

微細加工による計算機レインボーホログラム

浜野 智 恒

近年、光リソグラフィの発展により微細加工技術が急速に進歩し、この技術を応用した回折光学素子 (DOE: diffractive optical element) の研究開発成果が報告されている¹⁾。この DOE の一種には、ホログラフィーを応用したホログラフィック光学素子 (HOE: holographic optical element) があり、さらにその一形態に計算機ホログラム (CGH: computer-generated hologram) がある。CGH は数値計算された干渉縞データを媒体に記録したいわばデジタルホログラムであり、そのアイデアは 1960 年代にすでに提案されている²⁻⁴⁾。

立体像表示を目的としたホログラムの場合、物体光と参照光の交差角度が大きいため、媒体上に形成される干渉縞の間隔はサブミクロン間隔になる。したがって、CGH を立体像表示の手段として適用した場合、サブミクロンピッチの標本間隔で干渉縞データを計算し媒体に記録する必要がある。筆者らは、この記録手段としてフォトマスク製造に用いられる電子線描画装置を応用し、レインボーホログラムの原理を適用した水平視差のみを有する CGH の開発を推進してきた⁵⁻⁷⁾。本稿では、これら CGH の作製原理と試作結果について解説する。

1. 計算機ホログラム作製の原理

1.1 計算機ホログラムの作製フロー

本稿で紹介する CGH は干渉縞計算と干渉縞記録の 2 段階の工程を経て製造され、また各工程はさらに複数の工程で構成されている。図 1 は本 CGH 作製の工程概略図である。まず CGH として記録する対象物の物理的形状をコンピューター内部のデジタルデータとして規定する (図 1 のステップ 1)。この形状規定には、例えばコンピューター

グラフィックス分野で使用されるモデリングツールを使用することができる。次に干渉縞計算の前準備として、規定した対象物の幾何的・光学的諸定数を定義する (図 1 のステップ 2)。この段階では、対象物の物理的な大きさ、CGH 面との配置関係、物体を構成する点光源の初期位相や波面の広がり角度、さらに参照光の入射角度や波長等、干渉縞計算に必要な諸定数を定義する。また、立体感を強調するために、コンピューターグラフィックス分野の技術である隠面処理や陰影付けを適用する。より具体的には、規定された対象物は点光源の集合体であると仮定し、対象物の表面に点光源を配置し、この点光源それぞれに対し、観察視点に応じた隠面処理を施す^{8,9)}。また、環境光を設定し、点光源それぞれに対し陰影処理を施す。その後、上記初期設定を基に干渉縞データを計算する (図 1 のステップ 3)。干渉縞データは規定対象物の各点光源からの波面の合成である物体光と、別途設定した参照光との CGH 面での複素振幅和の 2 乗値を求めることで計算する。この際干渉縞データは、計算および記録の制約から、横長の矩形形状の要素領域に分割して計算する。したがって、最終的な CGH は矩形形状の要素 CGH の集合として構成される。結果として、本 CGH は水平方向にのみ視差を有し、垂直方向には虹色に変化するレインボーホログラム¹⁰⁻¹²⁾ のように再生されることになる。ここまでの段階で干渉縞データの生成が完了し、次いで干渉縞記録段階に移る。

まず、計算された干渉縞データを電子線描画装置が受け入れられる矩形データに変換する (図 1 のステップ 4)。電子線描画装置は ON/OFF 制御であるため、干渉縞データを縞の有無に対応する微小矩形の集合に変換する必要がある。この変換は大きく 3 段階に分類できる。第 1 の段階は実数値で表現されている干渉縞データを量子化し整数値の干渉縞データに変換する段階であり、第 2 の段階はこの

大日本印刷(株)中央研究所 (〒277-0871 柏市若柴 250-1)
E-mail: Hamano-T@mail.dnp.co.jp

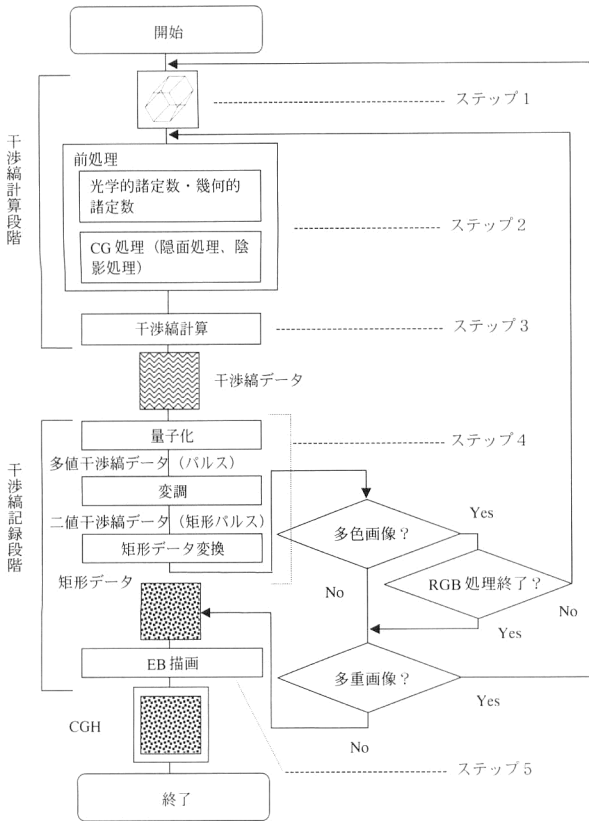


図1 CGH 作製の工程概略図.

量子化された干渉縞データを強度値一定の2値データに変換する段階であり、第3の段階は2値データを電子線描画装置が受け入れられる矩形データとして定義する段階である。本CGH作製方法においては、第2段階の2値データにパルス幅変調 (PWM: pulse width modulation) を適用することで階調表現を実現している⁶⁾。このPWMでは干渉縞データの強度値を、微小矩形の幅の大きさに変換することで表現している。また、CGHの再生像に色付けを施す場合には、例えばRGB3色の干渉縞データを同様に求める。この際、各干渉縞データはCGH面上で重ならないように、規則性をもたせて配置し記録する。さらに、複数の対象物を多重記録する場合には、各対象物の干渉縞データを同様に求め、CGH面上で重ならないように、規則性をもたせて配置し記録する。この段階で干渉縞データが微小矩形の集合に変換され、電子線描画装置用のデータが完成する。最後に、干渉縞データを変換した矩形データを電子線描画装置により媒体に記録する (図1のステップ5)。

1.2 計算機プログラムの計算方法

ここでCGHの計算方法を簡単に述べる。図2に示すごとく対象物は点光源の集合体である対象物データとして定義する。また、点光源からの光は1平面内においてのみ伝搬すると規定する。これは前述のごとくレインボーホログラム

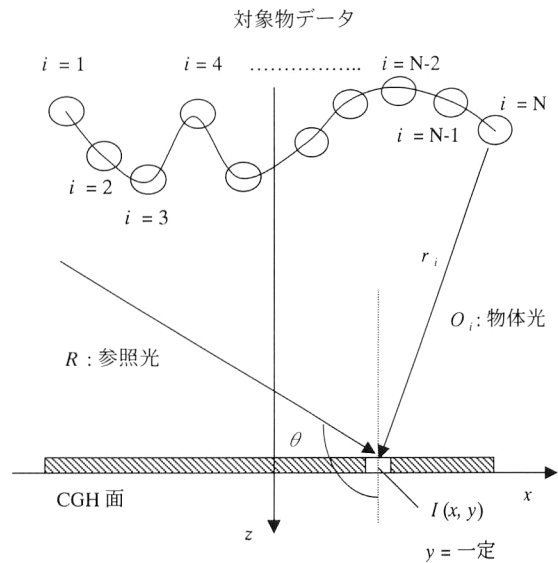


図2 干渉縞データの計算原理を説明する模式図.

ラムを模して作製するためである。図2に示すCGH面上の点 (x, y) における物体光 $O(x, y)$ と参照光 $R(x, y)$ の干渉縞の強度 $I(x, y)$ は、一般に式(1)で表される。

$$I(x, y) = |O(x, y) + R(x, y)|^2 \quad (1)$$

また、物体光 $O(x, y)$ および参照光 $R(x, y)$ はそれぞれ式(2)、式(3)で表される。

$$O(x, y) = \sum_{i=1}^N [O_i / r_i(x, y) \exp\{jkr_i(x, y) + j\phi_i\}] \quad (2)$$

$$R(x, y) = R_0 \exp\{j k x \sin(\theta) + j\phi_r\} \quad (3)$$

ここで、 O_i は対象物データを構成する i 番の点光源の振幅、 $r_i(x, y)$ は同点光源からCGH面上の点 (x, y) までの距離、 k は波数、 ϕ_i は同点光源の初期位相、 R_0 は参照光の振幅、 θ は参照光の入射角、 ϕ_r は参照光の初期位相、 N は対象物データの標本点数を表す。

2. 試作事例

以下、前述の原理に従ったCGHの試作事例を簡単に紹介する。

2.1 モノクロタイプ

本試作では図3に示す実験モデルを設けた。対象物は中心にDNPのロゴおよびそれを取り囲むリングを設け、背景にDNPの小文字を配した。このDNPロゴとリングは3次元形状として3D-CADで作成した。参照光は平行光とし、入射角度は垂直上方向40度とした。物体光は水平方向に±20度とし、垂直方向には広がらないと規定した。また、波長は642.8nmとした。CGHの大きさは24mm×10mmであり、要素CGHの大きさは24mm×0.1

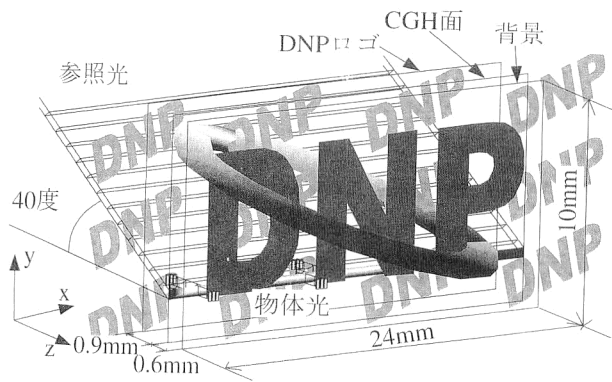


図3 モノクロタイプのCGHを作成するための実験モデル。CGHは対象物（中央部のDNPロゴやそれを囲むリング、背面の複数の微小ロゴ）がCGH面近傍に設置されたイメージタイプである。また各対象物は微小な線光源の集合体として構成されている。

mmである。また、干渉縞データの標本間隔は水平方向に $0.6\mu\text{m}$ 、垂直方向に $0.2\mu\text{m}$ とした。図4は試作したCGHの白色光源下における再生像である。中央に位置するDNPロゴとその周囲のリングおよび背面に配した小文字のDNPによる幾何的配置や隠面処理、陰影付けにより、光学撮影ホログラムに近い立体感を再現できていることがわかる。

2.2 カラータイプ

次に、本CGHのカラータイプへの拡張について述べる。本CGHは横長スリット状の複数の要素CGHで構成されている。したがって、白色光源の下では、各要素CGHからの部分的な再生像は、あたかもレインボーホログラムのように機能し、この結果、各要素CGHから合成された再生像全体は、観察視点を垂直方向に移動すると、虹色に変化して観察される。これは図5上図に示すように再生物体光の色分散によるものだが、この現象を積極的に活用すると、多色像の表示が可能となる。図5下図に示すように、特定の観察位置において、RGBそれぞれの再生物体光が集まるように干渉縞データを計算すれば、再生される像はカラーの再生像となる。

本試作実験ではCGH全体の大きさを $24\text{mm}\times 9.984\text{mm}$ とし、RGB各要素CGHの垂直方向の幅は $26\mu\text{m}$ 、また各波長はRGBそれぞれ 654nm 、 545nm 、 436nm に設定した。

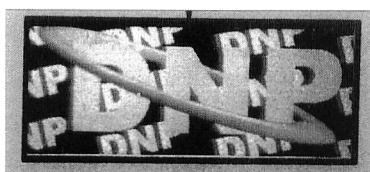


図4 モノクロタイプのCGH再生像。

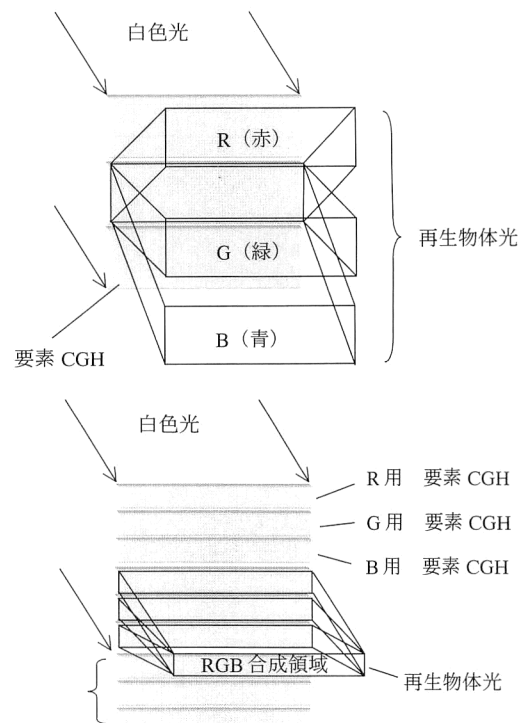


図5 カラータイプのCGHを作製するための概念図。モノクロタイプの場合、上図のように、要素CGHに入射した白色光は原理的に複数の色に分散する。この色分散を積極的に利用し、下図に示すようにRGB3色用の要素CGHを構成し、再生光を特定の位置に集光するとカラーの像を再生できる。

試作したCGHの白色光源下での再生像を図6に示す。レインボーホログラムの原理より観察視点を垂直に移動させると色が変化するが、所定の観察位置では所望の色で観察することができる。

2.3 多重画像タイプ

ホログラムの特性のひとつに角度選択性があり、これは再生光強度が再生照明光の入射角度に依存することを意味している。つまり、再生照明光の入射角度が異なると再生像の結像位置は異なることになる。この性質を積極的に利用すれば、1枚のホログラムに複数の像を記録できることが知られている。複数の像をホログラムに多重記録する方法には、1) 参照光の入射方向を変えて、順次対象物を記録する方法、2) 各対象物の物体光に異なる方向性をもたせ、同時に記録する方法があるが、本CGHの作製には、このような多重露光による方法ではなく、各対象物の干渉



図6 カラータイプのCGH再生像.

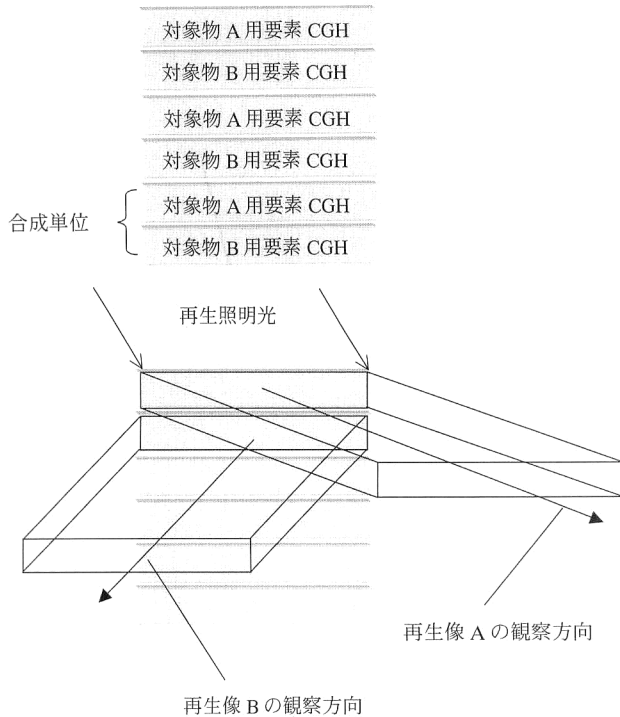


図7 複数の画像を1枚のCGHに記録するための概念図。上図のごとく微小領域(要素CGH)を対象物AおよびBで交互に設け、あらかじめ各再生像の観察位置が異なるように干渉縞データを計算する。これにより下図のように再生像AとBを分離して観察することができる。

縞データの記録領域を微細な格子状に分割した空間分割記録を適用した。例えば対象物AおよびBを記録する場合、図7上図に示すように、各対象物の要素干渉縞データが垂直方向に交互に現れるように配置する。各干渉縞データは図7下図に示すように、再生照明光を照射した際に記録した各干渉縞データからの再生光が異なる方向に出射するように設計される。これにより観察位置を変えれば、異なる像を観察できる。

図8にCGHの白色光源下での再生像を示す。各再生像は再生照明光の光源位置を変更して、CGH正面で観察した像である。図8上図の設定参照光はCGH面の水平方向に27.03度、垂直方向に18.75度傾いた平行光であり、同様に下図の設定参照光は水平方向に-27.03度、垂直方向に18.75度傾いた平行光である。また中央に位置するCGH単独の大きさは28mm×26mmであり、波長は643nmであり、物体光の広がり角度は±20度である。本結果

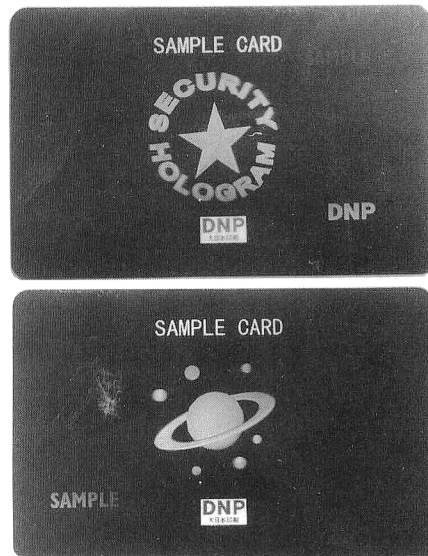


図8 多重画像タイプのCGH再生像.

から、空間分割記録により複数の像を再生するCGHの設計・作製が可能であることがわかる。

以上簡単に筆者らによる試作結果を紹介した。CGHの作製技術はすでに光学撮影によるレインボーホログラムと同等の品質を再現できる段階にある。しかしながら、大面積化は今後の技術課題として残されており、より明るい再生像を得るために回折効率の向上も望まれる。今後、微細加工技術がさらに発展することにより、干渉縞の深さを正確に多段階に記録することが可能となり、これによる回折効率の向上が、より高輝度な像再生を可能とすると思われる。

文 献

- 1) (社)応用物理学会日本光学会光設計研究グループ：回折光学素子入門，第1版(1997)。
- 2) B. R. Brown and A. W. Lohmann: "Complex spatial filtering with binary masks," *Appl. Opt.*, **5** (1966) 967-970.
- 3) A. W. Lohmann and D. P. Paris: "Binary Fraunhofer holograms, generated by computer," *Appl. Opt.*, **6** (1967) 1739-1748.
- 4) W.-H. Lee: "Sampled Fourier transform hologram generated by computer," *Appl. Opt.*, **9** (1970) 639-643.
- 5) T. Hamano and H. Yoshikawa: "Image-type CGH by

- means of e-beam printing," Proc. SPIE, **3293** (1998) 2-14.
- 6) T. Hamano, M. Kitamura and H. Yoshikawa: "Computer-generated holograms with pulse-width modulation for multi-level 3-D images," Proc. SPIE, **3637** (1999) 244-251.
 - 7) T. Hamano and M. Kitamura: "Computer-generated holograms for reconstructing multi-3D images by space-division recording method," Proc. SPIE, **3956** (2000) 23-32.
 - 8) 北村 満, 浜野智恒, 吉川 浩: "EB 描画によるイメージ型バイナリ CGH(3)", 3次元画像コンファレンス '99 (1999) pp. 314-319.
 - 9) J. Underkoffler: "Occlusion processing and smooth surface shading for fully computed synthetic holography," Proc. SPIE, **3011** (1997) 19-30.
 - 10) S. A. Benton: "Hologram reconstructions with extended incoherent sources," J. Opt., Soc. Am., **59** (1969).
 - 11) D. Leseberg and O. Bryngdahl: "Computer-generated rainbow holograms," Appl. Opt., **23** (1984) 2441-2446.
 - 12) H. Yoshikawa and H. Taniguchi: "Computer generated rainbow hologram," Opt. Rev., **6** (1999) 118-123.

(2000年10月11日受理)