

解説

並列光論理演算*

谷田 純

大阪大学工学部応用物理学教室 〒565 吹田市山田丘 2-1

(1986年5月16日受理)

Optical Parallel Logic Operation

Jun TANIDA

Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Osaka University,
2-1, Yamadaoka, Suita 565

1. はじめに

大容量高速情報処理の基礎技術として、光情報処理技術が脚光を浴びている。光情報処理は高速性、並列性、高密度処理等を特徴とし、とくに、大容量データに対して有効な処理手段を提供しうる^{1,2)}。大容量データ処理システムの開発が高度情報化社会における社会的要請であることを考慮するならば、光情報処理技術の効果的な利用に関する研究の意義は非常に大きい。

もちろん、現在の情報処理科学はデジタル計算機を基盤とするきわめて高度なものである。しかし、デジタル計算機における処理は本質的に点の処理であり、大容量データ処理を考えた場合、複雑な配線パターン、混信、clock skew 等情報伝送の点で問題が生じる³⁾。これらの問題は電子を情報媒体とする限り避けることができないが、光を情報媒体に用いれば容易に解決できる。そこで、光波あるいは光子の物理的性質を生かした光情報処理技術—とくにデジタル計算を面の処理に拡張した並列光論理演算が注目されるに至っている⁴⁾。

並列光論理演算に関する研究は並列論理ゲート自体を対象とする研究と効率的な並列光演算システムを探索する研究に大別できる。前者には LCLV (liquid crystal light valve)⁵⁾、PROM (Pockels readout optical modulator)⁶⁾、MSLM (microchannel spatial light modulator)⁷⁾ 等各種空間光変調素子の開発から θ 変調法⁸⁾ や符

号化を応用した論理演算法⁹⁻¹²⁾等の研究が含まれ、後者では tse コンピュータ¹³⁾、古典的光有限状態マシン^{4,14)}、光パイプラインプロセッサ¹⁵⁾、OPALS (optical parallel array logic system)^{12,16)}等の研究があげられる。

本稿では並列光論理演算の一方法として、画像の符号化と符号化画像に対する相関演算を用いる方法⁹⁾とその各種並列処理への応用法^{10,11)}を紹介する。そして、本方法により構成可能な並列光論理演算システム OPALS^{12,16)}を説明して本方法の拡張性の高さを示す。なお、以下では著者らの考案した光学的並列論理演算技術を並列光論理演算法と呼ぶものとする。

2. 並列光論理演算法

2.1 原理と実行方法

並列光論理演算法は画像の符号化と2次元相関演算を用いて2枚の2値離散画像の対応画素間論理演算を光学的に実行する技術である。本方法の原理を図1に示す。演算は次の手順で行なう。

- 1) 2入力画像の各画素対において、画素値(0,1)の組合せに従った符号パターンを選択し、符号パターンの配列により符号化画像を作る。図1中の表が画素値の組合せと符号パターンの対応関係を示す。この操作を符号化と呼ぶ。
- 2) 符号化画像に対して画素区画の半分の大きさの間隔で並ぶ点群との2次元相関演算を行なう。図2に示すように点群のパターンが実行する演算の内容を決める。点群パターンを演算カーネルと呼ぶ。
- 3) 相関画像は1/4画素の区画で構成されるが、一つ

* 本稿は昭和60年度光学論文賞受賞記念講演(1986年4月2日、日本大学生産工学部)を骨子として、まとめたものである。

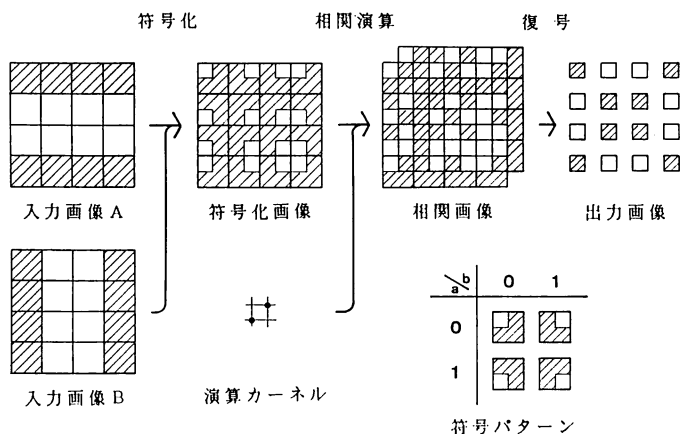


図 1 並列光論理演算法の原理

おきの区画の信号を抽出し、論理値 0, 1 に対応させる。得られた論理値列が論理演算の結果となる。この操作を復号と呼ぶ。

各操作は並列処理可能であり、とくに 2) の 2 次元相関演算には種々の光学的方法が利用できる。

最も簡単な方法として図 3 に示す多重投影光学系がある。多重投影光学系では、格子点上に配列した点光源群が符号化画像を照明し、スクリーン上の投影像として相関演算結果が得られる。点光源群の点滅パターンが演算カーネルに対応し、論理演算の結果は復号マスクを通過した光信号の明暗として得られる。

図 4 は多重投影光学系による並列光論理演算法の実行結果である。二つの入力画像 (64×64 画素) に対する数種類の並列画素間論理演算の結果を示す。光源には発

光ダイオードを用い、点滅パターンの制御により各結果を得ている。論理演算要素の空間密度は 3.5 ゲート/mm であった。

投影光学系による本方法は幾何光学近似に基づくため、ゲート密度は回折現象によって制限される。そこで、回折計算により幾何光学近似の成立条件とゲート密度 ν との関係求めた⁹⁾。

$$\nu \ll (2\sqrt{z\lambda})^{-1} < (4\lambda)^{-1} \quad (1)$$

ここで、 z は符号化画像とスクリーンの間隔、 λ は光の波長である。この結果は、投影光学系を用いる場合でも z を小さくできるならば高密度論理演算ゲートが実現できることを示している。

並列光論理演算法には多くの実行方法があり、既存の光学技術の有用な手法を利用できる。その点で柔軟性に富み大きな拡張性を有する演算技術である。

2.2 演算の拡張

並列光論理演算法は並列画素間論理演算のみならず、並列 2 次元デジタルフィルタリング演算・並列画素間アナログ演算・並列近傍画素間論理演算に応用できる。

| 演算カーネル | 演算 | 演算カーネル | 演算 |
|--------|------------------|--------|------------------|
| ⊠ | 0 | ⊠ | $\bar{A}\bar{B}$ |
| ⊠ | AB | ⊠ | $A\bar{B}$ |
| ⊠ | $\bar{A}B$ | ⊠ | B |
| ⊠ | A | ⊠ | A+B |
| ⊠ | $\bar{A}\bar{B}$ | ⊠ | \bar{A} |
| ⊠ | B | ⊠ | $\bar{A}+B$ |
| ⊠ | $A\bar{B}$ | ⊠ | $\bar{A}+B$ |
| ⊠ | A+B | ⊠ | 1 |

図 2 演算カーネルと演算内容の対応関係

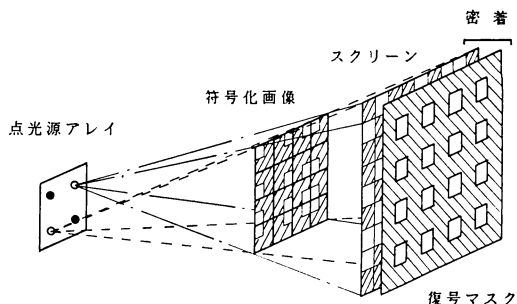


図 3 多重投影光学系

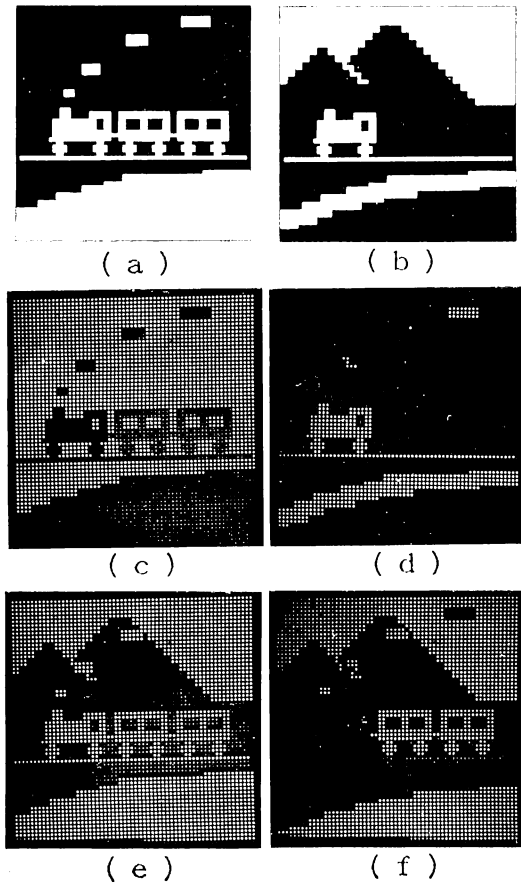


図4 多重投影光学系による並列光論理演算
 (a) 入力画像 A, (b) 入力画像 B, (c) \bar{A} ,
 (d) AB, (e) A+B, (f) $A \oplus B$

表1 並列論理演算の定義

| 演算 | 定義式 |
|------------------|---|
| 並列画素間論理演算 | $c_{ij} = R(a_{ij}, b_{ij})$ |
| 並列2次元デジタルフィルタリング | $\tilde{c}_{ij} = \sum_{m=-L}^L \sum_{n=-L}^L \hat{h}_{mn} \bar{a}_{i+m, j+n} \bar{b}_{i+m, j+n}$ |
| 並列画素間アナログ演算 | $\tilde{c}_{ij} = f(\bar{a}_{ij}, \bar{b}_{ij})$ |
| 並列近傍画素間論理演算 | $c_{ij} = R(\mathbf{a}_{ij}, \mathbf{b}_{ij})$ |

$i, j = 1, \dots, N$,
 N : 画素数,
 L : 近傍領域の範囲,
 x_{ij} : 画像 X の (i, j) 画素 (論理変数),
 \bar{x}_{ij} : 画像 X の (i, j) 画素 (数値変数),
 $\mathbf{x}_{ij} = \{x_{i+m, j+n} | m, n = -L, \dots, L\}$,
 $R(\mathbf{x})$: 論理変数列 \mathbf{x} に対する論理関数,
 $f(\bar{\mathbf{x}})$: 数値変数列 $\bar{\mathbf{x}}$ に対する数値関数

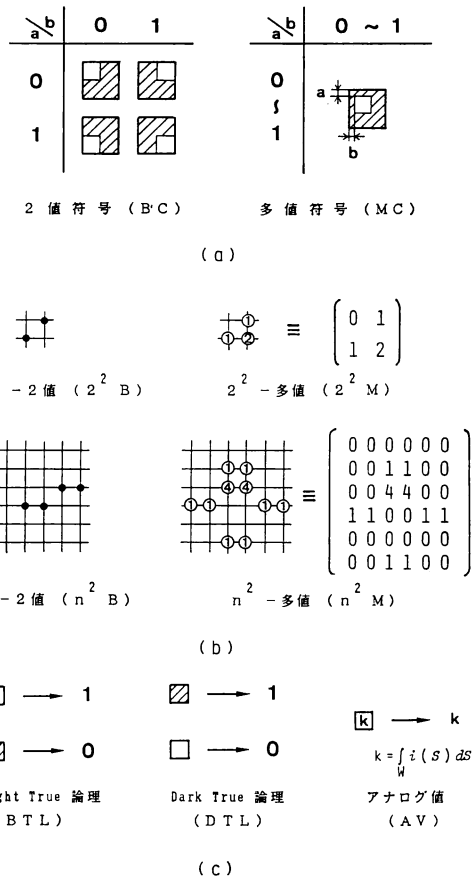


図5 並列光論理演算法の拡張に用いる技術
 (a) 符号パターン, (b) 演算カーネル,
 (c) 光信号/出力値の対応付け

これらの演算は符号化で用いる符号パターンの種類, 演算カーネルの形式, 光信号/出力値の対応付け等を変えれば簡単に実現できる. ここで, 各演算の定義は表1に示すものである.

並列光論理演算法の拡張に利用できる技術の例を図5に示す. 図5(a)は符号パターンで, 2.1項で用いた2値符号パターンの他に多値情報の符号化が可能な多値符号パターンの使用が考えられる. (b)は演算カーネルの空間的な拡張ならびに強度変調の手法を示す. (c)は光信号を出力値に変換する時の対応付けを表す.

各技術を組み合わせて得られる演算の例を表2にまとめる. 表中の記号は図5中の各技術を示す. すべての演算は画像データに対する並列演算であり, 大容量情報処理の基礎技術として利用価値の高いものである. これらのうち, とくに有用と思われる並列画像処理演算と並列近傍画素間論理演算について, 3., 4. 節で説明する.

表 2 並列光論理演算法の拡張方法

| | 符 号 演 算 | 光 信 号 / パター ン カー ン 核 | 出 力 値 |
|------------------|---------|-------------------------|-------|
| 並列画素間論理演算 | BC | 2 ² B | BTL |
| 並列2次元デジタルフィルタリング | BC | n ² M | AV |
| 並列画素間アナログ演算 | MC | n ² M | AV |
| 並列近傍画素間論理演算 | BC | n ² B | DTL |

3. 並列画像処理演算

3.1 2値画像処理

演算カーネルに強度分布を持たせると入力画像に対する2次元デジタルフィルタリング¹¹⁾が実行できる。この場合、演算カーネルがデジタルフィルタに対応し、入力画像とのコンボリューションに供される。演算カー

| カーネル ユニット | フィルタ要素 | マスク条件 |
|--|--------|---------------------|
| $\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ p & p \end{pmatrix}$ | p | - |
| $\begin{pmatrix} p & p \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ | -p | - |
| $\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & p \end{pmatrix}$ | p | b _{ij} = 1 |
| $\begin{pmatrix} 0 & p \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ | -p | b _{ij} = 1 |

p ≥ 0

図 6 カーネルユニットとフィルタ要素の対応関係

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix} \quad (a)$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 4 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{matrix} \quad (b)$$

図 7 2次元デジタルフィルタリングにおける演算カーネルの例
(a) 横方向差分, (b) ラプラシアン

ネルは正方形に並ぶ四つの要素の組 (カーネルユニットと呼ぶ) の集合体であると考え、一つのカーネルユニットがデジタルフィルタ内の1要素を表わすものとする。その結果、負値をもつデジタルフィルタやマスク条件を設定することができる。マスク条件は入力画像Bによってデジタルフィルタリングの実行範囲を指定するもので、局所的な処理を可能にする。図6はカーネルユニットとフィルタ要素の対応関係を示し、図7は2次元デジタルフィルタリング用の演算カーネルの例を示す。ここでは演算カーネルは行列として表わしてある。

図8は多重投影光学系による2次元デジタルフィルタリングの実用例である。入力画像は図4(a)に示す2値画像である。各処理のデジタルフィルタは負値を含むが、所望の結果が得られている。ただし、出力光強度にはバイアス値が加わっているため実際の処理結果はバイアス値を差し引いたものとなる。

3.2 濃淡画像処理

並列光論理演算法は2値離散画像を対象とする技術である。したがって、濃淡画像処理を行なうためには濃淡画像/2値画像変換の方法を考える必要がある。ここでは二つの方法について述べる。

一般に、並列デジタル計算機は濃淡画像情報をビットプレーンと呼ばれる2値画像に分解して処理する。そこで、図9に示すようなビットプレーン展開を行なう方法が考えられる。もとの濃淡画像の1画素の濃度値をビット展開し、各ビット情報が互いに隣接するように配置する。その結果、展開画像を並列光論理演算法の入力画像とすれば近傍画素間演算として濃淡画像情報の処理ができる。すなわち、ビットプレーン展開を行ない2値画像に変換すれば、3.1項の2次元デジタルフィルタリングと同一の手順により濃淡画像処理が実現できる。

一方、図5(a)で示したように、符号パターンとして

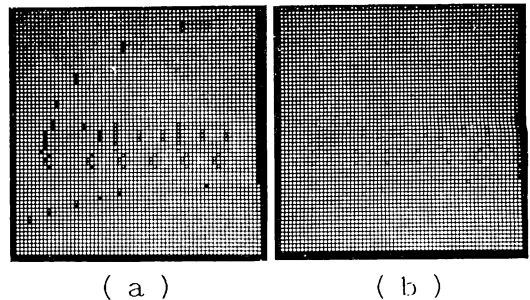


図 8 多重投影光学系による2次元デジタルフィルタリング¹¹⁾
(a) 横方向差分, (b) ラプラシアン

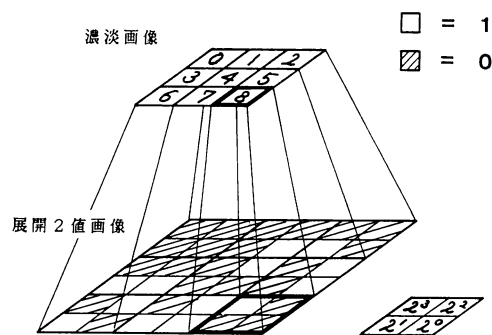


図9 ビットプレーン展開による濃淡画像/2値画像変換

濃淡情報の表現が可能なパターンを用いる方法も考えられる。この場合、入力 a_{ij}, b_{ij} は

$$0 \leq a_{ij} \leq 1 \quad (2)$$

$$0 \leq b_{ij} \leq 1 \quad (3)$$

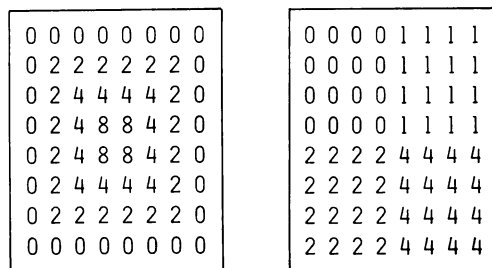
を満たす連続値で、出力は図5(c)に示すように出力窓内光強度の積分値として得る。図10は多重投影光学系による並列乗算、並列加算の実験結果である。(a), (b)の濃淡画像を多値符号パターンで符号化した後、並列光論理演算法の実行手順にしたがって処理を行なった。出力値は復号マスクの各窓内の光信号を積分して得る。

濃淡画像処理法は光の強度情報を有効に利用する点で興味深い。多値論理¹⁸⁾への応用を含め今後の研究が待たれる。

4. 並列近傍画素間論理演算

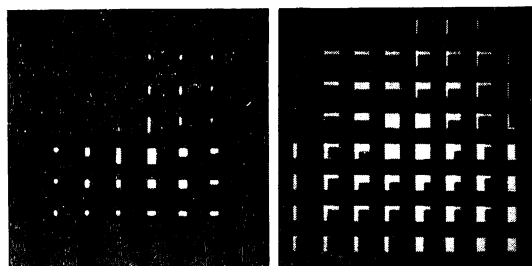
並列光論理演算法の演算手順は電子工学で開発されたアレイロジック¹⁹⁾の演算手順と密接な関係をもつ。アレイロジックとは入力信号列の符号化*1と符号化信号に対する積和演算(=積項演算+論理和演算)を用いて任意の論理演算を実現する技術で、電子工学分野では汎用LSI論理素子PLA(programmable logic array)²⁰⁾として実用化されている。並列光論理演算法による1回の処理はアレイロジックの符号化および符号化信号に対する積項演算と等価である。そこで、この対応関係を積極的に利用すれば、並列論理演算の有用な実行技術となる。著者らは本方法をアレイロジックとの関係から光アレイロジックと名付けた。

光アレイロジックとは並列光論理演算法とアレイロジ



(a)

(b)



(c)

(d)

図10 多重投影光学系による濃淡画像演算¹¹⁾

(a) 入力画像 A, (b) 入力画像 B,
(c) $A \times B$, (d) $A + B$

ックとの対応関係を利用して各画素における近傍画素間論理演算を光学的に画素並列に実行する並列演算技術である。すなわち、光アレイロジックは2画像における対応近傍画素群 a_{ij}, b_{ij} に対する論理演算

$$c_{ij} = R(a_{ij}, b_{ij}) \quad (4)$$

を全画素対 $(i, j=1, \dots, N)$ にわたって並列的に実現する。ここで、 $R(x)$ は論理変数列 x に対する論理演算であり、 a_{ij}, b_{ij} は L を近傍領域の範囲とすると次式で定義される。

$$a_{ij} \equiv \{a_{i+m, j+n} | m, n = -L, \dots, L\} \quad (5)$$

$$b_{ij} \equiv \{b_{i+m, j+n} | m, n = -L, \dots, L\} \quad (6)$$

$R(x)$ はある近傍画素群に対する演算を表わすだけでなく処理画像内の全画素に対する並列演算をも記述していることに注意を要する。これは、光アレイロジックの処理が space-invariant であるため、代表近傍画素群 a_{ij}, b_{ij} に対する演算のみで並列演算の表現ができるからである。そこで、光アレイロジックでは演算の記述に(7)式のような記号を用いる。

$$\begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots \\ \dots & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dots & 1 & \dots \\ \dots & 1 & \dots \\ \dots & 1 & \dots \end{bmatrix} \quad (7)$$

(7)式は積和形式で表わされた論理演算

$$c_{ij} = \bar{a}_{ij} + a_{i+1, j} \quad a_{i-1, j} \quad a_{i, j+1} \quad a_{i, j-1} \quad (8)$$

*1 電子工学では「デコード(復号)」と呼称するが、混同を避けるため本稿では「符号化」と呼ぶ。

| カーネル ユニット | 演算 | 表記記号 | カーネル ユニット | 演算 | 表記記号 |
|--------------|-------------|------|--------------|--------------|------|
| | 1 | .. | | a+b | PP |
| | $\bar{a}+b$ | NN | | a o b | UU |
| | $\bar{a}+b$ | NP | | b | .1 |
| | \bar{a} | O. | | $\bar{a}b$ | 01 |
| | a+b | PN | | a | 1. |
| | b | .0 | | a b | 10 |
| | $\bar{a}b$ | EE | | ab | 11 |
| | $\bar{a}b$ | 00 | | 0 | 00 |

図 11 カーネルユニットと光アレイロジック表記記号の対応関係

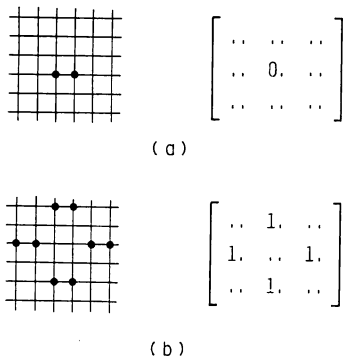


図 12 光アレイロジックにおける演算カーネルの例
(a) \bar{a}_{ij} , (b) $a_{i+1,j}$ $a_{i-1,j}$ $a_{i,j+1}$ $a_{i,j-1}$

を記述したもので、積項演算を一つのブロックとする。各ブロックは近傍領域内の対応画素対に対する論理演算を表わす記号 (., 1., 0. 等, 図 11 に示す) を組み合わせて構成され, 各記号の位置が近傍領域内の対応画素対の位置を示す。

本表記法の特長は演算処理の内容を視覚的にわかりやすく記述するだけでなく, 各ブロックの内容から実際の光学処理で使用される演算カーネルを容易に得ることができる点にある。具体的には, ブロック内の各記号を図 11 に示す関係を用いてカーネルユニットに置換し, 各カーネルユニットを並べて演算カーネルを合成する。図 12 は (7) 式の二つのブロックからそれぞれ変換した演算カーネルである。(7) 式は 3×3 の近傍領域内画素間論理演算の記述法であるが, 近傍領域の大きさに応じたブロックを用いれば処理の種類, 近傍領域の大きさの記述

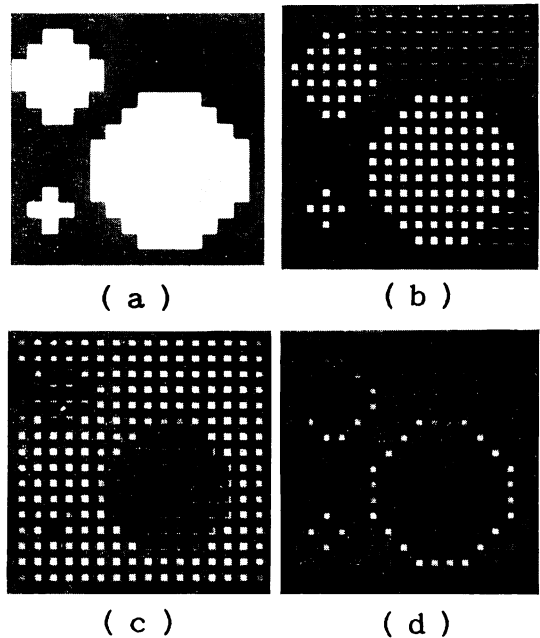


図 13 多重投影光学系による非エッジ点の抽出処理
(a) 入力画像, (b) \bar{a}_{ij} , (c) $a_{i+1,j}$ $a_{i-1,j}$ $a_{i,j+1}$ $a_{i,j-1}$, (d) 出力画像

に普遍性をもたせることができる。

一つの演算カーネルを用いて並列光論理演算法による処理を 1 回行なえば, 対応する積項演算の結果 (たとえば, (8) 式の \bar{a}_{ij}) を dark-true 論理として得る。そこで, 複数回積項演算を行なった後に全部の演算結果に対して各画素ごとの論理和をとると所望の近傍画素間論理

演算の結果を得る。この手順はアレイロジックの演算実行の手順とまったく等価であるためアレイロジックによる論理設計法を応用でき、その結果、簡単に任意の並列近傍画素間論理演算の設計・実行ができる。

図13は(8)式の並列近傍画素間論理演算を多重投影光学系を用いて実行した結果を示す。処理内容は入力図形(a)の非エッジ点の抽出であり、(b),(c)が(8)式の各種演算の出力像、(d)が(b),(c)の出力像に対する論理演算の結果、すなわち、(8)式の演算結果である。ここでの論理演算は入力信号の中で少なくとも一つ暗信号が存在する場合に1を出力するもので、(d)は(b),(c)の出力像をリスフィルムに記録し、重ね合わせて観測することにより得た。この場合、出力結果はdark-true 論理で得られるため暗信号の画素が非エッジ点を表わす。

図9に示したビットプレーン展開を併用すると多ビット値を各画素の入力とする処理も行なえる。たとえば、並列2ビット加算器、並列2ビット比較器等が実現できる。詳細は文献12)を見ていただきたい。

5. Optical parallel array logic system

光アレイロジックを演算の基本技術として用いると処理効率の優れた並列光演算システムの構築が可能となる。著者らはこのシステムを光アレイロジックの名前にちなんで optical parallel array logic system (略して OPALS) と名付けた。

図14は OPALS の概念図である。OPALS は光アレイロジックを実行する光アレイロジックプロセッサを中心に符号器、帰還系、入出力ポートにより構成され、画像データを面のまま処理する。システムは2値画像を処

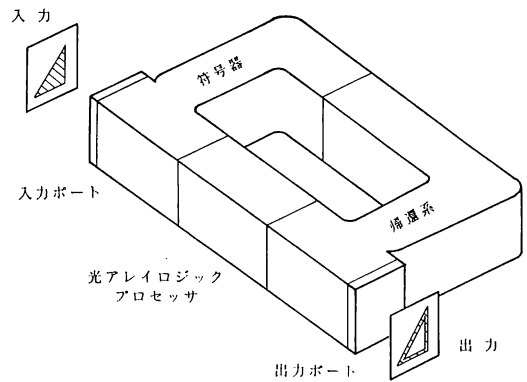


図14 OPALS の概念図

理対象とし、並列近傍画素間論理演算を反復的に実行する。光アレイロジックは基本的に2入力1出力の処理系を実現する技術である。そこで、OPALS では出力を次段の入力の一方として帰還させる信号の流れを考えることでコンパクトな反復処理システムを構成している。

図15は空間光変調素子と各種の光学素子で構成する OPALS の例である。詳しい説明は文献16)に譲るが、図のような純光学型 OPALS は演算能力の点で従来のデジタル計算機を凌駕しうる可能性をもっている。とくに、光アレイロジックの利用により得られるプログラム設計・実行の容易さは他の同種のシステム^{4,13-15)}にはない特長であり、OPALS の大容量情報処理システムとしての発展が期待されるゆえんでもある。

6. む す び

入力画像の符号化と符号化画像に対する相関演算を用いて並列論理演算を光学的に実行する方法ならびにその

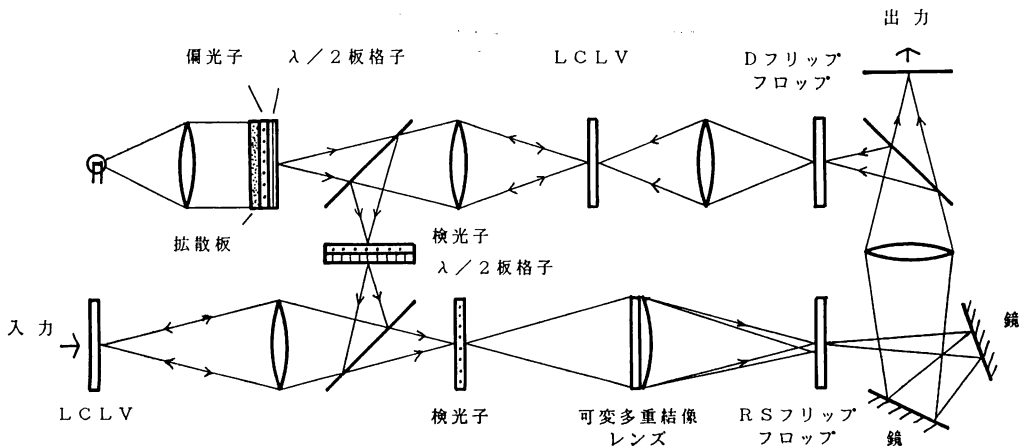


図15 純光学型 OPALS

各種並列処理への応用法, システム化の方法を紹介した. 本方法は並列画素間論理演算, 並列画素間アナログ演算, 並列近傍画素間論理演算等, 種々の並列演算に応用できる自由度の大きさ, 拡張性の高さを特徴とする. とくに, 光情報処理技術の並列処理性とデジタル演算の処理の柔軟性を融合させた結果, 本並列光論理演算法は新しい大容量情報処理の有力な手段となりうる.

大容量情報処理を目的とした光演算システムにはさまざまな形態が考えられるが, 本方法はそのうちのデジタル演算方式に基づいた光演算システムの一つの概念を提供するものである. 効率的な符号化法・相関演算法の開発が課題として残っているが, 今後, 空間光変調素子の開発をはじめとする周辺技術の確立により, 本方法が種々のレベルで実用化され, 大容量情報処理システムの基礎技術として利用されることが望まれる.

文 献

- 1) J. W. Goodman: *Introduction to Fourier Optics* (McGraw-Hill, New York, 1968).
- 2) 辻内順平, 村田和美: 光学情報処理 (朝倉書店, 東京, 1974).
- 3) 一岡芳樹: “光コンピュータ”, 応用物理, **54** (1985) 1019-1030.
- 4) A. A. Sawchuk and T. C. Strand: “Digital optical computing,” Proc. IEEE, **72** (1984) 758-779.
- 5) J. Grinberg, A. D. Jacobson, W. P. Bleha, L. Miller, L. Fraas, D. Boswell and G. Myer: “A new real-time optical signal processing,” Opt. Eng., **14** (1975) 217-275.
- 6) J. Feinleib and D. S. Oliver: “Reusable optical image storage and processing device,” Appl. Opt., **11** (1972) 2752-2759.
- 7) C. Warde, A. M. Weiss, A. D. Fisher and J. I. Thakara: “Optical information processing characteristics of the microchannel spatial light modulator,” Appl. Opt., **20** (1981) 2066-2074.
- 8) H. Bartelt, A. W. Lohmann and E. E. Sicre: “Optical logical processing in parallel with theta modulation,” J. Opt. Soc. Am. A, **2** (1985) 944-951.
- 9) J. Tanida and Y. Ichioka: “Optical logic array processor using shadowgrams,” J. Opt. Soc. Am., **73** (1983) 800-809.
- 10) Y. Ichioka and J. Tanida: “Optical parallel logic gates using a shadow-casting system for optical digital computing,” Proc. IEEE, **72** (1984) 787-801.
- 11) J. Tanida and Y. Ichioka: “Optical-logic-array processor using shadowgrams. II. Optical parallel digital image processing,” J. Opt. Soc. Am. A, **2** (1985) 1237-1244.
- 12) J. Tanida and Y. Ichioka: “Optical-logic-array processor using shadowgrams. III. Parallel neighborhood operations and an architecture of an optical digital computing system,” J. Opt. Soc. Am. A, **2** (1985) 1245-1253.
- 13) D. H. Schaefer and J. P. Strong, III: “Tse computers,” Proc. IEEE, **65** (1977) 129-138.
- 14) A. Huang: “Design for an optical general purpose digital computer,” Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., **232** (1980) 119-127.
- 15) A. Huang: “Architectural considerations involved in the design of an optical digital computer,” Proc. IEEE, **72** (1984) 780-786.
- 16) J. Tanida and Y. Ichioka: “OPALS: Optical parallel array logic system,” Appl. Opt., **25** (1986) 1565-1570.
- 17) W. K. Pratt: *Digital Image Processing* (Wiley, New York, 1978).
- 18) S. L. Hurst: “Multiple-valued logic—Its status and its future,” IEEE Trans. Comput., **C-33** (1984) 1160-1179.
- 19) H. Fleisher and L. I. Maissel: “An introduction to array logic,” IBM J. Res. Dev., **19** (1975) 98-109.
- 20) 南谷 崇: PLA の使い方 (産報出版, 東京, 1978).