



ホログラムを用いた局所可変光論理演算

高木 康博・大頭 仁

早稲田大学理工学部応用物理学科 〒169 東京都新宿区大久保 3-4-1

(1990年2月22日受付, 1990年6月22日受理)

Local Variable Optical Logic Operations by Use of Holograms

Yasuhiro TAKAKI and Hitoshi OHZU

Department of Applied Physics, School of Science and Engineering, Waseda University,
3-4-1, Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169

(Received February 22, 1990; Accepted June 22, 1990)

Two techniques for implementing local variable optical logic operations by use of holograms are proposed. The local variable logic operations are necessary in order to reduce the number of logic operations and interconnections in optical logic circuits. One technique is based on a one-dimensional spatial filtering system for holographic logic operations. The other technique is based on multiplexing of holographic logic operations. Experimental results of both techniques are demonstrated. We estimated potential integrations of optical logic operations in both techniques with our experimental systems. It shows that a higher integration is obtained with the multiplexing technique (3.7×10^4 gates/mm²) than the one-dimensional technique (5.3 gates/mm²). Much higher integration of 2.1×10^6 gates/mm² could be obtained with the multiplexing technique by fabricating a hologram with an electron beam lithography system.

1. はじめに

ホログラムを用いた光論理演算において、実行する論理演算の種類を位置により可変にする方法を提案する。われわれは、ホログラムを用いて光論理演算が実現できることを以前の研究¹⁾で示した。この方法は、入力空間的符号化を必要としないため光論理演算の入力も出力も光で行えるという特徴がある。さらに、ホログラムを用いた光論理演算の多重化の方法²⁾を提案した。しかし、ホログラムを用いた光論理演算で、一つの空間フィルタリング系で行える論理演算は一種類である。多重化によっても、位置により論理演算を変えることは不可能である。このような同一種類の論理演算のみで論理回路を構成することも可能である。NOR 演算や NAND 演算を用いることで実現できる。ただし、このような光論理回路の構成方法を用いると、光論理回路を構成するために必要な論理演算数の増加と論理演算間の接続数の増加をまねく。このため、位置により異なる論理演算を行う方法が必要である。これを、局所可変光論理演算と呼

ぶ。

光論理演算を局所可変にする研究としては、空間符号化論理を用いた方法³⁾が報告されている。この方法は、入力を空間的に符号化する必要がある。また、複屈折光学素子を用いた局所可変論理演算⁴⁾が報告されている。この方法は、入力に可変偏光板を用いる必要がある。

本論文においては、ホログラムを用いた光論理演算を局所可変にする方法を二つ提案する。一つの方法は、光論理演算を行う空間フィルタリング系を一次元化することで局所可変光論理演算を実現する。もう一つの方法は、光論理演算を多重化しロジックアレイを構成することで局所可変光論理演算を実現する。さらに、これらの二つの局所可変光論理演算の実現方法における演算の集積度について検討する。

2. 一次元化による局所可変光論理演算

2.1 原理

空間フィルタリング系を一次元化することで、ホログラムを用いた光論理演算を局所可変にする方法を提案す

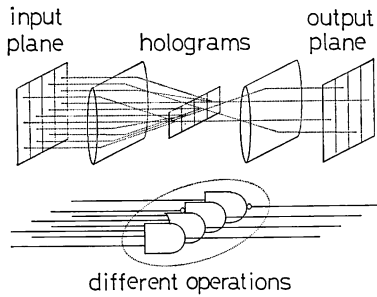


Fig. 1 Local variable logic operations based on a one-dimensional filtering system.

る。構成図を、**Fig. 1** に示す。ホログラムを用いた光論理演算を行う空間フィルタリング系において、次の二点の変更を行った。(1) フィルタリングを行うレンズとして、シリンダリカルレンズを用いる。(2) フィルタリング面に異なる論理演算を行うホログラムを並べる。以上により、空間フィルタリング系を一次元化し、ホログラムにそって空間フィルタリング系を space-variant にし、異なる論理演算が実行できるようにする。ただし、フィルタリングと直交する方向の光の回折を抑えるため、フィルタリングを行うシリンダリカルレンズに直交してシリンダリカルレンズをさらに挿入する必要がある。**Fig. 1** では図の簡略化のために省いてある。同様に、図の簡略化のために、演算結果のえられる一次回折光の位置を光軸上に行っている。以降の図でも同様である。

一次元化による局所可変光論理演算は、複数のホログラムにより実現される。それぞれの論理演算の入力位置および出力位置が **Fig. 2(a)** に示す場合、ホログラムには同図 **(b)** に示す点応答が必要である。ここで、二変数入力を x, y で表し、常に論理1である定常入力を i で表す。また、 l_x と l_y は二入力 x, y の入力位置、 l_i は定常入力 i の入力位置、 l_o は出力位置である。このような点応答を用いると、入力 x に対しては波面 c が、入力 y に対しては波面 a が、定常入力 i に対しては波面 b が出力点にえられる。ここで、パラメータ a, b, c を適当に選ぶことで、任意の論理演算が実現できる。パラメータ a, b, c の値については、前報¹⁾において報告した。**Fig. 2(b)** に示す点応答を有するホログラムの空間周波数特性は、一般に次のようになる。

$$F(\nu_x, \nu_y) = c \cdot \exp\{j2\pi(l_o - l_x)\} + b \cdot \exp\{j2\pi(l_o - l_i)\} + a \cdot \exp\{j2\pi(l_o - l_y)\} \quad (1)$$

ここで、 ν_x と ν_y はホログラム面での空間周波数であ

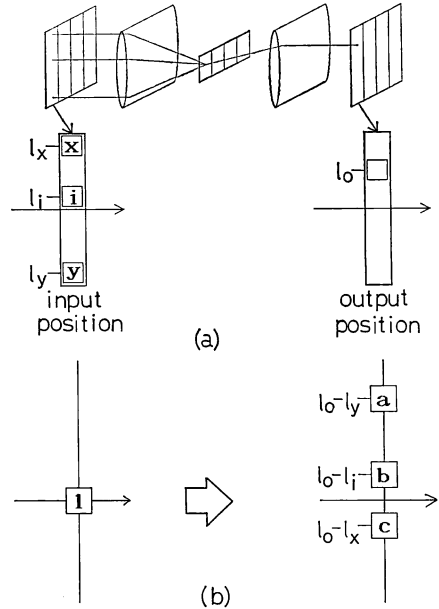


Fig. 2 (a) Positions of inputs and an output of a local variable logic operation based on a one-dimensional filtering system, l_x, l_y and l_i are inputs' positions, l_o is an output's position. (b) a point spread function of the one-dimensional filtering system.

る。

AND 演算と XOR 演算を例に説明する。それぞれの、演算の入力位置および出力位置が **Fig. 3(a)** に示す場合について考える。各入力等は間隔 l でならんでいて $l_x = l, l_i = 0, l_y = -l$ である。出力の位置は $l_o = 0$ で、出力面の中心である。AND 演算の出力を C で、XOR 演算の出力を S で表す。パラメータ (a, b, c) は、AND 演算では $(2/3, -1/3, 2/3)$ で、XOR 演算では $(1, 0, -1)$ である¹⁾ ことから、それぞれの演算に必要なホログラムの点応答は **Fig. 3(b)** のようになる。ここで、各パラメータの間隔は各入力の間隔に等しく l である。AND 演算、XOR 演算に対応するホログラムの空間周波数特性を F_{AND}, F_{XOR} で表すと、(1)式より次のようになる。

$$F_{AND} = 2/3 \cdot \exp(-j2\pi l \nu_x) - 1/3 + 2/3 \cdot \exp(j2\pi l \nu_x) \quad (2. a)$$

$$F_{XOR} = -\exp(-j2\pi l \nu_x) + \exp(j2\pi l \nu_x) \quad (2. b)$$

入力 x, y が 0, 1 と変化した場合の出力面での再生波面および出力位置での強度を **Fig. 3(c)** に示す。この図より、AND 演算と XOR 演算が同時に実行できることがわかる。ただし、AND 演算の論理0に対応する強度が $1/9$ となり完全に0にすることができないが、これは

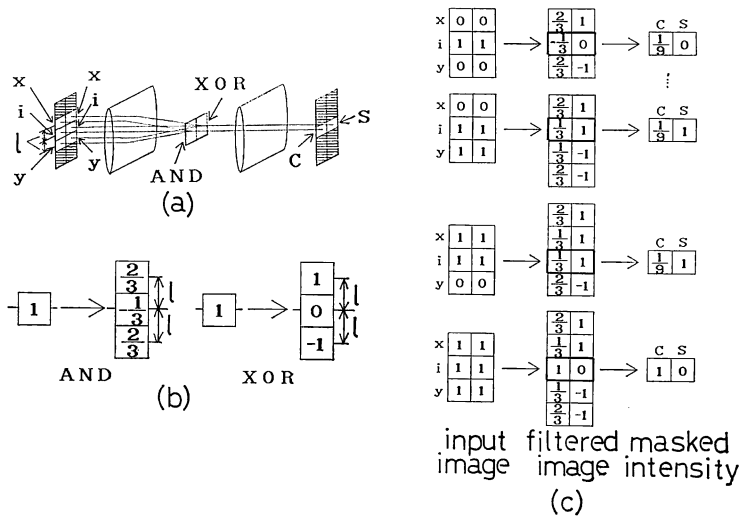


Fig. 3 Examples of local variable logic operations based on a one-dimensional filtering system. (a) AND and XOR operations are localized, l is the distance between each input, (b) point spread functions, l is the distance between each parameter, (c) wavefronts and masked intensities on the outputplane.

適当な閾値フィルターを設定することにより容易に弁別可能であると考えられる。

2.2 実験

一次元化による局所可変光論理演算の実験を行った。本実験では、Fig. 3(a)の構成を用い AND 演算と XOR 演算を同時に実行した。

シリンドリカルレンズの焦点距離は 300 mm で、光源は波長 633 nm の He-Ne レーザーを用いた。それぞれの光入力、 $250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ の開口により入力を行った。

(2. a), (2. b) 式に示す空間周波数特性を持つホログラムは、計算機合成ホログラムにより容易に製作可能である。本実験では、計算機合成ホログラムとして Lohmann 型バイナリーホログラム⁵⁾を用いた。Lohmann 型バイナリーホログラムとは、全体を小さなセルで構成し、その各セルごとにあけられた穴の大きさで振幅を表し、位置で位相を表す。(2. a), (2. b)式で表されるホログラムをそれぞれ 8×128 セルで作製し、全体で 16×128 セルでホログラムを作製した。各入力の間隔は $250 \mu\text{m}$ であるので、(2. a), (2. b)式の l は $250 \mu\text{m}$ で計算した。プロッタで作図したホログラム原図を、Fig. 4 に示す。これを $4.0 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ に写真縮小して実験に用いた。

2.3 実験結果

実験結果を、Fig. 5 に示す。左側に入力像を、中央

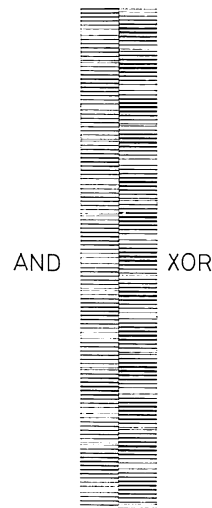


Fig. 4 Magnified patterns of Lohmann type binary holograms for local variable logic operations based on a one-dimensional filtering system.

にフィルタリング像を、右側にマスク処理と閾値処理を行った像を示す。フィルタリング像をビデオカメラで撮影し、フレームメモリに読み込みフレームメモリ上でマスク処理と閾値処理を行った。結果から、入力 $x=0, y=0$ に対しては出力 $C=0, S=0$ が、 $x=0, y=1$ に対しては $C=0, S=1$ が、 $x=1, y=0$ に対しては $C=0, S=1$ が、 $x=1, y=1$ に対しては $C=1, S=0$ が得られ

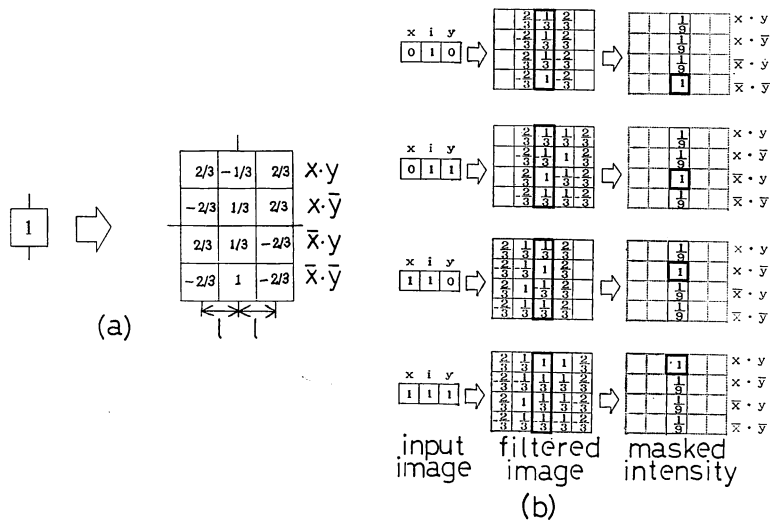


Fig. 8 Operating principle of local variable logic operations based on a multiplexing technique, (a) a point spread function of the filtering system, l is the distance between each parameter, (b) wavefronts and masked intensities on the output plane.

に、出力面に配置したマスク上の四つの開口の有無により四つの演算結果を選択する。この開口パターンで、ロジックアレイの行う論理演算を 16 種類の論理演算の中から選択する。マスクの開口パターンと対応する論理演算の関係を、**Fig. 9** に示す。Fig. 8 (a) に示す点応答を有するホログラムの空間周波数特性は、次のようになる。

$$\begin{aligned}
 F_{LA}(\nu_x, \nu_y) = & \{2/3 \cdot \exp(-j 2 \pi l \nu_x) \\
 & - 1/3 + 2/3 \cdot \exp(j 2 \pi l \nu_x)\} \exp(-j 3 \pi l \nu_y) \\
 & + \{2/3 \cdot \exp(-j 2 \pi l \nu_x) \\
 & + 1/3 - 2/3 \cdot \exp(j 2 \pi l \nu_x)\} \exp(-j \pi l \nu_y) \\
 & + \{-2/3 \cdot \exp(-j 2 \pi l \nu_x) \\
 & + 1/3 + 2/3 \cdot \exp(j 2 \pi l \nu_x)\} \exp(j \pi l \nu_y) \\
 & + \{-2/3 \cdot \exp(-j 2 \pi l \nu_x) \\
 & + 1 - 2/3 \cdot \exp(j 2 \pi l \nu_x)\} \exp(j 3 \pi l \nu_y)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

2 ビットデコーダによるロジックアレイを実行する空間フィルタリング系には、入力の位置により出力の位置が決まる space-invariant 性がある。この space-invariant 性により、**Fig. 10** に示すように複数の入力に対してロジックアレイが同時に複数実行できる。それぞれの入力に対応した位置に置いたマスクの四つの開口により、各入力に対して実行する論理演算を指示する。位置によりマスクの開口パターンを変えることで、位置により異なる論理演算が実現できる。

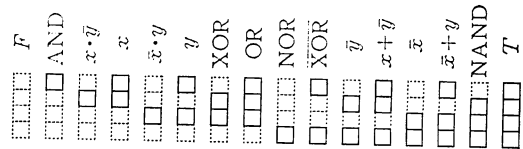


Fig. 9 Mask patterns for sixteen possible logic operations.

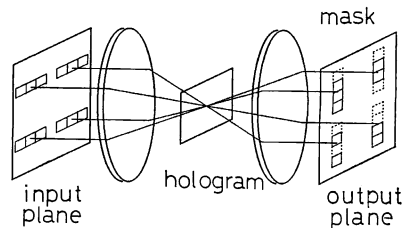


Fig. 10 Local variable logic operations based on a multiplexing technique.

3.2 実験

多重化によるホログラムを用いた局所可変光論理演算の実験を行った。実験系を **Fig. 11** に示す。光入力は、透過型液晶パネルをレーザー光で照射することで行った。各光入力は、液晶パネルの一画素の透過と不透過の切替えで行った。一画素の大きさは $310 \mu\text{m} \times 310 \mu\text{m}$ で、透過と不透過の切替えはパーソナルコンピュータで制御した。フィルタリング像をビデオカメラで撮影し、パーソナルコンピュータに接続したフレームメモリ上に

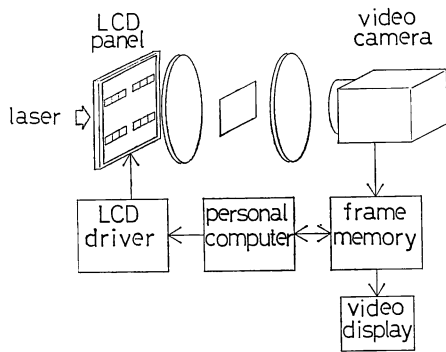


Fig. 11 Experimental system for local variable logic operations based on a multiplexing technique.

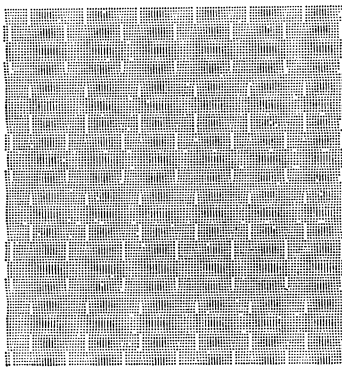


Fig. 12 Magnified pattern of a Lohmann type binary hologram for local variable logic operations based on a multiplexing technique.

読み込み、マスク処理と閾値処理を行った。レンズの焦点距離は 300 mm で、光源としては波長 633 nm の He-Ne レーザーを用いた。

(3)式で表されるホログラムは、一次元化による方法と同様に Lohmann 型バイナリーホログラム⁵⁾を用いて、128×128 セルで作製した。各入力の間隔は 310 μm であるので、(3)式の l は 310 μm で計算した。プロッタで作図したホログラム原図を Fig. 12 に示す。これを、4.0 mm×4.0 mm に写真縮小して実験に用いた。

今回の実験では、2ビットデコーダの働きを明らかにするために、論理演算を指定するマスクの四つの開口をすべて開けてある。

3.3 実験結果

最初に、二入力の場合に考えられる四つの入力パターンを別々に入力した場合の実験結果を Fig. 13 に示す。左側に入力像を、中央にフィルタリング像を、右側にマスク処理と閾値処理を行った像を示す。入力 $x=0, y=$

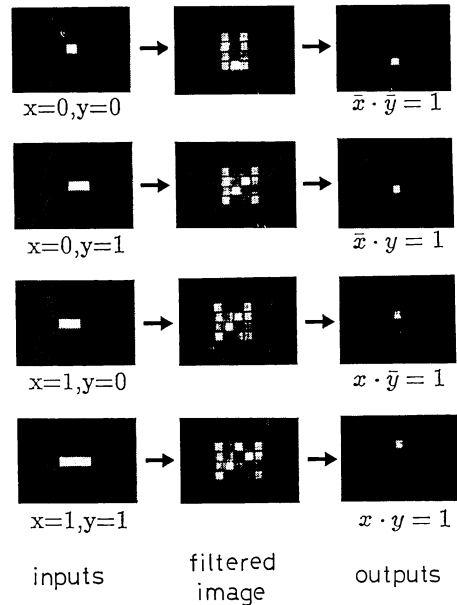


Fig. 13 Experimental results of local variable logic operations based on a multiplexing technique.

0 に対しては $\bar{x} \cdot \bar{y}$ に出力がえられている。入力 $x=0, y=1$ に対しては $\bar{x} \cdot y$ に出力がえられている。入力 $x=1, y=0$ に対しては $x \cdot \bar{y}$ に出力がえられている。入力 $x=1, y=1$ に対しては $x \cdot y$ に出力がえられている。以上より、2ビットデコーダを用いたロジックアレイが正しく動作していることが確認できた。

次に、四つの入力パターンを同時に入力した場合の実験結果を Fig. 14 に示す。左側に入力像を、中央にフィルタリング像を、右側にマスク処理と閾値処理を行った像を示す。正しい実験結果がえられていることがわかる。以上より、多重化による局所可変光論理演算の動作が確認できた。

4. 考 察

本論文で提案した二つの局所可変光論理演算でえられる光論理演算の総数と集積度について比較を行う。本研究では光論理演算の実現にホログラムを用いているため、総論理演算数と集積度はホログラムの性能により決まる。本考察では、ホログラムとしてセル型の計算機合成ホログラム (以下、CGH と略す) を仮定する。本研究で用いた Lohmann 型バイナリーホログラムも、この一種である。二つの方法を比較するために、作製できるホログラムの総セル数を $N \times N$ であるとする。

最初に、多重化による局所可変光論理演算について考

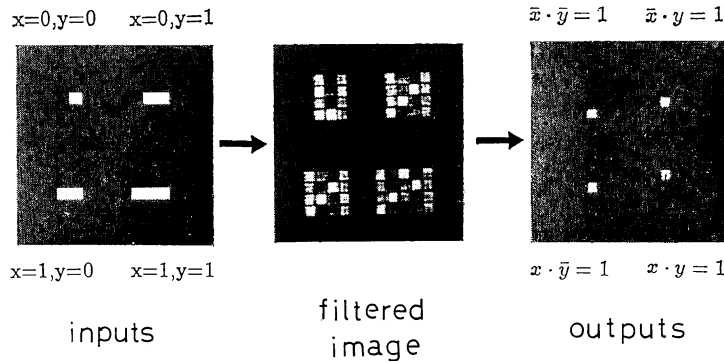


Fig. 14 Experimental results of simultaneous operations of local variable logic operations based on a multiplexing technique.

Table 1 Total gate count and integration

Local variable logic operation	Plotter fabrication ($N=128$, $d\xi=31.3 \mu\text{m}$)		E-beam fabrication ($N=5000$, $d\xi=2 \mu\text{m}$)	
	Total gate count	Integration (gates/mm ²)	Total gate count	Integration (gates/mm ²)
One-dimensional technique	128	5.3	5000	5.3
Multiplexing technique	1.4×10^3	3.7×10^4	2.1×10^6	2.3×10^2

える。セル型の CGH を用いた場合、扱える画像の画素数はホログラムを構成するセル数に等しく $N \times N$ である。論理演算数が最大になるのは、光論理演算の入力光・出力光の大きさをこの一面素に対応させた場合である。多重化による方法では、一つの論理演算を四つの論理演算の組合せで実現する。それぞれの論理演算には3画素必要であるので、一つの論理演算には12画素必要である²⁾。よって、最大論理演算数は $N^2/12$ である。一方、集積度は単位面積当りの論理演算数である。ホログラムの扱える画像は、一辺の長さが $(\lambda f/d\xi)$ で面積が $(\lambda f/d\xi)^2$ の正方形である。ここで、 $d\xi$ はセルの一辺の長さで、 λ は光源の波長で、 f はレンズの焦点距離である。よって、最大集積度は $(Nd\xi/\lambda f)^2/12$ である。

一方、一次元化による局所可変光論理演算では、フィルタリング面にならべるホログラムの数で論理演算数が決まる。それぞれのホログラムを別々に作製し、つなぎ合わせることも可能であるが、ホログラム数が多くなると困難になる。そこで、一度に作製できる $N \times N$ のセルを分割し複数のホログラムを作製することを考える。それぞれのホログラムの幅が1セルのとき、つまり各ホログラムが $1 \times N$ セルで構成されるとき、ホログラム数が最大になり N 個の論理演算が実現できる。つまり、

最大論理演算数は N である。演出力は、一辺の長さがホログラムの再生像の長さ $(\lambda f/d\xi)$ で、他辺の長さがホログラム全体の幅 $Nd\xi$ の長方形のなかに入れられる。この長方形の面積は $N\lambda f$ である。よって、最大集積度は $1/\lambda f$ である。

例として、本実験の実験装置で可能な最大論理演算数および集積度を求める。本実験では xy プロッタにより、 N が 128、 $d\xi$ は $31.3 \mu\text{m}$ でホログラムを作製した。光源の波長 λ は 633 nm で、レンズの焦点距離は 300 mm である。この条件で、論理演算数と集積度を計算した結果を Table 1 に示す。さらに、電子ビーム露光装置を用いると、 $d\xi$ を $2 \mu\text{m}$ で N を 5000 程度で作製することができる⁶⁾。この値を用いて計算した結果を Table 1 に示す。ただし、光源の波長とレンズの焦点距離は先ほどの計算と同じ値を用いた。

同表より、多重化による方法のほうが一次元化による方法より高い集積度がえられることがわかる。

5. 結 語

ホログラムを用いた局所可変光論理演算の実現方法を二つ提案した。一次元化による方法と多重化による方法である。それぞれの方法について実験を行い動作を確認

した。

二つの方法について、最大論理演算数と集積度について考察した。xyプロッタを用いてCGHを作製した場合、一次元化による方法の最大演算数は128で最大集積度は5.3演算/mm²である。これに対し、多重化による方法の最大演算数は 1.4×10^3 で最大集積度は 3.7×10^4 演算/mm²である。さらに、電子ビーム露光装置を用いてCGHを作製すると、一次元化による方法の最大演算数は5000で最大集積度は5.3演算/mm²になる。これに対し、多重化による方法の最大演算数は 2.1×10^6 で最大集積度は 2.3×10^2 演算/mm²になる。このように、多重化による方法のほうが多くの演算数、高い集積度がえられることが判明した。

最後に、本方法を用いて全光学的な光論理回路を実現するために今後必要な技術について述べる。

(1) 本研究では適当な閾値フィルターの欠如のため、閾値処理を電気的方法で行ったが、これを光学的に行う光非線形素子の開発が必要である。

(2) 本論文で提案した局所可変光論理演算を組み合わせることで光論理回路を構成するためには、局所可変光論理演算の接続を行う光接続法の開発が必要である。

本研究の遂行にあたり、早稲田大学理工学部の小松進一教授より有益なアドバイスを受けたことを感謝する。

文 献

- 1) 高木康博, 大頭 仁: “ホログラフィック・フィルターを用いた光論理演算”, 光学, **16** (1987) 345-351.
- 2) 高木康博, 大頭 仁: “波面の重ね合わせを用いた光論理アレー”, 光学, **19** (1990) 39-44.
- 3) T. Yatagai: “Optical space-variant logic-gate array based on spatial encoding technique,” Opt. Lett., **11** (1986) 260-262.
- 4) J. Tanida, J. Nakagawa and Y. Ichioka: “Local variable logic operation using birefringent optical elements,” Appl. Opt., **28** (1989) 3467-3473.
- 5) A. W. Lohmann and D. P. Paris: “Binary Fraunhofer holograms, generated by computer,” Appl. Opt., **6** (1967) 1739-1748.
- 6) S. M. Arnold: “Electron beam fabrication of computer-generated holograms,” Opt. Eng., **24** (1985) 803-807.