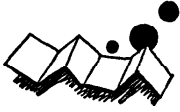


## 解説

## 3. 光情報処理システム



## 3.4 二次元デジタル演算方式†

## —並列光論理演算と光コンピューター—

— 岡 芳 樹††

## 1. ま え が き

光の高速情報処理能力を利用した光情報処理は基本的に光の特性であるアナログ処理が主体であった。そのため、処理精度、汎用性、などに欠け、また、有効なインタフェース素子の欠如と相まって、大きく発展するに至らず、長い間、専用の情報処理システムに利用されるにすぎなかった。その間、半導体集積回路技術の驚異的な発展に伴い、デジタル処理全盛の時代を迎え、本来、光情報処理が主体となるべき画像処理の分野までが、デジタル処理の傘下に入っていた。一方、現在、進行しつつある高度情報化社会では、大容量情報の高速処理に対する要望は止まるところを知らず、常により高性能の計算機の出現に対する期待が続いている。しかし、驚異的なスピードで進歩してきた計算機の性能向上に対しても、ようやく、本質的とも思われる問題が認識されるようになってきた。たとえば、von Neumann bottleneck、信号通信帯域の制限、Bus congestion などの計算機の基本構成に関連した問題をはじめ、LSI のピン数の制約、熱除去、クロックスキューによる配線長の制約、信号線間の相互干渉などの実装上の問題が大きくクローズアップされている<sup>1)</sup>。

これらの問題を克服しうの一つのアプローチとして光の超並列情報処理能力を活かした情報処理システムが再び注目を浴びはじめるようになってきた。電子機器における、デジタル処理のアナログ処理に対する優位性は、現在では疑うことのない事実であり、本来なら当然アナログ装置であるべきものまでがデジタル装置に取って替わられているのが現状である。

デジタル処理がアナログ処理を凌駕した最も大き

な理由は 1) プログラムによる汎用処理が可能であり融通性に富む、2) 高精度演算が可能、3) 反復処理が可能、4) 雑音に強い、5) 集積化した素子の製作が容易、などであろう。

光を情報処理システムに利用する場合、システムの入出力部における役割は誰もが認めるところである。これを一步踏みこんで、演算部分にも光の並列性を利用しようという試みも考えられないわけではなかった。残念ながら、光には、計算機構成時に必要な論理素子、記憶素子が欠如していたため、光を利用してデジタル計算機を作ろうという試みは、最初の段階でつまづかざるを得なかった。

光を情報処理に使うときの特質は、1) 超並列・高速情報処理が可能、2) 信号の並列性を保ったままの処理が可能、3) 光の強度、位相、偏光などの現象を利用した多レベルの信号処理が可能、4) 信号相互間の干渉がない(インコヒーレント光の場合)、5) 帯域が広い、6) 単一の処理系で、連続信号、離散信号、アナログ信号、デジタル信号が扱える、ことなどである。

光の特質を保ちつつ精度の高いしかも汎用性のある並列デジタル処理を行うためには、論理演算や記憶用素子の欠如をいかに克服するかが大きな問題となる。

一方、最近にわかに活発になってきた光コンピューターの基礎研究の一つに従来アナログ的な性質の強かった光情報処理技術をいかにデジタル処理に利用するかという点に焦点を合せた分野がある。そして、現在、光を用いて並列デジタル演算を行うこともかなり試みられるようになってきた<sup>2)</sup>。たとえば、

- (1) 並列光論理演算
- (2) アナモルフィック光学系によるマトリックス、ベクトル計算<sup>3), 4)</sup>
- (3) 並列ストリック演算<sup>5)</sup>、剰余演算<sup>6)</sup>
- (4) 並列 A/D, D/A 変換<sup>7), 7)</sup>
- (5) 光インタコネクション<sup>8), 9)</sup>

† Two-Dimensional Optical Digital Computing—Optical Parallel Logic Gate and Optical Computer— by Yoshiki ICHIOKA (Dept. of Applied Physics, Faculty of Engineering, Osaka University).

†† 大阪大学工学部応用物理学教室

(6) 並列光コンピュータ

などの研究が精力的に行われている。本稿ではこのうち、特に光コンピュータの要素技術と目されている並列光論理演算法に的を絞って、現在までに行われている研究を概観する。そして、これらの演算法を基にして提案されつつある光コンピュータの構想を、2, 3 紹介する。

2. 並列光論理演算法

現在の計算機はほとんどが von Neumann 型であり、二値信号に対する演算を逐次実行する形態をとっている。その構成は、入出力部、演算部、記憶部と別れており、それぞれははっきりした機能分担を行っている。光を媒体とした計算機では、このような機能分けは必ずしも必要でない。たとえば、後述の空間光変調素子はこの3つの機能を一つの素子で有する。したがって、光コンピュータでは使用する素子により、従来の計算機とはまったく異なる情報処理システムが実現する可能性もある。ここでは光コンピュータの最も基本的な演算部である並列光論理演算について述べる。

並列光演算法は大きく分けて二つの流れがある。一つは、非線型素子、光演算素子、空間光変調素子などの光機能素子を用いた方法である。ほかは光の空間的伝播特性を活用した並列光論理演算法である。後者は光情報処理技術を基にした新しい並列デジタル光演算法を基本としている。

2.1 光機能素子を用いた並列光論理演算法

電子的スイッチングを利用したデジタル処理の基本は二変数二値論理関数である。AND, OR, NOT が実行できればほかのすべての論理は構成しうる。

AND, OR 論理を光で実行する場合、種々の非線型特性を利用する必要がある。光学的な二値信号は白黒(ネガ・ポジ)、空間位置、2色性、偏光特性、などの物理的性質を利用して表現する。

2.1.1 Tse コンピュータ<sup>10)</sup>

NASA で開発した Tse コンピュータは、Tse アンブ、ファイバ束、ファイバを板状に配列し適当な方向にカットしたファイバシートから成る光演算システムである。ファイバ束とファイバシートは論理アレイ間の光信号の伝送、結合、分岐を司る。図-1 に Tse アンブの構造、ファイバシートと Tse アンブを組み合わせた並列 XOR 論理演算ゲートを示す。

Tse アンブは微小な受光素子-発光素子を組み合わせたアレイ状の光-電気-光変換素子であり、ファイバ

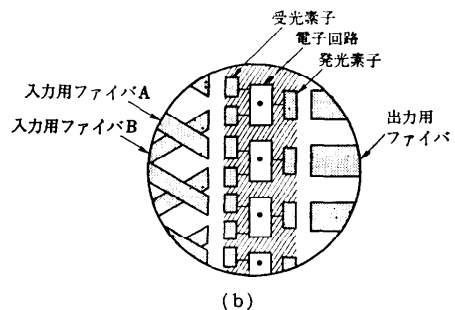
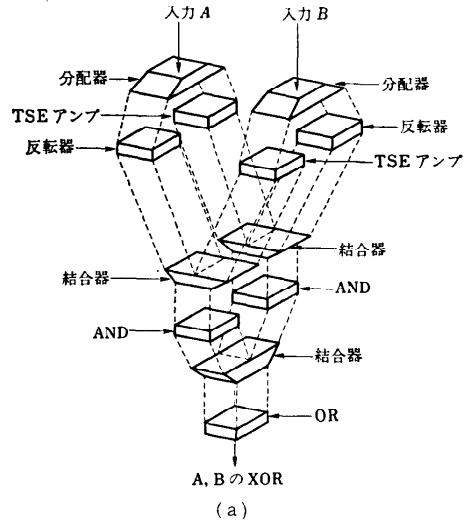


図-1 Tse アンブとその組合せによる OR ゲートの実現<sup>10)</sup>

でガイドされた光入力信号を一担電気信号に直し、出力端で発光素子により光信号として出力する。Tse コンピュータの欠点は、光-電-光変換が必要なこと、伝送に必要な大規模の光ファイバ束の作成が困難なこと、単一の論理演算実行に種々の素子の組み合わせが必要なことなどである。しかし、Tse コンピュータは光による並列デジタル演算の概念を提示した点で評価されるべき提案であった。図-2 はこの Tse コンピュータの考え方を基に描いた光コンピュータの構想図である<sup>11)</sup>。前処理部では入力信号(画像)の幾何学的形状の規格化、輝度の規格化、中間調画像に対する並列 A/D 変換などを行う。演算部では入力像と参照像の並列論理演算や種々の演算を行う。演算は光の伝播速度で実行され出力はメモリに記憶される。各演算はプログラムによって指定、実行され、出力は画像として得られる。このシステムは構想のみで実現されなかったが、光コンピュータのあるべき姿と必要なシステム機能を

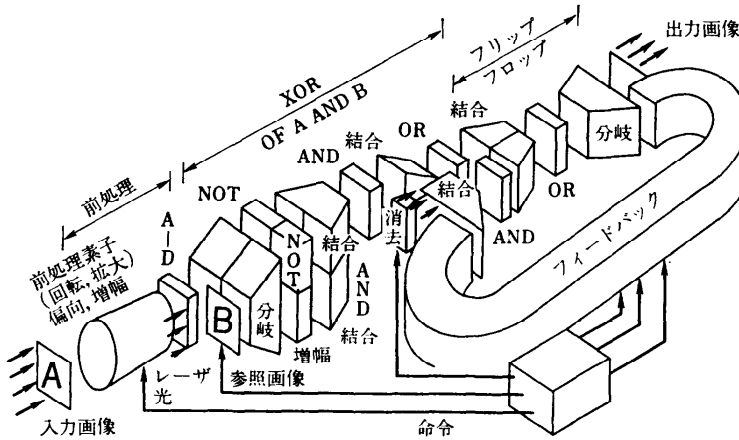


図-2 Tse アンプを用いた並列デジタル光コンピュータの構想<sup>11)</sup>

たぐみに描いてある。特にフィードバック系の利用、プログラムによる並列演算の考え方は後でのべる光演算システムにも踏襲されている重要な考え方である。

2.1.2 ファイバレーザプレート、面発光レーザを用いた並列光論理演算<sup>12)-14)</sup>

ファイバレーザの入力光信号に対する急峻な発光閾値特性と発振遅延特性を利用すると非線型処理が可能である。このようなファイバレーザを束状に集めたファイバレーザプレートを用いると画像入力に対する各種論理演算、レベルスライス、A/D変換などの並列デジタル演算ができる。中間調を持つ入力画像を照射するとあるレベル以上の輝度を持つ画像の部分だけ発振し、閾値処理出力像が得られる。二つの二値画像を入力として照射すると、各入力像の照度値に応じてANDやOR演算が実行できる。またファイバレーザでは入力光量による発振の遅延がある。この特性と出力側に高速シャッタをおいて透過光量を制御すると、並列レベルスライス、NOT演算、XOR演算などができる。この素子は、入力光と出力光の波長が異なる、効率が低く大出力の光源が必要、サイクルタイムが長いなどの欠点があったため、その後、光演算デバイスとしてはあまり進展していない。

これらの欠点を除外するため、GaAs半導体薄膜を用いた光励起画像発振レーザが提案された<sup>14)</sup>。入力像は波長591nmの色素レーザで照明励起され、波長834nmの赤外レーザ光の画像発振が確認されている。この場合も入出力光の波長変換が問題となっている。

最近では、集積型の半導体光機能素子の研究が活発であり、集積型双安定半導体レーザ<sup>15)</sup>、光増幅機能素子<sup>16)</sup>などが発表されているが、本特集号の別稿で紹介

されているのでここでは割愛する。

2.2 空間光変調素子を用いた並列論理演算

光情報処理の発展を阻害した原因の一つに光の信号を効率良く記憶する素子の欠点があった。光演算用の記憶素子には光信号の並列記憶、読出、消去の三つの機能が不可欠である。空間光変調素子とはこの三つの機能を合わせ持つ並列記憶素子である。伝統的な銀塩乳剤は消去不能の材料であり、Read only

memoryの機能しか持たない。強誘電体結晶、液晶、サーモプラスチック、変形ミラー、などを用いた素子が代表的なものである。文献17)、18)にそれらの特性、構造、機能などがまとめられている。光入力、光出力方式のものが多いが、一般的に制御は電子的に行われる。電子ビーム入力、光読出方式のものもある。低電圧動作可能でμs以下の速い応答速度を持つ高分解能の空間光変調素子の開発が光コンピュータ実現の一つの鍵を握っている。

2.2.1 PROMを用いた並列光論理演算

PROM (Pockels Read-Out Optical Modulator) はBSO (Bi<sub>12</sub>SiO<sub>20</sub>)の光伝導性強誘電体結晶を絶縁層、透明電極などでサンドイッチした構造をもつ素子である。

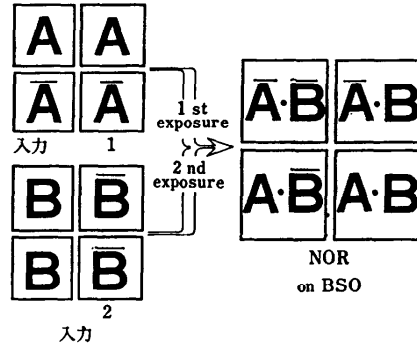
BSOの光伝導性と一次電気光学効果(ポッケルス効果)を利用して光変調を行う。入射光強度分布により結晶に加わる電圧が空間的に変化する。この状態で読出光を照射すると、その変化がポッケルス効果、すなわち屈折率変化として現れる。具体的には読出光の偏光面の回転を検光子を通して強度の変化として検出する。したがって、偏光面の回転角を入力光信号で制御して並列光論理演算を実行することができる<sup>19)-21)</sup>。一例として最近、われわれの研究室で行った一枚のPROMを用いて実行できる並列光論理演算法について述べる。

図-3に示すように、まず二枚の二値画像入力とそのネガ像を図のように配置し、青色光で多重露光してPROM上に書き込む。BSO素子上では二入力像の和の演算が行われる。ここで適当な閾値を設定すると、BSO素子上に保持された像は二入力像のNOR演算像

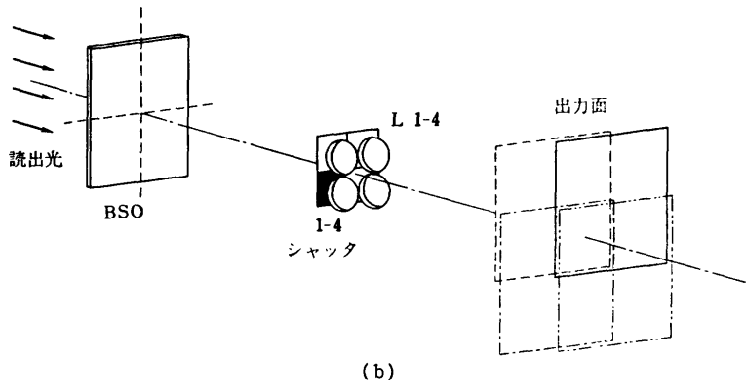
となる。出力像の読み出し光学系としては BSO 素子を中心とした多重結像光学系を用いる (図-3 (b))。読み出し光には赤色光を用いる。この際、各レンズには NOR 演算による像が図のように互いにシフトして重なるように調節する。多重像の中央の四つの像が重なっている領域に二入力画像の論理演算結果が出力される。四枚のレンズの前に独立に開閉可能なシャッタレイを取りつけ四つの NOR 演算の結果の組み合わせを制御する。シャッタの開閉の仕方は 16 通りあるので、16 種類の二変数二値論理関数の演算結果が像面上に得られる。図-4 は二つの二値入力像とその並列 AND の演算の実験結果である。PROM の数を増やすと入力像のネガ・ポジ配列などの手間ははぶくことができる<sup>21)</sup>。

2.2.2 液晶光変調素子を用いた並列光論理演算

液晶層、CdS 光導電体、絶縁層、透明電極などを組み合わせた液晶光変調素子がある。図-5 は代表的な素子の構造で液晶ライトバルブ (LCLV) と呼ばれている<sup>17)</sup>。入射光強度の空間分布は光伝導効果により液晶素子に印加する電圧に変化し、ツイステッドネマチック効果により液晶分子の配列が二次元的に変る。この状態で読み出し光 (直線偏光) を照射すると、その偏光状



(a)

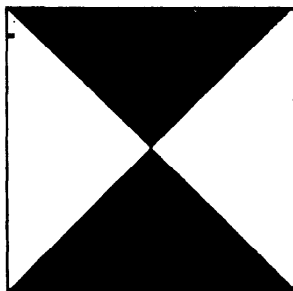


(b)

図-3 (a) 二つの二値入力画像の配列と BSO への書き込み像  
(b) 多重結像読み出し光学系<sup>20)</sup>

態が空間的に変調され、検光子に通して光の強度の変化として観測できる。

液晶素子の中には、入力光強度により、空間周波数の異なる回折格子が生成する VGM (variable grating mode) 素子もある<sup>22), 23)</sup>。この素子ではバイアス印加時に一定の回折格子が生じ、光照射による光伝導効果によって素子にかかる二次元的な印加電圧が変化



INPUT A  
(a)



INPUT B  
(b)



AND  
(c)

図-4 一枚の PROM を用いた並列光論理演算の例<sup>21)</sup>  
(a), (b) 二枚の二値入力値, (c) AND 演算結果

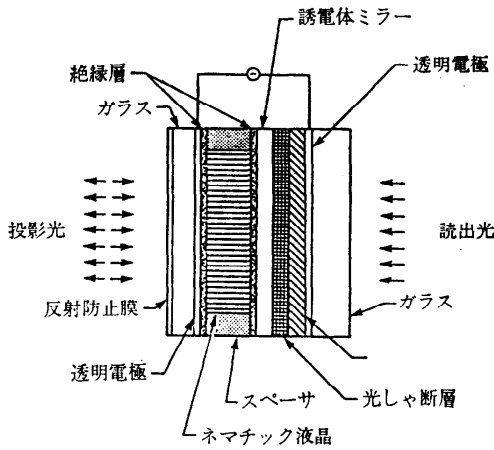


図-5 LCLVの構造<sup>17)</sup>

し、それに応じて空間周波数が変調される。図-6はこの素子を使って並列論理演算を実行する光学系である<sup>24)</sup>。入力像 A, B が VGM 素子に結像される。これをレーザー光で読出す。レンズの後側焦平面上には、入力像 A, B の強度に対応してフーリエスペクトルが生ずる。これを適当なマスクでフィルタリングすると所望の論理像をうる。

Athale らはネマチック液晶に透明電極と不透明の CdS 光導伝層対をアレイ状に配置した光並列素子を報告している<sup>25)</sup>。この素子では入力画像強度によってネマチック液晶に加わる電圧が変る。素子を用いた半加算器の実験が報告されている。中野は液晶ライトバルブを用いた簡単な光学系で実行可能な並列論理演算法を発表している<sup>26)</sup>。Fatehi らは、LCLV とかなり複雑な構成の光学系を用いて、16 種類の二変数二値論理を演算する方法を考案し、並列全加算器の光学的な実現方法を発表している<sup>27)</sup>。

LCLV は低電圧動作が可能で非常に扱いやすい素子であるが、応答時間が遅い、高性能の素子の開発が難しいなどの欠点がある。市販品も発売されているがきわめて高価である。

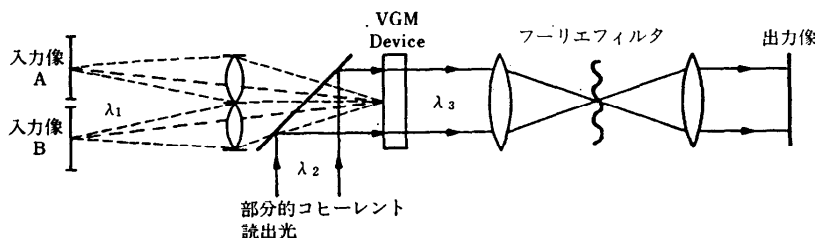


図-6 VGM を用いた並列光論理演算光学系<sup>24)</sup>

### 2.2.3 MSLM 空間変調素子と空間光変調管による並列論理演算

マイクロチャンネルプレートと BSO 結晶を組み合わせた MSLM (Microchannel Spatial Light Modulator) 空間光変調素子がある<sup>28)</sup>。この素子では入力光信号は光電面で電気信号に変換されマイクロチャンネルプレートで増幅される。この信号は LiNbO<sub>3</sub> 結晶などに印加され電気光学効果を生ずる。これを読出光で検出して変調光信号を得る。基本的には光-電-光変換を行っている。マイクロチャンネルプレートから放出される電子信号はグリッドで電子的に制御することもできる。この機能を用いると、画像のコントラストの逆転、閾値処理、論理演算などが実行できる。最近、イメージ管、マイクロチャンネルプレート、電気光学結晶を組み合わせた空間光変調管も開発されている<sup>29)</sup>。種々の非線型光演算に利用されている。

このほか、光機能素子を使った論理演算法として、光誘起屈折率変化を生ずる薄膜素子を用い、コヒーレント光強度入力に対し、干渉縞変位を出力とする並列論理演算<sup>30)</sup>、四光波混合による共役位相波を用いた三次元論理ラティスによる並列論理演算<sup>31)</sup>の構想などが発表されている。

### 2.3 空間的並列光論理演算法

2.1, 2.2 で述べた並列光論理演算の実行にはいずれも特別に作成された光機能素子が必要であった。二値論理演算の組み合わせを実行する計算システムをこのような素子の組み合わせで構築することはもちろんできる。しかし複雑な論理演算を実行するには多くの素子を組み合わせなければならず、光学系がきわめて煩雑になる。さらにこのような系では光の減衰の問題、システム駆動のためのプログラムの問題などを考慮する必要がある。これらの問題を避けるために、光の空間的情報伝達処理能力を活かした並列論理演算法が考えられる。伝統的な光情報処理技術の中から並列デジタル演算法を抽出することは光コンピュータのシステム化を考えた場合、望ましい方向である。以

下、光の空間情報処理能力を活かした 2, 3 の並列論理演算法を紹介する。

2.3.1 光論理関数発生器<sup>32)</sup>

1972 年 Maure は光の空間並列伝播特性を利用したユニバーサルな論理演算法を発表した。この方法は光の特性を利用して並列に多数の論理ゲートを実行し、マスクを取りかえて任意の論理ゲートを実行するものである。図-7 に光論理関数発生器の構成図を示す。装置は LED アレイ、受光素子アレイ、マスクが並行に配置された構成となっている。出力側では最低一對の受光素子が直列に接続されており、所望の論理演算結果を並列に電気信号として取り出す。LED アレイと受光素子アレイがそれぞれ  $m \times n$  個の素子から成っているとすると、 $(n \times m)^2$  本の光の経路ができる。この経路に  $m \times n$  個の開口をもつマスクを配置する。所望の論理演算は開口の組み合わせをかえたマスクを取りかえて実行する。LED アレイの発光状態を電氣的に制御するとさらに処理の自由度を増大させることもできる。出力信号は光信号でなく電気信号として取り出し、出力増幅器に接続したインバータで、正または負論理を選択する。この装置は、1) 非常に簡単な構成である、2) 無収差光学系である投影光学系を利用している、3) 特殊な光演算素子を必要としない、4) 単一の装置で任意の論理演算が実行できる、など、光の並列情報処理・伝送特性を有効利用した並列デジタル演算装置である。

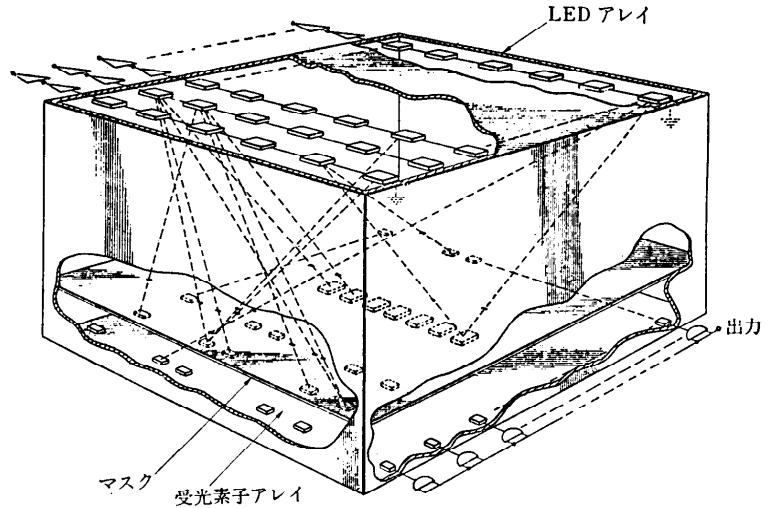


図-7 光論理関数発生器<sup>32)</sup>

2.3.2 相関光学系を用いた並列光論理演算

1982 年、われわれは相関光学系を用いて 16 種類の二変値二値論理関数を並列に実行する方法を提案した<sup>33)</sup>。

図-8 に簡単な相関光学系（インコヒーレント投影光学系）を用いた並列光論理演算法の原理図を示す。

二値入力画像 A, B は  $m \times m$  画素から成る。両画像の各画素値を図-8 の左下に示す方法で空間的に符号化する。画素値 1 または 0 に従って符号像は異なる。また、二画像の符号化像の方向は互いに直交するようにする。すべての画素に対し、符号化した後、二画像の対応する画素どおしが重なるように重畳する。特定

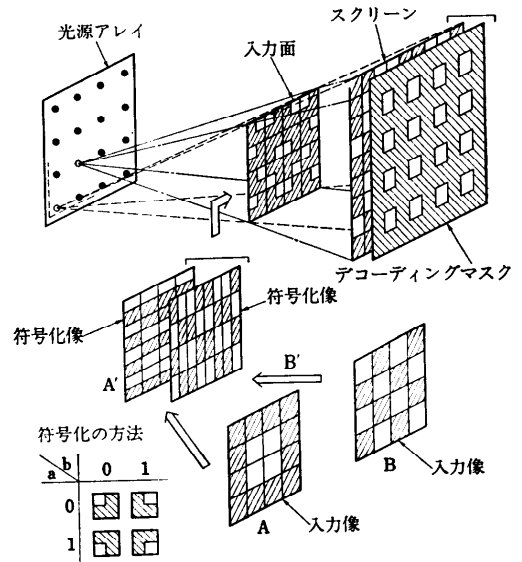


図-8 相関光学系（投影光学系）を用いた並列論理演算法の原理図<sup>33)</sup>

の画素に着目すると画像 A, B の値の組み合わせ (00, 01, 10, 11) にしたがって一面素区画の 1/4 区画のみが透明な符号化像となっている。この符号化像を入力面におき、四つ一組の点光源（LED アレイ）によって照明する。光源面、入力面、スクリーン面の幾何学的配置は、各点光源による投影像が上下、左右半画素区画だけずれて重なるように設定する。得られた投影像の重なりは着目する画素区画の中央のみを検出できるような格子窓の並んだ復号マスクを用いて、復号、標本化する。

復号マスクを通して観測した像は二変数二値論理関数の演算結果となっている。この演算結果は画像を構成する全画素に対し光の明暗信号、すなわちパターン論理として得られる。この論理ゲートは SIMD で動作し、画像を構成する全画素に対し完全並列、かつ独

立に作動する。四つの LED からなる光源アレイの点滅の組み合わせは 16 通りあり、これによってすべての二変数二値論理関数が実行できる。図-9 は 64×64 画素から成る二つの二値入力画像と AND, OR, XOR 論理演算の実験結果である。

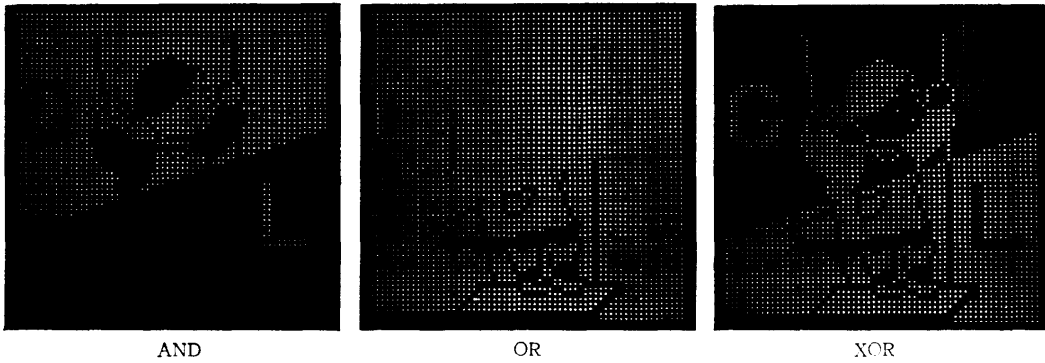
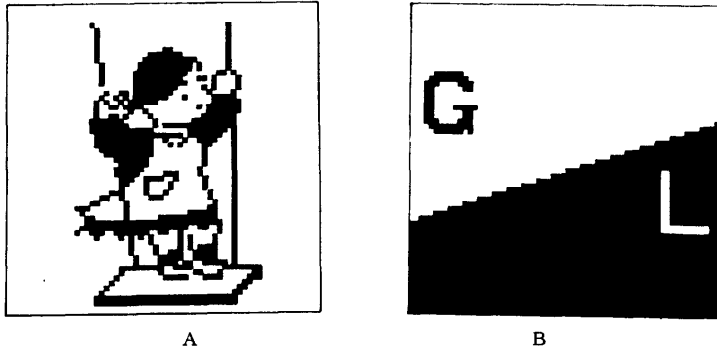


図-9 並列光論理演算法によるパターン論理演算

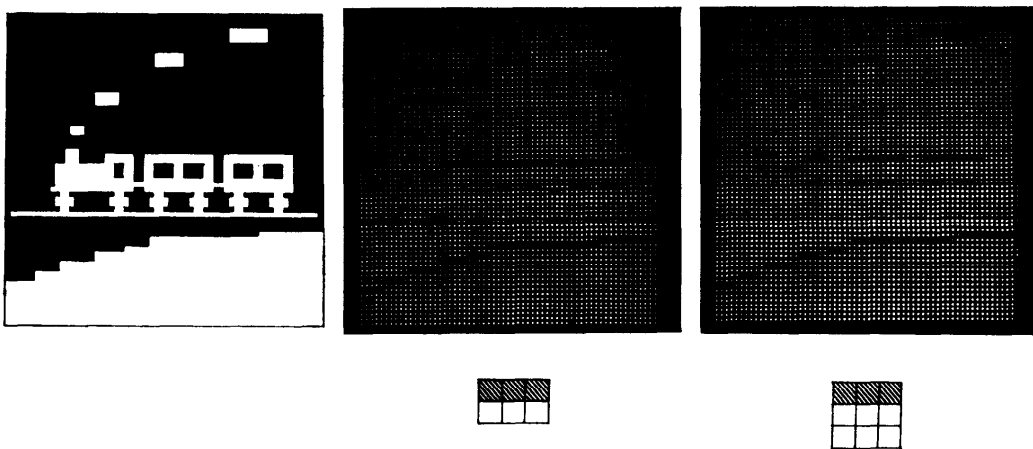


図-10 並列光演算法を用いたテンプレートマッチング処理  
最左：入力像，中，右：写真下に示すテンプレートと一致した画素を Dark true logic で表示したマッチング像

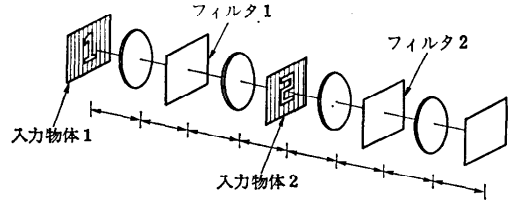
この論理演算法を用いると並列シフト演算も簡単に実行できる。これは LED アレイを横または縦方向にシフトすることにより実現できる。図-10はこの性質を利用して行った並列テンプレートマッチング処理の実験例である。写真下に示したテンプレートのある位置が暗信号として検出されている。

この並列論理演算はすべての相関光学系によって実行可能である。重要なことはこの方法が PLA (Programmable Logic Array) と密接な関係をもっておりしかもそれが並列に実行されることである<sup>34)</sup>。この性質を利用した並列光演算システムについては 3.3 で述べる。

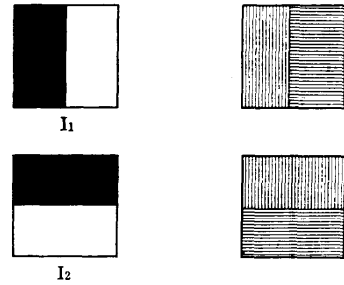
### 2.3.3 空間周波数フィルタリングを用いた並列光論理演算法

図-11(a)のようなコヒーレント光学系と $\theta$ 変調の概念を用いても並列論理演算が実行できる<sup>35)</sup>。 $\theta$ 変調とは入力画素の各濃度値を個々の方向を有する回折格子で変調、符号化してコヒーレント光学系の入力像とし、スペクトル面に方向性をもって分布した島状のスペクトル成分の組み合わせのみを通過、再回折させて、変換像を得る技術である。主として画像の A/D 変換、カラー画像の退色効止を目的とした符号化像による保存などに利用されている。

図-11(b)に示す二枚の二値画像を考え、それぞれを暗部(0)は縦方向の、明部(1)は横方向の回折格子で符号化する。ただし回折格子の空間周波数は同一のものにしておく。物体1と物体2は図のように共役の位置に配置する。フィルタ面1に現れる物体1のスペクトルはモアレをさけるためサイドバンドのみを通過させる。フィルタ面2では物体1,2の各スペクトルとその組み合わせ(差または和)の周波数成分のスペクトルが現れる。そこで適当な組み合わせの成分のみを通過させるフィルタをフィルタ面2に置く。透過させるスペクトル成分の組み合わせを変えることにより、16種類の変数二値論理関数の演算結果がパターン論理として像面で得られる。図-12は二つの二値入力



(a)  $\theta$  変調を用いた並列論理演算光学系<sup>35)</sup>



(b) 入力像の回折格子の方向性を利用した符号化  
図-11

像1と2の論理演算結果 1 AND 2, 1 OR 2, 1 EQV 2 で結果は Bright true logic で表されている。

## 3. 光コンピュータの構成

### 3.1 基本構成

光の並列特性を利用した光コンピュータの構成はどのようなものであろうか。図-13はフォンノイマン型計算機の基本構成と、光コンピュータがとるであろうノンフォンノイマン型計算機の基本構成である<sup>3)</sup>。前者はCPUの中にすべての論理演算ユニットが含まれており、メモリとは完全に分離されている。CPUはアドレッシングユニットを介してメモリをアクセスしメモリの内容を逐次読出してCPUに印加する。そのため信号伝送路は少数で済む。しかし、演算能力を高めるためには、クロックサイクルの短縮、配線の短縮などが必要であるが、演算速度の高速化には限界がある。これが、von Neumann bottleneck である。図-



図-12  $\theta$  変調を用いた並列論理演算<sup>35)</sup>

13(a)の構成は並列光コンピュータになじむものではない。この欠点を除外したのが(b)のノンフォンノイマン型計算機である。CPUは直接メモリを並列アクセスし、メモリ内のデータを並列にCPUに転送する構成をとる。入出力装置はCPU



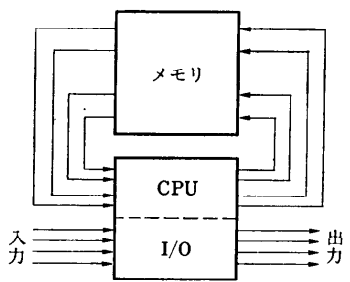
のごく近くにあってもよいし、(c)のように切り離すこともできる。この図に示すように、光コンピュータでは局所的なアドレッシングの概念だけでなく大局的な信号伝送、受授、処理が重要となる。

光コンピュータに望まれる機能としては

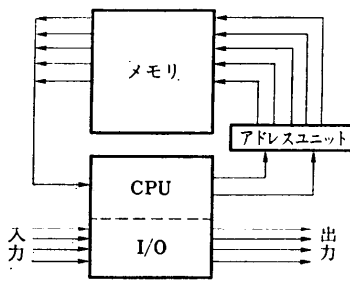
- (1) 並列デジタル光演算が高速にできること
- (2) 配列を保ったままの演算が可能なこと
- (3) プログラムによる反復計算ができること一汎用性、融通性

用性、融通性

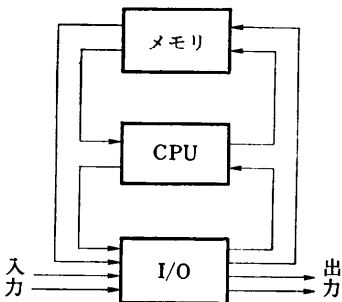
- (4) 精度の保持
- などが要求される<sup>36)</sup>。



(a)



(b)



(c)

図-13 (a) フォンノイマン型計算機の基本構成  
(b), (c) ノンフォンノイマン型計算機の基本構成

### 3.2 光 Interconnection と順序論理プロセッサ

計算機の CPU は論理ゲートとそれらの間の結線の集合体である。光コンピュータでは各ゲート間の信号の伝送はもちろん、CPU とメモリ、I/O 間の伝送も完全並列に実行する必要がある。並列計算機では信号の伝送に線が必要である。プロセッサの並列度が上がるほど配線が複雑になり、それに要する費用も高くなる。

光コンピュータの一つの利点は並列配線に光の自由空間伝播特性が利用できることである。そしてこの特性をプログラムで可変にできれば、比較的簡単な構成をもつシステムで多機能の並列演算を実行させることも夢でなくなる。光のこの特性はゲート間、素子間、プロセッサ間に用いることができる<sup>37)</sup>。このような光による Interconnection は、空間的に無限本の配線が可能、各線間の相互干渉がない、光速で実行できる、など光の最もよい特長を利用している。

図-14 は自由空間結合素子を用いたノンフォンノイマン型光コンピュータの基本概念図である<sup>37)</sup>。空間光変調素子を使えば入出力部、論理演算部の区別はなくなる。CPU で計算された並列光信号は順序論理実行のために並列に入力側にフィードバックされる。

自由空間結合素子の動作を動的に制御できれば、フィードバックされた信号は、所望のメモリ要素にある信号との演算に利用され、新しい演算結果を出力する。

図-15 は並列順序論理が実行できる並列光演算システムの具体的な構成図である<sup>37)</sup>。この系ではゲートアレイとデータの記憶に LCLV を利用しており、自由空間結合素子として計算ホログラムを利用している。系は光学的なフィードバックループを有しており、読出光 (中間出力光) はフィードバックして別のホログラムを照射して新しい演算を順次実行していく。この

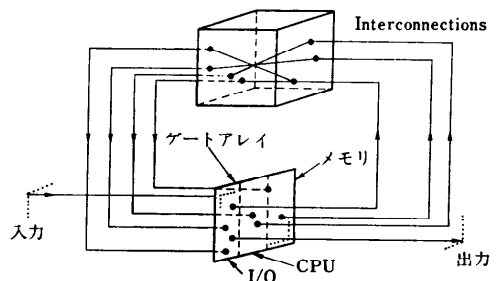


図-14 自由空間結合素子を用いた順序論理プロセッサの概念図<sup>37)</sup>

システムが実行できるのは、画像処理でよく知られているセルラーロジック<sup>38)</sup>である。このロジックは、光学的に並列に実行するのに適している。したがって、ここで示したような光コンピュータの最も興味ある応用対象はデジタル画像処理や画像理解の分野である。

**3.3 並列光演算システム：  
OPALS<sup>39), 40)</sup>**

OPALS (Optical Parallel Array Logic System) は空間的並列光論理演算法と空間アレイロジックの概念を結合した汎用並列光演算システムである。

以下簡単に OPALS の概念とその構想について述べる。

**3.3.1 並列光論理演算法と空間アレイロジック**

アレイロジックは LSI メモリ素子のような規則正しい構造を持つ回路素子を用いて、複雑な機能を有する回路を作成する技術である。アレイロジックを用いると、任意の論理関数が AND アレイと OR アレイの二つのアレイ構造の交点パターンの定義で実現できる。図-16(a)は半加算器のランダムロジックによる表現、(b)は2ビットデコーダを用いたアレイロジックによる表現である。上の破線で囲んだ部分が AND アレイであり、下の破線で囲んだ部分が OR アレイである。

2.3.2 で述べた相関光学系を用いた空間的並列光論理演算法の機能はアレイロジックにおける2ビットデコーダを用いたロジックアレイの機能と密接な対応関係がつく。すなわち、二つの入力画像の空間的な符号化は2ビットデコーダの機能に、光源の発光パターンの組み合わせは AND アレイの一つの積項線(図の縦線)の交点の組み合わせに対応する。この対応関係が入力画像の全画素に対して成り立っているところが重要な要点である。図-17 は二入力画像の対応画素値がともに1である場合の AND 演算出力とそのアレイロジックによる表現である。ここでの演算の出力は dark true logic で得られる。このように並列に動作するアレイロジックを電子的なそれと区別するためにわれわれは空間アレイロジックと呼んでいる<sup>40)</sup>。

アレイロジックを用いるとランダムロジックで構成

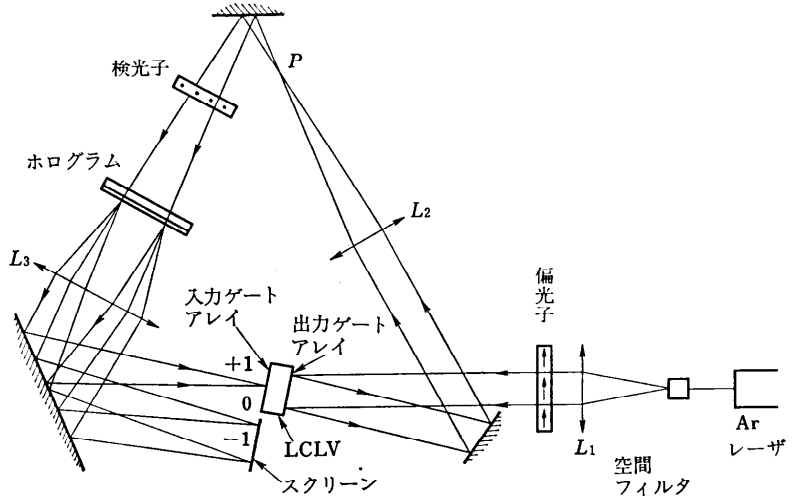
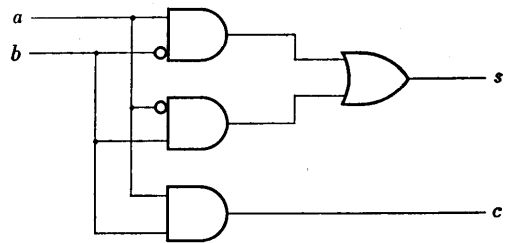
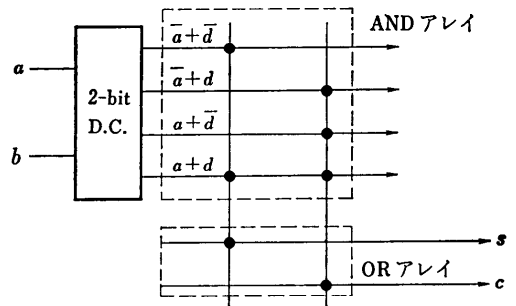


図-15 並列順序論理プロセッサ<sup>37)</sup>



(a) 半加算器のランダムロジックによる回路構成



(b) アレイロジックによる構成<sup>34)</sup>  
図-16

されるデジタル回路をアレイ状に並んだ信号線の交点の組み合わせにより表現でき、回路構成をきわめて簡素化することができる。この概念は、空間アレイロジックの場合にも適用することができる。図-18 はランダムロジック回路で構成する並列光演算回路と、同一機能を有する回路を空間アレイロジックで実現する場合の概念図の比較である。前述の光機能素子を用いて種々の論理演算を実行する回路をランダムロジック

で実現すると膨大な数の素子が必要であるのに対し、空間アレイロジックを用いると Operation kernel (光源アレイの点滅状態やシフトなど) の変換だけですむので、簡単なシステム構成で同一機能を持つ回路を作成することができる。複雑な機能を持つ並列光演算

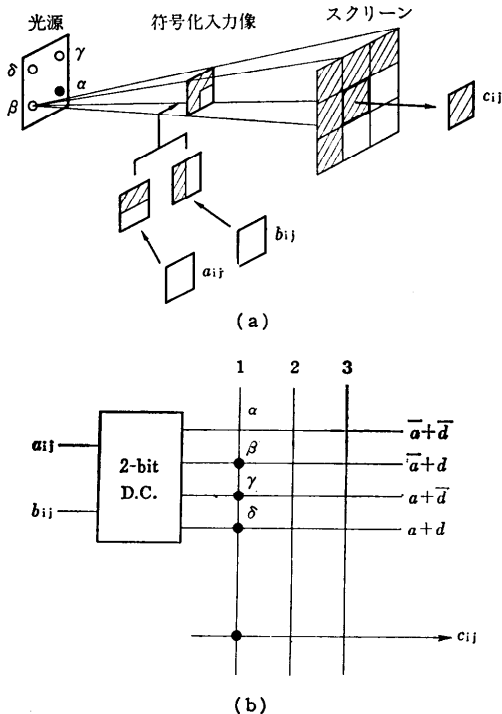


図-17 並列光論理演算法による特定画素に対する AND ゲートの実行(a)とアレイロジックによる表現 (b)<sup>3)</sup> (出力は dark true logic で表現)

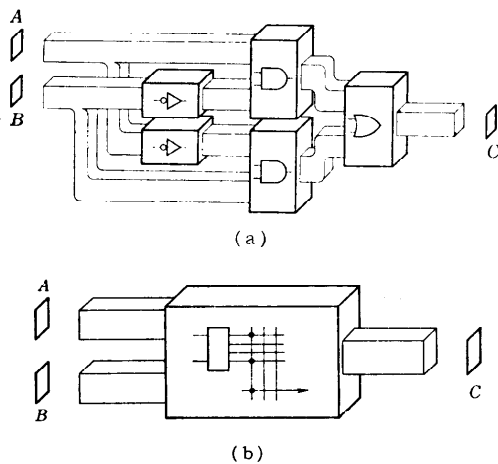


図-18 同一機能を持つ光演算回路の(a)ランダムロジックによる構成と(b)空間アレイロジックによる構成

システム実現の一方法としてこのような空間アレイロジックの概念を応用することは得策であろう。

### 3.3.2 並列光演算システム: OPALS の構想

OPALS は空間的並列光論理演算法と空間アレイロジックの概念を結合した近傍画素論理演算システムである。図-19 にその概念図を示す。

入力画像は符号器で符号化され、相関光学系を中心とした処理系で空間アレイロジックの概念を基に並列近傍画素間演算を実行する。並列演算結果はフィードバック光学系内で一旦ラッチされる。この中間処理結果と入力像は再度、符号器を通して処理装置に転送され、並列近傍画素間演算を実行する。処理結果はフィードバックループの途中からモニタする。所望の結果が得られると光学的に画像出力する。OPALS はこのように反復処理が可能であり、プログラムによる汎用の並列デジタル光演算が可能である。

OPALS では被処理像の画素単位の演算にアレイロジックが適用される。OPALS で実行できる処理は、並列論理演算、並列シフト演算、近傍画素間演算であり、それらを組合せてセルラーロジックなどの演算も簡単にできる。

OPALS の具体的なシステム化の方策としては、電子技術を併用したハイブリッド型、フィードバック光学系、相関光学系を中心とした光学主導型などが考えられる。図-20 は光学主導型として考えられる一つの具体的なシステム構成のブロック図である<sup>4)</sup>。この図は、高速応答特性を持つ空間光変調素子、並列ラッチ素子などの未開発の光機能素子の利用を前提として描いてある。このシステムでは相関光学系の瞳関数をプログラムによって動的に制御して、Operation kernel と並列光 Interconnection の状態を刻々と変えて任意の並列デジタル光演算を実行することができる。シ

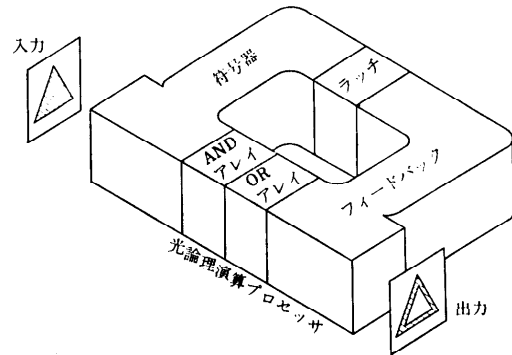


図-19 OPALS の概念図<sup>4)</sup>

ミュレーション用のハイブリッド型システムを作成して、画像の4連結点抽出処理の実験を行った結果、OPALSが予想通りの機能を持つことが確認されている<sup>41)</sup>。

#### 4. おわりに

並列デジタル演算方式のうち、本稿では特に並列光論理演算法に的を絞って概説し、さらに光コンピュータの基本構成に

関する2,3の構想を紹介した。光コンピュータを目指した基礎研究が最近、活発になっている。特に光を用いた情報処理では、論理素子、記憶素子の欠如が早くから認識されていたため、デバイスサイドからの研究が盛んである。しかし、新しい光論理演算素子、記憶素子が開発されても単にそれらを現在の計算機を構成している電子的な素子と置換するだけでは意味がない。また、せっかく光の特性を利用するので光-電気-光変換を用いる素子も、効率、演算速度の点からあまり望ましくない。また、光の並列情報処理・伝送能力を活かすには、光通信のように光をファイバや導波路に閉じこめるのもあまり得策とは思えない。光による並列 Interconnection は従来、結線によって信号伝送していた電子装置とは異なる新しい発想の情報処理システムの構築に役立つと思われる。これらの点を鑑みれば、新しい光コンピュータは従来の計算機とはかなり形態の異なったシステム構成をもつものになるであろう。この意味からもシステムサイドからの基礎研究は重要である。さらに、歴史を有する光情報処理技術をいかに新しいシステム構築に反映させるかも大切である。

光の並列情報処理能力はきわめて大きい。したがって光コンピュータの実現にはこの能力を引き出すための、制御方式、並列デジタル演算方式、並列計算システムの方式の研究が一層望まれる。光コンピュータの研究は、アメリカ、日本を中心にここ2,3年急速に進歩しつつあり、初代の光計算システムが近い将来実現するのも夢でなくなってきた。

しかし、その実現への道のりは予想以上に険しいと思われる。なぜなら光コンピュータの実現には単に経済的な問題の解決だけでなく、光コンピュータ全体に対する深い洞察と数多くの新しい発想が要求されるか

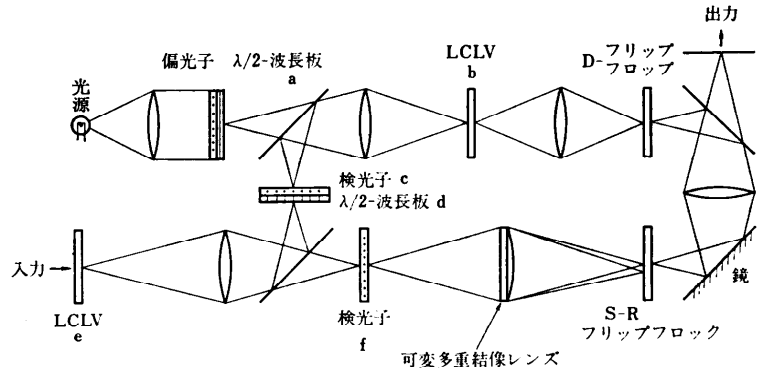


図-20 OPALSの光学的な実現可能システム<sup>41), 42)</sup>

らである。

#### 参考文献

- 1) プロジェクト, A. J.: サイエンス, Vol. 13, No. 9, pp. 13-25 (1983).
- 2) Lee, S. H.: Optical Information Processing, Fundamental, ed. S. H. Lee, Springer-Verlag, Berlin, p. 261 (1981).
- 3) Rhodes, W. T. and Sawchuk, A. A.: Optical Information Processing, Fundamental, ed. S. H. Lee, Springer-Verlag, Berlin, p. 69 (1981).
- 4) Goodman, J. W. and Woody, L. M.: Appl. Opt., Vol. 16, No. 10, pp. 2611-2612 (1977).
- 5) Kung, S. Y.: Proc. IEEE, Vol. 72, No. 7, pp. 867-884 (1984).
- 6) Huang, A. et al.: Appl. Opt., Vol. 18, No. 1, pp. 149-162 (1979).
- 7) Tsunoda, Y. and Goodman, J. W.: Appl. Opt., Vol. 16, No. 10, pp. 2607-2608 (1977).
- 8) Sawchuk, A. A. and Strand, T. C.: Proc. IEEE, Vol. 72, No. 7, pp. 758-779 (1984).
- 9) Goodman, J. W. et al.: Proc. IEEE, Vol. 72, No. 7, pp. 850-866 (1984).
- 10) Schaefer, D. H. and Strong III, J. P.: Proc. IEEE, Vol. 65, No. 1, pp. 129-138 (1977).
- 11) 世古淳也: 情報処理, Vol. 22, No. 11, pp. 1037-1048 (1981).
- 12) Seko, A. and Sasamori, A.: Appl. Opt., Vol. 18, No. 12, pp. 2052-2055 (1979).
- 13) Seko, A., Kobayashi, H. and Shimizu, K.: Appl. Phys. Lett., Vol. 37, No. 3, pp. 260-262 (1980).
- 14) Seko, A. and Nishikata, M.: Appl. Opt., Vol. 16, No. 5, pp. 1272-1274 (1977).
- 15) 奥村謙一郎, 小川 洋, 伊藤弘昌, 稲場文男: 電子通信学会論文誌, J 66-C, No. 5, pp. 393-400 (1983).
- 16) Sasaki, A. et al.: IEEE Trans. Electron Devices, ED-31, No. 6, pp. 805-811 (1984).

- 17) Knight, G. R.: *Optical Information Processing, Fundamental*, ed. S. H. Lee, Springer-Verlag, Berlin, p. 111 (1981).
- 18) 窪田恵一, 西田信夫: *光学*, Vol. 14, No. 1, pp. 19-28 (1985).
- 19) Bartholomew, B. and Lee, S. H.: *Appl. Opt.*, Vol. 19, No. 2, pp. 201-206 (1980).
- 20) 小野修司, 一岡芳樹: 第 45 回応用物理学会学術講演会講演予稿集, p. 79 (1984).
- 21) 岡本和弘, 峯本 工, 宮本 敬: 同上 p. 78 (1984).
- 22) Grinberg, J. et al.: *Opt. Eng.*, Vol. 14, No. 2, pp. 217-275 (1975).
- 23) Soffer, B. H. et al.: *Mol. Cryst. Lic. Cryst.*, Vol. 70, No. 1, pp. 145-161 (1981).
- 24) Tanguay Jr., A. R. et al.: *Opt. Eng.*, Vol. 22, No. 6, pp. 687-694 (1983).
- 25) Athale, R. A. and Lee, S. H.: *Opt. Eng.*, Vol. 18, No. 5, pp. 513-517 (1979).
- 26) 中野正和: 第 29 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, p. 84 (1982).
- 27) Fatehi, M. T., Wasmundt, K. C. and Collins, Jr. S. A.: *Appl. Opt.*, Vol. 20, No. 13, pp. 2250-2256 (1981).
- 28) Warde, C. et al.: *Appl. Opt.*, Vol. 20, No. 12, pp. 2066-2074 (1981).
- 29) 原 勉, 杉山 優, 鈴木義二: 第 44 回応用物理学会学術講演会, 講演予稿集, p. 4 (1983).
- 30) 今井 洋, 大塚喜弘: 第 32 回応用物理学関係連合講演会, 講演予稿集, p. 52 (1985).
- 31) 丹野直弘: 同上, p. 53 (1985).
- 32) Maure, D. R.: U. S. Patent 3 680 080 (July 25, 1972).
- 33) Tanida, J. and Ichioka, Y.: *J. Opt. Soc. Amer.*, Vol. 73, No. 6, pp. 800-809 (1983).
- 34) Ichioka, Y. and Tanida, J.: *Proc. IEEE* Vol. 72, No. 7, pp. 787-801 (1984).
- 35) Bartelt, H. and Lohmann, A. W.: *J. Opt. Soc. Amer. A*, Vol. 1, No. 9, pp. 944-951 (1984).
- 36) 一岡芳樹: 第 15 回画像工学コンファレンス論文集, p. 37 (1984).
- 37) Jenkins, B. K. et al.: *Appl. Opt.*, Vol. 23, No. 19, pp. 3455-3464 (1984).
- 38) Preston, K. et al.: *Proc. IEEE* Vol. 67, No. 5, pp. 826-856 (1979).
- 39) 谷田 純, 一岡芳樹: 第 15 回画像工学コンファレンス論文集, p. 303 (1984).
- 40) Tanida, J. and Ichioka, Y.: *Technical Digest of Topical Meeting on Optical Computing*, March 18-20, 1985, Incline Village, NV. pp. TuA 4-1 (1985).
- 41) 谷田 純, 一岡芳樹: 第 32 回応用物理学関係連合講演会予稿集, p. 51 (1985).

(昭和 60 年 4 月 15 日受付)