コンピュータホログラフィによる 自然で奥行き深い3次元立体画像

松 島 恭 治^a

^a 関西大学 システム理工学部(〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

Natural 3D Imaging of Very Deep Scenes by Computer Holography

Kyoji MATSUSHIMA^a

^a Faculty of Engineering Science, Kansai University (3-3-35, Yamate-cho, Suita-shi, Osaka 564-8680)

Keywords : Computer Holography, Computer-Generated Hologram (CGH), 3D Image

1. はじめに

半世紀以上の歴史を有しているホログラフィは、一般に立体画像の技術として知られている。しかし、実物のホログラムの3D映像を見る機会は実際にはほとんどないのが現状である。ホログラムの名称を使用している映像や映像再生機器は世の中に数多いが、実際にはそれらの映像の大半はホログラムによるものではない。実生活の中で最も目にすることが多いホログラムは、お札やクレジットカードの物である。これらは本物のホログラムであるが、単に見る方向によって像が変わる小さな画像であり、面白くはあるがそれを見て立体画像と思う人はいないであろう。

本物の、それも良くできたホログラムによる立体映像を見た人は、一様に驚く。これは、それが再生する映像が単なる立体感を越えた深い奥行き感覚を与えるからである。一般のホログラムは厚さがミリ単位の薄い板あるいはフィルムであるが、その奥の深さ数十センチの空間に実物がそこにあるように見えるのである。現在では立体映像の技術は数多いが、よくできたホログラムによる映像は、文字通り、それとは次元の異なる奥行き感がある。残念なことに、この立体映像を写真やビデオで撮影すると次元が一つ失われるため、他の3D技術による映像と何が違うのかわからなくなる。これが、本当のホログラフィがネットやテレビなどのマスメディアでは持てはやされない理由である。

このようにホログラフィは、薄板状の物体から深い奥行きを再生できる、おそらく唯一の技術である。しかし、古典的なホログラフィには一つの大きな問題がある。それは、デジタル技術ではないことである。従来のホログラフィは、かつてのフィルムカメラと同様のアナログ写真技術である。特殊な方法を用いればコピーすることもできるが、コピーのたびに必ず劣化する。データとしてデジタルメディアに保存したりネットで転送したりすることはできない。何より、ホログラフィで再生できる映像は、実在する物体を撮影した映像の

みである。撮影の際には、被写体をコヒーレントなレーザー光源で照明する必要がある、暗室と除振した撮影環境も必要である。乗り物や建築物などの大きな物体をこのような環境下に持ち込んで撮影することは極めて困難であるため、そのような像を再生したい場合は、まず実物を縮小したミニチュア模型を作成して、それを撮影する必要がある。

撮影したホログラムの実体は、撮影方法にもよるが、極めて微小な2次元画像にしか過ぎないことが多い。その画像を顕微鏡等で拡大して見てもランダムなパターンしか見えないが、特定の条件を満たす照明光で照明すると、上述の深い奥行き感を伴った3D映像が再生する。これは、ホログラムが記録した物体の光そのものを再生する性質を有しているからである。ホログラムが2次元画像パターンにしか過ぎないのであれば、それをコンピュータによって発生して印刷し、同様の深い奥行き感の3D映像を再生できるはずである。これがコンピュータホログラフィのアイデアであり、このようにして作成されたホログラムは計算機合成ホログラム(Computer-Generated Hologram, 以下CGH)と呼ばれる。

コンピュータホログラフィのアイデア自体は古くからあり、ほとんど古典的なホログラフィと同じぐらいの歴史がある。しかし、次節で述べる通り、実際に3D映像を鑑賞できる程度のCGHは、その計算規模が巨大であったり、極めて精細な描画技術が必要であったりするため、近年に至るまで作成することができなかった。筆者らは、独自の計算アルゴリズムとレーザーリソグラフィ技術によりその問題を克服し、展示して鑑賞できるレベルのホログラムを作成することに成功している^{1)~6)}。本稿では、その技術の一部を紹介する。

2. コンピュータホログラフィの性質

我々が作製したCGHの中でも、本稿執筆時点(2018年3月)において最新であるCGHの写真を図1に示す⁷⁾。このCGHは「Sailing Warship II」と名付けられており、(b)に示すように水柱の立つ中で海上に行く帆船の姿を再生している。

図1 計算機合成ホログラム「Sailing Warship II」⁷⁾。(a)遠景写真、(b)クローズアップ 図2 計算機合成ホログラム「Sailing Warship II」が再生する3Dシーン⁷⁾

表1 計算機合成ホログラム「Sailing Warship II」のパラメータ

パラメータ	数値
サイズ (水平×垂直)	18 × 12 cm ²
画素ピッチ (水平×垂直)	0.8 μm × 0.4 μm
画素数 (水平×垂直)	675 億 (225,000 × 300,000)
視域角 (水平×垂直)	45° × 45°
設計波長	633 nm

このCGHが再生しているモデルのデザインを図2に示し、このCGHの主要なパラメータを表1に示す。ホログラムの再生像が見える部分のサイズは18 cm × 12 cmであり、あたかもこの部分が窓となっているように、その奥に再生像が見える。この部分に、ホログラム干渉縞と呼ばれる前述の2次元画像パターンがプリントされている。この画像の画素ピッチは、水平方向に0.8 μmで垂直方向に0.4 μmである。一般のレーザープリンタで描画される高精細画像でも画素ピッチは20～40 μmである。それに比べると2桁近く小さな画素ピッチとなっている。これは、光波の波長が非常に短いことに起因している。また、この画像の総画素数は675億画素にも達している。このような極端な画素ピッチと画素数は、コンピュータホログラフィがその性質として要求するものであり、コンピュータホログラフィの実現を阻んできた最大の課題であった。

2. 1 干渉縞画像の画素ピッチ

図3(a)に示すように、波長 λ の光波が z 軸に対して角度 θ 傾いた方向に進むとき、 z 軸と垂直な x 軸方向でのその波の波長は $\lambda_x = \lambda / \sin \theta$ となる。信号理論によれば、この波を x 軸方向に空間サンプリングするためには、そのサンプリング間隔 Δx は、 $\Delta x \leq \lambda_x / 2$ でなければならない。そのため、逆にサンプリング間隔 Δx が与えられたとき、サンプリングされた光波が取り得る最大の角度は

$$\theta_{\max} = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{2\Delta x} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。これは最大回折角と呼ばれ、光波をデジタル処理する際に取り扱える光の方向の限界を表している。

一方、図3(b)に示すように、3D画像を見たときに視点を動かせる角度範囲のことを視域角と呼ぶ。これが大きいほど

図3 最大回折角と視域角

様々な方向から像を見ることができ、立体感の強い3D映像になる。式(1)で示したように、光が進む角度の最大値が $\theta_{\max}$ であることから、コンピュータホログラフィにおける視域角は $2\theta_{\max}$ となる。図1のホログラムにこの式を適用すると、水平方向の視域角は約45度となる。なお、このCGHの場合、CGHを照明する光源がCGHの上方にある関係で、垂直方向には式(1)の通りにならず、垂直方向の視域も水平方向と同じ約45度となっている。

この様に、干渉縞画像の物理解像度が視域角に直結しているため、十分に広い視域角を得るためには1 μm以下の解像度で干渉縞を描画・表示する必要がある。この製作技術がコンピュータホログラフィの大きな問題の一つである。

2. 2 干渉縞画像の画素数

前節とよく似た問題として、コンピュータホログラフィには空間バンド積の問題と呼ばれる問題がある。前節と同様に間隔 Δx で光波をサンプリングし、サンプル点数が N である時、サンプリングされた空間の広さは $W=N\Delta x$ である。一方、信号理論によれば、空間周波数のバンド幅は $B=1/\Delta x$ で与えられる。これらの積は空間バンド積と呼ばれ、 $W \times B = N$ となることから単純にサンプル数に一致する。ここで、 W は x 方向のホログラム干渉縞の大きさを意味する。一方 B は、式(1)からわかるように、その大きさが大きいほど視域角が広がるパラメータである。つまりCGHの画面サイズと視域角の積は、概ねサンプル点数(画素数)に比例する。例えば、フルHDの解像度である 1920×1080 画素でCGHを作成する時、もしも画素ピッチが 0.1 mm であると、CGHのサイズは $19.2 \times 10.8 \text{ cm}^2$ になるが、式(1)から視域角はわずか 0.36 度になる。逆に、画素ピッチを $1 \mu\text{m}$ にすると、視域角は 37 度になるが、画像サイズはわずか $1.9 \times 1.1 \text{ mm}^2$ になってしまう。

つまり、面積が大きくかつ視域角が広いホログラムを作成するためには、どうしても大きな画素数が必要であるということになる。実際、図1のSailing Warship IIでは、 45 度の視域角を保ったままサイズを $18 \times 12 \text{ cm}^2$ とするため、 675 億画素ものホログラム干渉縞を必要としている。8Kスーパーハイビジョンで約3300万画素、高解像カメラで約4000万画素であることを考えると、3桁ほど高い解像度になる。

前節の画素ピッチの問題が製作上の問題とすれば、画素数の問題はCGHの計算に関する問題と言える。これほどの画素数でホログラム干渉縞を計算するための計算量は莫大なものとなる。これが、コンピュータホログラフィの実現を長年阻んできたもう一つの大きな課題であった。

3. ポリゴン法とシルエット法による干渉縞の合成

コンピュータホログラフィの歴史は、ある意味、計算機で干渉縞を合成する技術の歴史である。アナログの光学ホログラフィの場合、被写体をレーザー光で照明し、被写体の反射光である物体光と参照光を光学的に干渉することにより干渉縞を発生する。コンピュータホログラフィにおいても、多くの場合、干渉縞の合成は二つのステップに分かれている。すなわち、(1)物体光波の合成と、(2)物体光波と参照光波の干渉である。このうち、(1)が圧倒的に巨大な計算パワーを要求する。物体光波の合成では、図2に示したような数値的な物体モデル(CGモデル)が発する光波をホログラム干渉縞の位置で計算しなければならない。

3. 1 物理シミュレーションによる物体光波の合成

物体光波合成の手法は、大きく分けて、物理シミュレーションによるものとモデルの2次元画像をベースにしたものがある。前者では、立体的な物体が発する光を物理的にシミュレーションすることにより物体光波を合成する。一方、後者ではCGの技術を用いて様々な方向からモデルを見た時の画像を多数作成し、それに基づいて近似的に物体光波を計算する。後者の方が、圧倒的に計算量が少なく済む。しかし、2次元画像をベースとしているため、奥行き感が不自然にな

図4 物理シミュレーションによる物体光波合成

ることが多く、深い奥行きを再生できるホログラフィ本来の良さを減じる場合がある。

物理シミュレーションによる物体光波合成において最もよく用いられる方法が、点光源をベースとする手法である。これを以下、点光源法と呼ぶ。この手法では、図4(a)に示すように、高密度に敷き詰めた点光源で物体表面が形成されていると考え、この点光源群が発する球面波をホログラム面上で計算してそれを重畳することにより物体光波を求める。この手法は原理的にわかりやすく、また球面波は簡単な数式で求められるため、もっともよく研究された手法となっている。一方、この方法の計算時間は、敷き詰めた点光源の数とCGHの画素数の積に比例する。これが問題である。個々の点光源が分離せずに表面を形成しているように見えるためには莫大な点光源数が必要であり、前節で述べたような高い空間バンド積、すなわち巨大な画素数を有するCGHでは、点光源数と画素数の積も巨大になる。その結果、長い計算時間が必要となる。この計算時間を少しでも減じるため、種々の近似計算法や高い計算能力を有するGraphic Processing Unit (GPU)を用いたり、CGH計算専用のCPUを構築することなどが試みられている。しかしながら、図1のSailing Warship IIのレベルのCGHを点光源法で計算することは、依然として困難と言わざるを得ない。

そこで、このような大規模なCGHを計算するために筆者らが考案した手法が、図4(b)に示すポリゴン法である⁸⁾。この手法では、現代のCGと同様に表面物体をポリゴンで形成し、ポリゴンを面光源としてその光波を重畳する。点光源とは違い、ポリゴンには様々な傾きや形のものがあるため、それを簡単な数式で表すことはできず、光波の回転変換^{9),10)}や角スペクトル法¹¹⁾等の様々な波動光学的なシミュレーション手法を駆使してポリゴン光波を求める必要がある。そのため、一つのポリゴンあたりの計算時間は点光源よりはるかに長く、またそのプログラミングも複雑なものとなる。しかし、ポリゴン数は点光源数よりも2~3桁少なく済むため、結果的に短時間で計算が終了する。また、この手法はCGの考え方に似ているため、CGと類似したスムーズシェーディングや⁴⁾、メタリックな鏡面などが実現できる³⁾。さらには滑らかな曲面も再生できる¹²⁾。

3. 2 オクルージョン処理(隠面消去処理)

物体光波の合成は、単に物体の表面を形成できただけでは十分ではない。図1(b)の再生像を見ればわかる通り、例えば、

水柱の向こう側にある船体は水柱に隠れており、複雑に折り重なった帆も、物体モデルの前後関係に従って背後の部分は前方の部分に隠れている。また、この写真だけではわからないが、CGHの観察者が視点の位置を変えると、実際の物体がそうであるように隠れていた部分が現れたり、逆に背後に隠れたりする。このように、前方の物体が後方の物体を隠すことをオクルージョンと呼ぶ。

このオクルージョンを正しく再現できるCGHでなくては、奥行き深いシーンを自然に再生できない。この処理は、CGの分野で隠面消去と呼ばれる処理にほぼ対応している。ただし、コンピュータホログラフィにおけるオクルージョン処理はCGとは大きく違う。静止画CGでは観察者の視点(カメラ位置とも呼ぶ)が変化しないため、その方向にだけ正しく隠面消去できれば良く、zバッファ法などの標準的な手法が確立されている。しかし、コンピュータホログラフィでは像の観察者は視域角の範囲内で自由に視点を変えることができるため、その範囲内のすべての方向に対して破綻の無いオクルージョン処理がなされていなければならない。このように、コンピュータホログラフィにおけるオクルージョン処理は非常な難題であり、それでなくても長い計算時間をさらに桁違いに長時間化させかねない大問題である。

そこで、筆者らはシルエット法と呼ぶ簡易な物理モデルにより現実的なオクルージョン処理を行っている。この手法の原理を図5に示す。光波が空間を伝わるにつれてどのように変化するかは、先にも述べたように、角スペクトル法¹¹⁾などによる光波伝搬計算でかなり正確にシミュレートできる。そこで、物体光波の計算をシーンの一番奥から始める。物体平面と呼ばれる物体の中央を横切る平面上で光波を求め、その物体のシルエットの形で光波の一部をマスク処理する。これにより、その物体の背後に隠れているはずの別の物体の光がその物体を透過しないようにする。このマスクをシルエットマスクと呼び、シルエットマスクを用いたオクルージョン

処理手法をシルエット法と呼んでいる¹³⁾。

この処理によりマスク背後の物体が完全に見えなくなってしまうように思われるかもしれないが、ここで取り扱う光波はホログラム面に垂直に進む成分だけではなく斜めに進む成分も含んでいる。その斜め成分のうち、シルエットマスクと交差する部分だけが遮蔽される。言い換えればシルエットマスクと交差しない光波成分は遮蔽されないため、視点を変えると背後に隠れていた物体が見えてくることになる。つまり、自然なオクルージョン処理が達成される。

なお、実際の物体モデルは、図5のように複数の物体に分離しているとは限らず、図2に示したように一つながりの大きなモデルとなっている場合も多い。この場合には、物体を構成するポリゴン一つ一つのシルエットマスクで奥から順にポリゴン単位でマスク処理を行うことにより、物体全体のオクルージョン処理ができる。この時、この原理通りに処理すると莫大な計算量となるため、シルエットマスクの代わりに、マスクを反転したシルエット開口を用いるスイッチバック法と呼ばれる処理手順を用いると高速にオクルージョン処理ができる¹³⁾。

4. レーザリソグラフィによる高解像度CGHの作成

合成した干渉縞パターンを透過率や反射率のパターン、あるいは屈折率や膜厚のパターンに変換し、照明光を照射すると再生像を得ることができる。従って、レーザプリンタにより透明フィルム上に干渉縞パターンを描くだけでも再生像が得られる。しかし、2.1節で述べたように、干渉縞の物理解像度が低いと視域角を狭くってしまう。赤色の波長で37度の視域角を得るには1 μm の画素ピッチが必要である。これは、プリンタ解像度では25,400 dpiに相当する。従って、解像度600～1200 dpi程度の民生用レーザプリンタなどでは解像度が足らず、かつては、業務印刷用のイメージセッターと呼ばれる高解像度印刷機やフリンジプリンタと呼ばれるホログラム専用のプリンタ¹⁴⁾、あるいはCD-Rライターによるパターン描画も行われた。しかし、いずれも描画干渉縞の解像度やコントラストが不十分であったり、大面積の描画が困難であったりした。そのため、筆者らは、現在ではIC製造等で用いられるレーザ直接描画装置と呼ばれる機器を用いたレーザリソグラフィでフォトマスクに干渉縞を描画している¹⁾。

レーザ直接描画装置では、図6(a)に示すように、ガラス基板上にクロム膜とフォトレジストを成膜したフォトマスクブランクスに紫外線レーザでパターンを描画する。そして、フォトレジストの現像後にウェットエッチングでクロム膜を除去する。これにより、高コントラストのクロム膜のパターンとしてホログラム干渉縞が描かれる。クロム膜は反射率が高いため、照明光を照射すると図6(b)に示すように反射光としても透過光としても再生像が得られるが、通常は展示がしやすい反射で再生を行っている。図1に示した再生像も反射再生で得られた像である。なお、筆者らが現在用いているのは、ドイツのハイデルベルグ・インストルメンツ社製のDWL-66+レーザ直接描画装置である。この装置の仕様上の最小画素ピッチは0.6 μm であるが、実際には表1に示

図5 シルエット法の原理

図6 レーザリソグラフィによる干渉縞の描画

図7 カラーフィルタ方式フルカラー CGH の原理

したように $0.4\ \mu\text{m}$ の干渉縞パターンでも十分に良好な再生像が得られる。一方、この装置の仕様上の最大描画範囲は $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ であるが、実用的には $18\text{ cm} \times 18\text{ cm}$ 程度が限界である。

5. カラーフィルタ方式フルカラー CGH

フリンジプリンタやレーザリソグラフィで作製される CGH は、光学ホログラフィにおいて「薄い」ホログラムと呼ばれるホログラムになる。その特徴は、どのような波長の光で照明しても再生像が得られることである。しかし、波長

が変わると色収差により像の大きさや位置が変化する。このことは、裏を返すと、広帯域な白色光で照明すると様々な波長で少しずつずれた像が一斉に再生することを意味する。その結果、ボケた像や色にじみのある像が再生する。そのため、再生照明光源としては、赤色 LED 等の比較的狭帯域な単色光源やレーザーが用いられる。当然ながら再生像も単色となり、フルカラー再生像は得られない。

3 枚の CGH を用いて RGB の 3 色で像再生し、ダイクロイックミラー等を用いて RGB の像を一つに合成するとフルカラー再生像が得られる¹⁵⁾。しかし、像合成に必要な光学系が大きくて重く、またその光学調整にも時間がかかるため、この方式では実際に CGH を展示することは困難であった。そこで開発したのが、液晶パネル等と同じ RGB カラーフィルタを用いたフルカラー CGH である^{16), 17)}。その原理を図 7 に示す。この方式では、前節で述べた方法で描画したクロム膜の干渉縞パターンに RGB カラーフィルタを貼り合わせる。この時、RGB フィルタの背後の干渉縞パターンは、その色に相当する波長で計算しておく。これにより、白色光で照明すると RGB フィルタを透過した照明光によりその色に相当する波長で像が再生され、それが合わさってカラー再生像が見える。この方式で作製したフルカラー CGH の例を図 8 に示す。この CGH では、干渉縞パターンの画素数は $131,072 \times 132,072$ の 160 億画素であり、画素ピッチは水平垂直とも $0.8\ \mu\text{m}$ である。この干渉縞パターンに幅 $80\ \mu\text{m}$ の縦ストライプの RGB カラーフィルタを貼りつけている。

図8 カラーフィルタ方式フルカラー CGH 「Casino Chips」¹⁵⁾

6. おわりに

以上、駆け足であったが、筆者らのグループが進めてきたコンピュータホログラフィの研究を紹介した。残念ながら、よくできたアナログ光学ホログラムを凌駕できるほどの計算機合成ホログラムは未だ作成することができない。しかし、コンピュータホログラフィは年々発展しており、光学ホログラムに比肩しつつあることは間違いない。現在の段階のCGHでも、その再生像は他の3D技術では決して作り出せない深い奥行き感を与えるものとなっている。1章でも述べたように、写真ではその自然な立体感を伝えることができないことが大変残念である。

謝 辞

本研究は、JSPS 科研費 15K00512, 文部科学省私立大学戦略基盤研究形成支援事業(平成 25 年～平成 29 年), および科学技術振興機構産学連携バリュープログラム VP29117941340 の助成を受けたものである。

(Received March 21, 2018)

文 献

1) K. Matsushima, S. Nakahara ; *Appl. Opt.*, **48**, H54 (2009).

- 2) K. Matsushima, Y. Arima, S. Nakahara ; *Appl. Opt.*, **50**, H278 (2011).
- 3) H. Nishi, K. Matsushima, S. Nakahara ; *Appl. Opt.*, **50**, H245 (2011).
- 4) K. Matsushima, H. Nishi, S. Nakahara ; *J. Electron. Imaging*, **21**, 023002 (2012).
- 5) 松島恭治, 中原住雄 ; レーザー研究, **40**, 18 (2012).
- 6) K. Matsushima, S. Nakahara ; Stepping closer to the perfect 3D digital image, SPIE Newsroom, (6 Nov. 2012). doi:10.1117/2.1201210.004526
- 7) 松島恭治, 斎藤智崇, 五十嵐勇祐, 國枝織絵, 橋村直柔, 小西涼太 ; *HODIC Circular*, **38**, (1), 2 (2018).
- 8) K. Matsushima ; *Appl. Opt.*, **44**, 4607 (2005).
- 9) K. Matsushima, H. Schimmel, F. Wyrowski ; *J. Opt. Soc. Am.*, **A20**, 1755 (2003).
- 10) K. Matsushima ; *Appl. Opt.*, **47**, D110 (2008).
- 11) K. Matsushima, T. Shimobaba ; *Opt. Express*, **17**, 19662 (2009).
- 12) H. Nishi, K. Matsushima ; *Appl. Opt.*, **56**, F37 (2017).
- 13) K. Matsushima, M. Nakamura, S. Nakahara ; *Opt. Express*, **22**, 24450 (2014).
- 14) 小林俊輔, 宮内宏之, 松島恭治 ; *HODIC Circular*, **25**, (4), 2 (2005).
- 15) T. Miyaoka, K. Matsushima, S. Nakahara ; *SPIE Proc.*, **9386**, 93860N (2015).
- 16) Y. Tsuchiyama, K. Matsushima ; *Opt. Express*, **25**, 2016 (2017).
- 17) 土山泰裕, 松島恭治 ; *HODIC Circular*, **36**, (3), 11 (2016).