

研究

液晶ライトバルブとツイステッドネマチック液晶セルを用いた並列光論理演算器

會田 田人・滝沢 國治・菊池 宏・岡田 正勝

NHK 放送技術研究所 〒157 東京都世田谷区砧 1-10-11

(1992 年 3 月 30 日受付, 1992 年 7 月 25 日受理)

Optical Parallel Logic Processor Using a Liquid Crystal Light Valve and Twisted Nematic Liquid Crystal Cells

Tahito AIDA, Kuniharu TAKIZAWA, Hiroshi KIKUCHI and Masakatsu OKADA

Science and Technical Research Laboratories, NHK,
1-10-11, Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo 157

(Received March 30, 1992; Accepted July 25, 1992)

This paper describes an optical polarization parallel logic processor which can perform logical operations on TV images. In this logic processor two orthogonal linearly-polarized lights correspond to two binary logic states '0' and '1'. The logic processor employs a liquid crystal light valve (LCLV) for video projectors and 90° twisted nematic liquid crystal cells (TNLC's). The input-output characteristic of the LCLV is a sigmoid or sinusoidal type nonlinear function. The TNLC rotates the direction of linear polarization by 90° to function as inverter. 16 Boolean logic functions are realized with the combination of nonlinearity of the LCLV and the inverter function of the TNLC. Experimental results of the logical operations on two TV images and edge extraction of a moving object in TV image are presented.

1. まえがき

並列光論理演算は光の特長である超並列性を用いて、画像などの多重の 2 次元データの論理演算を一度に実行しようとするものであり、オプティカルコンピューティング、光学画像処理の基本的演算手法である。すでにさまざまな方法¹⁻⁵⁾が報告されているが、互いに直交する二つの直線偏光を論理値 "1", "0" に対応させる方法⁵⁾は、偏光方向を回転するだけで、光エネルギーを消費せずに容易に論理反転を実行できる特長がある。

最近われわれは、直線偏光の方向で論理値を表現するこの方法を採用し、BSO で構成したポッケルスセル (PROM) の非線形性と 90° ツイステッドネマチック (TN) 液晶セルの論理反転機能を組み合わせて、並列光論理演算器を構成し 14 通りの論理演算機能が実現できることを確認した⁶⁾。しかし、この並列光論理演算器で動画像を処理するためには、PROM の性能からくる次

のような制約があることも判明した。すなわち PROM は、①書き込み光と読み出し光の波長が異なるため、PROM を多段接続して論理演算を階層的に行うことが困難であること、②バルク結晶の電気光学効果を利用するため大きなバイアス電圧を必要とすること、③応答速度が遅く動画像を扱うことが困難である、などの問題を抱えている。

われわれは今回、非線形素子として液晶ライトバルブ (LCLV) を用いて、上記の制約を克服した並列光論理演算器を考案・試作してその性能を確認した。また、LCLV の光変調特性が、バイアス条件と読み出し光の偏光方向を選ぶことにより周期特性を示すことに着目して、PROM を使用した場合には 2 系統のシステムを必要とする XOR と NXOR を、本システム 1 系統で実行できることを示した。

本並列光論理演算器に使用した LCLV は、ビデオプロジェクタ用として製作されたものであり、解像度、応

答速度ともにテレビ信号に十分対応する性能を有している。われわれはこの点に着目し、被演算信号としてテレビ動画像を入力して動き部分の前縁、後縁および輪郭を抽出することに成功し、本並列光論理演算器が動画像処理へ応用できることを確認した。

2. 液晶ライトバルブの特性

非線形素子として用いた Hughes 社の LCLV の構造を Fig. 1 に示す。この素子では、2枚の透明電極の間に、光導電層 (CdS)、遮光層 (CdTe)、誘電体ミラー、ネマチック液晶層が積層されており、交流電圧がバイアスとして印加される。書き込み光と読み出し光は遮光層および誘電体ミラーにより光学的に隔離されており、この素子は読み出し光が液晶層を往復して変調される反射型で動作する。液晶層は、反射型で最大変調効率の得られるよう 45° TN 配向され、ハイブリッド電界効果モードで動作する。

LCLV の動作は次のとおりである⁷⁾。光導電層に照射される書き込み光が弱い時、光導電層のインピーダンスは高く、液晶層に印加されるバイアス電圧は小さい。このため液晶分子のチルト角は小さくガラス基板にほぼ平行な配向状態を保つ。この時、液晶層の入射側液晶分子の配向に平行あるいは直交方向に直線偏光した読み出し光が入射すると、読み出し光の偏光方向は液晶分子のねじれに沿って 45° 回転するが、誘電体ミラーで反射された液晶層に戻るときに再び液晶分子のねじれに沿って回転し、往路の回転を打ち消す。したがって、出射光は入射光と同じ直線偏光となり変調を受けない。次に、書き込み光強度が増加すると、光導電層のインピーダンスが低

下して液晶層にかかるバイアス電圧が増加し、液晶分子のチルト角が大きくなる。この状態では、液晶の旋光性が減少するとともに複屈折効果が大きくなり、液晶層に入射した読み出し光は一般に梢円偏光となる。液晶層にかかるバイアス電圧の増加とともに、出射光の偏光状態は入射光と直交する偏光成分が増加し、適当なバイアス条件で偏光面が 90° 回転した直線偏光になる。以上が、LCLV のハイブリッド電界効果モードによる動作である。

一方、読み出し光の偏光方向を上述の方向と異なる角度に回転させて液晶層に入射すると、液晶分子がガラス基板に平行な状態でも読み出し光は液晶の大きな複屈折効果を感じ、そのリターデーションは液晶分子のチルト角の変化に対して敏感に変化する。したがって、LCLV から出射した光の偏光状態は、液晶層にかかるバイアス電圧が増加すると、バイアス電圧が低いうちから大きな変化を示す。これは、一種の ECB (electrically controlled birefringence) モード動作である。

われわれは上述の二つの非線形特性を並列光論理演算に利用するため、読み出し光の偏光方向を、液晶層の入射側の液晶分子配向に平行あるいは直角に設定した場合 ($\theta=0^\circ$ とする) と、 45° 傾けた場合 ($\theta=45^\circ$ とする) の LCLV の光変調特性を測定した。なお、本実験では高いコントラスト比を得るために、LCLV の読み出し光としては、高輝度発光ダイオードの赤色光を用いた。

Fig. 2(a), (b) は、LCLV に入射する書き込み光強度を十分に大きくとり光導電層のインピーダンスを低くして、読み出し光の液晶層にかかるバイアス電圧依存性を測定したものである。Fig. 2(a) は $\theta=0^\circ$ のときの 45° TN 液晶の典型的な光変調特性を示す。また Fig. 2(b) に示すように、 $\theta=45^\circ$ の場合は液晶の複屈折効果が大きく寄与して、低いバイアス電圧から偏光方向の回転が起き、周期的光変調特性を示す。

Fig. 3(a), (b) は、バイアス電圧を一定にして書き込み光強度を変化したときの LCLV の光入出力特性を示す。Fig. 3(a) は、バイアス電圧として 28.5 Vp-p , 3.5 kHz の正弦波電圧を印加したときの、 $\theta=0^\circ$ における LCLV の読み出し光強度と書き込み光強度の関係であり、Sigmoid 関数に類似した飽和特性を示す。また、 $\theta=45^\circ$ とし、バイアス電圧を 11.5 Vp-p , 3.5 kHz に設定すると、Fig. 3(b) に示す周期的光入出力特性を得ることができた。後述するように、これらの非線形入出力光特性を用いれば、重要な論理演算である XOR と NXOR を容易に実現することができる。なお、Fig. 2

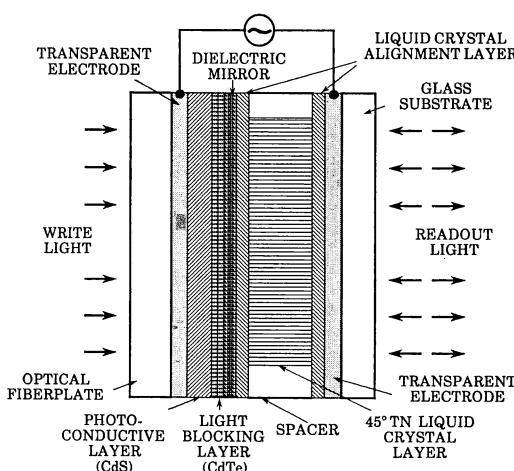


Fig. 1 Cross-sectional view of liquid crystal light valve.

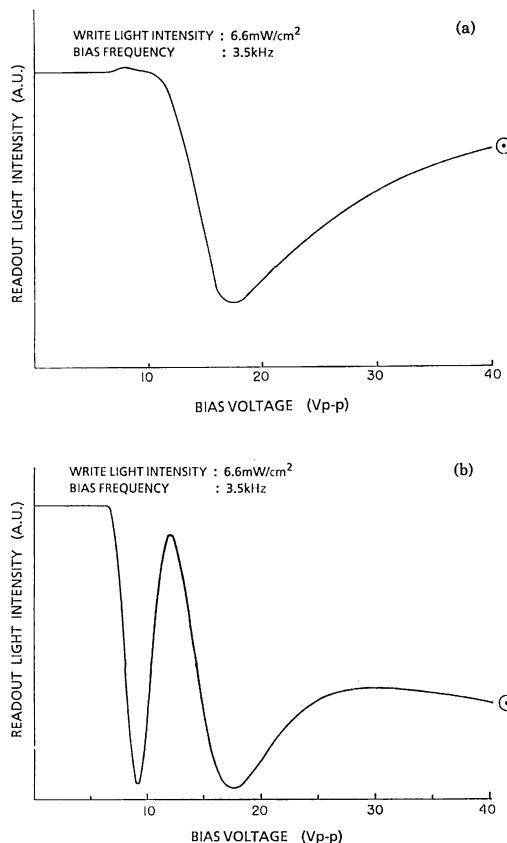


Fig. 2 Optical modulation characteristic of 45° twisted nematic liquid crystal used for liquid crystal light valve. (a) polarization direction of readout light $\theta = 0^\circ$, (b) polarization direction of readout light $\theta = 45^\circ$.

および Fig. 3 の曲線は、検光子の偏光方向を読み出し光の偏光方向(○)に一致させたときに得られた特性である。

3. 並列光論理演算機能の実現

実験装置を Fig. 4 に示す。書き込み光にはキセノンランプの白色光を、また読み出し光には高輝度発光ダイオードの赤色光を用い、これらの光を偏光子(P)に通して紙面に垂直(○)な直線偏光だけを選択している。

なお、ここでは演算機能の原理確認が目的であるため、高いコントラスト比が得られる単色光(赤色光)を読み出し光としたが、通常は、書き込み光と同じ白色光を用いる。読み出した演算結果を次段の論理演算器の書き込み光とする継続接続には、書き込み光と読み出し光が同じ波長であることと、強い読み出し光(増幅機能)が必要である。この点、LCLV は書き込み光と読み出

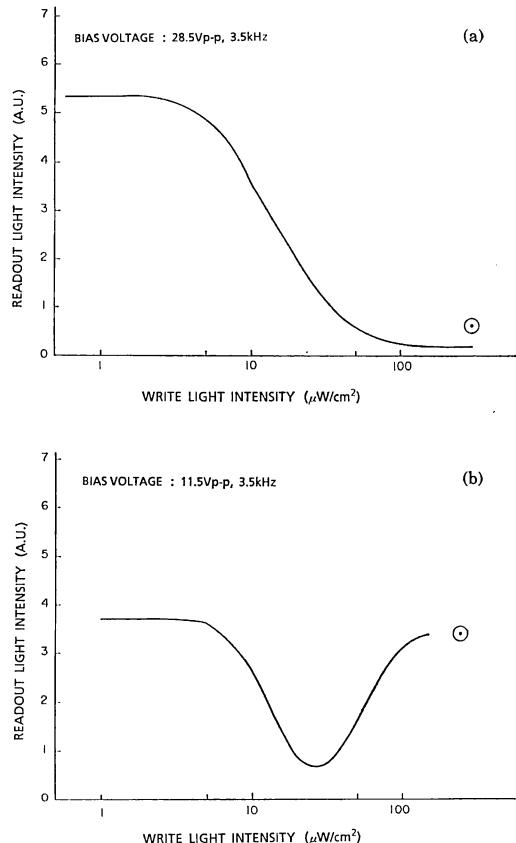


Fig. 3 Input-output characteristic of liquid crystal light valve. (a) polarization direction of readout light $\theta = 0^\circ$, (b) polarization direction of readout light $\theta = 45^\circ$.

し光が光学的に隔離されており、書き込み光と同じ波長の強力な読み出し光を用いても書き込み側には影響を与えないもので、本論理演算器は原理的に継続接続が可能である。

二つの被演算入力 A, B は、2 値化処理されたビデオ信号で二つの液晶テレビ (LCTV-A, LCTV-B) に加えられる。LCTV は偏光板とカラーフィルタを除去した画素数、縦 240 × 横 372 のアクティブマトリックス型であり、各画素が 90° TN 液晶セルとなっている。電圧が印加されていない 90° TN 液晶セルは旋光性を有し、セルを透過する直線偏光の偏光方向を 90° 回転させる。また、十分大きな電圧が印加された場合は液晶の旋光性は失われ、透過光の偏光方向は変化しない。したがって、偏光方向が一様な直線偏光を LCTV に照射すると、2 値化された入力ビデオ信号の “1”, “0” に応じてこの直線偏光が変調され、互いに直交する二つの直線偏光からなる空間的分布が得られる。LCTV-A および LCTV-

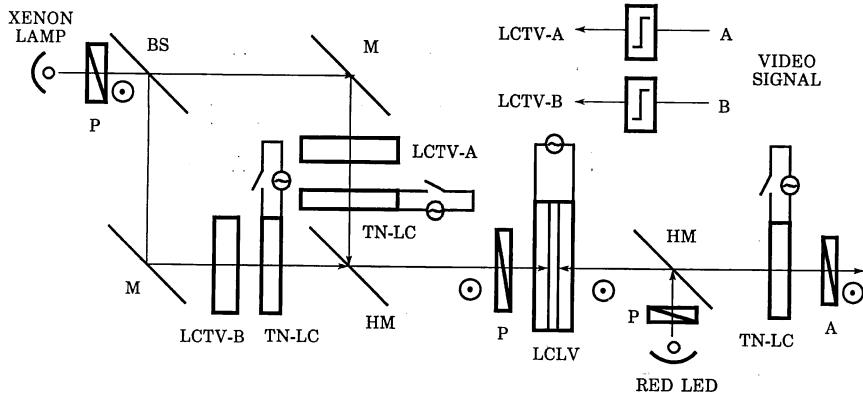


Fig. 4 Schematic diagram of optical parallel logic processor.

Bを透過して得られる空間分布した直線偏光を、それぞれ被演算光入力A, Bとした。光入力A, Bは、半透明鏡(HM)で合成され、偏光子(P)で光強度に変換されてLCLVの光導電層に書き込まれる。

LCTV-AおよびBの出力側とLCLVの読み出し光の出力側には、論理反転用の90°TN液晶セル(TN-LC)が挿入されており、約10VのAC電圧で駆動されている。

まず、Fig. 3(a)の入出力光特性を用いた、NORを基本とした14種類の論理演算の原理について説明する。二つの被演算光入力A, Bは、先に述べたように、その偏光の方向で論理値“1”(◎)あるいは“0”(†)を表すが、LCLVへの書き込み光は、透過する光の偏光方向が論理値“1”と平行(◎)な偏光子(P)を通して論理値“1”を明、“0”を暗となるように光強度に変換して照射する。A, Bそれぞれ単独の光強度を、Fig. 3(a)の変調特性が飽和する値(約100μW/cm²)に設定すると、A, Bがともに“0”的み、読み出し光の偏光が論理値“1”(◎)となるNORが実現できる。A, Bの論理値はLCTVの直後のTN-LCにより反転できるので、直ちに次の4通りの論理演算が実現できる。

$$\begin{array}{ll} \overline{A+B} = \bar{A} \cdot \bar{B} & \text{NOR} \\ \overline{A+\bar{B}} = \bar{A} \cdot B \\ \overline{\bar{A}+B} = A \cdot \bar{B} \\ \overline{\bar{A}+\bar{B}} = A \cdot B & \text{AND} \end{array}$$

この読み出し結果を再びLCLVの直後のTN-LCにより論理反転すれば、OR, NANDを含むさらに4通りの論理演算結果を得る。A, \bar{A} , B, \bar{B} はそれぞれ片方の入力光のみ照射することにより得られる。また、TrueとFalseはそれぞれ、AとB両方の入力光を消した時に

得られる一様な偏光状態の読み出し光と、その反転論理値として得られる。

次に、Fig. 3(b)の変調特性を用いるXORとNXORの原理について説明する。A, Bそれぞれ単独の光強度を、水平偏光(◎)の変調特性の谷の値(約40μW/cm²)に設定すると、A, Bの一方が“1”的み読み出し光の偏光の論理値が“0”となり、その他は“1”となるNXORが実現できる。XORはその論理反転で得られる。

以上の偏光状態を用いた論理演算結果を表示するには、Fig. 4のように透過方向が読み出し光の偏光と平行(◎)な検光子(A)で、論理値“1”を明、論理値“0”を暗に対応させて、読み出し光の空間的な偏光分布を強度分布に変換すればよい。

4. 実験結果

本実験では、被演算画像をテレビカメラで撮影し、ビデオ信号入力A, Bとした。Fig. 4に示すように、ビデオ信号入力A, Bを2値化処理してLCTV-AおよびLCTV-Bに入力した。並列光論理演算を実行したLCTVの領域は、書き込み光と読み出し光の両方に均一な光ビームの得られる、直径約1.5cmの円内である。

まず、静止画像間の論理演算結果を示す。2枚の静止画像(アルファベットNとH)を撮影した2系統のビデオ信号を、それぞれビデオ信号入力A, Bとした。前章で説明した手順に従って、これらの静止画像間の16通りの論理演算を実行した結果をFig. 5に示す。演算結果は、読み出し光の偏光と平行(◎)な検光子(A)で、論理値“1”が明、論理値“0”が暗となるように可視化して記録したものである。

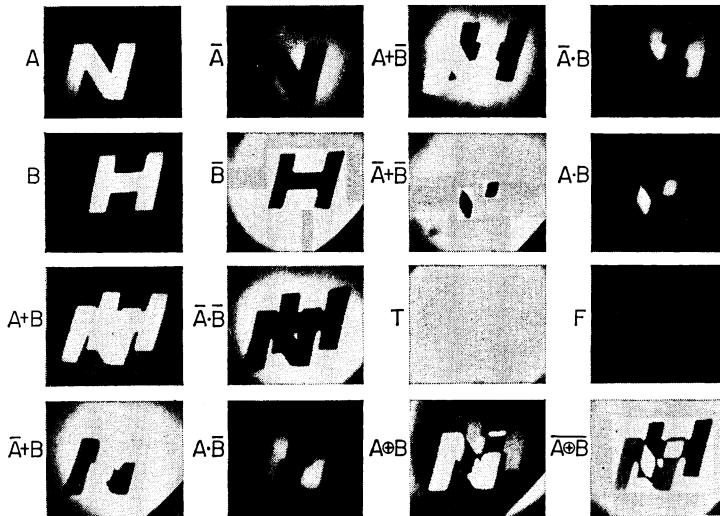


Fig. 5 Experimental results of 16 Boolean logic operation between two static TV images.

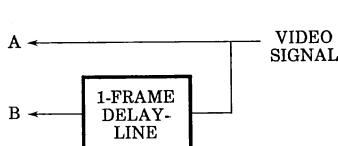


Fig. 6 Diagram of video signal input circuit for extraction of a moving object in a TV image.

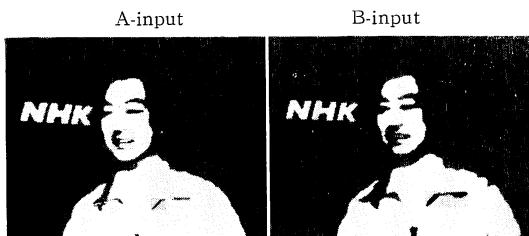


Fig. 7 Binary-leveled TV images for the logical operation.

次に、この論理演算器をテレビ画像の動画像処理に適用した例を示す。静止している背景に対して右から左に動いている人物を映したビデオ信号を、Fig. 6 のように1フレームの時間差をつけて、LCTV-AとLCTV-Bに入力する。Fig. 7はLCTVに入力される、2値化処理された被演算テレビ画像A、Bを示す。Fig. 8は演算結果A、B、 $A \cdot B$ および $\bar{A} \cdot B$ を示す。 $A \cdot \bar{B}$ では動き部分の前縁が、 $\bar{A} \cdot B$ では後縁が抽出されている。動き部分の輪郭は、これらの論理和(XOR)をとることにより抽出できるが、ここでは3章で述べた1系統によるXORによる論理演算結果をFig. 9に示す。動き部分の輪郭が精度良く抽出されている。

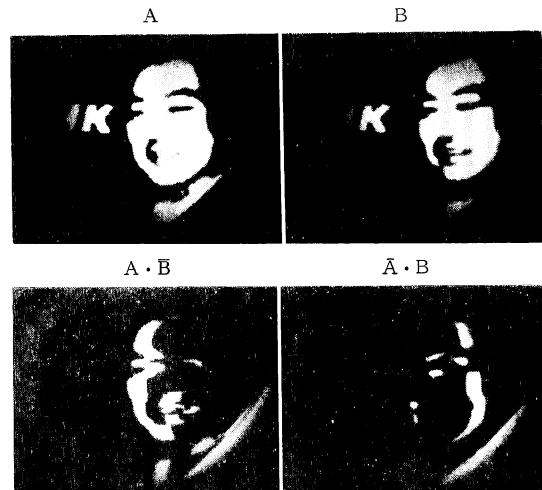


Fig. 8 Experimental results of extraction of front and back edges of moving TV image using $A \cdot B$ and $\bar{A} \cdot B$ logical operations.



Fig. 9 Experimental results of extraction of outline of moving TV image using XOR logical operation. Image B was delayed 1 TV-frame with respect to image A.

なお、XOR, NXOR の原理で説明したように、LCLV に照射される書き込み光強度を、理想的には、A あるいは B 単独では Fig. 3(b) の周期特性の谷の部分の $40 \mu\text{W}$ 程度に、また A と B の両方を照射した場合には飽和領域の $100 \mu\text{W}$ 程度に設定すべきだが、Fig. 3(b) から明らかなように、両条件を満足するように設定することは不可能であった。実験では、A と B の両方を照射した場合の光強度を約 $100 \mu\text{W}$ の飽和領域に設定したため、A, B 単独照射の場合の光強度は谷の部分ではなく $50 \mu\text{W}$ 付近の傾斜部分に設定された。また、A と B の光強度の不揃いもあり、照射なし、A 単独照射、B 単独照射、A と B の両方照射の 4 通りの場合の読み出し光の変調状態は、理想的な XOR あるいは NXOR とはならなかった。前縁と後縁のコントラストの不揃いは、このような理由によるものである。

5. 結 論

非線形素子として液晶ライトバルブ、論理反転素子として 90° TN 液晶セル、そして被演算光入力素子としてアクティブラマトリックス型液晶テレビを用いた並列光論理演算器を提案・試作し、本演算器一系統で XOR, NXOR を含む 16 通りの並列光論理演算を実行した。さらに、テレビ信号の動画像のリアルタイム処理に適用し、動き部分の前縁、後縁および輪郭を抽出できることを示した。

テレビ動画像は本質的に 2 次元の時系列信号であり、2 次元信号のまま並列処理することは、テレビ信号の特質にあった有利な方法である。並列処理の適用は、処理速度の向上のみばかりでなく、並列処理に適した効率の良い処理アルゴリズムや簡単なハードウェア構成の開拓

へと展開することが期待される。われわれは、先に光学情報処理の並列性を利用したテレビ動画像の動き検出⁸⁾について報告したが、今回の報告した結果はこれらとともに、光学系による並列情報処理技術のテレビ画像のリアルタイム処理への適用の可能性を示すものである。

文 献

- 1) F. T. Fatehi, F. C. Wasmundt and S. A. Collins, Jr.: "Optical logic gates using liquid crystal light valve: implementation and application example," *Appl. Opt.*, **20** (1981) 2250-2256.
- 2) J. Tanida and Y. Ichioka: "Optical logic array processor using shadowgrams," *J. Opt. Soc. Am.*, **73** (1983) 800-809.
- 3) T. Minemoto, K. Okamoto and K. Miyamoto: "Optical parallel logic gate using spatial light modulators with the Pockels effect," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 2055-2062.
- 4) F. T. S. Yu, Q. W. Song and X. J. Lu: "Implementation of Boolean logic gates using a microchannel spatial light modulator with liquid-crystal television," *Opt. Lett.*, **12** (1987) 962-964.
- 5) A. W. Lohmann and J. Weigelt: "Spatial filtering logic based on polarization," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 131-135.
- 6) K. Takizawa, H. Kikuchi, T. Aida and M. Okada: "Optical parallel logic gate using a Pockels readout optical modulator and twisted nematic liquid-crystal cells," *Opt. Lett.*, **14** (1989) 208-210.
- 7) W. P. Belha, L. T. Lipton, E. Wiener-Avnear, J. Grinberg, P. G. Reif, D. Casasent, H. B. Brown and B. V. Markevitch: "Application of the liquid crystal light valve to real-time data processing," *Opt. Eng.*, **17** (1987) 371-384.
- 8) T. Aida, K. Takizawa and M. Okada: "Real-time tracking of a moving object in a television image using an optical system consisting of a liquid-crystal television and a position-sensitive device," *Opt. Lett.*, **14** (1989) 835-837.