10 は提案手法の $m=0.1000$ の場合、図 11 は $m=0.0010$ の場合、図 12 は $m=0.0001$ の場合における再生像であり、(a) はそれらを正面から撮影したもの、(b) は右から撮影したものとなっている。このときの光源は、(a) は三角形の上、(b) は三角形の右上に見える。

従来手法の白色性雑音の場合 (図 9) では、正面からの場合でも右からの場合でも、三角形の全体が明るくなって再生されていることが確認される。提案手法の $m=0.1000$ の場合 (図 10) でも同様に再生像が明るく表示されていることが確認される。従来手法の場合では、反射特性が完全拡散反射であるため、どの位置からでも像が一樣に明るく見える。提案手法の $m=0.1000$ の場合も同様に、拡散反射の割合が大きいため、従来手法のような反射特性に近い再生像が得られていることがわかる。一方、反射係数をさらに小さくした $m=0.0010$ (図 11) と $m=0.0001$ (図 12) の場合では、正面から見たときは三角形の全体が表示されていることが確認されるが、右から見た場合では、光源から遠い位置にある三角形の左下の部分は暗くなっており、光源に近い位置にあたる部分が明るくなっていることがわかる。これは反射係数を小さくしたことにより、傾き角の生成される幅がガウス分布により小さくなる。そのため傾きのない微小面が多く分布することになり、傾きのない微小面の正反射方向に対応する 0 度の位置である正面の位置には反射光は強く届く。しかし、0 度以外の角度が大きい位置では、その位置に進む反射光が 0 度に比べると非常に少ないため、光がほとんど届かないことになり、反射特性は鏡面反射の割合が大きくなっていることがわかる。これらより、再生像の反射特性が提案手法により表現されていることがわかる。

また、撮影画像の輝度値と撮影位置から、物体から視点までの角度を算出し角度と輝度値の割合を測定した。測定方法は、まず 1 枚の右からの再生像を撮影した画像を用いて、画像中の光源の中心における縦のピクセルを 0 度とする。そして再生像のある横一列の輝度値を測定し、撮影距離と画像のピクセルピッチから角度を計算し、角度における輝度値の割合を算出した。この結果を図 13 に示す。図 13 では、それぞれの反射係数に応じた計算機シミュレーションによる光波強度のグラフ (実線) と撮影画像から測定した結果 ("+") を表している。それぞれの反射係数ごとにシミュレーション値と測定値を比較すると、傾向が類似していることが確認される。

このときのずれの原因としては、実験環境における精度の影響が考えられる。比較対象のシミュレーション値は、完全コヒーレントな平行光波を想定して計算しているが、この実験で再生照明光として使用した LED は時間的インコヒーレンスであり、また有限距離に配置しているため、完

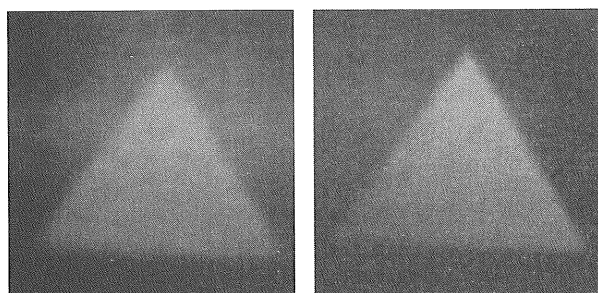


図 9 従来手法 (白色性雑音位相付与)
(a) 正面からの再生像 (b) 右からの再生像
Conventional method (add white noise phase).
(a) from the front. (b) from the right.

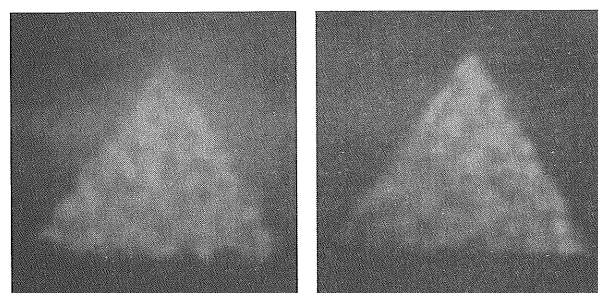


図 10 提案手法 ($m = 0.1000$)
(a) 正面からの再生像 (b) 右からの再生像
Proposed method ($m = 0.1000$).
(a) from the front. (b) from the right.

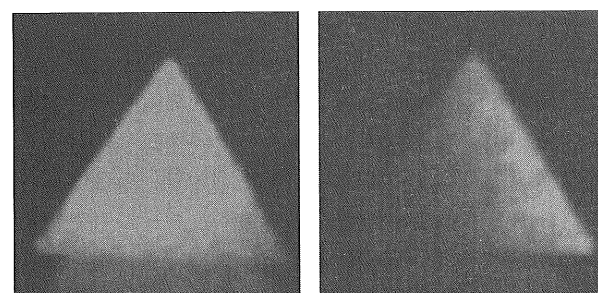


図 11 提案手法 ($m = 0.0010$)
(a) 正面からの再生像 (b) 右からの再生像
Proposed method ($m = 0.0010$).
(a) from the front. (b) from the right.

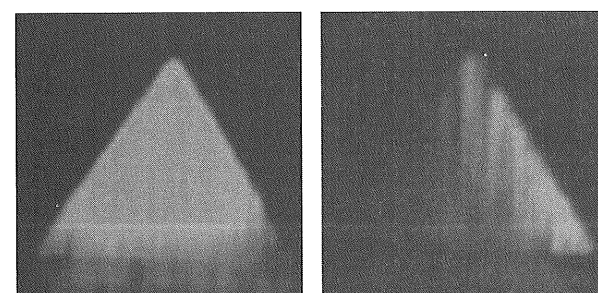
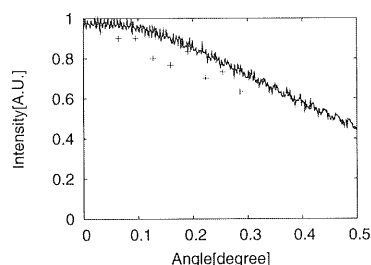
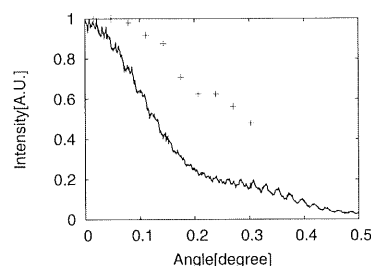


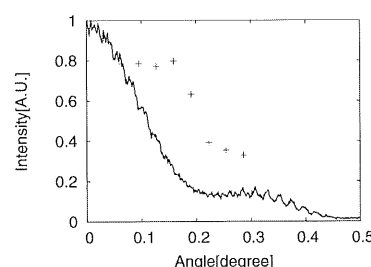
図 12 提案手法 ($m = 0.0001$)
(a) 正面からの再生像 (b) 右からの再生像
Proposed method ($m = 0.0001$).
(a) from the front. (b) from the right.



(a) $m = 0.0050$



(b) $m = 0.0010$



(c) $m = 0.0001$

図 13 シミュレーション値と実測値との比較
実線: シミュレーション値
+: 実測値

Comparing with simulated values and measured values.
line: simulated values.
+: measured values.

全な平行光波にはならない。そのため、シミュレーション値と比較すると実測値は角度方向に広がることになる。また、今回は物体表面の微小面数が少ないため、微小面間による干渉の発生が考えられる。この干渉により、物体表面が鏡面に近いときには階段状な光波強度分布となり、拡散面に近いときには光波の広がり幅が狭くなる。今後は、よりコヒーレントなレーザ光を再生照明光として用いたり、微小面を十分に密に取ることが必要だと考えられるが、比較する角度範囲が非常に狭いことから、人が再生像を観察する際にはシミュレーション値と実測値にそれほど大きな差はないと考えられる。

6. む す び

本論文では、完全鏡面反射・完全拡散反射以外の反射特性を表現可能な CGH 計算法を提案した。提案手法は、Blinn や Torrance-Sparrow 反射モデルを CGH の位相付与計算に適用したものであり、物体表面を多数の微小面に分割し、それぞれの微小面の傾き角を変更することで、物体表面の形状に応じた位相差を付与することで反射特性を表現している。

シミュレーションとして、反射係数 m に応じた提案手法を用いた場合のホログラム面上の光波強度分布を比較した結果、完全鏡面反射から完全拡散反射までの反射特性の可能性が示せた。また、LCD を用いて実際に像を再生し、光学再生実験を行った。その結果、肉眼でも再生像の見え方が変化した点から、反射特性が確認された。

今後の課題としては、微小面間の多重反射および遮蔽を考慮する必要がある。微小面の傾き角が大きい場合、その微小面での反射光は隣り合う微小面によって反射される。Blinn や Torrance-Sparrow 反射モデルでは、これを遮蔽して表現しているため、厳密な反射を表現するために、これらの反射あるいは遮蔽を今後検討する必要がある。また、微小面の大きさによって反射特性がかわることが考えられるが、この点についても今後の検討課題とする。

最後に、本研究を行うに当たり、日本ビクター株式会社 久里浜 R&D センターには多大なご協力を頂きました。ここに感謝申し上げます。

〔文 献〕

- 1) J. P. Waters: "Holographic image synthesis utilizing theoretical methods", Appl. Phys. Lett. **9**, pp.405-407(1966)
- 2) "3次元映像ハンドブック", 朝倉書店 (2006)
- 3) 坂本雄児: "影伝搬法を用いた計算機合成ホログラムの隠面消去法", 信学論, **J85-D-II**, 12, pp.1832-1839(2002)
- 4) K. Matsushima: "Computer-Generated Holograms for Three-Dimensional Surface Objects with Shade and Texture", Applied Optics, **44**, pp.4607-4614(2005)
- 5) Bui-Tuobg Phong: "Illumination for Computer Generated Pictures", Communications of the ACM, **18**, No.6, pp.311-317(1975)
- 6) J. F. Blinn: "Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures", Proceedings of SIGGRAPH '77, pp.192-198(1977)
- 7) K. E. Torrance and E. M. Sparrow: "Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces", J. Opt. Soc. Am. **57**, pp.1105-1114(1967)
- 8) R. Cook and K. Torrance: "A Reflectance Model for Computer Graphics", ACM Transactions on Graphics, **1**, No.1, pp.7-24(1982)
- 9) J. W. Goodman: "Introduction to Fourier Optics 2nd ed", Chap.3.10(1996)
- 10) R. Bräuer, F. Wyrowski and O. Bryngdahl: "Diffusers in Digital holography", J. Opt. Soc. Am. **A8**, pp.572-578(1991)
- 11) 坂本雄児, 鶴野敦士: "計算機合成ホログラムにおける物体光沢の表現法", 信学論, **J88-D-II**, 10, pp.2046-2053 (2005)



やまぐち かずひろ
山口 一弘

2007 年, 北海道大学工学部情報工学科卒業。2009 年, 同大学大学院情報科学研究科メディアネットワーク専攻修士過程修了。現在, 同大学大学院情報科学研究科メディアネットワーク専攻博士後期過程在学中。計算機合成ホログラムに関する研究に従事。学生会員。



さかもと ゆうじ
坂本 雄児

1983 年, 北海道大学工学部電気工学科卒業。1988 年, 同大学大学院博士課程了。同年, (株)日立製作所中央研究所入社。1990 年, 北海道大学情報工学科助手。1994 年, 室蘭工業大学電気工学科助教授。2000 年, 北海道大学工学研究科電子情報工学専攻助教授。現在, 同大学大学院情報科学研究科准教授。計算機合成ホログラム, 3D 画像処理, CG, デジタル無線通信に関する研究に従事。工博。正会員。