

電子ビーム描画による計算機ホログラムの作製

— 光情報処理応用を中心に —

吉 川 宣 一

計算機ホログラム (computer-generated hologram: CGH) は、光学的なホログラム作製における物体波と参照波の干渉を計算機内の数値計算により行い、数値情報として得られる干渉縞を表示装置に書き込むことにより作製される^{1,2)}。最近では微細加工技術を用いて高精度な素子が作製できるようになり、さまざまな分野で CGH に関する研究が行われている。主な応用としては、3次元物体表示のためのディスプレイ応用、複数の光学的機能を合わせもつ複合機能素子、入力波面の振幅と位相を自由に変換できる複素振幅フィルター、自由空間光インターコネクション素子などが研究されている。

本稿では、電子ビーム描画装置 (EB) を利用した CGH 作製を中心に、EB を利用した CGH の新しい多重化法やセキュリティーなどの光情報処理への応用について述べる。

1. 合成二重露光法による CGH

EB を利用した新しい多重化法である合成二重露光法 (synthetic double exposure method: SDE) とそれを応用したセキュリティーホログラムが提案されている^{3,4)}。SDE とは、EB のサブミクロンレベルの微細加工性能に基づいて、2つの異なる CGH のコード化法、point-oriented CGH (以下、ポイント型) と cell-oriented CGH (以下、セル型) を多重記録する手法である。

1.1 原 理

はじめに CGH の2つのコード化法 (セル型とポイント型) の特徴について考える。セル型は、ホログラム面を標本点と同じ数のセルに分割して、その中に小開口をつく

り、その小開口の大きさと横ずれを複素振幅の振幅と位相にそれぞれ対応させてホログラム情報を表す方法である (図1(a))。一方、ポイント型は CGH の1つの標本点をホログラム面の1点に対応させて、ホログラム面全体でホログラム情報を表す方法である (図1(b))。ポイント型の場合、キャリア成分を含めて回折計算しなければならないため標本点数や計算量が増加するという欠点もあるが、最近のコンピューター技術の発展によりパソコンを用いた設計でもさほど困難でなくなっている。EB を用いた CGH 作製ではポイント型を使う場合がほとんどである。

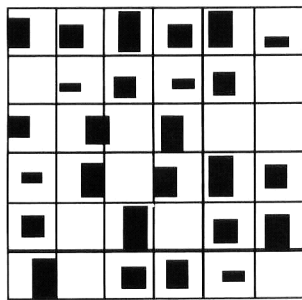
この2つの方式を比較すると、ホログラム面の利用効率が大きく異なっていることがわかる。セル型の場合、例として Lohmann 型 CGH⁵⁾ を考えると、1つの標本点を表すセルにおいて、最大でも半分領域しか小開口として利用されない。すなわち空間の利用効率が低いといえることができる。ここで、この利用されていない領域にポイント型を埋め込むことを考える (図1(c))。これは CGH のコード化法の違いを利用した多重化に相当し、ホログラムの冗長性により、それぞれの型に対応する像を再生することができる。この多重化法は、以下に述べるように、電子ビームの二重露光 (SDE) により実現することができる。SDE を実行するためには自由度が高く高分解能な CGH 作製技術が必要であり、EB をなくして実行することは困難である。

SDE は、波面の重ね合わせの原理に基づく多重化 (コヒーレント多重化)⁶⁾ と異なり、CGH のコード化法の違いを利用しているため、セル型とポイント型を独立に設計して CGH 作製時に多重記録してもよく、光学的なホログラムのアナロジーとして、セル型とポイント型のインコヒーレント多重記録として考えることができる。

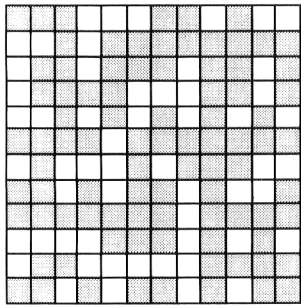
図2に SDE の基本的な手順を示す。はじめに電子ビー

武蔵工業大学工学部電子通信工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

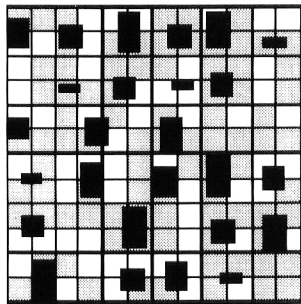
E-mail: yosikawa@ml.ec.musashi-tech.ac.jp



(a)



(b)



(c)

図1 (a) セル型, (b) ポイント型, (c) 合成二重露光法による多重化.

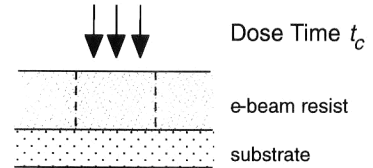
ム用レジストをスピコートしたガラス基板を用意して、通常の方法でセル型を描画する。次にポイント型を同じガラス基板に対して描画する（電子ビームによる二重露光を行っている）。このときの電子ビームのドーズ量は、セル型のホログラム情報を消さないように最初の描画時に比べて低く設定しておく必要がある。二重露光プロセスが終わったら通常の現像プロセスを行い最終的に SDE により多重化された CGH を得る。

1.2 CGH の設計

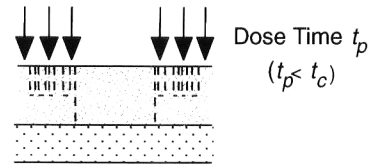
SDE による CGH の作製例として、ポイント型としてホログラム面近傍に再生像をつくるイメージ型 CGH、セル型としてフレネル型とフーリエ型をコヒーレント多重化した CGH を SDE により多重化した CGH を示す (図 3)。

ポイント型は、ホログラム面での標本点数は 8192×128 、サンプリング間隔は $0.3 \mu\text{m} \times 19.5 \mu\text{m}$ に設定し、

Step1. Exposure of cell-oriented CGH



Step2. Exposure of point-oriented CGH



Step3. Development

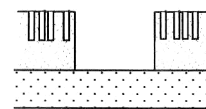


図2 合成二重露光法.

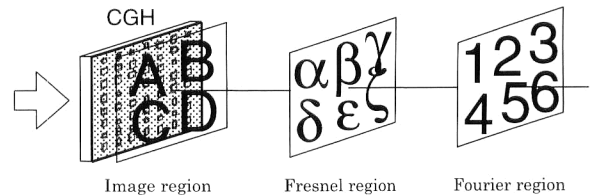


図3 再生像の設定.

物体光と参照光による干渉縞を計算して CGH を設計した。ここでは計算量を削減するため、垂直方向の視差は無視し、物点の最大回折角と参照光の入射角は 30° とした。光源は He-Ne レーザー ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) を仮定した。CGH に記録する物体は、標本点数が 128×128 である一定強度のアルファベット (A, B, C, D) とし、ホログラム面 ($z=0$) を基準として $A: z=+3 \text{ mm}$, $B: z=-1 \text{ mm}$, $C: z=-3 \text{ mm}$, $D: z=+1 \text{ mm}$ の位置にそれぞれ再生するように設定した (図 4(a))。

セル型にはフレネル型とフーリエ型をコヒーレント多重化した Lohmann 型 CGH を用いた。標本点数は 256×256 、ホログラム面でのサンプリング間隔は $9.75 \mu\text{m} \times 9.75 \mu\text{m}$ に設定した。フレネル型の物体は $z=+200 \text{ mm}$ の位置に再生するギリシャ文字、フーリエ型の物体はフーリエ変換レンズの焦点面に再生する数字とした。

図 4(b) にイメージ型の水平方向 1 ライン (図 4(a) の点線) の再生シミュレーション結果を示す。図では再生強度が大きくなるほど黒くなるように表している。図 4(c), (d) に、文字 A, B のそれぞれの再生位置での再生強度

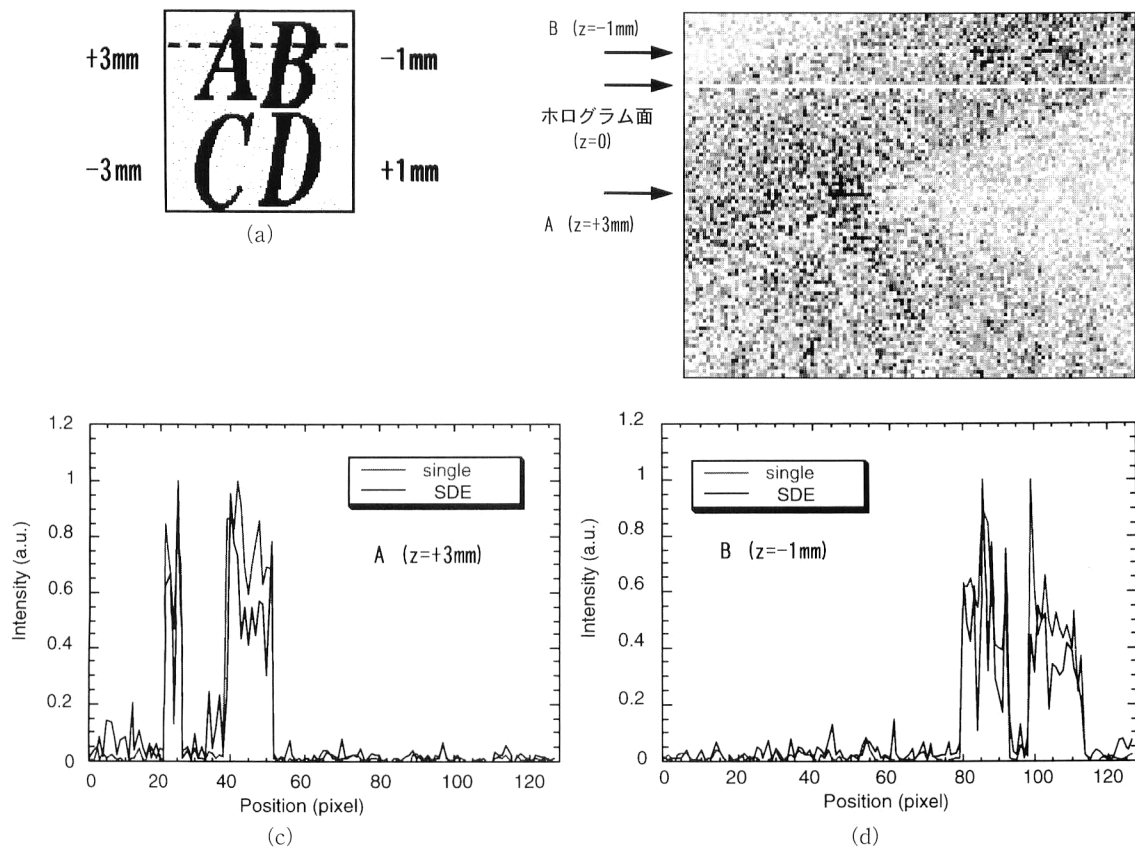


図4 イメージ型CGHの再生シミュレーション。(a) イメージ型CGHの再生物体、図中の数字は各文字が再生されるホログラム面 ($z=0$) からの距離を表す。(b) イメージ領域におけるCGHの1ライン ((a) の点線) の再生強度分布、(c) 「A」 ($z=+3\text{mm}$) の再生強度分布、(d) 「B」 ($z=-1\text{mm}$) の再生強度分布。

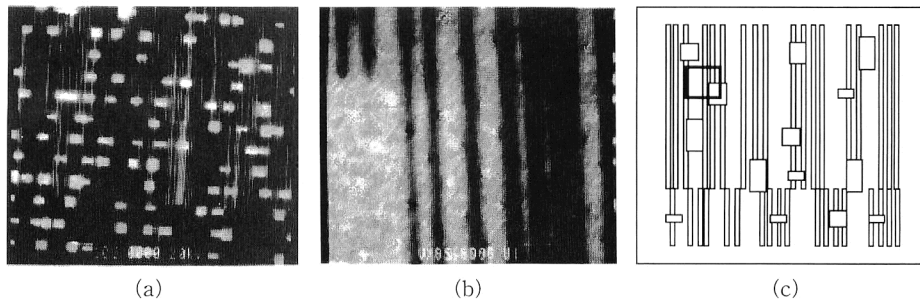


図5 (a) 電子ビーム描画により作製されたCGH、(b) (a)の一部を拡大したCGH表面、(c) 合成二重露光法による多重化の様子。図中の太線内が(b)に相当する。

分布を示す。回折効率を再生平面上で再生像に寄与する強度の割合として考えたとき、それぞれの回折効率は、A: 78%, B: 83%であった。SDEによる多重化を行わなかった場合の回折効率は、A: 92%, B: 94%であり、SDEによる多重化の影響が少ないことがわかる。

1.3 EBによるCGHの作製

図5にEBを用いて作製したCGHを示す。EBは、ELS 3300-PWS-L (エリオニクス社製) を用いた。SDEを実行するときのドーズ量は、セル型、ポイント型の描画において、それぞれ $74 \mu\text{m}/\text{cm}^2$, $62 \mu\text{m}/\text{cm}^2$ (加速電圧

20 kV) と設定した。図5(a)は、セル型の小開口を強調して表している。実際にセル型に利用された面積はCGH全体の約14%であった。図5(b)は図5(a)の一部を拡大したCGH表面である。図右下の白い四角形の部分はセル型の小開口であり、図中の縦線はポイント型の標本点である。図5(c)にセル型とポイント型の標本点の形状と位置関係を図示する。ここで作製したCGHでは、ポイント型の標本点がセル型に比べて細長い形状をしていることがわかる。これはセル型が多重記録されてもポイント型の情報がすべて消去されないようにするためである。

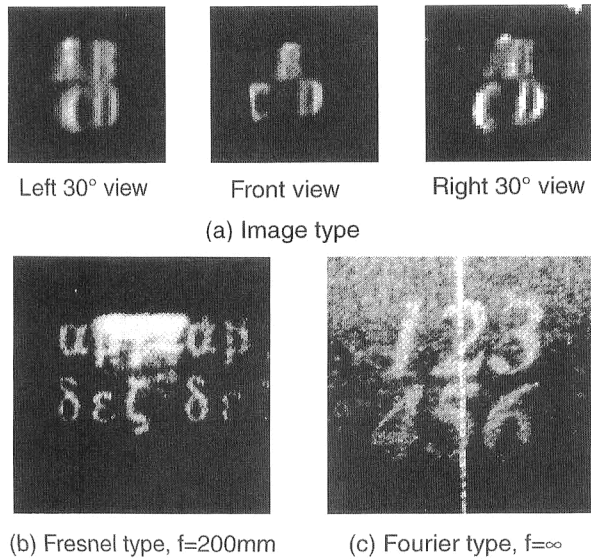


図6 再生像。(a) イメージ型, (b) フレネル型, (c) フーリエ型。

1.4 再生実験

図6にそれぞれの再生位置におけるCGHの再生像を示す。イメージ型は白色光源、フレネル型およびフーリエ型はHe-Neレーザー(633nm)を用いて再生した。なお、本研究におけるCGHの実験では、微細加工されたレジストを簡易的にそのままCGHとして用いている。図6(a)より、イメージ型では観察する角度により、文字の位置関係が変わっており、3次元再生されていることがわかる。再生像はイメージ型、フレネル型、フーリエ型においてそれぞれのCGHを単独で作製した場合と比べてもほとんど差はみられなかった。なお、フーリエ型の再生像の中央にある縦方向の線はフーリエ面におけるポイント型の回折線であり、セル型とポイント型の座標軸を平行に設定したため発生したものである。このクロストークを避けるためには、フーリエ型の再生像の位置をずらすか、一方の型のCGHの座標軸を45°回転させるなどして対処する必要がある。一般的なEBには描画用ステージに高精度な回転制御機能が備わっているので、設計段階からCGHの座標系の変換を考慮しなくても、座標回転は容易に実行できる。

1.5 セキュリティホログラムへの応用

SDEにより多重化されたCGHを用いてセキュリティホログラムへの応用を考えた。前節で作製したCGHにおいて、イメージ型に従来のセキュリティホログラムと同様の機能を割り当てるとすると、フレネル型、フーリエ型には奥行き方向にも情報(例えば個人情報や暗号など)を記録できる新しいセキュリティ効果を考えることができる。SDEによるCGHの多重化では、イメージ型(ポイント型)の回折効率にほとんど影響を与えずに、セル型をコヒーレント多重化することができるので、目視による

認証という基本的なセキュリティ機能を損なうことなく奥行き方向の情報を増やすことができる。特定の位置や波長で読み出せるように設計しておけば、それ以外の位置や波長で再生すると情報の読み出しが困難になるようなセキュリティ効果も期待できる。

以上のように、SDEにより多重化されたCGHを応用したセキュリティホログラムでは、従来の対偽造防止効果に加えて再生像の奥行き方向への情報記録などのホログラムの性質を利用したセキュリティ効果を考えることができる。しかし、これ自体は従来のセキュリティホログラムの拡張であり十分とはいえない。将来的にもCGHをセキュリティデバイスとして用いるならば、ホログラムの物理的な性質と切り離して情報を管理するような手法、すなわち、情報そのものにセキュリティ効果を含ませることにより、伝送媒体に関係なく安全に情報のやり取りができるようなセキュリティ方式が必要になると考える⁷⁾。このような方式を実現するためには、数学的な概念を含めてCGH技術とセキュリティ技術を融合させる必要があるだろう。

2. 今後の課題

CGHを光情報処理に利用するためには、目的に応じた波面合成・変換が必要になり、専門的な知識がない人でもCGHを簡単に作製できるような簡単な設計法と作製法が必要である。

設計法に関しては、製作支援CADシステムが開発されている⁸⁾。将来的にはCGHを実際に作製する前に性能評価ができるように、半導体デバイス用CADシステムにおける性能評価シミュレーターのような機能をもつCADシステムに発展させる必要がある。また、設計の効率化のためにもCGH用データフォーマットの標準化なども必要である。

作製法においては、現在では微細加工技術を用いて高精度なCGHが作製できるようになったが、試作レベルで考えると非常に高価な製造装置を使うことから簡単になったとはいいがたく、一般的な機器を用いた簡便な作製法が望まれる。一定の精度を確保して簡易的にCGHを作製する方法として、書き換え可能な光ディスク技術⁹⁾が利用できるものと考えられる。光ディスクにCGHを書き込む先駆的な研究は、すでにYatagaiらにより提案されている¹⁰⁾。最近、マルチプロジェクト方式LSI試作サービスの中に回折光学素子が検討されはじめている¹¹⁾。将来的にはCGHに拡張されることも期待される。

以上、微細加工技術を用いた CGH 作製と光情報処理への応用について述べた。光情報処理に CGH を用いることを考えた場合、CGH は複数の光学的機能を 1 つの CGH に組み込むことができるので、光情報処理システムの高機能化、小型化が可能になる。いわばワンプレート化された CGH により光情報処理技術がさらに発展するものと考えられる。

文 献

- 1) W. H. Lee: "Computer-generated holograms: Techniques and applications," *Progress in Optics XVI*, ed. E. Wolf (North-Holland, 1978).
- 2) O. Bryngdahl and F. Wyrowski: "Digital holography—Computer-generated holograms," *Progress in Optics XXVIII*, ed. E. Wolf (North-Holland, 1990).
- 3) N. Yoshikawa, M. Itoh and T. Yatagai: "Binary computer-generated holograms for security application using synthetic double exposure method by electron-beam lithography," *Opt. Lett.*, **23** (1998) 1483-1485.
- 4) N. Yoshikawa, M. Itoh and T. Yatagai: "Synthetic double exposure method for security hologram: Image estimation based on numerical simulation," *Proc. SPIE*, **3740** (1999) 521-524.
- 5) A. W. Lohmann and D. P. Paris: "Binary Fraunhofer holograms, generated by computer," *Appl. Opt.*, **6** (1967) 1739-1748.
- 6) 辻内順平: *ホログラフィー* (裳華房, 1997) pp. 106-108.
- 7) 松本 勉: "電子透かしと関連技術", *電気学会誌*, **120** (2000) 430-433.
- 8) T. Yatagai, M. Geiser, R. Tian and H. Onda: "CAD system for CGH's and laser beam lithography," *Computer and Optically Generated Holographic Optics*, eds. I. Cindrich and S. H. Lee, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **1555** (1991) 8-12.
- 9) 菅谷寿鴻: "書き換えできる DVD", *応用物理*, **67** (1998) 3-12.
- 10) T. Yatagai, J. G. Camacho-Basilio and H. Onda: "Recording of computer-generated holograms on an optical disk master," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 1042-1044.
- 11) 太田 淳: "光コンピューティングのためのマルチプロジェクト方式 LSI 試作サービス", 第 91 回光コンピューティング研究会講演予稿集 (2000) pp. 5-10.

(2000 年 10 月 14 日受理)