

シルエット近似を用いた全方向視差 CGH の隠面消去

近藤 暁靖^{†*} 松島 恭治^{†a)}

Hidden Surface Removal in Full-Parallax CGHs by Using the Silhouette Approximation

Akinobu KONDOH^{†*} and Kyoji MATSUSHIMA^{†a)}

あらまし 本論文では、全方向視差計算機合成ホログラムにおいて隠面消去処理を施す方法について報告している。まず、本論文では傾いたパッチによる光の遮へいを波動光学的に厳密に取り扱う方法を議論し、次にそれを簡略化したシルエット近似を提案する。また、このシルエット近似を用いて隠面消去した物体光波を合成するための漸化式を示す。更に、提案手法で作成した表面モデル物体の全方向視差ホログラムの光学再生像が、ホログラムを観察する視点の変化に応じて自然に重なりが変化することを示す。本手法により、全方向視差計算機合成ホログラムにおいても縦方向視差を放棄したホログラムと同様に隠面消去が可能となる。

キーワード 3次元画像、立体画像、計算機合成ホログラム、隠面消去、シルエット近似

1. まえがき

計算機内に保持した物体モデルから発せられる光波とその干渉をシミュレートして作成する計算機合成ホログラム (Computer-Generated Hologram, 以下 CGH) は、実在の物体が必要な従来のアナログホログラムと対比してデジタル合成ホログラムと呼ばれることもある立体画像技術である。立体感のある画像を再生する技術は数多くあるが、その多くは単に人間の生理的な立体感を刺激するものであり、物体からの光そのものを合成して提示する CGH はそれらとは一線を画する技術である。一方、CGH を作成するためには極めて高解像度の印刷/表示デバイスが必要であることや、物体光波の数値合成に莫大な演算時間が必要という問題点を抱えている。

3次元の物体モデルからの光波の数値合成法として、点光源法 [1], [2] が現在最もよく用いられている^(注1)。この手法は手順が単純であり、表面モデルに適用して陰影付け等の処理 [3] が比較的簡単にできる利点がある反面、計算量が多いという問題点がある。点光源法

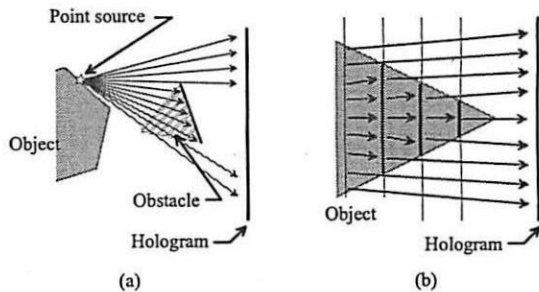


図1 従来から用いられる CGH の隠面消去法。(a) 幾何学的手法、(b) 断層法

Fig.1 Conventional algorithms for hidden-surface removal in CGHs; geometrical methods (a) and the layered method (b).

による光波合成において計算時間を短縮する手法 [4]~[9] が各種提案されているが、全方向視差ホログラムでは依然として莫大な計算時間を必要とする。

点光源法 CGH における隠面消去処理としては、いくつかの幾何学的手法 [10]~[12] が提案されている。これらはその実現方法に多少の差異があるものの、図 1 (a) に示したように、光線と交差する物体 (あるいはパッチ) による光線の遮へいを幾何学的に求める。この交差判定をすべての点光源とホログラムのサンプル

(注1): この手法は光線追跡法とも呼ばれるが、この用語は CG におけるそれではなく幾何光学の用語から来ており、混乱を避けるため本論文では点光源法と呼ぶ。

[†] 関西大学工学部先端情報電気工学科, 吹田市
Department of Electrical Engineering and Computer Science, Kansai University, 3-3-35 Yamato-cho, Suita-shi, 564-8680 Japan

* 現在, 松下電器産業株式会社

a) E-mail: matsu@kansai-u.ac.jp

リング点の組合せについて行わなければならないため、点光源法自体の計算量の莫大さと相まってその計算には長大な時間を要する。そのため、幾何学的手法を全方向視差ホログラムに適用することは現在の計算機の能力では困難であり、現在まで幾何学的手法で報告されている隠面消去はいずれも縦方向視差を放棄した CGH を対象としている。

一方、非幾何学的手法として、手前に位置する物体による後方の物体からの光の遮へいを波動光学的に計算する方法が、断層法として CGH の初期のころより Lohmann により提案されている [13]。図 1(b) に示したとおり、この方法では物体をホログラムに平行な平面で切断し、各平面からの光波伝搬を数値的に求めてホログラム上で重畳する。このとき、物体空間の奥から順に計算を行い、物体の内外を示すマスク関数でマスクングすることにより光波を遮へいする。光波伝搬の数値計算は高速フーリエ変換（以下 FFT）を用いて行えるため、全方向視差ホログラムでも実用的な時間で計算が可能である。この手法の最も大きな問題点は、表面モデルの物体であっても、その断層面からの光波の合成となることである。そのため、表面の陰影付けやテクスチャマッピングなどのレンダリング処理が困難である。また最近、波動光学的手法の一種としてバビネの原理に基づく隠面消去法 [14], [15] が提案されているが、傾いたパッチに対する隠面消去の具体的方法と結果は示されていない。

以上まとめると、断層化しない表面モデルの物体の全方向視差 CGH では、現在のところ現実的な隠面消去手法は提案されていないのが現状である。そこで本論文では、全方向視差 CGH において表面モデル物体にも適用可能な実用的な隠面消去の一手法を提案する。

提案手法では、Lohmann の断層法と同様、光波遮へいの計算に波動光学的手法を用いる。この遮へい計算では、ホログラムに対して傾いた平面での光波複素振幅の計算が必要であるが、これには既に報告されている 2 回の FFT と 1 回の補間による計算法 [16], [17] を用いた光波遮へいを検討し、それを簡略化した近似的な光波遮へい手法を提案する。一方、光波そのものを発生する方法は提案手法とは独立しており、上述の点光源法や物体表面からの回折計算に基づく手法 [18]~[20] 等いずれの方法を用いることもできる。本論文では、光波発生手法として実装やシェーディング処理等が容易な点光源法を用いている。その意味では、本論文で報告する実装は、幾何学的手法と波動光学的手法

のハイブリッド的手法といえる。これにより、物体を断層化することなく隠面処理を施し、表面モデルのまま陰影付け等が可能となる。

まず本論文では、パッチで構成された表面モデルの物体において傾いたパッチによる厳密な光波遮へいの理論を検討する。次にこの厳密手法を簡単・高速化する方法としてシルエット近似を提案する。更にこのシルエット近似を用いた具体的な光波合成の手順を示し、最後に提案手法により作成した CGH の光学再生像を示す。

2. 傾いた物体平面による光波遮へい理論

2.1 断層法における光波遮へい

図 2 は Lohmann の断層法の原理を表している。ホログラムが $(\hat{x}, \hat{y}, 0)$ 平面にあり、 \hat{z} が物体空間の奥行位置を表しているとする。ホログラムと平行で $\hat{z} = \hat{z}_0$ の位置にある平面 V で物体を切断し、背面より平面 V に入射する光波の複素振幅分布を $\hat{h}(\hat{x}, \hat{y})$ とする。また V 上で物体の内外を表す 2 値関数をマスク関数 $\hat{m}(\hat{x}, \hat{y})$ として定義する。すなわち、

$$\hat{m}(\hat{x}, \hat{y}) = \begin{cases} 0 & (\text{物体内部}) \\ 1 & (\text{物体外部}) \end{cases} \quad (1)$$

とする。このとき、平面 V 上で物体により遮へいされた光波は

$$\hat{h}'(\hat{x}, \hat{y}) = \hat{m}(\hat{x}, \hat{y})\hat{h}(\hat{x}, \hat{y}) \quad (2)$$

となる。更に V 上の物体断面から放出される光を $\alpha(\hat{x}, \hat{y})$ とすると、平面 V 上での光波複素振幅分布は $\hat{h}'(\hat{x}, \hat{y}) + \alpha(\hat{x}, \hat{y})$ と表されるので、これを次の断面を含む平面まで伝搬させる。このような処理を物体空間

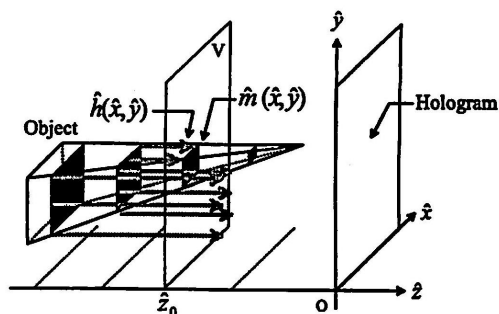


図 2 座標系と断層法の原理

Fig. 2 The principle of the layered method and the coordinate system used for theoretical consideration.

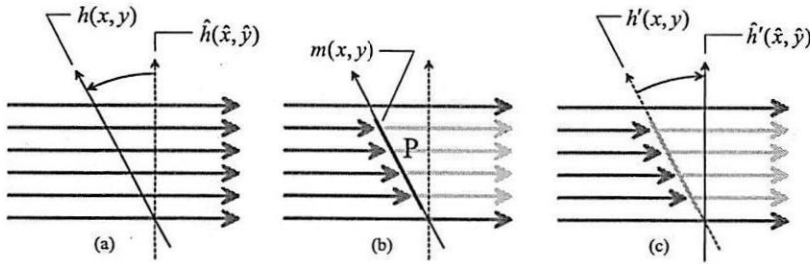


図3 傾いたパッチによる波動光学的な光波遮へい計算の手順. (a) フーリエ空間における座標回転による傾いた平面上での光波複素振幅の計算. (b) マスク関数による遮へい. (c) 逆回転によるホログラムと平行な平面上での光波複素振幅の計算

Fig.3 The basic procedure for hidden surface removal by employing a wave-optical method. The incident field is obtained on an object surface by the coordinate rotation in Fourier domain (a) and masked behind the patch (b). Finally, the masked field is again rotated, i.e. its complex amplitude is calculated on a plane parallel to the hologram (c).

の最も奥の平面からホログラムの方向へ順次行くことにより、隠面消去された光波を求めることができる。

2.2 傾いたパッチによる光波遮へい

傾いたパッチによる光波遮へいを考える場合、上記のように物体断面のマスク関数で遮へいするのではなく、表面モデルで記述された物体表面のパッチ P の背面から入射する光波の P による遮へいを厳密に求める。すなわち、 $z = z_0$ に位置する平面 V と交差して傾いたパッチ P があり、V に入射する光波 $\hat{h}(\hat{x}, \hat{y})$ の一部を遮へいしているものとする。このパッチ P による遮へいを受けた光波 $\hat{h}'(\hat{x}, \hat{y})$ を計算するためには次の手順が必要になる。

まず、 $(x, y, 0)$ 平面内にパッチ P を含む傾いた座標系 (x, y, z) を定義する。次に図 3(a) に示すとおり、光波 $\hat{h}(\hat{x}, \hat{y})$ をフーリエ空間で座標回転し、傾いた座標系上で複素振幅 $h(x, y)$ をもとめる [16]。そのためには、フーリエスペクトル $\hat{H}(\hat{u}, \hat{v}) = \mathcal{F}\{\hat{h}(\hat{x}, \hat{y})\}$ を

$$H(u, v) = \mathcal{R}\{\hat{H}(\hat{u}, \hat{v})\} \tag{3}$$

として座標回転する。ここで、 $\mathcal{R}\{\cdot\}$ は座標系の回転のための変数変換

$$\begin{pmatrix} \hat{u} \\ \hat{v} \\ \hat{w} \end{pmatrix} = \mathbf{T} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}, \quad \mathbf{T} = \begin{pmatrix} \hat{a}_1 & \hat{a}_2 & \hat{a}_3 \\ \hat{a}_4 & \hat{a}_5 & \hat{a}_6 \\ \hat{a}_7 & \hat{a}_8 & \hat{a}_9 \end{pmatrix} \tag{4}$$

を表している。なおここで、フーリエ周波数 $(\hat{u}, \hat{v}, \hat{w})$, (u, v, w) と波長 λ の間には、

$$\hat{w}(\hat{u}, \hat{v}) = \sqrt{\lambda^{-2} - \hat{u}^2 - \hat{v}^2} \tag{5}$$

$$w(u, v) = \sqrt{\lambda^{-2} - u^2 - v^2} \tag{6}$$

の関係がある。この回転したスペクトルは回転変換の近軸近似 [16] のもとでは、逆フーリエ変換で傾いた平面上の複素振幅に戻される。

$$h(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{H(u, v)\} \tag{7}$$

結局、傾いた平面上での光波複素振幅は

$$h(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\mathcal{R}\mathcal{F}\{\hat{h}(\hat{x}, \hat{y})\} \tag{8}$$

で表され、2 回の FFT と 1 回の変数変換が必要である。なお、数値計算時には、この変数変換でサンプリングが不均等になるため補間が必要になる。

今、傾いた平面 $(x, y, 0)$ 上で、パッチ P 内では 0、パッチ P 外では 1 の値をとるマスク関数 $m(x, y)$ を定義すると、図 3(b) のように、この平面を通過した直後の遮へいされた光波は、

$$h'(x, y) = h(x, y)m(x, y) \tag{9}$$

となる。

$h'(x, y)$ をそのまま再び伝搬した場合、パッチの法線方向へ計算が進むことになる。そこで、パッチへの入射光波 $\hat{h}(\hat{x}, \hat{y})$ と同一平面上でパッチにより遮へいされた出射光波 $\hat{h}'(\hat{x}, \hat{y})$ を求める。そのためには、 $h'(x, y)$ を、図 3(c) に示したように、ホログラムと平行な平面上へ再び回転すればよい。したがって、傾いたパッチで遮へいされた光波は、

$$\begin{aligned} \hat{h}'(\hat{x}, \hat{y}) &= \mathcal{F}^{-1}\mathcal{R}^{-1}\mathcal{F}\{h'(x, y)\} \\ &= \mathcal{F}^{-1}\mathcal{R}^{-1}\mathcal{F}\{\mathcal{F}^{-1}\mathcal{R}\mathcal{F}\{\hat{h}(\hat{x}, \hat{y})\}m(x, y)\} \end{aligned} \tag{10}$$

と表される。ここで、 $\mathcal{R}^{-1}\{\cdot\}$ は逆回転の変数変換である。

2.3 遮へいのシルエット近似

以上の手順をそのまま行くと、4回のFFTと補間を伴う変数変換が2回必要となり、大変効率が悪い。光波の伝搬計算はフーリエ空間でも行えるので、遮へいのみを扱うのであればフーリエ空間で光波 $\hat{H}(\hat{u}, \hat{v})$ を操作することにより2回のFFTと補間で遮へい計算が可能であるが、その場合、実際の物体光波合成においてパッチ自体からの光波もフーリエ空間で扱う必要がある。

実空間で遮へいを扱う場合、 $\hat{h}(\hat{x}, \hat{y})$ を座標回転し再び逆回転していることから、何らかの近似によりこれらの手順を統合・簡略化することが望ましい。この簡略化を困難にしている要因は式(5)の非線形性である。

そこで $\hat{w}(\hat{u}, \hat{v})$ を

$$\hat{w}(\hat{u}, \hat{v}) \simeq \lambda^{-1} [1 - (\lambda\hat{u})^2/2 - (\lambda\hat{v})^2/2] + \dots \quad (11)$$

と展開する。今、ホログラムのサンプリング間隔が波長より十分に粗く、 $\hat{h}(\hat{x}, \hat{y})$ のスペクトル幅が狭い、すなわち $\hat{u}, \hat{v} \ll \lambda^{-1}$ が仮定できる場合には、式(11)を最低次数で打ち切り、 $\hat{w}(\hat{u}, \hat{v}) \sim \lambda^{-1}$ と近似できる。この場合、 $\hat{h}(\hat{x}, \hat{y})$ の物体平面Sによる遮へいは

$$\hat{h}'(\hat{x}, \hat{y}) = m(\hat{a}_1\hat{x} + \hat{a}_4\hat{y}, \hat{a}_2\hat{x} + \hat{a}_5\hat{y})\hat{h}(\hat{x}, \hat{y}) \quad (12)$$

に帰着する(付録参照)。これは、パッチPに対するマスク関数 $m(x, y)$ を $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}_0)$ 平面に投影してできるシルエットをマスク関数として光波 $\hat{h}(\hat{x}, \hat{y})$ を遮へいすることを意味している。以下、これを遮へいのシルエット近似と呼ぶ。

3. シルエット近似隠面消去による物体光波合成の手順

今、図4に示したように、光波合成を行う物体を構成するパッチを物体空間の奥から P_1, \dots, P_N とし、それと交差するホログラムに平行な平面を V_1, \dots, V_N 、その奥行位置をそれぞれ $\hat{z}_1, \dots, \hat{z}_N$ とする。ここで N は総パッチ数である。なお、パッチ同士が相互に交差することはないものとする。

パッチ P_{n-1} より奥にあるパッチから発せられ、ホログラムに到達する光波の一部は、パッチ P_n によって遮へいされているので、ホログラムを光学再生した場合観察することができない。そこで、傾いたパッチ P_n に対するマスクを平面 V_n へ投影したシルエット

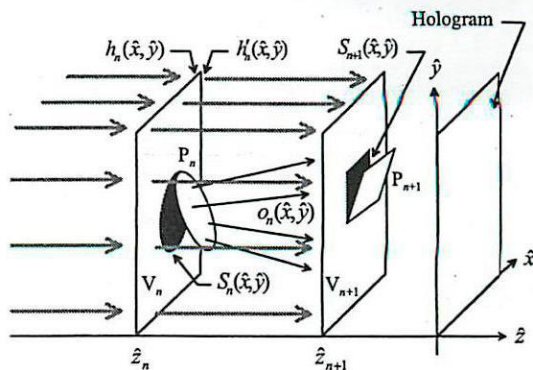


図4 シルエット近似による波動光学的遮へいを用いた物体光波の合成

Fig.4 Synthesis of object waves with a wave-optical masking in the silhouette approximation.

マスク関数 $S_n(\hat{x}, \hat{y})$ を定義する。いま、平面 V_n より奥に位置するパッチからの光波が V_n 上で、 $h_n(\hat{x}, \hat{y})$ であるとすると、この光波はシルエットマスク関数 $S_n(\hat{x}, \hat{y})$ でマスクされる。すなわち、平面 V_n を通過した直後の光波の複素振幅は、

$$h'_n(\hat{x}, \hat{y}) = S_n(\hat{x}, \hat{y})h_n(\hat{x}, \hat{y}) \quad (13)$$

となる。

次にこの $h'_n(\hat{x}, \hat{y})$ の回折伝搬計算によって平面 V_{n+1} 上へ伝搬させ、 V_{n+1} 上での複素振幅分布 $F_{d_n}\{h'_n(\hat{x}, \hat{y})\}$ を求める。ここで、 $F_{d_n}\{\cdot\}$ は、伝搬距離 d の回折伝搬演算を表す演算子であり、 $d_n = |\hat{z}_{n+1} - \hat{z}_n|$ とする。こうして求めた V_{n+1} 上での伝搬光の複素振幅分布 $F_{d_n}\{h'_n(\hat{x}, \hat{y})\}$ に、パッチ P_n 自体から発せられて V_{n+1} に達する光波 $o_n(\hat{x}, \hat{y})$ を重畳することにより、平面 V_{n+1} 上においてそれより奥のパッチからの全光波を求めることができる。すなわち、シルエット近似を用いて隠面を遮へいた光波は次の漸化式で表されることになる。

$$\begin{aligned} h_{n+1}(\hat{x}, \hat{y}) &= F_{d_n}\{h'_n(\hat{x}, \hat{y})\} + o_n(\hat{x}, \hat{y}) \\ &= F_{d_n}\{h_n(\hat{x}, \hat{y})S_n(\hat{x}, \hat{y})\} + o_n(\hat{x}, \hat{y}) \end{aligned} \quad (14)$$

物体空間の最も奥に位置するパッチ P_1 からの光波は、

$$h_2(\hat{x}, \hat{y}) = o_1(\hat{x}, \hat{y}) \quad (15)$$

となり、以下、物体空間の奥からホログラムの方向に向かって、漸化式(14)に従って光波複素振幅 $h_n(\hat{x}, \hat{y})$ を順に求める。仮想物体の総パッチ数は N なので、最

最終的にホログラム上における光波の複素振幅分布は

$$h_H(\hat{x}, \hat{y}) = F_{|\hat{z}_N|} \{ h_N(\hat{x}, \hat{y}) S_N(\hat{x}, \hat{y}) \} + o_N(\hat{x}, \hat{y}) \quad (16)$$

となる。

4. 隠面消去したホログラムの光学再生像

4.1 ホログラムの作成と光学再生実験

前章までで述べた手順に従い実際に CGH を作成し、光学再生実験を行った。作成した CGH の基本的なパラメータを表 1 に示す。

各パッチからの物体光波 $o_n(\hat{x}, \hat{y})$ は、漸化式を用いた点光源法 [9] によって求めた。これは、実装とシェーディング処理が容易な点、それに計算時間が短いことが理由である。一般に点光源法による物体光波計算は遅いが、これは物体から離れたホログラム面で物体光波を計算するためである。すなわち、ホログラム面では光が広範囲に拡散するため広い範囲で球面波計算を行う必要があるためである。本研究のように点光源の位置から光波を求める V_{n+1} 面までの距離が短い場合には、回折角の制限により光はまだそれほど広がらず、計算しなければならぬ範囲が極めて狭い。このような状況では計算手法の研究が進んでいる点光源法の方が、表面からの回折を計算する波動光学的な手法より高速になる。

またこのとき、点光源を充てんした平面の輝度モデル [3] を用いて輝度補正とフラットシェーディングを行った。ただし、本論文のホログラムはグレイレベルホログラムであり、文献 [3] のバイナリホログラムではないので、マスキングによる輝度制御ではなく、点光源光波の振幅を変調してシェーディングを行っている。また、光波の回折伝搬演算 $F_d\{\cdot\}$ には伝搬距離の制約のない波面展開法 [21] を用いた。

CGH の作成にはホログラム専用プリンタ [22] を使用し、写真乾板上に 8 ビットグレイスケールの透過率分布を印刷した。このホログラム専用プリンタでは、水平方向ピクセル間隔が $2 \mu\text{m}$ であるので、水平方向視域角は約 18 度となる。なお、参照光入射角を 3 度としてコーディングを行っている。

表 1 CGH 作成時の基本的パラメータ

Table 1 Parameters used for fabricating CGHs.

Number of pixels	8192×4096
Sampling pitches	$2 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$
Reconstruction wavelength	632.8 nm

光学再生には、出力 5 mW の He-Ne レーザを光源として使い、空間フィルタを通した後、直径 100 mm、焦点距離 400 mm のコリメータレンズにより平行光として、ホログラム背面より入射角度 3 度で入射した。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。

4.2 光学再生像

図 5 は、5 cm 離して置いた 2 枚のパッチを合成したホログラムである。奥のパッチ P_1 は $\hat{z}_1 = 150 \text{ mm}$ の位置に x 軸周りに -45 度回転して置いた正方形のパッチであり、水平方向の幅 6.68 mm である。一方、手前のパッチ P_2 は、 $\hat{z}_2 = 100 \text{ mm}$ で x 軸周りに $+45$ 度回転した円形のパッチである。点光源密度は両平面とも 2500 point/cm^2 としており、陰影付け等の処理は行わず点光源の振幅は一定値となっている。

図 5(a) と (b) は、手前のパッチ P_2 自体の光波 $o_2(\hat{x}, \hat{y})$ を重畳せず、 P_1 の光波を P_2 のシルエットによって遮へいた効果の確認を目的とした同一のホログラムの再生像であり、(a) と (b) では視点を変化して再生像を撮影している。図 5(c) と (d) は、(a) と

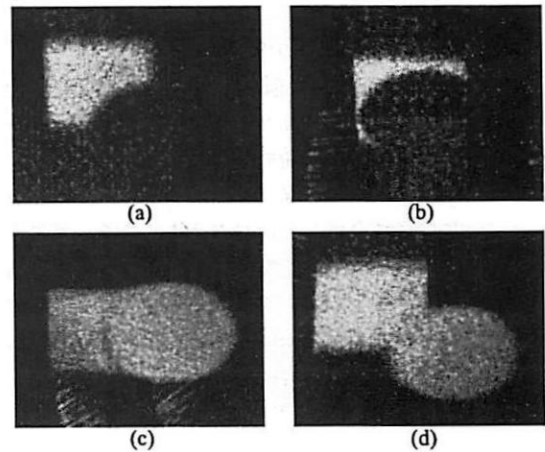


図 5 2 枚のパッチの光学再生像。(a)、(b) P_1 の光波の P_2 による遮へいのみを計算したホログラムの視点を変えた再生像写真。(c)、(d) P_1 からの光波を遮へいし更に P_2 からの光波を加算したホログラムの視点を変えた再生像写真

Fig. 5 Optical reconstruction of holograms of two pieces of patches. Photos (a) and (b) are taken from different angles for a hologram, which of the object wave synthesized only for P_1 and masked by silhouette for P_2 . Photos (c) and (d) are for a hologram, of which the object wave synthesized for P_1 and P_2 with masking by silhouette for P_2 .

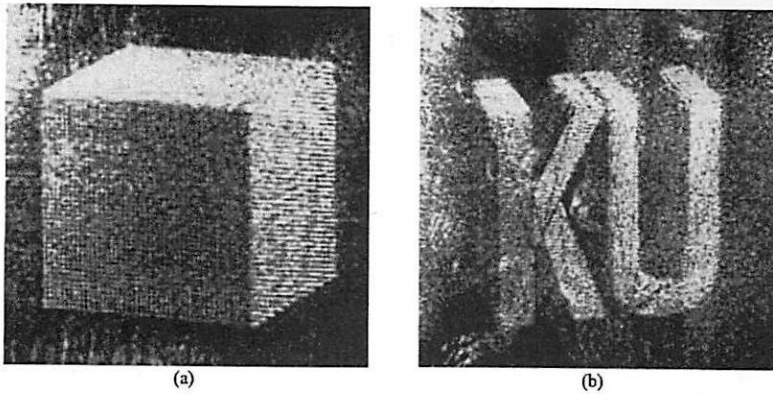


図 6 シルエット近似で隠面消去して合成した立体物のホログラムの光学再生像。(a) 立方体。(b) 文字「KU」形の立体

Fig. 6 Optical reconstruction of holograms for three-dimensional (3-D) objects, in which hidden-surfaces are removed by the proposed method. (a) a cube. (b) 3-D characters "KU."

(b) のホログラムに対して更に P_2 の光波 $o_2(x, y)$ を重畳して作成したホログラムの再生像であり、(c) と (d) では撮影時の視点が変化している。

これらの結果から、奥の平面からの光波を手前の平面が適切に遮へいし、ホログラムを観察する視点を変化させると、その変化に応じて光学再生像が変化することが確認できた。

4.2.1 単純な立体物のホログラム

パッチ間の隠面消去が可能であることが確認できたので、比較的少数の平面からなる物体のホログラムを作成し、その光学再生像を観察した。

図 6(a) は、横方向サイズ 12mm の立方体を距離 100mm に置いて合成したホログラムであり、点光源の密度は 2500 point/cm^2 である。また (b) は、「KU」という文字の掃引体のホログラムであり、水平方向サイズは 12mm で奥行 50mm の位置に配置している。点光源密度は 10000 point/cm^2 である。これらはいずれも、右上方より物体を照らす照明光源を想定してフラットシェーディングを施してある。

4.2.2 多数のパッチからなる物体のホログラム

比較的少数の平面からなる単純な物体の隠面消去が確認できたので、多数の平面パッチからなる複雑な物体のホログラムを作成し、提案手法の有効性を確認した。

図 7 は、トーラスを合成したホログラムの光学再生像である。これは点光源密度は 10000 point/cm^2 で合成した直径 10mm のトーラスであり、ホログラムから 150mm の位置に配置されている。パッチ数は 256

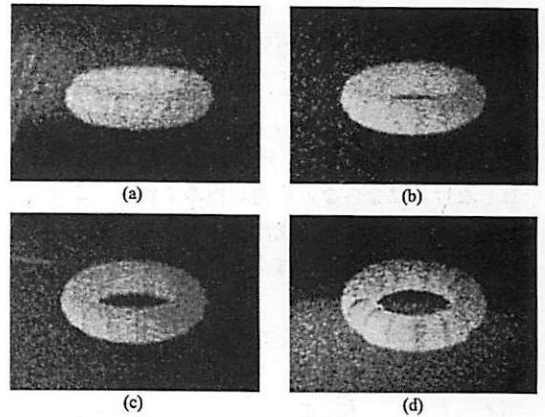


図 7 (a)~(d) 異なった視点から観察したトーラスの光学再生像

Fig. 7 Optical reconstruction of the hologram of a torus observed from different angles in (a)~(d).

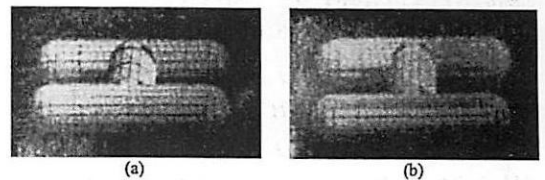


図 8 (a), (b) 多数のパッチからなる物体の異なった視点から観察した光学再生像

Fig. 8 Optical reconstruction of a 3-D object constructed of many patches, observed from different angles in (a) and (b).

である。

図 7(a) は正面から観察した光学再生像であり、(b)~

(c)に従って、視点位置を上方向に変化させている。視点の変化に応じてトーラスの見え方も変化することから垂直方向視差があることが分かる。しかしながら、(d)のように視点位置が正面から大きく外れる場合には、パッチ間の継ぎ目が目立つ結果となった。

同様に、図 8 は文字「H」の形をしたチューブであり、(a)と(b)では視点位置が変化している。

5. 議 論

前章の再生像において、視点の位置が正面から大きく外れた場合には、パッチ間の継ぎ目が目立つことが分かる。この原因は、提案手法であるシルエット近似における遮へいの漏れにあると考えられる。シルエット近似では、傾いたパッチによる光波の遮へい（マスキング）をそのシルエットで行っている。言い換えれば、これは光波を近軸光線として扱っていることになる。つまり、光波がほぼ光軸（ z 軸）と平行に伝搬することを仮定している。図 9 はシルエット近似で立体物の光波がどのようにに遮へいされるかを示した模式図である。漸化式 (14) を用いて奥に位置するパッチから順に光波を計算した際、当然ながら、物体の背面から放出され物体内を伝搬する光波も計算される。これらの光波は、物体の手前側に位置するパッチのシルエットマスク（図中の実線）に遮られ、ホログラム面には到達せず遮へいされる。しかし、図 9 に破線で示したように、光軸となす角度が比較的大きな光線がある場合、それはシルエットマスクのすき間から漏れてホログラム面に達することになる。

図 10 に示したように、光軸を含む平面中で差し渡し長の長さが L で法線ベクトルが光軸と角度 θ_n をなすパッチがあり、回折角が θ_d であるとき、このマスクの間げきが最大となるのは回折角と同じ角度でこれを見込む場合であり、その場合間げきの幅は $w = L \sin \theta_n \sin \theta_d$ となる。したがって、ホログラムに垂直なパッチ ($\theta_n = 90^\circ$) が最悪値を与え、仮に前節で示したホログラムで $L = 1 \text{ mm}$ の垂直なパッチがある場合、 $w = 0.15 \text{ mm}$ となる。

このような間げきを通る近軸光線から外れた光は、提案手法のシルエット近似だけでは扱えない。このような光は、大きな回折角を有するホログラム、すなわち CGH のサンプリング間隔が波長に近く、大きな視域角をもつホログラムでは問題になる。しかしながら、現状の CGH の作製技術では、それほど大きな視域角を有するホログラムは作製困難であるため、大きな障

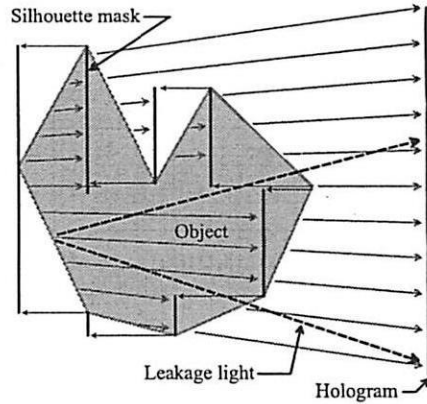


図 9 シルエット近似における光の遮へい漏れ
Fig.9 Leakage of light attributed to the silhouette approximation.

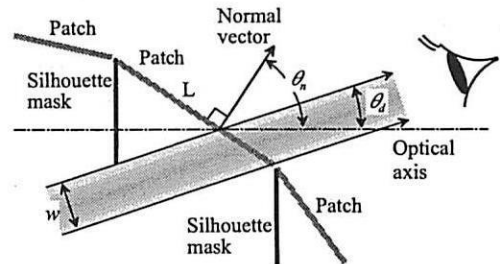


図 10 シルエット近似における間げきの幅
Fig.10 Gap width in the silhouette approximation.

害にはならないと考える。実際、図 7 や図 8 の再生像でも肉眼ではパッチの境界はほとんど感知できない。なお、これらの再生像の写真で間げきが黒く写っているのは、間げきから漏出しているのが物体背面のパッチから放出される光であるため、物体内側を拡散・伝搬するに従ってその強度が下がっており、物体前面のパッチから放出される光に比べて暗いためと考えられる。

シルエット近似は式 (11) の最低次の近似であるので、近い将来、より高解像度の CGH を製作可能になった場合には、より次数の高い手法が必要になると考えられる。

6. む す び

本論文では、全方向視差を有する計算機合成ホログラムにおいて波動光学的手法による隠面消去の手法を提案した。従来の波動光学的手法による隠面消去は、パッチで構成された表面モデルの物体にそのまま適用できず、断層化が必要であった。また、従来の幾何学

的手法による隠面消去では莫大なメモリ・計算時間積が必要であり、實際上、全方向視差 CGH に適用することは困難であった。

これらの従来法に対して、本論文では傾いたパッチによる波動光学的な光波遮への厳密な手順の議論から出発し、それを大幅に簡略化したシルエット近似を提案した。また、このシルエット近似を用いて、全方向視差 CGH にも適用可能な隠面消去の手法を提案した。この提案手法により、多数のパッチで構成された表面モデル物体においてもシェーディング・隠面消去などのコンピュータグラフィックスと同様のレンダリングが可能であることを示した。

謝辞 本研究におけるホログラム製作を支援頂いた関西大学大学院電気工学専攻の山中俊介氏と宮内宏之氏に感謝する。本研究の一部は、平成 15 年度関西大学学術助成基金（奨励研究）において「計算機合成ホログラムを用いた 3 次元立体ディスプレイにおける波面合成表示装置の基礎研究」として研究費を受けたものの成果として公表するものである。また、本研究の一部は関西大学ハイテクリサーチセンターの支援を受けて行ったものである。

文 献

- [1] J.P. Waters, "Holographic image synthesis utilizing theoretical methods," *Appl. Phys. Lett.*, vol.9, no.11, pp.405-407, 1966.
- [2] A.D. Stein, Z. Wang, and J.J.S. Leigh, "Computer-generated holograms: A simplified ray-tracing approach," *Comput. Physics*, vol.6, no.4, pp.389-392, 1992.
- [3] 松島恭治, 本荘和巳, "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," *映像学誌*, vol.56, no.6, pp.986-992, 2002.
- [4] M. Lucente, "Interactive computation of holograms using a look-up table," *J. Electron. Imaging*, vol.2, no.1, pp.28-34, 1993.
- [5] J.L. Juárez-Pérez, A. Olivares-Pérez, and R. Berriel-Valdos, "Nonredundant calculation for creating digital Fresnel holograms," *Appl. Opt.*, vol.36, no.29, pp.7437-7443, 1997.
- [6] A. Ritter, J. Böttger, O. Deussen, M. König, and T. Strothotte, "Hardware-based rendering of full-parallax synthetic holograms," *Appl. Opt.*, vol.38, no.8, pp.1364-1369, 1999.
- [7] 下馬場朋祿, 阿部幸男, 伊藤智義, "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.
- [8] H. Yoshikawa, S. Iwase, and T. Oneda, "Fast computation of Fresnel holograms employing difference," *SPIE Proc. Practical Holography XIV and Holographic Materials VI*, vol.3956, pp.48-55, 2000.
- [9] K. Matsushima and M. Takai, "Recurrence formulas for fast creation of synthetic three-dimensional holograms," *Appl. Opt.*, vol.39, no.35, pp.6587-6594, 2000.
- [10] J. Underkoffler, "Occlusion processing and smooth surface shading for fully computed synthetic holography," *SPIE Proc. Practical Holography XI*, vol.3011, pp.19-29, 1997.
- [11] T. Hamano and M. Kitamura, "Computer-generated holograms for reconstructing multi-3-D images by space-division recording method," *Proc. SPIE*, pp.23-32, 2000.
- [12] 高瀬雅文, 坂本雄児, 青木由直, "光線の到来方向を考慮した z パツファによる計算機合成ホログラムの高速隠面消去," *映像学誌*, vol.57, no.4, pp.483-489, 2003.
- [13] A.W. Lohmann, "Three-dimensional properties of wave-fields," *Optik*, vol.51, no.2, pp.105-117, 1978.
- [14] 近藤暁晴, 松島恭治, "全方向視差 CGH における Babinet の原理による隠面消去," 3 次元画像コンファレンス 2002, pp.113-116, 2002.
- [15] 坂本雄司, "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 (D-II)*, vol.J85-D-II, no.12, pp.1832-1839, Dec. 2002.
- [16] K. Matsushima, H. Schimmel, and F. Wyrowski, "Fast calculation method for optical diffraction on tilted planes by use of the angular spectrum of plane waves," *J. Opt. Soc. Am.*, vol.A20, no.9, pp.1755-1762, 2003.
- [17] N. Delen and B. Hooker, "Free-space beam propagation between arbitrarily oriented planes based on full diffraction theory: A fast Fourier transform approach," *J. Opt. Soc. Am.*, vol.A15, no.4, pp.857-867, 1998.
- [18] 松島恭治, H. Schimmel, F. Wyrowski, "波面展開法を用いた表面モデル CGH の高速計算法," 3 次元画像コンファレンス 2001, pp.13-16, 2001.
- [19] K. Matsushima and A. Kondoh, "Wave optical algorithm for creating digitally synthetic holograms of three-dimensional surface objects," *SPIE Proc. Practical Holography XVII and Holographic Materials IX*, vol.5005, pp.190-197, 2003.
- [20] T. Tommasi and B. Bianco, "Computer-generated holograms of tilted planes by a spatial frequency approach," *J. Opt. Soc. Am.*, vol.A10, no.2, pp.299-305, 1993.
- [21] J.W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, 2nd ed., chapter 3.10, McGraw-Hill, 1996.
- [22] 松島恭治, 上甲 篤, "計算機合成ディスプレイホログラム用高解像度プリンタ," *映像学誌*, vol.56, no.12, pp.1989-1994, 2002.

付 録

シルエット近似

傾いた座標系上でマスクされた光波のスペクトルは、式 (9) から、

$$\begin{aligned} H'(u, v) &= \mathcal{F}\{h'(x, y)\} \\ &= \mathcal{R}\{\hat{H}\} * M(u, v) \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot 1)$$

となる。ここで、 $M(u, v)$ はマスク関数のスペクトルである。スペクトル $H'(u, v)$ を図 3(c) に示すとおり逆回転する。その結果、 (\hat{x}, \hat{y}) 平面上での遮へいを考慮した光波は、ホログラムと平行な平面上で、

$$\begin{aligned} \hat{h}'(\hat{x}, \hat{y}) &= \mathcal{F}^{-1}\mathcal{R}^{-1}\{H'(u, v)\} \\ &= \mathcal{F}^{-1}\mathcal{R}^{-1}\{\mathcal{R}\{\hat{H}\} * M(u, v)\} \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot 2)$$

となる。

ここで、回転変換 (4) の逆変換行列を

$$\mathbf{T}^{-1} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{pmatrix} \quad (\text{A}\cdot 3)$$

とし、展開式 (11) の最低次数だけを用いるとき、変数変換は

$$\begin{aligned} u &= \alpha(\hat{u}, \hat{v}) = a_1\hat{u} + a_2\hat{v} + a_3/\lambda \\ v &= \beta(\hat{u}, \hat{v}) = a_4\hat{u} + a_5\hat{v} + a_6/\lambda \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot 4)$$

となる。同様に、

$$\begin{aligned} \hat{u} &= \alpha(u, v)^{-1} = \hat{a}_1u + \hat{a}_2v + \hat{a}_3/\lambda \\ \hat{v} &= \beta(u, v)^{-1} = \hat{a}_4u + \hat{a}_5v + \hat{a}_6/\lambda \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot 5)$$

となり、式 (A.2) は、

$$\begin{aligned} \hat{h}'(\hat{x}, \hat{y}) &= \iint \hat{H}(\alpha^{-1}(u', v'), \beta^{-1}(u', v')) \\ &\quad \times \iint M(\alpha(\hat{u}, \hat{v}) - u', \beta(\hat{u}, \hat{v}) - v') \\ &\quad \times \exp[i2\pi(\hat{u}\hat{x} + \hat{v}\hat{y})] d\hat{u}d\hat{v}du'dv' \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot 6)$$

となる。ここで、積分変数 (\hat{u}, \hat{v}) を

$$u = \alpha(\hat{u}, \hat{v}) - u', \quad v = \beta(\hat{u}, \hat{v}) - v' \quad (\text{A}\cdot 7)$$

と変換し、また (u', v') を式 (A.4) を用いて (\hat{u}', \hat{v}')

に変換することにより、

$$\begin{aligned} \hat{h}'(\hat{x}, \hat{y}) &= |a_1a_5 - a_2a_4| |\hat{a}_1\hat{a}_5 - \hat{a}_2\hat{a}_4| \iint M(u, v) \\ &\quad \times \exp[i2\pi[(\hat{a}_1\hat{x} + \hat{a}_4\hat{y})u + (\hat{a}_2\hat{x} + \hat{a}_5\hat{y})v]] dudv \\ &\quad \times \iint \hat{H}(\hat{u}', \hat{v}') \exp[i2\pi(\hat{x}\hat{u}' + \hat{y}\hat{v}')] d\hat{u}' d\hat{v}' \\ &= m(\hat{a}_1\hat{x} + \hat{a}_4\hat{y}, \hat{a}_2\hat{x} + \hat{a}_5\hat{y}) \hat{h}(\hat{x}, \hat{y}) \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot 8)$$

を得る。

(平成 15 年 11 月 7 日受付, 16 年 2 月 15 日再受付)