ホログラムによるレーザービームパターンニング

椿本 孝治

大阪大学 レーザー核融合研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)

Laser Beam Shaping by Computer Generated Hologram

Koji TSUBAKIMOTO

Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

(Received October 20, 2003)

A computer generated hologram (CGH) is a useful tool for various optical applications, such as beam multiplexing, patterning, beam homogenizer, etc. The precise technologies are important issue for the fabrication of CGH, and the algorithm is more essential for designing it. I discuss the detailed consideration on the CGH design which is required to reconstruct a complex image. I also introduce efficient methods to design a hologram which creates a desired pattern at the Fresnel region and on a spherical surface.

Key Words: Computer generated hologram, Beam shaping, Diffraction efficiency, Error reduction algorithm, Fresnel hologram

1. はじめに

リソグラフィーやプラズマエッチングといった微細加工技術により、高性能な回折光学素子(DOE: Diffractive Optical Element)を製作することが可能になってきている。DOEは、透明平面基板上に微少な凹凸形状を作製し、光の位相を制御することにより、分岐、多点集光、ビームパターンニング、分布均一化などの機能を持たせた光学素子である。レンズ、ウェッジといった従来の光学素子もまた、DOEを使って製作可能である。中でも、計算機を使って位相分布を求める計算機ホログラム(CGH: Computer Generated Hologram)は、計算機の高速化と設計アルゴリズムの改良により、レーザービームの効率的なパターンニング素子としての応用が期待されている^{1,4)}。

一例として、Fig. 1に回路パターンを一括加工するために設計したCGHによって得られる遠視野像の計算結果を示す。設計波長は800 nm、レンズの焦点距離は1 m、CGHのセル幅は62.5 μm 、セル数を512 $\times$ 512、入射レーザー光の半径を15 mmに設定した。このパラメーターで得られる最小線幅は25 μm である。ただし、設計回路パターンの最小線幅は、100 μm で設計している。Fig. 1に見られるように、計算では非常に鮮明な回路パターンが再生できていることがわかる。しかし、実際に作製したCGHは、設計、製作段階での不具合により、その性能を発揮することができなかった。

本稿では、CGHを用いて複雑なパターンニングをするために設計段階で考慮しなければならない事柄について、

フーリエ変換を用いるアルゴリズムをもとに検討する。また、筆者が行った、レーザー核融合用のCGHの設計についても述べる。

2. CGH設計アルゴリズム

CGHは、近視野領域における光の空間位相分布を制御することにより、遠視野もしくは準遠視野において任意の強度分布を作り出す。一般的には、CGHの後ろに集光用のレンズを挿入し、遠視野像を得ている。今、Fig. 2のような光学系を考える。レンズに入射するレーザー光の複素振幅分布を

$$|U(x_i, y_i)| \cdot \exp(i\theta(x_i, y_i)) \quad (1)$$

とすると、レンズで集光した後の像は、式(1)のフーリエ変換で与えられる。この時、振幅 $U(x, y)$ は、レーザー光によって決まるため、位相項 $\theta(x, y)$ を適当に選ぶことで集光強度分布が変化する。実際のCGHでは、連続的な位相分布を再現する方法も検討されているが、大抵の場合、空間を微少なセルに分割し、それぞれのセルに特定の位相値を与えるように設計される。つまり、連続波面空間を離散的な位相分布で表現することになる。式(1)を離散的な位相分布で書き換えると、

$$\sum_l \sum_m U_{l,m} \cdot g_{l,m}(x_i, y_i) \cdot \exp(i\theta_{l,m}) \quad (2)$$

と置くことができる。ただし、 U はセルに入射する複素振

Fig. 1 Reconstructed electric circuit image from a CGH (numerical calculation).

Fig. 2 Coordinates for solving the diffraction optics.

幅, g はセルの形状で決まるゲート関数, θ_{lm} はセルの位相であり, l, m はセルの場所を表す整数である。ただし, セルに入射する複素振幅は一樣であるとしている。また, 入射ビーム内の位相分布は一樣であるとして無視した。レンズの焦点位置での振幅分布は, フランフォーファの近似式を用いて, 次式のように表すことができる。

$$U_F(x_o, y_o) = \frac{1}{i\lambda f} \exp\left[ik\left(\frac{x_o^2 + y_o^2}{2f}\right)\right] \sum_l \sum_m \int \int U_{lm} \cdot g_{lm}(x_i, y_i) \cdot \exp(i\theta_{lm}) \cdot \exp\left[-i2\pi(f_x x_i + f_y y_i)\right] dx_i dy_i \quad (3)$$

ただし, $f_x = x_o/\lambda f$, $f_y = y_o/\lambda f$ である。今, CGHのセルが一辺の長さが a , 中心の座標が (A_{lm}, B_{lm}) の正方形であると仮定すると, 式(3)は解析的に解くことができ,

$$U_F(x_o, y_o) = \frac{1}{i\lambda f} \exp(ikf) a^2 \text{sinc}(af_x) \text{sinc}(af_y) \cdot \sum_l \sum_m U_{lm} \exp\left[-i2\pi(f_x A_{lm} + f_y B_{lm})\right] \cdot \exp(i\theta_{lm}) \quad (4)$$

となる。ここで, $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/\pi x$ であり, SINC関数と呼ばれる正方形開口の遠視野像を与える関数である。最終的には, 式(4)の θ をいかにして求めるかがアルゴリズムに求められる。

式(3), (4)からわかるように, この2つの式は離散的フーリエ変換の形になっている。そのため, CGHの設計には, しばしば, フーリエ変換が利用される。設計アルゴリズムの基本は, 近視野像と遠視野像を交互に求め, 振幅を一定に保ちながら位相情報を最適解に収束させることにある。GerchbergとSaxtonは, 近視野と遠視野の2つの像から, 高速フーリエ変換を使って位相を回復するア

ルゴリズム (Error-Reduction Algorithm: ER) を開発している⁵⁾。彼らは, 近視野像をフーリエ変換し, 遠視野像を求め, 求めた遠視野像の振幅成分を計測した遠視野像と置き換え, フーリエ逆変換を行って近視野像を求めるという動作を繰り返し, 位相分布を求めている。Gerchberg-Saxtonのアルゴリズムは, 単純明瞭であるが, 極値へのトラップや収束までに必要な反復回数が多いといった欠点がある。Fienupは, Gerchberg-Saxtonのアルゴリズムに改良を加え, 収束性能を向上させたInput-Outputアルゴリズムを開発している^{6,7)}。このアルゴリズムでは, 遠視野での振幅の置き換え時にビームパターンの外側の領域に着目し, この領域の成分に一定のファクターを乗じて戻すことで誤差の成分を効率的に取り除いている。

Seldowitzらは, CGHの位相を最終的に2値化することに着目し, 異なるアプローチで, さらに誤差が小さくなる直接探索アルゴリズム (Direct Binary Search Algorithm: DBS) を開発している⁸⁾。DBS法では, 近視野での複素振幅に対して, 単一のセルの位相を別の位相に入れ替えて, 遠視野像を求める。この遠視野像と設計すべき像との誤差が少なくなれば, 入れ替えを受け入れ, 大きくなれば元に戻す。この計算をすべてのセグメントに対して行い, 位相分布を最適値へと収束させる。Feldmanらは, DBS法にSimulated Annealing法(SA)⁹⁾を組み合わせ, 入れ替えを受け入れる判断基準に確率要素を取り入れることにより, 回折効率とビームパターンの一様性を向上させている¹⁰⁾。

3. 位相の量子化

CGHの設計では, 製作上の問題から位相を2のべき乗により量子化する必要がある。位相の量子化は誤差を拡大する方向に作用する。小さなドットの繰り返しパターンを再生するようなCGHでは大きな問題とはならないが, ある種のシンボルや画像など, 複雑なパターンを再生するようなCGHでは, 誤差がパターン内に干渉スペクルという形で現れるため, コントラストの低下を招くことがある。また, 量子化の階調数が2の場合には, Fig. 3に示すように, 点対称位置に反転画像が発生するという問題がある。これは, 2階調のCGHが線形傾斜成分を表現できないことが原因で, 原理的に除去することができない。2階調のCGHを設計する場合には, 点対称像の発生を考慮した設計を行う必要がある。量子化による誤差を低減する方法として, Fetthauerらは, 誤差拡散法 (Error Diffusion method) をCGHの設計に導入し, ビームパターン内に生じるスペクルを低減させている¹¹⁾。また, ER法では, 量子化によってCGHが極小値にトラップされ, 最適解に収束しなくなることがあることから, 極小値へのトラップを避けるために, 急激な量子化を行わず, 段階的に位相の階調数を下げる方法がとられる。Fig. 4に, 2階調のCGHを設計した場合の誤差と反復計算数の関係を示す。設計像は直径500 μm の円形フラットパターン, 入力光は直径400 mmのフラットパターンにしている。焦点距離は1 m, CGHのセルサイズは1.0 mm, 波長は532 nmとし, 反復数

Fig. 3 Ghost image appeared by binary (two level) quantization. (a) Design image. (b) Reconstructed image from binary CGH.

Fig. 4 Reduction of reconstruction error by stepped quantization.

は100回にした。図からわかるように、段階的に階調を下げることで誤差が小さくなることがわかる。最終的に得られた誤差は、最初から2階調で設計した場合には、0.001794なのに対して、段階的に下げたことで、0.001653と約8%改善されている。また、回折効率も、63.7%から65.8%と約3%改善されている。

量子化の階調数は、CGHの製作を考えた場合、あまりに大きな値は現実的ではない。Fig. 5に量子化の階調数及びセルの大きさに対する回折効率の変化を示す。CGHの設計にはER法を用いている。設計に用いた像は、単純な円形フラットパターンであり、直径は500ミクロンとしている。入力光は波長532 nm、直径50 mmの様な振幅分布を持つとし、1008 mmの焦点距離を持つレンズで集光するものとした。また、図中の回折効率および、Ratioは次式により評価した。

$$\text{回折効率} = (\text{再生像に含まれるエネルギー}) \div (\text{入力エネルギー})$$

$$\text{Ratio} = (2.0 \times (\text{焦点距離} \times \text{波長}) \div \text{セルサイズ}) \div (\text{設計像の直径})$$

2階調に量子化したときは、量子化しないときに比べて回折効率が低い。量子化の階調数が多い方が、回折効率がよくなっている様子がわかる。16階調の量子化で、量子化しない場合に匹敵するような回折効率を得られていることから、16階調で十分な像の再生が可能であるといえる。また、量子化の階調数が誤差に与える影響が

Fig. 5 Diffraction efficiency depending on the number of quantized levels and on the cell size.

Yoshikawaらによって議論されており、ここでも、16階調以上は誤差に大きな差がないことが示されている¹²⁾。

4. 離散化による問題点と回折効率

CGHを設計する時のもう一つの問題点は、位相の離散化である。式(3)、(4)にみられるように、CGHの位相はセル毎に離散的な値をとる。これは、位相によるビーム分割に相当し、分割されたビームレット、つまり、単位セルによる回折が少なからず再生パターンに影響を与えることになる。単位セルによる回折は、2次以上の回折成分を作り出し、ゴーストのような多重像を再生してしまう。これは、そのまま、回折効率の低下につながる。Fig. 5から、CGHの回折効率は、設計像とビームレットの大きさの比に依存することがわかる。このグラフから、セルサイズが小さくなることで、回折効率が高くなっている。また、Ratioは5から10程度にする必要があるということがわかる。Fig. 6にこの現象を説明する概念図を示している。CGHにより再生される像は、第1ローブの半分の領域に存在している。離散的フーリエ変換は、図の点線で示すように、繰り返し像を発生させる。これらの像は2次、3次といった高次の回折像に相当し、回折ロスとな

Fig. 6 Explanation of high-order diffraction image in the Fourier transform.

る。しかしながら、おもしろいことには、これら高次の回折像はセルの回折パターン(実線)における暗環部分(ゼロ位置)に中心を持つ。つまり、第1ローブの中心付近に再生像を集中させれば、高次の回折成分は暗環部分に集中することになり、振幅は0となりうる。Fig. 7に2階調CGHで得られる典型的な再生像を示す。再生像は円形のフラット強度分布としている。図では、高次の再生像を見やすくするためにわざと中心部を飽和させている。Fig. 7 (a)は、再生像の半径を第1ローブの半径と等しくした場合であり、(b)は再生像の半径を5分の1にした場合である。Fig. 7 (a)において、中心部分に、強度の高い円形フラット像がみられる。その周りには、半月状のパターンが現れていることがわかる。これが高次の再生像である。このとき、高次の再生像に共通の現象が存在する。Fig. 7にみられるように、高次の再生像の中心部が暗くなっている。これは、高次の再生像の中心が、暗環部にあるためである。Fig. 7 (b)では、中心の白い部分が再生像である。周辺部に、高次の再生像はみられない。CGHを設計するときは、再生像のサイズを十分に考慮する必要があるといえる。また、離散的フーリエ変換での設計領域いっぱいにはパターンを再生するようなCGHを設計した場合には、Fig. 8に示すように、中心から外側に向かって強度が低くなるようなパターンが再生される。また、階調数を2から16に変えても、あまり改善されていない。広い面を持つパターンを再生するCGHを設計する場合には、パターンと設計領域の大きさの比を十分にとることが必要不可欠である¹³⁾。

高次回折光とは異なる問題も存在する。離散化に製作上の位相誤差が加わることで、0次回折光(センタースパイク)が顕著に現れるようになる。Dixitらは、2階調の回折光学素子における位相誤差と0次回折光の強度について議論している¹⁴⁾。彼らによれば、0次回折光の強度は、0及び π 位相のセルの個数をそれぞれ N_0 、 N_p とし、位相誤差を $\Delta\phi$ とすれば、

$$\frac{\text{CentralPeak}}{\text{Background}} = \frac{1}{N} |N_0 + N_p \exp(i\Delta\phi)| \quad (5)$$

で与えられるとしている。0次回折光は、集光位置に近づくにつれ絞られていくため、小さな誤差が致命的な強度比となって現れることになる。256×256程度のセル数を持つCGHでは、1から2%程度の誤差に抑えなければ0次回

Fig. 7 High-order diffraction image reconstructed from the binary CGH. (a) Ratio = 1. (b) Ratio = 5.

Fig. 8 Reconstructed images designed at whole area of fast fourier transform inclined to the outside of it. (a) Binary CGH. (b) 16-level CGH.

折光の影響が無視し得ない大きさとなって現れる。0次回折光がパターンの一部となるような、ビーム分岐や、アレイ状パターンニングなどでは、影響を小さくすることができる。布施氏らは、CGH製作時の誤差がアレイ状再生パターンに与える影響について、詳細に検討し、位相誤差を評価関数に反映させることで、誤差に鈍感なCGHの設計が可能であることを示している⁴⁾。一方で、0次回折光をパターンの一部として使わないようなパターンニングでは、パターン中央に輝点が現れるために大きな問題となる。パターンの再生位置を集光位置から手前(フレネル領域)にずらすことで、0次回折光を大きく広げることで輝度を下げ、影響を少なくすることができる。フレネル領域でのCGHの設計については、後で述べる。

5. 高速フーリエ変換とCGHの設計

設計段階では、離散的フーリエ変換を解くために、高速フーリエ変換(FFT)が用いられることが多い。FFTを用いる場合には、物体面の大きさとセルの幅によって決まる空間周波数と、入力複素振幅の関係に注意しなければいけない。フーリエ変換面(像面)と物体面とは、Fig. 9に示すような関係にある。フーリエ変換後の周波数空間における1セルの幅は、変換前の物体面全幅の逆数に比例する。一方で、セルで分割されたビームレット間での干渉によって生じるスペckルの最小半径は、ビームレット間の最大交差角、つまり、入力複素振幅の最大幅の逆数で決定される。入力複素振幅の幅が物体面全幅の2分の1以上になると、発生するスペckルを正確に計算できなくなる。したがって、入力複素振幅は、物体面全幅の2分の1を直径とする円よりも大きくとることが許されない。また、前節で述べたように、高い回折効率を得るためには、周波数空間において、中心から全幅の5分の1の領域にパターンを集中させなければならない。これは、設計パターンの解像度を低下させるか、計算時間を大きく増

Fig. 9 The Size of hole area at the image plane is correspond to maximum spatial frequency obtained by FFT, and decided by single cell width at the object plane.

加させることになる。なぜなら、解像度を上げるために物体面を大きく拡大しなければならないためである。

FFTによる制約を回避するには、式(3)、(4)を直接計算することが望ましい。ER法でこれを実行するのは、計算時間を考えると現実的ではない。しかし、DBS法やSA法の場合には、大型計算機を使って十分に計算可能である。DBS法では、単一のセルの位相を入れ替えて式(4)を計算する。このとき、FFTを使うこともできるが、一つのセルが全体に与える影響を考慮すると、FFTを使わなくても少ない計算量で計算できる。もっとも単純な2階調CGHを考えてみる。式(4)から、一つのセルが与える影響は、

$$U_{F,lm}(x_o, y_o) = A_{lm}(x_o, y_o) \times \exp(i\theta_{lm})$$

$$A_{lm}(x_o, y_o) = \frac{1}{i\lambda f} \exp(ikf) a^2 \text{sinc}(af_x) \text{sinc}(af_y) \cdot U_{lm} \exp\{-i2\pi(f_x A_{lm} + f_y B_{lm})\} \quad (6)$$

で与えられる。式(6)において、セルの位相項、 $\exp(i\theta_{lm})$ は、 $\theta_{lm} = 0, \pi$ に対して、1および、-1という値をとる。したがって、セルの位相を他方に置き換える計算は、遠視野像の複素振幅に対して、

$$U'_F(x_o, y_o) = U_F(x_o, y_o) - A_{lm}(x_o, y_o) \times \exp(i\theta_{lm}) + A_{lm}(x_o, y_o) \times \exp(i\theta'_{lm})$$

$$= U_F(x_o, y_o) - 2 \times A_{lm}(x_o, y_o) \times \exp(i\theta_{lm}) \quad (7)$$

を行うことに等しい。2次元の離散的フーリエ変換を、FFTを使わずに計算する場合、計算に要するループは4重になる。しかし、式(7)を使って、一つのセルの変化分のみを反映させるだけなら、2重ループで計算できることになり、計算量は $n \times n$ の配列に対して $1/n^2$ に減少する。DBS法やSA法では、この性質を利用することでFFTによる多くの制約を回避することができる。

6. フレネル領域でのCGH設計

4節で述べたように、実際のCGH製作では、ある程度の位相誤差を許容しなければならない。0次回折光を必要としないパターンニングでは、影響を低減するために、フレネル領域での設計を行わなければならない。フレネルホログラムの設計法についても多くの論文が報告されている¹⁵⁻¹⁸⁾。ここでは、筆者が行っている2つの方法について述べ、さらに、非平面上に像を再生するCGHの設計について述べる。

6.1 平面上の設計

フレネル領域における複素振幅を与える式は、フレネルの近似式を使って

$$U_F(x_o, y_o) = \frac{1}{i\lambda f} \exp\left(ik \frac{x_o^2 + y_o^2}{2f}\right) \sum_k \sum_m \int \int U_{lm} g_{lm}(x_i, y_i) \times \exp\left\{-ik \frac{x_i^2 + y_i^2}{2f} + ik \frac{x_i^2 + y_i^2}{2z} - i2\pi(f_x x_i + f_y y_i)\right\} \times \exp(i\theta_{lm}) dx_i dy_i \quad (8)$$

で表される。ここで、 z はレンズから再生像までの距離である。最初に、式(8)を解析的に解くことを考える。セルの形状を表す関数 g_{lm} が正方形の場合、式(8)はフレネル積分を使って次のように書き換えることができる。

$$U_F(x_o, y_o) = \frac{1}{2j\beta\lambda z} \exp\left\{ik\left(z + \frac{x_i^2 + y_i^2}{2z}\right) - i\pi \frac{f_x^2 + f_y^2}{\beta}\right\} \times \sum_l \sum_m U_{lm} e^{i\theta_{lm}} \times \left[F\left(\sqrt{2\beta}(a/2 + A_{lm} - f_x/\beta)\right) - F\left(\sqrt{2\beta}(-a/2 + A_{lm} - f_x/\beta)\right)\right] \times \left[F\left(\sqrt{2\beta}(a/2 + B_{lm} - f_y/\beta)\right) - F\left(\sqrt{2\beta}(-a/2 + B_{lm} - f_y/\beta)\right)\right] \quad (9)$$

ここで、 F はフレネル積分を表す。

フレネル領域のCGHを設計する一つの方法は、式(9)を数値計算するものである。これは、DBS法やSA法の場合に、5節で述べた方法を使って可能となる。もう一つの方法は、式(8)を離散的フーリエ変換の形に変形する方法である。式(8)の位相項のなかで、

$$-ik \frac{x_i^2 + y_i^2}{2f} + ik \frac{x_i^2 + y_i^2}{2z} \quad (10)$$

の部分に注目してみる。式(10)を変形すると、

$$ik(f-z) \frac{x_i^2 + y_i^2}{2zf} \quad (11)$$

となる。これは、焦点距離 $zf(z-f)$ のレンズが与える位相分布である。ところで、 $z-f$ は、デフォーカス距離に相当し、 zf に比べると遙かに小さな値をとる。したがって、式(11)は x_i, y_i に対して緩やかに変化するとし、それぞれの

セルの中では一様であるとみなせる．この仮定で式(8)を書き換えると

$$U_F(x_o, y_o) = \frac{1}{i\lambda f} \exp\left(ik \frac{x_o^2 + y_o^2}{2f}\right) \sum_1 \sum_m \int_{-\infty}^{\infty} U_{lm} g_{lm}(x_i, y_i) \times \exp(i\phi_{lm}) \exp(i\theta_{lm}) \exp\{-i2\pi(f_x x_i + f_y y_i)\} dx_i dy_i \quad (12)$$

となり，離散的フーリエ変換の形に変形することができる．つまり，入力複素振幅に焦点距離 zf のレンズが与える位相値を乗算すれば，フランフォーファー領域での設計と同様の過程でCGHを設計することができる．

式(12)を使って設計したCGHによる再生像の計算例をFig. 10に示す．入力振幅は直径320 mmの一様な円形パターン，設計パターンは，直径0.5 mmの一様な円形パターンとしている．位相は2階調の量子化を行っている．また，デフォーカス量は，焦点距離1008 mmに対して，0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5 mmとしている．おおむね，良好な再生像が得られていることがわかる．ただし，デフォーカス量が1.0 mmを越えると，再生像の中心部分の強度が周辺部よりも低くなる傾向が見られる．

6.2 球表面上の設計

フレネル近似による式と，DBS法を用いることで，非平面で像を再生するCGHを設計することが可能である． (l, m) 番目のセルが像面で作る強度分布は，光線の入射位置を考慮して平面と非平面での投影面積比をかける必要がある．球面に対しては，次式のようになる．

$$U_F(x_o, y_o) = \frac{1}{i\lambda f} \exp\left(ik \frac{x_o^2 + y_o^2}{2f}\right) \sum_1 \sum_m \int_{-\infty}^{\infty} U_{lm} g_{lm}(x_i, y_i) \times \exp\left\{-ik \frac{x_i^2 + y_i^2}{2f} + ik \frac{x_i^2 + y_i^2}{2z} - i2\pi(f_x x_i + f_y y_i)\right\} \times \exp(i\theta_{lm})(\cos\gamma) dx_i dy_i \quad (13)$$

ここで， γ はセルからの光線が入射した球面上の点と球の中心を結ぶ線分が z 軸となす角である．重要なのは，伝搬距離 z がすべての計算点で異なることである．Fig. 11に球

Fig. 10 Reconstructed images in the Fresnel region. Numerals indicate the defocusing depth in a unit of micrometer.

Fig. 11 Envelope profile of reconstructed image on a spherical surface.

面に対して設計したCGHの包絡線プロファイルを示す．横軸は γ に相当する．球面上でも設計パターンを再生するCGHを製作可能になることがわかる．これにより設計されたCGHはレーザー核融合用の球ターゲットに対する照射強度分布の非一様性を大幅に改善する可能性を示した．

7. まとめ

計算機を使って位相分布を求める計算機プログラムを用いて，より複雑なパターンを再生する場合に考慮すべき事項について述べた．CGHは製作からくる制限のため，位相を階段状に量子化する必要がある．位相の量子化は再生像の内部に強いスペックルを発生させる原因となる．複雑な濃淡があるようなパターンを再生する場合には，16階調以上の階調数で量子化することが望ましい．また，設計時の制限から，空間を離散化している．離散化は，セルの回折により高次回折像や0次回折光を発生させ，回折効率の低下を招く．再生像の大きさは，セルの回折像半径の5分の1以下が理想である．CGHの設計に多用されるFFTは，計算時間を短縮するという意味では非常に有用な手法である．ただ，CGHの性能を高めるためには，FFTによらない計算も必要である．

参考文献

- 1) Ch. Haupt, M. Pahlke, R. Krupka, and H. J. Tizian: Appl. Opt. **36** (1997) 4411.
- 2) J. Amako, K. Umetsu, and H. Nakao: Appl. Opt. **40** (2001) 5643.
- 3) J. Amako, K. Nagasaka, and K. Nishida: Opt. Lett. **27** (2002) 969.
- 4) 布施 敬司, 平井 隆之, 塩崎 学, 岡田 健, 栗巢 賢一, 江畑 恵司: SEIテクニカルレビュー **162** (2003) 71.
- 5) R. W. Gerchberg and W. O. Saxton: Optik **35** (1972) 237.
- 6) J. R. Fienup: Opt. Eng. **19** (1980) 297.
- 7) J. R. Fienup: Appl. Opt. **21** (1982) 2758.
- 8) M. A. Seldowitz, J. P. Allebach, and D. W. Sweeney: Appl. Opt. **26** (1987) 2788.
- 9) S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi: Science **220** (1983) 4598.
- 10) M. R. Feldman and C. C. Guest: Opt. Lett. **14** (1989) 479.
- 11) F. Fetthauer, S. Weissbach, and O. Bryngdahl: Opt. Commun. **94**

- (1992) 44.
- 12) N. Yoshikawa and T. Yatagai: Appl. Opt. **33** (1994) 863.
- 13) L. M. Barton, P. Blair, and M. R. Taghizadeh: Appl. Opt. **38** (1997) 9132.
- 14) S. N. Dixit, I. M. Thomas, B. W. Woods, A. J. Morgan, M. A. Henesian, P. J. Wegner, and H. T. Powell: Appl. Opt. **32** (1993) 2543.
- 15) H. Y. Wu and P. Chavel: Appl. Opt. **23** (1984) 228.
- 16) H. Y. Wu, P. Chavel, D. Joyeux, and J. Brunol: Opt. Commun. **45** (1983) 155.
- 17) J. L. Juarez-Perez, A. Olivares-Perez, and L. R. Berriel-Valdos: Appl. Opt. **36** (1997) 7437.
- 18) T. J. Suleski, B. Baggett, W. F. Delaney, C. Koehler, and E. G. Johnson: Opt. Lett. **24** (1999) 602.

レーザーワード

計算機ホログラム (Computer generated hologram)

物体から反射される光の位相分布を、回折理論をもとにして計算機により求めることで実現したホログラムのことを指す。計算機ホログラムは、干渉を使って記録するホログラムのようにレーザー光や記録媒体を必要とし

ない反面、複雑な3次元物体等を実現する場合には膨大な計算量となる。ビーム分岐、アレイビーム発生、ビーム成形等を行うためのレーザー用光学素子が計算機ホログラムにより実現され、応用されている。(椿本 孝治)