

研究

光多値論理デバイス：2次元化の検討

間 多 均

東京農工大学工学部電子工学科 〒184 小金井市中町 2-24-16

(1987年7月27日受理)

Optical Multiple-Valued Logic Devices: An Implementation
for Two-Dimensional Processing

Hitoshi MADA

Department of Electronic Engineering, Faculty of Technology,
Tokyo University of Agriculture and Technology,
2-24-16, Nakamachi, Koganei 184

An optical implementation method of multiple-valued logic gates for two-dimensional processing is proposed. A liquid crystal spatial light modulator and an optical feedback system construct the basic operation units: multistability, linear inverter, and thresholding. These basic units have the same structure except adoptable polarizer, phase plate, and/or variable attenuator. An assembly method and combination method of these units are also discussed. Combining these units, the basic functional operations of the multiple-valued logic can be realized.

1. はじめに

光コンピュータを構築する方法として、多くの方式が提案されている。それらのなかで論理演算により情報を処理する方式が一つの方向として研究が進んでいる。しかし論理演算を実行するに当たって半導体デバイスとの競合を考えると、光の有する特徴を有効に生かすため、空間的な並列処理を行なうことが必要不可欠となる。

一方、素子の記憶または情報処理密度を高めるために多値論理の応用が検討されている¹⁻⁵⁾。われわれは、液晶を使用した光変調器により多安定素子⁶⁾および多値論理素子⁷⁾の実現を検討してきた。本論文は、光の空間的並列性を生かした多値論理演算素子として、演算処理の2次元化の方法とその構成方法について考察した。このシステムにより並列演算が高速に実行でき、さらにフーリエ光学系との組合せで連想処理や情報検索がより高速に実行できる可能性がある。

2. 多 値 論 理

一般に、多値論理演算は Table 1 に示した 5 種類の基本演算により任意の多値論理関数が実現できる¹⁾。われわれはその 5 種類の基本演算の中から補 (complement)

とりテラル (literals) をすでに実現したが⁷⁾、本報告では、その 2 次元化について考察する。

3. 基 本 素 子

多値論理の基本演算を実現するため、はじめに次のような基本素子に対して考察する。つまり、メモリ、多重ヒステリシスを実現する多安定素子、閾値素子、およびリニアインバータの 3 種類である。

3.1 多安定素子

液晶を使用した空間光変調器と光学的な帰還により多安定素子を実現できる⁶⁾。Fig. 1 にその光学系を示す。この光学系はトランジスタのような 3 端子素子となっている点の特徴である。つまり入力光強度によりバイアス光を制御する構造となっている。液晶の動作モードは電圧制御複屈折 (ECB: electrically controlled birefringence) モードを使用する。この光学系の動作は以下ようになる。空間光変調器の透過率を T とすると入出力間には

$$I_{out} = I_t = (I_{in} + I_B T) / 2 \quad (1)$$

なる関係が得られる。ここで I_{out} 、 I_t 、 I_{in} 、および I_B はそれぞれ出力光、帰還光、入力光、およびバイアス光強度を意味している。また帰還光強度と透過率の関係は、

Table 1 Basic functional operations of p -valued logic.

Operation	Definition
Complement	$\bar{x} = (p-1) - x$
Logical product	$x \cap y = \text{MIN}(x, y)$
Logical sum	$x \cup y = \text{MAX}(x, y)$
Cycling	$x \overset{k}{\rightarrow} = (x+k) \bmod p$
Literal	$a x^b = \begin{cases} p-1 & a \leq x \leq b \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

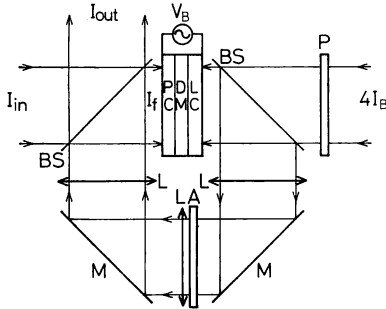


Fig. 1 Optical system of multistable device. The liquid crystal light modulator is composed of a liquid crystal layer (LC) which is operated in electrically controlled birefringence mode, dielectric mirror (DM), and photoconductor (PC), and is applied constant bias voltage V_B . The abbreviations are as follows: BS, beam splitter; P, polarizer; A, analyzer; M, mirror; and L, imaging lens.

帰還利得を β , $I_t=0$ のとき液晶にかかる電圧を V_0 として

$$T = f(\beta I_t + V_0) \quad (2)$$

である。なお帰還利得 β は光導伝材料と液晶材料により変化し、近似的に定数となる。関数 f は液晶の動作モードにより決まり、変数 $\beta I_t + V_0$ は液晶に印加される電圧である。液晶が ECB モードの場合、関数 f は一軸性の光学結晶と同じ振舞いを示し

$$f(V) = \cos^2(\phi_1 - \phi_2) - \sin 2\phi_1 \sin 2\phi_2 \sin^2 \alpha V \quad (3)$$

と表わせる。ここで ϕ_1, ϕ_2 は偏光子および検光子がそれぞれ液晶の光軸とのなす角である。また α は使用する液晶の複屈折と、他のいくつかの液晶特有な物理定数により決まる複雑な関数であるが、ここでは簡単のため定数としておく。以上から **Fig. 1** の光学系の安定状態は式(1), (3)を解けばよいが、**Fig. 2** に示したように式(2)で与えられる液晶の $T-V$ 特性と、式(1)で与えられる入力光強度をパラメータとした直線群との各交

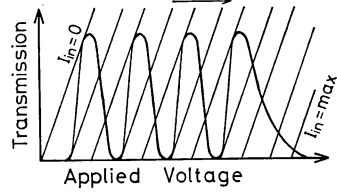


Fig. 2 Principle of operation of multistable device. Thicker solid lines indicate the stable state of the system.

点で図的に安定状態が与えられる。角度 ϕ_1, ϕ_2 を $\phi_1 = -\phi_2 = 45^\circ$ とすることによりメモリ特性が、さらに 45° から適当な角度にずらすことによりヒステリシス、または微分利得特性が得られる。

式(1)からわかるように出力には入力の一部が加わっているため、この素子は入力 I_{in} とバイアス光 I_B との関係は任意には設定できない。理想的には、入力光とバイアス光強度の比は 1:1 にする必要がある。

この素子はメモリや多安定素子としてだけでなく、波形整形や AD 変換としても利用できる。

3.2 閾値素子

この素子は多値論理の基本演算の中には含まれていないが、有用な基本素子となる。多値論理素子としてだけでなく、閾値論理素子としても使用できる。さらには神経回路網におけるニューロンのモデルとしても考えられよう。つまり順閾値素子は興奮性ニューロンとして、逆閾値素子は抑制性ニューロンと見なせる。

3.2.1 順閾値素子

Fig. 3 の光学系において、空間光変調器は多安定素

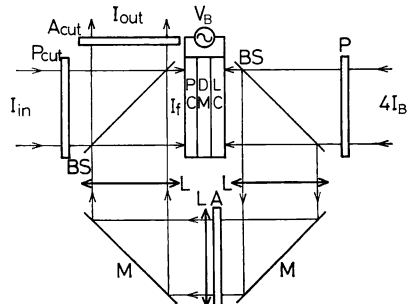


Fig. 3 Optical system of threshold device. In order to prevent the input light from leaking out of the output, the polarizer P_{cut} and analyzer A_{cut} are inserted in the input and the output terminal. The polarizer P and analyzer A are parallel; and the analyzers A and A_{cut} are also parallel.

子と同じ構成であるが、液晶層を薄くし、液晶への印加電圧が最小から最大まで変わるのに応じて位相が π から0まで変化するような可変 $\lambda/2$ 板として動作させる。入力光が出力側には出力されないように偏光板を設定することにより出力光強度は

$$I_{out} = I_B T/2 \quad (4)$$

となり、帰還光強度は多安定素子と同様

$$I_f = (I_{in} + I_B T)/2 \quad (5)$$

となる。空間光変調器の透過率は並行ニコルであるため $T = \sin^2 \alpha V$ となり、出力光強度は Fig. 4(b)に示したように閾値特性を示す。閾値レベルは、帰還光強度 I_f を調整することにより可変とすることができる。ECBモードつまり可変位相板の場合、閾値特性はあまり優れていないが、より閾値特性の鋭いSBE (super twisted birefringence effect) モード⁸⁾を利用することで特性を改善することができる。

3.2.2 逆閾値素子

入力光側のビームスプリッタを偏光ビームスプリッタとするだけで逆閾値特性が得られる。つまり帰還系の動作はまったく順閾値素子と同じで、出力のみ順閾値素子と直交した直線偏光波が出力されるので、出力光強度は

$$I_{out} = I_B(1 - T)/2 \quad (6)$$

と表現できる。これは順閾値特性における式(4)の補と見なすことができる。

3.3 リニアインバータ

この素子の場合、光学系は Fig. 3 とまったく同じ構成となっている。したがって、出力光強度と帰還光強度は式(4)、(5)と同じである。ただし空間光変調器用の

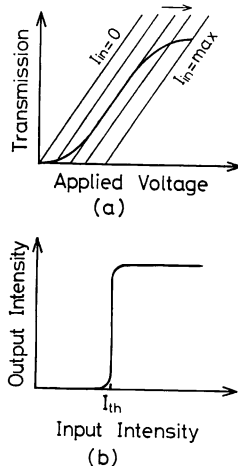


Fig. 4 Principle of operation of threshold device.

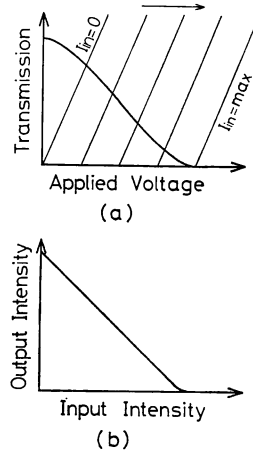


Fig. 5 Principle of operation of reverse threshold device. The optical system is the same as that shown in Fig. 3, but the polarizer P and analyzer A are crossed.

偏光子と検光子は直交ニコルとなっている。そのため空間光変調器の透過率は $T = \cos^2 \alpha V$ となり、Fig. 5に示した特性が得られる。閾値素子とこのリニアインバータは出力光に入力光が直接現れないため、入力光とバイアス光強度は任意に選べる。つまりバイアス光強度を上げれば増幅機能も兼ね備えることになる。

4. ユニット化

上で述べた基本素子を組み合わせて複雑な回路を構成するために、素子の標準化を行なうと都合が良い。本研究で提案する基本素子は、すべて Fig. 6のような同一形状となっている。Fig. 6の斜線部分は偏光板、位相板、および可変減衰フィルタなどが必要に応じて挿入される部分である。

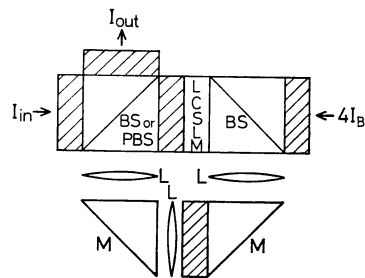


Fig. 6 Basic configuration of two-dimensional multiple-valued logic devices. Hatched regions mean the position inserted a polarizer, phase plate, variable attenuator, and/or imaging lens, as required.

帰還系に挿入されている結像レンズは空間周波数帯域の問題は残るが, Fresnel レンズや Fresnel ゾーンプレートが便利であろう。

基本ユニットとして, 若干冗長ではあるが, 平面内のパッキングを考慮して八角形とする。それに四角形の補助ユニットを導入することで Fig. 7 のように空間が有効に利用できる。

4.1 能動ユニット

基本演算を実行するユニットで, Fig. 8 に示した3種類を考える。これにより2種類の入力と1種類の出力で構成される3端子素子の任意の組合せをインラインとすることができる。結像面は補助ユニットの長さを単位として2ユニットとする。したがって, 結像面の位置は入力面を除いて必ず基本ユニットの表面に存在することになる。

4.2 受動ユニット

能動ユニットを組み合わせる場合, 入力面と出力面およびパイアス面の像の位置は決まるが, 正立像や倒立像さらに鏡像が混合される (Fig. 8 参照)。そのため以下のようなユニットがあると便利である。Fig. 9 (a) は鏡像ユニットで入出力間の2次元パターンがインラインで鏡像の関係となるユニットと, 直角に曲げるユニットを準備する。Fig. 9 (b) は変換ユニットで, 正倒立像の変換を行なう。Fig. 9 (c) は分岐ユニットである。このユニットは分岐の方向により像の関係が変換されるため注意が必要である。この他にもいろいろ考えられるが, ここでは省略する。

4.3 補助ユニット

八角形の能動受動ユニットを結合するための四角形のユニットである (Fig. 7 参照)。このユニットは単にビームスプリッタ等と同じである。この補助ユニットの向きにより上下方向から光を導入できるため, 平面上だけでなく立体配置も可能であり, より高密度の実装が可能となろう。

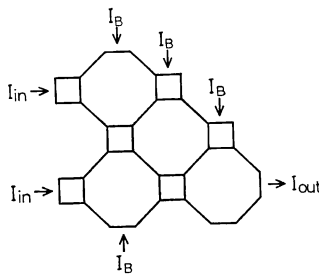


Fig. 7 Example of units packing. The octagons are operation devices, and the small squares are auxiliary linking units.

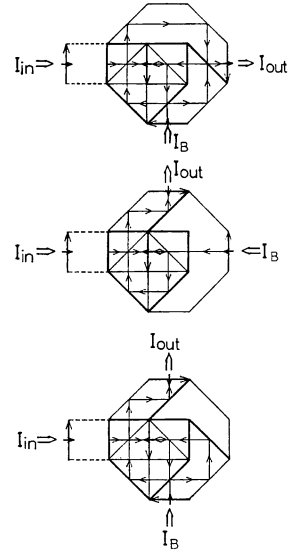


Fig. 8 Configurations of active units. Pentagon with thicker line (like home base shape) is the basic unit of Fig. 6. Other thicker lines stand for a mirror. Crossed arrows show the image direction: the long arrow stands for erect-inverted image; the short arrow for mirror image.

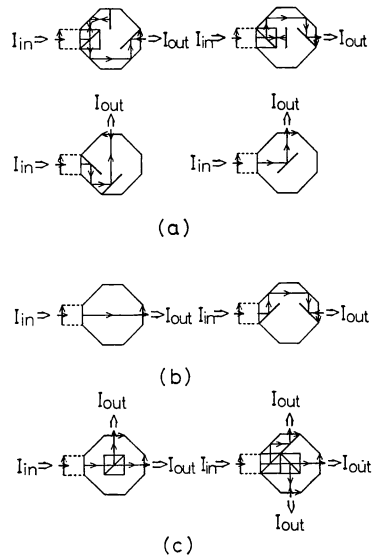


Fig. 9 Configurations of passive units: (a) mirror image units; (b) erect-inverted image conversion units; (c) branch units.

5. 基本演算素子

基本ユニットを組み合わせることで多値論理の基本演算を実

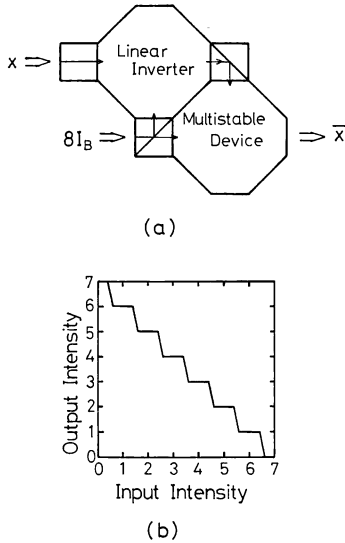


Fig. 10 An example of unit combination for the complement logic gate, and input-output property.

現する例を考える。

5.1 補演算

補演算は2値論理の否定に対応し、入力xに対してp値論理の場合は

$$\bar{x} = (p-1) - x \quad (7)$$

と表現される。実際の光回路はリニアインバータ (1-x) の出力を多安定素子の入力として組み合わせることにより実現できる。Fig. 10(a)が基本ユニットの組合せ例である。この場合、多安定素子は波形整形として動作する。入出力の関係を Fig. 10(b)に示す。

5.2 リテラル演算

Table 1 に示してあるように一種の窓関数であり、閾値素子と逆閾値素子を組み合わせればよい。ただしリテラル演算は順閾値素子と逆閾値素子の積であるため、順閾値素子の出力は逆閾値素子のバイアス入力としなければならない。Fig. 11 (a)と(b)にそれぞれ基本ユニットの組合せと入出力関係を示しておく。

6. ま と め

光多安定素子の2次元化について考察した。いくつかの基本素子をユニット化し、それを組み合わせることにより多値論理の基本演算を実現する方法を述べた。この方法は多値論理だけでなく通常の2値論理や閾値論理を始め、ほとんどの論理演算にそのまま応用可能である。

また液晶は、単に複屈折の現象のみを利用しているだけなので、応答速度の観点からはBSOなどのほうが有

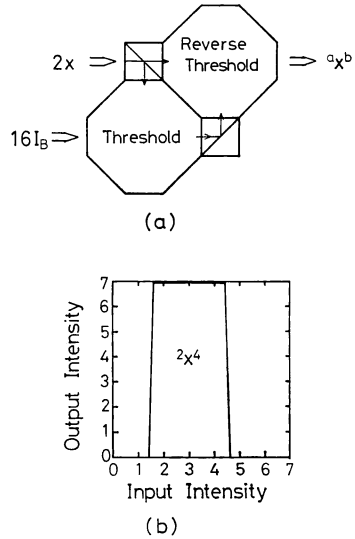


Fig. 11 An example of unit combination of literal gate, and input-output property of $2x^4$.

利と思われる。

問題点は基本ユニットの寸法と解像度である。有効な情報処理面積を $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ とすると、空間光変調器の実面積は $12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ となり、ビームスプリッタもその大きさとなる。したがって、ユニットの寸法は約 36 mm 角程度となるが、有効面積が $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 程度では解像度の点でかなり不足となるかもしれない。空間並列性を有効とするためには少なくとも $10^3 \times 10^3$ 程度の解像度が必要である。実用的には、解像度が 100 lp/mm 、応答速度が数 μs 程度の空間光変調器が開発されなければならない。今後結像系も含めてより詳しく検討する必要がある。

さらに、多値論理演算を実現するためには五つの基本演算のうち、残りの3種類：論理積、論理和、サイクル演算を実現化しなければならず、今後の課題である。

文 献

- 1) T. T. Dao and D. M. Campbell: "Multiple-valued logic: an implementation," Opt. Eng., 25 (1986) 14-21.
- 2) R. Arrathoon and S. Kozaitis: "Shadow casting for multiple-valued associative logic," Opt. Eng., 25 (1986) 29-37.
- 3) S. L. Hurst: "Multiple-valued threshold logic: its status and its realization," Opt. Eng., 25 (1986) 44-55.
- 4) G. Eichmann, Y. Li and R. R. Alfano: "Optical binary coded ternary arithmetic and logic," Appl. Opt., 25 (1986) 3113-3121.
- 5) Y. Imai and Y. Ohtsuka: "Optical multiple-output and multiple-valued logic operation based on fringe

- shifting techniques using spatial light modulator," Appl. Opt., **26** (1987) 274-277.
- 6) H. Mada, Y. Nakajima and T. Ozawa: "Optical multi-stability by a liquid crystal light modulator," Jpn. J. Appl. Phys., **26** (1987) L139-L141.
- 7) H. Mada and T. Ozawa: "Optical multiple-valued logic gates: complement and literals," Jpn. J. Appl. Phys., **26** (1987) L1283-L1285.
- 8) T.J. Scheffer and J. Nehring: "Investigation of the electro-optical properties of 270° chiral nematic layers in the birefringence mode," J. Appl. Phys., **58** (1985) 3022-3031.