

光並列アレイロジックシステム：アーキテクチャと並列プログラミング

一岡芳樹, 岩田昌也, 谷田 純
大阪大学工学部応用物理学科

並列デジタル光演算システム：OPALSのアーキテクチャと駆動並列プログラミング
について述べる。

OPTICAL PARALLEL ARRAY LOGIC SYSTEM: ARCHITECTURES AND PARALLEL PROGRAMMING

Yoshiki Ichioka, Masaya Iwata, and Jun Tanida

Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Osaka University
Suita, Osaka 565, Japan

We describe architectures of OPALS - Optical Parallel Array Logic System - and
parallel programming.

1. はじめに

光コンピュータは、光の超並列性、高速性、多波長性、無誘導性などの特長を生かした新しい超並列大容量情報システムである。光コンピュータの実現には総合的なシステムコンセプトの研究と、ハードウェア、ソフトウェア両面からの研究が必要である。

光を情報処理に利用しようとする考えは古くからあるが、光の本質的な特長を利用した、光情報システムはまだ実現していない。その理由は、システム作製に必要な光機能デバイスが未開発のためである。しかし、事態は急変しつつあり、新しい光機能デバイス開発の機運が急速に熟してきた。また、これに呼応して、システム構成や超並列演算アルゴリズムに関するソフトウェア面の研究も急速に進展している¹。

この報告では、光コンピュータの基本演算システムである汎用並列デジタル光演算システム：OPALS (Optical Parallel Array Logic System) のアーキテクチャと並列プログラミングについて述べる。

2. 並列デジタル光コンピュータ

並列デジタル光コンピュータは光の最大の特徴である、超高速・広帯域性、超並列性と、デジタル処理の柔軟性を活かした大容量情報システムである。コンピュータの入出力部、記憶部、演算部すべてに光の超並列信号通信・演算の概念を取入れる。伝統的な光学の持つ種々の処理技術を、並列光接続技術と見なし、並列情報システム構成の基本技術として導入するとともに既存のデジタル技術を最大限に利用する。その開発目標は、超並列処理が可能な高速画像処理システムや超高速汎用並列コンピュータである。

3. パターン符号化論理ゲート

現在のデジタル演算処理系は、2値論理に基づいており、ブール代数が基盤となっている。すなわち、処理されるデータは、2値論理変数によって表現され、処理は、論理変数に対する論理関

数の組合せによって実行される。電子計算機に必要な基本的演算は、2変数2値論理関数であり、複雑な論理回路を構成するための基本要素である。したがって、光を情報媒体としてデジタル処理系を構成するためには、光学的に論理関数を実現する方法が必要となる。

光論理ゲートを実現する方法として、光双安定素子などの光機能素子を用いて直接、非線形演算を行う方法と、入力信号(画像信号)を空間的に符号化して実行するパターン符号化論理²がある。OPALSでは後者を用いる。

パターン符号化論理では、2つの入力画像を空間的に符号化し、通常の光学技術を用いて並列論理ゲートを実現する。空間フィルタリングを用いる方法⁵、多重投影を用いる方法^{3,4}、多重投影と偏光現象を用いる方法などがある⁶。

パターン符号化論理の特徴は、1) 簡単な相関光学系で実現できる、2) 近傍領域内のデータを一括処理する近傍画素間論理演算(SIMD処理)ができる、そのため、システム構成の簡素化が図れることである。近傍画素間演算は多入力、1出力の処理系である。

4. 並列光論理演算法

パターン符号化論理の代表例として、我々が考案した並列光論理演算法^{3,4}について述べる。図1に「並列光論理演算」を実現する代表的な光学系(投影相関光学系)を示す。演算の手順は、2枚の入力画像の符号化、それによって出来る符号化画像と演算核(LEDアレイ)との相関演算、相関像から出力を求める復号化から成る。

並列光論理演算法で使う符号化像は、2ビットデコーダの出力信号に相当するサブパターンの集まりである。このサブパターンは図2に示すように、各点光源によって投影像の中央区画に投影されるが、サブパターンと点光源は1:1に対応している。各信号伝送で送られる信号は、インコヒーレント光を用いる限り、互いに非干渉で、独立に制御できる。したがって、中央区画に到達する信号(c_{ij})は、次式で表わされる。

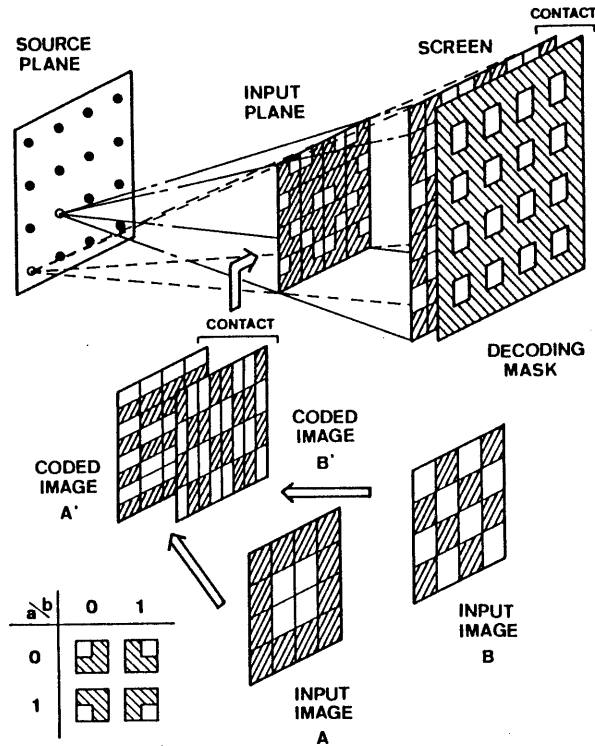


図1 光ロジックアレイプロセサ

$$c_{ij} = \alpha a_{ij} b_{ij} + \beta a_{ij} \bar{b}_{ij} + \gamma \bar{a}_{ij} b_{ij} + \delta \bar{a}_{ij} \bar{b}_{ij}$$

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ は、点光源の点灯状態を示す論理関数で、0, 1の値をとる。値の組合せによって、任意の2変数2値論理関数が実現できる。大切なことは、この演算が光の並列性によって、符号化像中の全画素（全チャンネル）に対して独立かつ並列に行われていることである。その結果、並列論理演算が実行でき、しかも、点光源の点滅の制御によって、簡単に記述できることになる。並列光論理演算法の特徴は、光論理素子を一切必要とせず、既存の光学技術を用いた並列光接続技術のみで実行できることにある。

デジタルの加算や減算では、論理演算とともにシフト演算が重要な役割を果たす。これは並列処理でも同様である。並列シフト演算とは、2次元画像全体をある画素分だけ、上下、左右に平行移動させる操作を云い、異なった位置の画素間（たとえば a_{ij} と $b_{i,j-1}$ ）の演算を行う操作のことを指す。並列光演算では、点光源を増設すればシフ

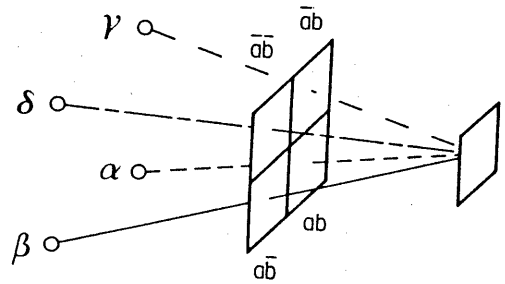


図2 空間光接続による論理演算

ト演算を容易に実現することができるし、シフト演算と2変数2値論理演算を組み合わせることも可能である。これも並列論理演算法の特徴的な演算の一つである。

5. 光アレイロジック

並列光論理演算法の各画素ごとの論理演算実行の手順は、カスタムICの作成に利用する「アレイロジック」⁷⁾の実行手順と密接な関係がある。アレイロジックとは、入力信号を符号化し、その符号化信号の組合せで任意の論理演算を実現する技術である。この考え方は、扱うデータの並列性という点を除けば、並列光論理演算法の考え方と基本的に同じである。

先に示した並列光論理演算法の符号化は、アレイロジックの入力信号のデコードに対応し、また符号化像に対して行う2次元相関演算の演算核は、アレイロジックのデコード信号の組合せに、対応している。この関係を用いると、アレイロジックを使って、並列光論理演算法による近傍画素間論理演算を記述することができる。すなわち、並列

光論理演算法のように、SIMD方式の並列演算であれば、代表画素に対する論理演算を表す式だけで、全体の並列演算を記述することができる。

並列近傍画素間演算は、2次元データの汎用処理の基本演算であり、これがアレイロジックを通して並列光論理演算法で実現できることは、汎用並列デジタル光演算の手段を得たことになる。

このように、画素単位の論理演算をアレイロジックで表し、その集合体として並列論理演算を光学的に実現する技術を、「光アレイロジック」と呼ぶ。光アレイロジックは、アレイロジックの概念を並列光論理演算法に適合する形で拡張した並列演算原理である⁸⁾。光アレイロジックを用いると、“任意”の並列情報処理のプログラムができ、それを光学的に実行することができる。図3に光アレイロジックによる並列演算手順を示す。

6. 並列デジタル光演算システム：OPALS

OPALSは、並列光論理演算法と光アレイロ

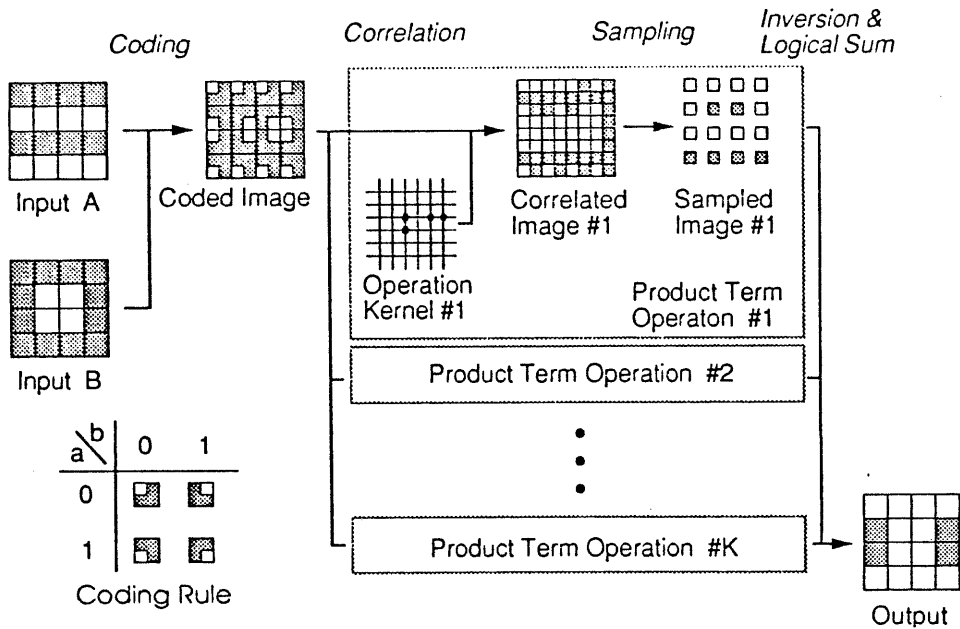


図3 光アレイロジックによる並列演算手順

ジックの概念を用いて構成した並列光コンピュータの基本演算システムである⁷⁻¹⁰。システムは、図4に示すように画像データの符号器、演算核が制御可能な2次元相関器、OR演算器、復号器とそれらを接続する並列信号伝送路からなる。このシステムの機能および、その特徴をあげると、

1. 2次元2値画像に対する並列画素間演算、近傍画素間演算が実行できる。
2. データ入出力、演算処理、記憶、表示、すべてを2次元配列を保ったまま実行できる。
3. 光アレイロジックによるプログラムが可能であり、汎用並列演算システムとしての機能を備えている。
4. 並列フィードバック系を用いるので、光の減衰なしに反復処理ができる。

OPALSの具体的なシステム構成法としては、いろいろなもの考えられるが、演算の中核なす並列光論理演算系には、必ず2次元相関光学系が必要である。この2次元相関光学系こそ並列光演算システム：OPALSのCPUである。

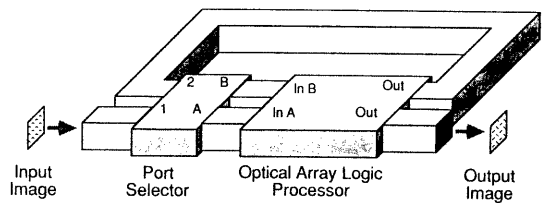


図4 OPALSの構成図

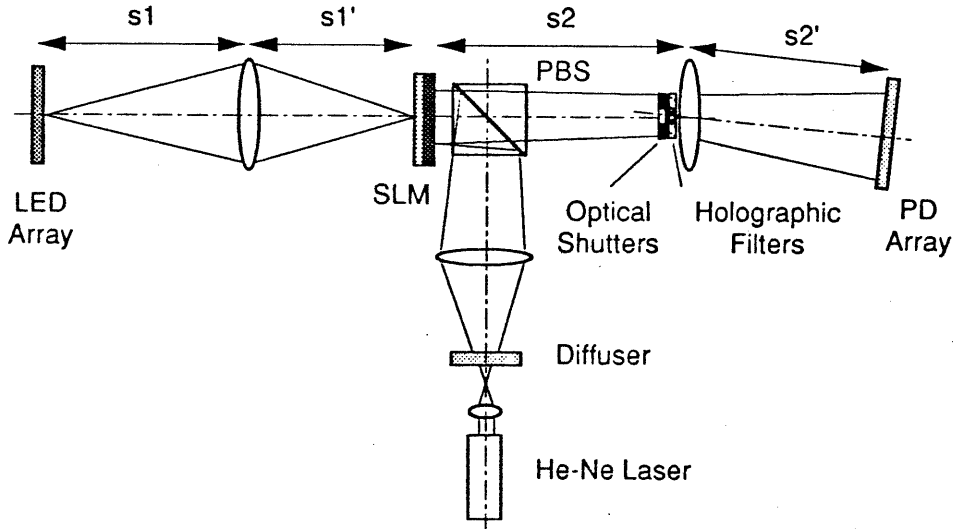


図5 光・電子複合型OPALSの光学系

OPALSのさまざまな実現形態が考案されている。純光学型、機能モジュール型、光/電子複合型、複屈折符号化型、波長多重型などがある。図5に現在試作中の液晶空間光変調素子を用いた光・電子複合型OPALSの光学系の部分を示す。

7. 並列プログラミング

OPALSを駆動する演算プログラムは並列演算に必要な演算核の系列からなる。個々の演算核はちょうど碁目のようなパターンで、電子計算機の機械語に相当する(たとえば、図1のLEDアレイの発光パターンがこれに対応する)。もちろん個々の演算核による演算は空間並列的に行れる。機械語によるプログラミングは大変面倒なので、我々はアセンブラ言語に対応する並列言語を開発した。この言語を用いると並列プログラムを比較的容易に書くことができる¹¹⁻¹⁴。

実際に細線化処理、微分処理、骨格線抽出、並

列迷路抽出などの並列デジタル画像処理を実行する並列プログラムを作成して複合型OPALSで演算させ所望の結果を得た。

OPALSに必要な2つの入力画像の内、一方に被処理像を、他方に並列制御命令を乗せることもできる。この入力方法を用いると、空間可変処理(入力画像の各場所によって異なる演算処理)が可能となり、処理の自由度を上げることができる。この方法をパターン論理演算(PTL)という。PTLを用いて並列チューリングマシンの模擬、並列AI処理、並列シストリック演算、並列光連想処理、並列数値演算、並列ニューラルネットワークなどが実行できる。図6は並列加算の演算結果である。一方の入力画面を特徴面に他方にビット展開した入力信号を配置してある。8種類の8ビット加算と4種類の16ビット加算が同時に並列に実行されている。図7に使用した並列プログラミングを示す。

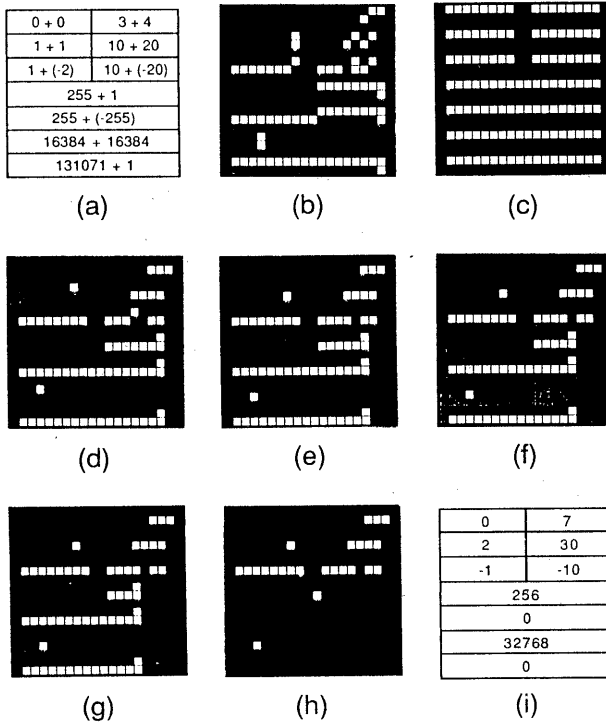


図6 並列処理による加算

Binary Addition

```

program Addition;
var
  i, N;
image attr = Attribute, data = Data;
kernel add;

N = 18;

add = | 1. |
      | 0. | * | .0 |
          | .1 |
+ | 1. |
  | 0. | * | .1 |
      | .0 |
+ | 1. |
  | 0. | * | ...1 |
      | ...1 |;

for i = 1 to N do
  exec(attr, data, add);
end;
end Addition.

```

図7 並列加算用プログラミング

6. おわりに

光の超並列情報処理・伝送能力とデジタル演算方式の柔軟性を融合した汎用並列デジタル光演算システム：OPALSの構成と具体的なシステム化の方法、および、駆動用の並列プログラミング法を示した。

OPALSは、入力像の符号化と、並列論理演算法、光アレイロジックという並列演算原理を用い、光の超並列情報処理・伝送能力を有効に生かす2次元相関光学系をCPUとした、汎用並列デジタル光コンピュータの基本演算システムである。

光コンピュータも電子計算機と同様に自由にプログラムが出来なければならない。前述したように並列光演算原理：光アレイロジックは、光による並列デジタル演算システムの構成法を明確にし、並列プログラミングの可能性を引きだした。この点で、OPALSは格段に進歩した並列デジタル光演算システムである。

10. J. Tanida, J. Nakagawa, and Y. Ichioka, *Appl. Opt.* 27, 3819 (1988)
11. J. Tanida and Y. Ichioka, *Appl. Opt.* 27, 2926 (1988)
12. J. Tanida, M. Fukui and Y. Ichioka, *Appl. Opt.* 27, 2931 (1988)
13. Y. Ichioka and J. Tanida, *Optoelectronics* 4, 39 (1989)
14. Y. Ichioka and J. Tanida, *Proc. Photo Opt. Instrum. Eng.* Vol. 963, 591 (1988)
15. 岩城忠男、光岡靖幸、山本修平、星英男、第50回応用物理学会学術講演会講演予稿集、第3文冊、p743、(1989)

参考文献

1. 一岡芳樹、デジタル光情報処理、光情報処理、辻内順平、一岡芳樹、峯本 工共著、オーム社(1989)、第3章
2. 谷田 純、応用物理、58, 1604 (1989)
3. J. Tanida and Y. Ichioka, *J. Opt. Soc. Amer.* 73, 800 (1983)
4. Y. Ichioka and J. Tanida, *Proc. IEEE* 72, 787 (1984)
5. J. Weigelt, *Opt. Eng.* 26, 28 (1987)
6. M. A. Karim, A. A. S. Awwal, and A. K. Cherri, *Appl. Opt.* 26, 2720 (1987).
7. 一岡芳樹、谷田純、サイエンス日本版、9月号、p. 62 (1987)
8. J. Tanida and Y. Ichioka, *Appl. Opt.* 25, 1565 (1986)
9. J. Tanida and Y. Ichioka, *Appl. Opt.* 26, 3954 (1987)