

## 研究

## 波面の重ね合せを用いた光論理アレー

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

(1989年7月10日受理)

## Optical Logic Array by Use of Wavefront Superimposition

Yasuhiro TAKAKI and Hitoshi OHZU

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

An optical implementation of a logic array by use of a holographic filter is presented, and its extension to a multiple logic array is presented. Multiple operations can be performed simultaneously to multiple inputs. For demonstration, an optical half-adder array based on this proposal has been implemented. In order to estimate the system capability, possible density of multiple data which can be processed simultaneously is discussed.

## 1. はじめに

近年の高度情報化社会において、情報処理への需要は爆発的な増大をみせている。円熟期に達した電子計算機には限界が見え始め、従来の電子計算機に代わる新しい計算機の開発が期待されている。光情報処理には、並列性、高速性、非干渉性といった優れた特徴がある。これらの特徴と、従来から電子計算機で用いられてきた高精度で柔軟性の高いデジタル演算法を組み合わせた光デジタル計算機の実現が注目を集めている。

光デジタル計算機の実現には、光論理演算の実現が必要不可欠である。そのため、光論理演算実現のために多くの研究が成されている。これらは、非線形素子を用いたものと、非線形素子と光学系を組み合わせたものの二つに大別できる。後者は前者の実現を前提とするが、光学系と組み合わせることにより光情報処理の特徴を有効に利用しようとするものである。これには、入力を空間格子の方向で符号化するシータ・モジュレーションを用いた方法<sup>1)</sup>、入力を空間パターンで符号化し点光源で投影する投影光学系を用いた方法<sup>2)</sup>、入力を位相情報に符号化し干渉縞のシフトを用いる方法<sup>3)</sup>などがある。そのなかでわれわれは、ホログラフィック・フィルターを用いた波面の重ね合せによる光論理演算を前報<sup>4)</sup>において報告した。この方法は、入力の符号化を必要としない

という長所がある。以上の方法は、光のもつ並列処理能力を有効に利用しており、多数の入力を同時に処理する光論理アレーとしての機能を有している。

光論理アレーにおいて同時に実行できる論理演算が一種類の場合、まとまった機能をもつ処理系を構成するためには複数の光論理アレーが必要となる。そこで、同時に複数の論理演算を実行する多重化の方法が研究されている。シータ・モジュレーションにおいては、光路を光軸から傾けることによりこれを実現している<sup>5)</sup>。投影光学系においては、異なった波長の光を用いることにより実現している<sup>6)</sup>。干渉縞を用いた方法では、干渉縞の検出位置を変えることによって実現している<sup>3)</sup>。本研究においては、前報のホログラフィック・フィルターによる波面の重ね合せを用いた方法において、ホログラフィック・フィルターの空間周波数特性を変えることにより多重化を実現した。このような空間周波数特性をもつプログラムは、計算機合成プログラム<sup>7)</sup>を用いることにより容易に作成可能である。

本論文では、最初に、ホログラフィック・フィルターを用いた光論理演算の光論理アレーとしての動作を説明する。次に、この論理アレーの多重化の方法を提案し、これを用いた光半加算器アレーの実験結果を示す。最後に、この多重化した光論理アレーにより処理可能なデータの並列度について検討する。

2. 波面の重ね合わせを用いた光論理アレー

最初に、前報<sup>4)</sup>で報告した波面の重ね合わせを用いた光論理演算の光論理アレーとしての動作を説明する。

波面の重ね合わせを用いた光論理演算は、Fig. 1(a)に示すホログラムを用いた空間フィルタリング系により実現される。この系は、同図(b)に示すような点入力に対して空間的に広がった演算パラメータ  $a, b, c$  を出力する。このシステムにおいて、光入力  $x, y$  と常に1である定常光入力  $i$  を、同図(c)に示す位置関係で入力する。そして、同図に示す位置にマスクを置き、マスクを透過する光の強度を論理演算の出力と考えることにより、2入力の場合に考えられる16種類の論理演算がすべて実現できる。パラメータ  $a, b, c$  の値は、前報<sup>4)</sup>において計算した。

3入力  $x, i, y$  は、相互の位置関係が保たれていれば、入力面上のどの位置に入力されても正しい処理結果

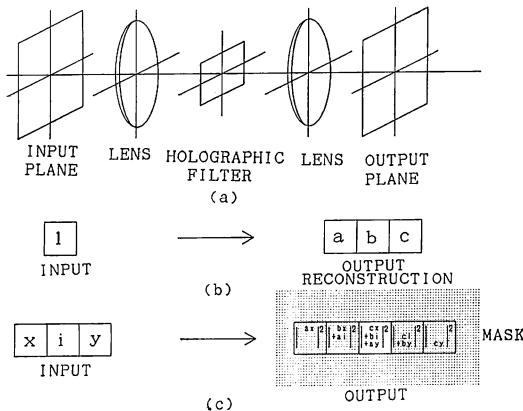


Fig. 1 Operating principle of an optical logic operation. (a) filtering system that conducts wavefront superimposition, (b) reconstructed image of a holographic filter by one input, (c) superimposition of reconstructed images by three inputs.

が出力面上に得られる。ただし、入力位置に対応した出力面上の位置にマスクを置く必要がある。このことを用いると、入力面上の異なる位置に複数の入力を入力し、同時に処理し、それぞれの出力を出力面上の対応した位置に出力することができる。以上より、波面の重ね合わせを用いた光論理演算は、Fig. 2に示すような多数の入力に対して1種類の論理演算を行う光論理アレーと考えることができる。

3. 光論理アレーの多重化

前章の光論理アレーにおいて、同時に実行できる論理演算が1種類であるのは、演算パラメータ  $(a, b, c)$  が一組しか出力されないためである。複数の演算パラメータを同時に出力することにより、複数の論理演算が同時に実行できるようになる。

$M \times N$  個の論理演算を同時に行う場合を考える。それには、Fig. 3(a)に示すように、点入力に対して  $M \times N$  組の演算パラメータを同時に出力する空間フィルタリング系を用いる。この系に、3入力  $x, i, y$  を Fig. 3(b)に示すような位置関係で入力すると、それぞれの演算パラメータは別々に重ね合わせが起こる。それぞれの重ね合わせの起こる位置に開口を置くことにより、各論理演算に対応した出力結果が得られる。このような複数の論理演算を行うホログラフィック・フィルターの空間周波数特性は、次式で表される。

$$\begin{aligned}
 f_{MUL}(\nu_x, \nu_y) &= \sum_{s=-M/2}^{M/2} \sum_{t=-N/2}^{N/2} \{a_s \exp(j2\pi l\nu_x) + b_s \exp(-j2\pi l\nu_x) + c_s \exp(-j2\pi(3it\nu_x + st\nu_y))\} \quad (1)
 \end{aligned}$$

ただし、 $l$  は出力する各演算パラメータ間の間隔を示す。

このような複数の論理演算を行う光論理アレーの場合も、入力の位置に対応して、その出力の位置が変化す

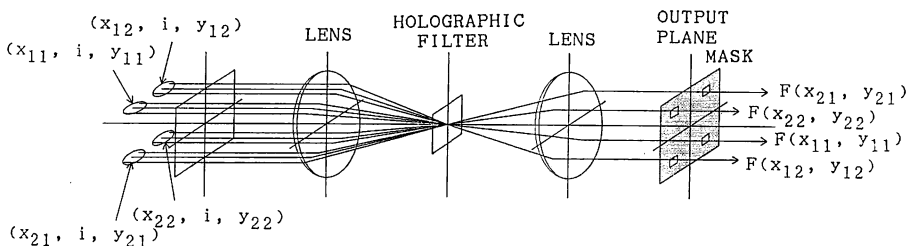
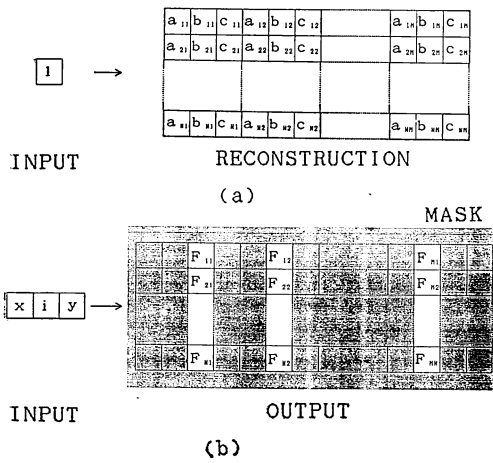


Fig. 2 Optical logic array that performs single logic operation. Single operation  $F$  is performed simultaneously to input pairs  $(x_{11}, y_{11}), (x_{12}, y_{12}), (x_{21}, y_{21}),$  and  $(x_{22}, y_{22})$ .



**Fig. 3** Operating principle of multiple optical logic operations by use of wavefront superimposition. (a)reconstructed image of a holographic filter by one input, (b)superimposition of reconstructed images by three inputs.

る。このことより、Fig. 4 に示すように、複数の入力に対して、複数の論理演算が同時に処理できる光論理アレーが実現できる。

#### 4. 光半加算器アレーへの応用

##### 4.1 光半加算器アレーの動作原理

多重化した光論理アレーの応用例として、光半加算器アレーを構成した。半加算器は、加算を始めとする多くの算術演算の基本となる演算素子である。この半加算器の回路図を Fig. 5 に示す。同図より、AND 演算と XOR 演算の 2 種類の演算を同時に実行する光論理アレーを構成すれば、光半加算器アレーが実現できることがわかる。

このためには、Fig. 6(a)に示すように、二つの演算パラメータを出力するフィルタリング系を用いる。上段

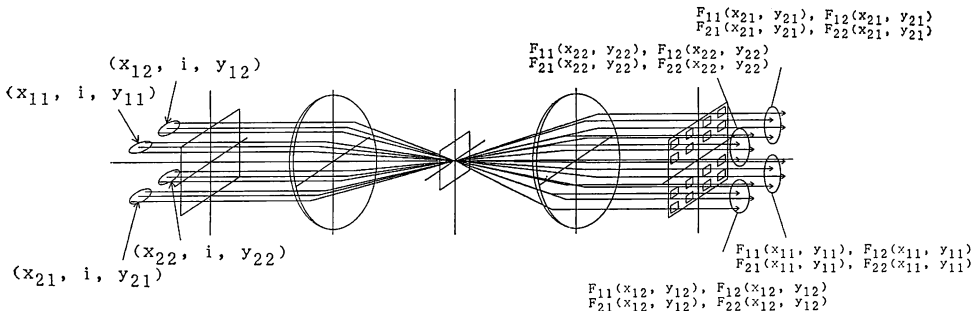
のパラメータ (2/3, -1/3, 2/3) は AND 演算を行うパラメータで、下段のパラメータ (1, 0, -1) は XOR 演算を行うパラメータである。このようなフィルタリング処理を行うためのホログラフィック・フィルターの空間周波数特性は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 f_{HA}(\nu_x, \nu_y) &= \{(2/3) \exp(j2\pi\nu_x) - 1/3 \\
 &+ (2/3) \exp(-j2\pi\nu_x)\} \exp(-j\pi\nu_y) \\
 &+ \{\exp(j2\pi\nu_x) - \exp(-j2\pi\nu_x)\} \exp(j\pi\nu_y)
 \end{aligned} \tag{2}$$

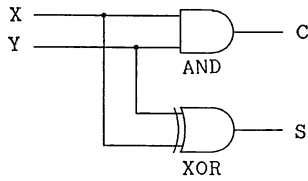
2 入力  $X, Y$  が 0, 1 と変化した場合の出力を、Fig. 6(b)に示す。同図に示すように、出力光強度は、 $X=0, Y=0$  の場合は  $S=0, C=1/9$  となり、 $X=0, Y=1$  の場合と  $X=1, Y=0$  の場合は  $S=1, C=1/9$  となり、 $X=1, Y=1$  の場合は  $S=0, C=1$  となる。ここで、出力  $C$  の論理レベル 0 に対応する光強度を完全に 0 にすることができないが、これは、適当な閾値フィルターを設定することにより容易に弁別することが可能であると考えられる。

##### 4.2 光半加算器アレーの実験方法と実験結果

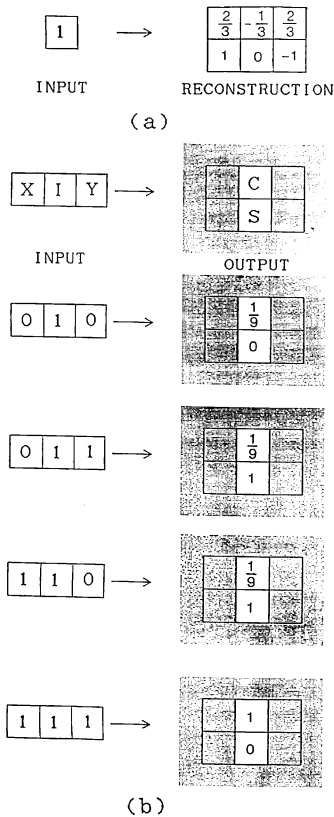
この光半加算器アレーの動作を、実験により確かめた。Fig. 7 に、実験に用いたフィルタリング系を示す。光源としては、波長 633 nm の He-Ne レーザーを用いた。レンズの焦点距離は 400 mm である。ホログラフィック・フィルターは、計算機ホログラム (以下 CGH と略す) を用いて作成した。CGH の作成方法としては、 $64 \times 64$  サンプルングポイントの Lohmann 型バイナリーホログラム<sup>7)</sup>を用いた。プロッターにより作成した原図を Fig. 8 に示す。これを、2mm×2mm に写真縮小して用いた。この CGH は、多数の小さな開口により構成されており、それらの一次回折光を利用して像を再生する。このため、Fig. 7 において、出力面上のマスクの開口位置を一次回折光の位置にしている。光



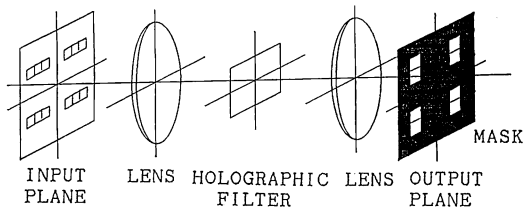
**Fig. 4** Optical logic array that performs multiple logic operations. Operations  $F_{11}, F_{12}, F_{21}$ , and  $F_{22}$  are performed simultaneously to input pairs  $(x_{11}, y_{11}), (x_{12}, y_{12}), (x_{21}, y_{21})$ , and  $(x_{22}, y_{22})$ .



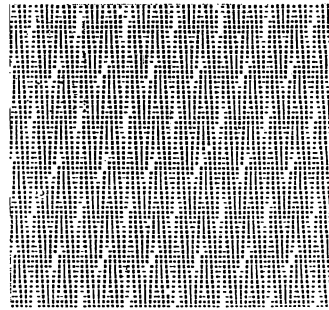
**Fig. 5** Circuit of a half-adder. Two inputs,  $X$  and  $Y$ , are added to produce a carry output  $C$  and a sum output  $S$ .



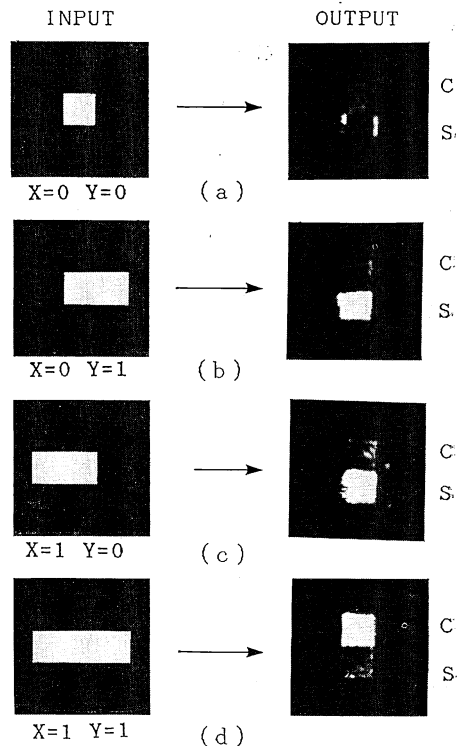
**Fig. 6** Operating principle of an optical half-adder array. (a) reconstructed image by one input, (b) output powers for four possible combinations of input  $X$  and  $Y$ .



**Fig. 7** Experimental setup of an optical half-adder array.



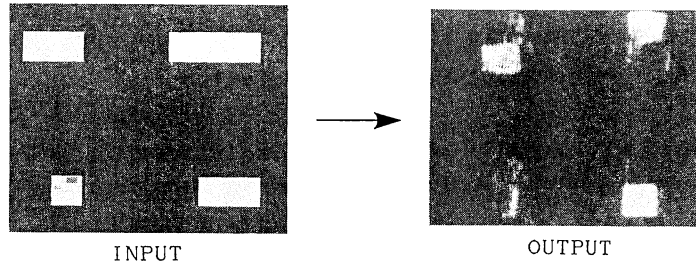
**Fig. 8** Magnified pattern of a holographic filter made by Lohmann type binary CGH.



**Fig. 9** Experimental results of an optical half-adder for single data. Left four patterns show input combinations, and right four photos show outputs. (a) corresponds to  $X=0, Y=0$ , (b) corresponds to  $X=0, Y=1$ , (c) corresponds to  $X=1, Y=0$ , (d) corresponds to  $X=1, Y=1$ .

入力は、入力面に置いたマスクの開口を用いて入力した。各開口の大きさは、 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ である。

最初に、光半加算器としての動作を確認するために、入力が一組の場合について実験を行った。入力  $X, Y$  の値を 0, 1 と変えた場合に考えられる四つの組合せについて、それぞれ実験を行った。入力の組合せと実験結果を、**Fig. 9** に示す。各入力における左側のピクセルが



**Fig. 10** Experimental result of an optical half-adder array for multiple data. Four input pairs are processed simultaneously.

入力 $X$ で、中央のピクセルが入力 $I$ で、右側のピクセルが入力 $Y$ である。実験結果から、 $X=0, Y=0$  に対しては  $C=0, S=0$  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  $C=1, S=0$  がそれぞれ得られていることがわかる。これより、光半加算器としての動作が確認できた。ただし、実験結果が多少ぼやけているのは、撮影の際に焦点を完全に合わせることが不可能であったためである。

次に、半加算器アレーとしての動作を確認するために、複数の入力を同時に処理する実験を行った。入力と実験結果を **Fig. 10** に示す。入力として、先ほどの実験で用いた四組の入力を同時に入力した。左下の入力が  $X=0, Y=0$  で、右下が  $X=0, Y=1$  で、左上が  $X=1, Y=0$  で、右上が  $X=1, Y=1$  である。実験結果から、各入力に対して正しい処理結果が得られていることがわかり、光半加算器アレーとしての動作が確認できた。

## 5. 処理能力の検討

本研究で提案した多重化した光論理アレーにおいて同時に処理可能なデータ数について検討する。

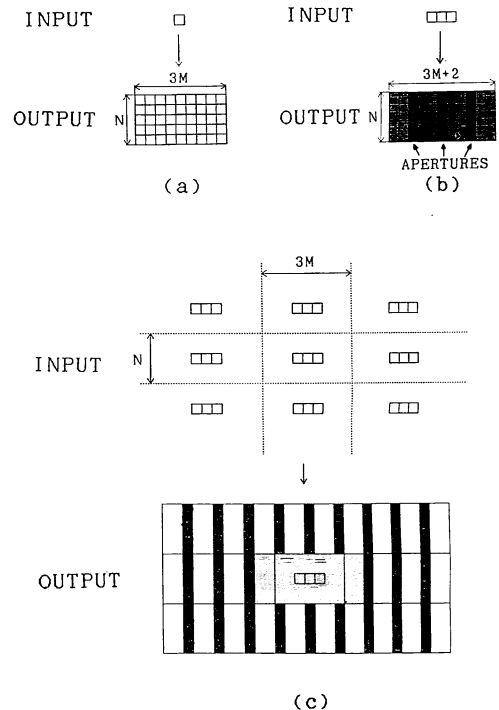
本方法では、フィルタリングによる処理を用いているため、ホログラフィック・フィルタにより再生できる像の分解能で処理できるデータ数が決まる。今回ホログラフィック・フィルタとして用いた CGH の場合、CGH の一辺の長さが  $\Delta\nu$  で、CGH を構成している各セルの一辺の長さが  $\delta\nu$  の場合、再生像の一辺の長さ  $\Delta x$  と、再生像を構成している各ピクセルの一辺の長さ  $\delta x$  は、次式で表せる。

$$\Delta x = 1/\delta\nu \quad (3)$$

$$\delta x = 1/\Delta\nu \quad (4)$$

ここで、像の分解能を  $L \times L$  とすると、 $L$  は

$$L = \Delta x/\delta x = \Delta\nu/\delta\nu \quad (5)$$



**Fig. 11** Limit of the density of multiple data processing. (a) size of reconstructed image, (b) size of superimposed images by three inputs. (c) the highest density arrangement.

となる。

処理できるデータ数が最大になるのは、各入力の大きさを再生像の1ピクセルの大きさ  $\delta x \times \delta x$  に対応させた場合である。

$M \times N$  種類の論理演算を行う場合、**Fig. 11(a)** に示すように  $3M \times N$  ピクセルの大きさの像が各入力に対して再生される。同図(b)に示すように、各入力に対する再生像が重ね合わされて、論理演算が実行される。このとき、再生像が隣の演算結果に影響を与えてはならない。そのためには、同図(c)に示すように、各入力に対

して、少なくとも  $3M \times N$  ピクセルの大きさを割り当てる必要がある。以上より、光論理アレーが同時に処理できるデータ数、つまり、並列度  $m$  は次式で表せる。

$$m = L^2 / (3MN) \quad (6)$$

上式を用いて、4章で構成した光半加算器の実験系において得られる最大の並列度を計算する。処理プレーンの大きさ  $\Delta x$  は  $8.1 \times 10^{-3}$  m で、最大並列度が得られるための各入力の大きさ  $\delta x$  は  $1.3 \times 10^{-4}$  m である。ここで、 $M=1$ 、 $N=2$  であるから並列度  $m$  は  $6.8 \times 10^2$  となる。

次に、現在利用可能な技術を用いた場合を考える。半導体分野の微細加工の技術を用いると、 $1 \mu\text{m}$  の微細加工が可能である。この技術を用いて  $16 \times 16 \mu\text{m}^2$  で CGH の 1 セルを描き、 $1000 \times 1000$  セルで 1 枚の CGH を作成したとすると、 $\Delta x$  は  $1.6 \times 10^{-2}$  m となり、 $\delta x$  は  $1.6 \times 10^{-5}$  m となる。 $4 \times 4$  種類の論理演算を同時に行うとすると、 $M=4$ 、 $N=4$  であるから並列度  $m$  は  $2.1 \times 10^4$  となる。

以上、本方法により実現できる処理の並列度を計算により示した。

## 6. 結 語

波面の重ね合せによる光論理演算の光論理アレーとしての動作を説明した。この光論理アレーは、入力の空間的符号化を必要としないという利点がある。これを拡張して、複数の入力に対して、複数の論理演算が同時に実行できる光論理アレーを提案した。この方法を用いて、

光半加算器アレーを構成し、実験によりその動作を確かめた。また、本方法において実現できる処理の並列度について検討した。

本研究における光論理アレーを用いて、光計算機を実現するには、光非線形素子の開発、光インターコネクション手法の開発が今後の課題として残る。

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

## 文 献

- 1) H. Bartelt, A. W. Lohmann and E. E. Sicre: "Optical logical processing in parallel with theta modulation," *J. Opt. Soc. Am. A*, **1** (1984) 944-951.
- 2) J. Tanida and Y. Ichioka: "Optical logic array processor using shadowgrams," *J. Opt. Soc. Am.*, **73** (1983) 800-809.
- 3) Y. Imai and Y. Ohtsuka: "Optical computing based on interference fringe shifting," *Opt. Eng.*, **25** (1986) 98-102.
- 4) 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.
- 5) A. W. Lohmann and J. Weigelt: "Digital optical adder based on spatial filtering," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 3047-3053.
- 6) J. Tanida and Y. Ichioka: "Optical-logic-array processor using shadowgrams. III. Parallel neighborhood operations and an architecture of optical digital computing system," *J. Opt. Soc. Am. A*, **2** (1985) 1245-1253.
- 7) A. W. Lohmann and D. P. Paris: "Binary fraunhofer holograms, generated by computer," *Appl. Opt.*, **6** (1967) 1739-1748