

Title	並列光演算システムの構成技術に関する研究
Author(s)	宮崎, 大介
Citation	大阪大学, 1993, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.11501/3072872">https://doi.org/10.11501/3072872</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

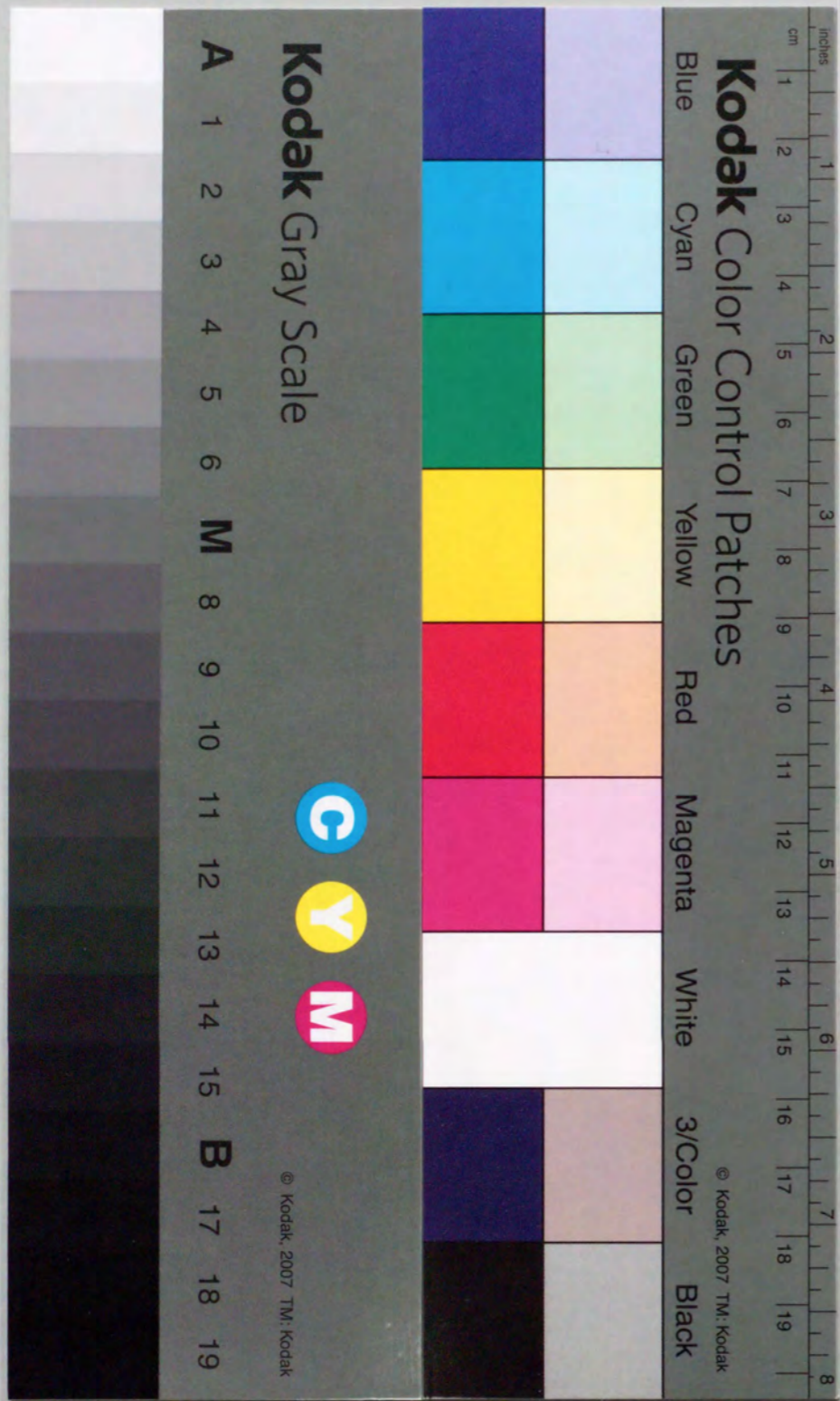
<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

並列光演算システムの構成技術に関する研究

1993年

宮崎大介



①

# 並列光演算システムの構成技術に関する研究

Study on Construction of Optical-Parallel-Computing Systems

1993年

宮崎大介

Daisuke MIYAZAKI

## 目次

緒論	1
第1章 モジュール統合型光演算システム	4
1.1 緒言	4
1.2 並列デジタル光演算技術	4
1.2.1 離散相関演算	4
1.2.2 光アレイロジック	5
1.2.3 並列光アレイロジックシステム：OPALS	7
1.3 モジュール統合型光演算システム	8
1.3.1 並列光演算システムの高機能化における問題点	8
1.3.2 モジュール統合型光演算システムの基本構成	8
1.3.3 モジュール統合型光演算システム開発における課題	10
1.3.4 光演算モジュール	10
1.3.5 光接続モジュール	11
1.3.6 モジュール間接続ネットワークユニット	15
1.4 結言	16
第2章 光・電子複合型並列光アレイロジックシステム	17
H-OPALSの試作	17
2.1 緒言	17
2.2 光・電子複合型並列光アレイロジックシステム：H-OPALS	17
2.3 H-OPALS 2	18
2.3.1 基本構成	18
2.3.2 多重ピンホール相関器	19
2.3.3 電子処理部	19
2.3.4 実験結果	21
2.4 H-OPALS 3	22
2.4.1 基本構成	22
2.4.2 カーネル選択型コヒーレント相関器	22
2.4.3 電子処理部	25
2.4.4 実験結果	25
2.5 H-OPALS 162	29
2.5.1 基本構成	29
2.5.2 プリズムアレイ多重結像相関器	30
2.5.3 電子処理系	31
2.5.4 実験結果	35
2.6 考察	39

2.7 結言 .....	41
<b>第3章 反射型多重投影相関器 .....</b>	<b>42</b>
3.1 緒言 .....	42
3.2 反射型多重投影相関器 .....	42
3.2.1 多重投影光学系とシステム集積化における問題点 .....	42
3.2.2 反射型多重投影相関器の原理 .....	43
3.3 原理検証実験 .....	46
3.4 処理画素の高密度化の検討 .....	46
3.4.1 回折による処理能力の制限 .....	49
3.4.2 ビームスプリッタの利用による画素密度の向上 .....	50
3.4.3 マイクロレンズアレイの利用による画素密度の向上 .....	51
3.5 結言 .....	54
<b>第4章 カーネル分割処理による離散相関器の拡張 .....</b>	<b>56</b>
4.1 緒言 .....	56
4.2 瞳分割離散相関光学系 .....	56
4.3 離散相関演算におけるカーネル分割 .....	58
4.4 多重離散相関器 .....	60
4.5 多段離散相関器 .....	60
4.6 多段離散相関器の設計例と能力評価 .....	63
4.7 結言 .....	66
<b>第5章 バンヤンネットワークの光学的実現法 .....</b>	<b>67</b>
5.1 緒言 .....	67
5.2 バンヤンネットワーク .....	68
5.3 サニヤックインバータを用いたバンヤンネットワーク .....	69
5.3.1 バタフライ接続の実現 .....	69
5.3.2 スイッチングノードの実現 .....	71
5.4 バンヤンネットワークの一体構成の検討 .....	72
5.5 実験結果 .....	73
5.6 結言 .....	76
<b>第6章 反射型ブロック光学系 .....</b>	<b>77</b>
6.1 緒言 .....	77
6.2 3次元光学系実装技術 .....	77
6.3 反射型ブロック光学系の原理 .....	78
6.4 応用例 .....	79
6.4.1 マイクロ/マクロハイブリッド光接続 .....	79

6.4.2 離散相関器に基づくデジタル光演算モジュール .....	80
6.5 実験結果 .....	82
6.6 考察 .....	83
6.6.1 偏光ビームスプリッタの入射角依存性 .....	83
6.6.2 位置合わせ・調整方法 .....	85
6.6.3 迷光 .....	85
6.7 結言 .....	86
総括 .....	87
謝辞 .....	90
付録A 偏光ビームスプリッタにおける反射率・透過率の入射角依存性 .....	91
参考文献 .....	94
著者発表論文 .....	99

## 緒論

光情報処理技術は、次世代の情報処理システムの開発において非常に魅力のある研究対象である。なぜなら、情報媒体としての光には、並列性、無誘導性、高帯域性、非干渉性等多くの優れた特性があり、この特性を利用すれば現存する電子コンピュータの処理能力をはるかに凌駕する大容量情報処理システム「光コンピュータ」の実現が期待できるからである[1-6]。大容量情報処理システムの開発は様々な分野から要請されている。例を挙げると、衛星画像や医用画像等の膨大な画像データの処理；人工知能開発における大容量知識ベースの処理；複雑な物理現象をシミュレートする計算科学；実世界の膨大な情報を実時間で処理するリアルワールドコンピューティングなどがあり、いずれも現存するコンピュータシステムで処理するには能力が不足している[7-9]。電子システムは大容量情報処理の需要に答えるべく進歩を続けているが、近年、需要の伸びに対する処理性能の伸びが鈍化してきている[10]。特に、半導体集積化の技術が進むにつれて、配線容量の増加による遅延時間・消費電力の増加、2次元面内の配線の制限、微細化・高速化にともなうノイズ耐性の低下などの電氣的な配線に起因する能力の制限が顕著になってきた。光情報処理技術は、この配線に関わる能力の制限を解決することが期待されている。光の高速伝送能力を活かした光通信は実用化され、また、コンピューティングシステム内の装置間・モジュール間信号伝送に光を用いる光接続技術も実用段階に入ろうとしている[11]。光演算システムの研究は、さらに演算の部分にも光を導入し、光の特性を十分活かした高性能コンピュータを実現することを目標としている。

これまでの光演算システムの研究により、演算方式、光デバイス、アーキテクチャ、システム構成法、実装技術、並列プログラム法等が検討され、着実な成果が上がっている。演算原理としては、データを2次元2値離散画像上のパターン群で表し、並列デジタル演算を実行する光演算技術が提案されている。代表的なものとしては、光アレイロジック[12]、記号置換論理[13]、2値画像代数[14]、画像論理代数[15]等が考案されている。これらの技術は、離散相関演算等の光情報処理手法を有効に利用して、

- 1) 大容量情報の一括並列処理、
- 2) 複雑な画素間接続の実現、
- 3) 柔軟性の高いデジタル演算の実行

といった優れた特長を持つ。

これらの光演算技術の有効性を確認するためには、その実行システムを構成することが不可欠であるが、コンピューティングシステムとして完全な形で動作しているものは報告されていない。しかし、近年の光エレクトロニクス技術の進歩により様々な光機能素子[16-20]が利用できるようになり、実験システムが試作されてきている。例としては、OPALS (optical parallel array logic system)[21]、DOCIP (digital optical cellular image processor)[22]、O-CLIP (optical cellular logic image processor)[23]、レギュラー接続プロセッサ[24]などがある。これまでの試作システムは、提案している光演算システムの部分的な機能のみを実現しているものが多い。また、デバイスやシステム構成の未熟さから、演算

の自由度、並列度や速度の点で十分な性能を持つとは言えない。したがって、完全なシステムの実現を目指して、問題点の検討と要素技術の向上のためにさらに試作研究を行う必要がある。

これまでの光演算システムの構成に関する検討から、いくつかの問題点が明らかになってきている。まず、処理の自由度や並列性の向上を図るほど、光学系の光強度分布や光機能素子の特性に対する均一性・安定性が強く要求されるようになり、光演算システムの構成が非常に困難になることが挙げられる。また、離散相関演算の様な光情報処理技術は、多くのデータに対して同一の処理を一括して実行することには適しているが、データごとに様々な処理を行う必要がある場合は処理効率が低下する。これらの問題を解決する一つの手法として、処理画素数は比較的小規模で、演算は固定の光演算モジュールを多数接続して、大規模な光演算システムを構成する分散モジュールアーキテクチャが検討されている[25]。この場合、多くのモジュールを効率良く連結する手法の開発が課題となる。しかし、このアーキテクチャでは、固定光演算モジュールを利用しているため、処理内容の可変性・汎用性が犠牲になっている。

一方、高密度、高並列な光機能素子が実現可能になるにつれ、光学系の実装技術の未熟さが認識されてきている。従来の光演算システムの試作では、光学定盤上に個別の光学素子を配置して構成していた。McCormickらによる光スイッチングネットワークは特別に設計した光学素子のマウントを使い、非常に洗練された光学系により構成されている[26]。しかし、実用的なシステムとするためには、定盤から脱却し、安定性・信頼性を持ち、高精度の位置合わせができる光学系実装技術の開発が必要である。有望な並列光演算システムの構成技術としては、微小光学素子を用いた3次元集積光学技術がある。屈折率分布型レンズを高精度に組み合わせて集積光学系を構成するタイプとして、積層プレーナ光学系[27]や、光バス接続システム等[28]が提案されている。また、リソグラフィ技術を利用して回折型光学素子をガラス基板上に作製し、所望の光学系を高精度に構成するプレーナ光学系[29]が提案されている。また、面発光レーザーやV-STEP等の半導体光素子の基板上にリソグラフィ技術を利用して回折型光学素子を直接集積した光機能素子が開発されている[30,31]。以上の技術は光学系をサブミリレベルに微小化・集積化するものであるが、情報処理能力を左右する空間帯域幅積が小さいという欠点を持っている。この欠点を克服する手法として、ミリメートルレベルの光学素子でコンパクトに構成したソリッド光学系[32,33]が提案されている。このように、実際にシステムを構築するための具体的な技術が必要とされている。

本研究の目的は、高度の並列性と接続能力を持つ並列デジタル光演算システムの構成における問題を明らかにし、それを解決するための方策を検討・評価することである。特に、大阪大学の谷田と一岡によって考案された光アレイロジック[12]を基本並列光演算原理として設定し、その実行システムを検討する。光アレイロジックは、光の特性を活かすことができ、演算の明確な設計思想を持つ優れた光演算技術である。しかし、これまで提案されている実行システムは構想の域を出ていないため、十分な性能を持つシステムのハードウェア化のためには多くの課題を解決する必要がある。そこで、本研究では、並列光演算システムの機能性と実現性を考慮したモジュール統合型光演算システムを提唱し、

その概念に基づき、光演算モジュールの設計・試作、高機能化の検討、光接続ネットワークの提案、実装技術の提案を行う。

第1章では、本論文で対象として設定する並列光演算システムの演算原理およびモジュール統合型光演算システムの基本構成を示し、その実現における要求事項と利用できる技術について概説する。

第2章では、モジュール統合型光演算システムの必要最小限な構成といえる光・電子複合型H-OPALSを試作し、実際に並列処理を実行させて性能評価を行った結果について述べる。

第3章では、実用性の向上を目指して、OPALSのコンパクトな実装を実現する反射型多重投影相関器を提案する。そして、基礎実験により原理を確認し、高密度化に関する検討を行う。

第4章では、光アレイロジックを実行するための重要な構成要素である離散相関器の能力を拡張する手法として、多段離散相関器を用いたカーネル分割処理を提案する。そして、設計例を示し、従来法との比較により本手法の有効性を明らかにする。

第5章では、光演算モジュール間を結合する画像接続ネットワークとしてバンヤンネットワークの光学的実現法を提案する。そして、試作実験により、バンヤンネットワーク実現光学系の原理を確認する。

第6章では、光演算システムを構成するうえで重要な技術となる光学系の実装方法として、反射型ブロック光学系を提案する。そして、基礎実験により原理を確認し、実現に必要な技術を検討する。

最後に、本研究の成果について総括し、今後の研究課題について述べる。

## 第1章 モジュール統合型光演算システム

## 1.1 緒言

光の自由空間伝播には、レンズによる結像作用やフーリエ変換に見られるような高度の並列性が存在する。この特性を活かして大容量データの処理を行うことが、並列光演算システム開発の動機の一つである。離散相関演算は、光の並列性と接続能力を活かして2値画像データを処理対象としたデジタル演算を実行する光情報処理技術である。この離散相関演算を用いて任意のデジタル処理を実行する並列光演算技術として、光アレイロジック[12]、記号置換論理[13]、2値画像代数[14]、画像論理代数[15]などが開発されている。これらの技術をもとにした並列光演算システムの研究がこれまでになされてきたが、残念ながら実用的なシステムの開発には至っていない。その原因としては、処理速度、消費エネルギー、並列度等の点で十分な性能を持つ光機能デバイスが開発されていないこと、高い並列度を活かしきれだけの安定性、位置合わせ精度、光量の均一性等を達成し得る光学系の構成法が確立されていないことなどが考えられる。また、離散相関演算に基づく並列光演算技術は、大容量データに対する一括処理には適しているが、個々のデータを対象とする処理には向かないため、結果として単純な処理しか実現できていない。

本章では、以上の問題点を考慮し、本研究において対象として設定する並列光演算システムの基本概念を明確にする。1.2では、対象とする並列デジタル光演算の基本原則について述べる。1.3では、並列光演算システムの実現性・機能性・拡張性を考慮して考案した、モジュール統合型光演算システムの基本概念について述べる。

## 1.2 並列デジタル光演算技術

本研究では、光演算システムの基本原則として光アレイロジックを採用する。光アレイロジックに基づいた研究によって得られる知見は、1.1で挙げた他の離散相関演算を基礎とした並列光演算技術に対しても適用可能な場合が多く、有益な情報となる。本節では、まず離散相関演算について述べる。次に、光アレイロジックについて簡単に説明し、その実行システムである並列光アレイロジックシステムOPALSについて述べる。

## 1.2.1 離散相関演算

離散相関演算は、2値離散画像とカーネルと呼ばれる点像パターンとの相互相関演算として定義される(図1.1)[34]。カーネルは、入力画像の画素間隔と等しい間隔の格子に配置されたデルタ関数により構成されている。デルタ関数が配置されている点をカーネル点と呼ぶ。離散相関演算は、カーネル点の数だけ入力画像を複製し、各複製画像に対して各カーネル点からカーネルの原点までの距離と方向に相当するシフトを実行し、それらを重ね合わせる操作と等価である。重ね合わせの結果として、得られる画像は多値離散画像となるが、画素値1以上をすべて1に、画素値0を0に変換して得た2値画像を出力画像とする。入力画像および出力画像において画素値1を論理値1に対応づけると、離散相関演算により、カーネル点で指定される近傍画素との多入力OR演算が実行される。逆に画素値0を論理値1に対応づけると、近傍画素との多入力AND演算が実行される。それぞれの論

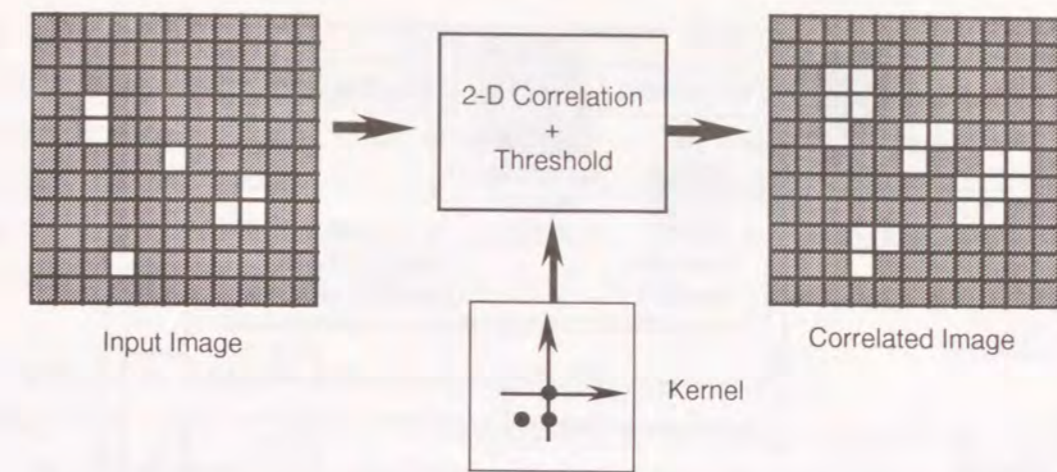


図1.1 離散相関演算

理値の設定を明論理、暗論理と呼ぶ。

離散相関演算の実行に必要な画像の複製、シフト、重ね合わせは、光学的処理を用いて高密度の2次元画像に対して並列に実行することができる。したがって、離散相関演算は光学処理に適したデジタル演算の基本原則として有望である。離散相関演算を実行する相関器として、様々な光学系が提案されている。カーネル固定型の離散相関器としては、干渉計を応用した光学系[13]や、ホログラムを用いた光学系[35]が提案されている。一方、カーネルの動的な変更が可能な相関器としては、多重投影光学系[36]や、プリズムアレイ[21]、分割鏡[37]、レンズアレイ[38]、フィルタアレイ[39]を用いた光学系が提案されている。2値化処理は、種々の非線形光学素子や、光電子集積回路によって実現できる[40]。

離散相関器は、光接続ネットワークとして解釈することもできる。入力・出力画像中の各画素を2次元平面に配置されたノードと考えると、各ノード間を共通の接続パターンにより、ノードの位置に対して不変な接続(スペースインバリエント接続)[55]をするネットワークとみなすことができる。この場合、カーネルのパターンが全ノードに対する近傍ノード間の接続パターンを表す。したがって、カーネル点の数は各ノードからのファンアウト数、あるいは各ノードへのファンイン数に等しくなる。

## 1.2.2 光アレイロジック

光アレイロジック[12]は、データの空間的符号化と離散相関演算に基づく並列光演算原理である。光学的並列処理を利用して、2枚の2値離散画像に対する任意の近傍画素間論理演算を実行することができる。図1.2に光アレイロジックの処理手順を示す。まず、2枚の入力画像A, Bを符号化ルールに従い、符号化画像Cへ変換する。次に、符号化画像に対して離散相関演算を実行する。光アレイロジックでは、この時のカーネルを演算カーネルと呼ぶ。相関画像を上下左右の方向に一画素おきにサンプリングして復号を行う。二つの入力画像を一つの画像として符号化すると、相関演算により2入力画像間の任意の論理演算を実行することができる。演算カーネルのパターンにより、画像A, B間の論理演算の種類と近傍画素間の接続パターンが決定される。光アレイロジックでは、離散相関演算の結果を暗論理でとる。したがって、ここまでの処理で、所望の演算の論理式を積和展開して



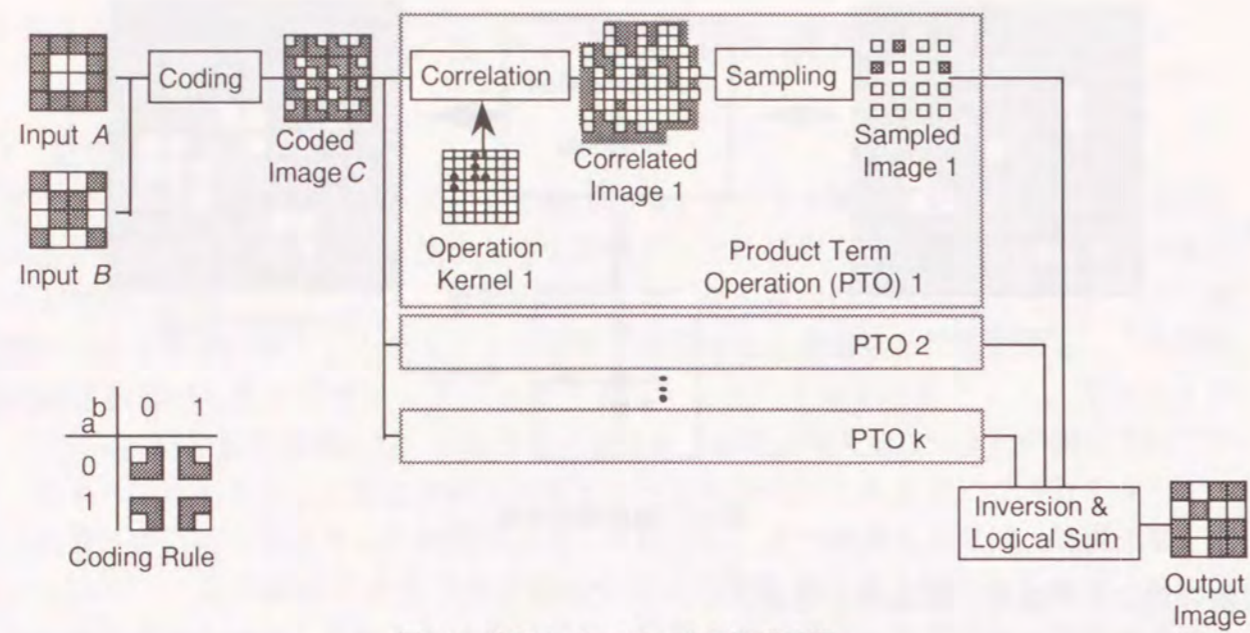


図1.2 光アレイロジックの処理手順

表1.1 カーネルユニットと論理関数の対応

論理関数	シンボル	カーネルユニット	論理関数	シンボル	カーネルユニット
1	..	⌘	$a+b$	PP	⌘
$\bar{a}+\bar{b}$	NN	⌘	$a\oplus b$	UU	⌘
$\bar{a}+b$	NP	⌘	b	.1	⌘
$\bar{a}$	0.	⌘	$\bar{a}b$	01	⌘
$a+\bar{b}$	PN	⌘	a	1.	⌘
$\bar{b}$	.0	⌘	$a\bar{b}$	10	⌘
$\overline{a\oplus b}$	EE	⌘	ab	11	⌘
$\bar{a}\bar{b}$	00	⌘	0	DD	⌘

得られる一つの積項演算が実行できる。任意の近傍画素間演算を実行するためには、複数の相関演算を行って必要な積項をすべて求め、それらの論理和をとる必要がある。このとき、入力画像との整合性を保つために、画素の明暗を反転させて明論理に変換し、画素を拡大して演算結果を出力する。

演算カーネルは、 $2 \times 2$ のカーネル点で構成されるカーネルユニットにより入力画像A, B間の論理演算の種類を指定する。カーネルユニットと2変数論理関数との対応関係を表1.1に示す。カーネルユニットの組合せにより、光アレイロジックの演算内容をプログラ

ムすることができる。表中のシンボルは、一つのカーネルユニットに対応する論理演算を表す演算記号で、演算カーネルを直感的に理解しやすい形式で記述するカーネル式において使用される。カーネル式により2次元配列データに対するデジタル演算を理解しやすい形で記述できる点で、光アレイロジックは他の離散相関演算に基づく並列光演算技術よりも優れている。この利点を活かして、画像処理、数値演算、推論機構、データベース処理等の並列処理アルゴリズムが開発されている[41-50]。

### 1.2.3 並列光アレイロジックシステム：OPALS

並列光アレイロジックシステムOPALS (optical parallel array logic system) は、光アレイロジックを演算原理とする並列光演算システムである。図1.3にOPALSの概念図を示す。OPALSは、光アレイロジックの各処理要素となる符号器、相関器、復号器と、さらに入力ポート、出力ポート、フィードバック伝送路により構成される。機能としては、光アレイロジックに基づいて、2値離散画像データに対する、SIMD(Single-Instruction stream Multi-Data stream)形式の並列近傍画素間演算を実行する。また、フィードバック伝送路を用いて反復処理を行うこともできる。OPALSの特長は、各演算要素による処理が2次元画像データの配列を保ったまま各画素並列に実行されることにある。この特長により、大容量情報を高速に処理することが可能となる。

具体的なOPALSの実現方式として、純光学型[21]、光・電子複合型[51]、機能モジュール型[52]などが提案されている。純光学型は光の特性を十二分に発揮することができ、究極的な光演算システムといえる。しかし、符号化、復号等の非線形処理を実行する高速・高並列な純光学的機能素子の実現は現状では困難である。光・電子複合型は、電子処理の多彩な機能を利用でき、実現性が高い。機能モジュール型は光・電子複合型をさらに発展させたOPALSの実現方式である。これは、OPALSの各構成要素を機能モジュールとして作製し、それらを組み合わせて、より高機能なシステムを実現するものである。

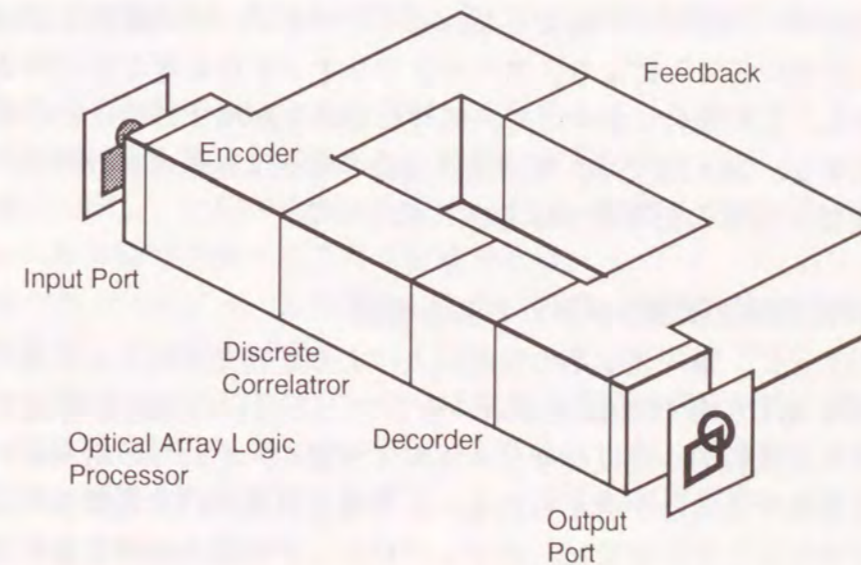


図1.3 OPALSの概念図

## 1.3 モジュール統合型光演算システム

ここでは、OPALS高機能化における問題点を考察し、次に、その問題点を解決する手段としてモジュール統合型光演算システムを提案する。さらに、モジュール統合型光演算システムの基本性能を決定する光演算モジュール、光接続モジュール、モジュール間接続ネットワークユニットに対する要求と実現例について述べる。

## 1.3.1 並列光演算システムの高機能化における問題点

高い並列処理能力は並列光演算システムの最も重要な特長である。光学系は本質的に高い並列度を持つ。例えば、収差補正された結像系では、 $10^6$ 程度の解像点を得ることが可能である。しかし、光学系の持つ並列度をそのまま活かした光演算システムの実現は容易なことではない。光演算システムの並列度向上のためには、まず光機能素子の消費エネルギーを抑え、高密度化して処理点数を増やす必要がある。また、並列度が高くなるにつれて、各素子の均質化や無欠陥化の実現が困難になるため、光機能素子の生産性が低下する。光学系についても、高並列化するためには、高解像レンズの装備、高精度の位置合わせ技術の開発、光強度の均一化、高い安定性・信頼性の獲得などの問題を解決しなければならない。

離散相関演算において、並列度と共に重要な特性として、カーネル設定の自由度があげられる。カーネル点数は、各画素から接続可能な画素数に対応するため、大きいほど処理能力が高いといえる。離散相関器において、カーネル点数は光信号のファンイン・ファンアウト数に対応する。したがって、実行可能なカーネル点数の増加には、光変調素子の高コントラスト化、光強度の安定化、低ノイズ化、光検出信号処理の高精度化などが必要となる。また、カーネル点数の増加時における、ファンアウト信号の光強度均一性は厄介な問題である。

離散相関演算のスペースインバリエンス性も並列光演算システムの演算能力を制限する要因となる。OPALSでは、画像中の位置によって異なる論理演算を実行する度合い、すなわち、スペースバリエンス性が高い演算ほど処理効率が低下する。光アレイロジックでは、2入力画像の内の一つをデータ画像とし、もう一つをデータの属性を指定するアトリビュート画像として用いることにより、スペースバリエーションな処理を実行する演算技法が多用される。しかし、この場合においても、処理の複雑さが増すに従って必要となる相関演算の回数が増加する。OPALSでは、相関演算回数の増加は処理の実行時間の増加に直接つながるので、複雑な演算の処理効率は急激に低下する。

## 1.3.2 モジュール統合型光演算システムの基本構成

1.3.1で検討したように、単一光学系の性能向上による並列光演算システムの大規模化・高機能化には制限があり、拡張性に乏しい。そこで、これらの問題を解決する方策として、光演算システムを比較的小規模なモジュールに分割し、それらの組み合わせにより大規模なシステムを構成することが考えられる。この考えに基づいて考案された光演算システムのアーキテクチャとして、すでに、光アレイロジックの最小処理要素モジュールを組合せてOPALSを構成する機能モジュール型OPALSが提案されている。本研究では、機能

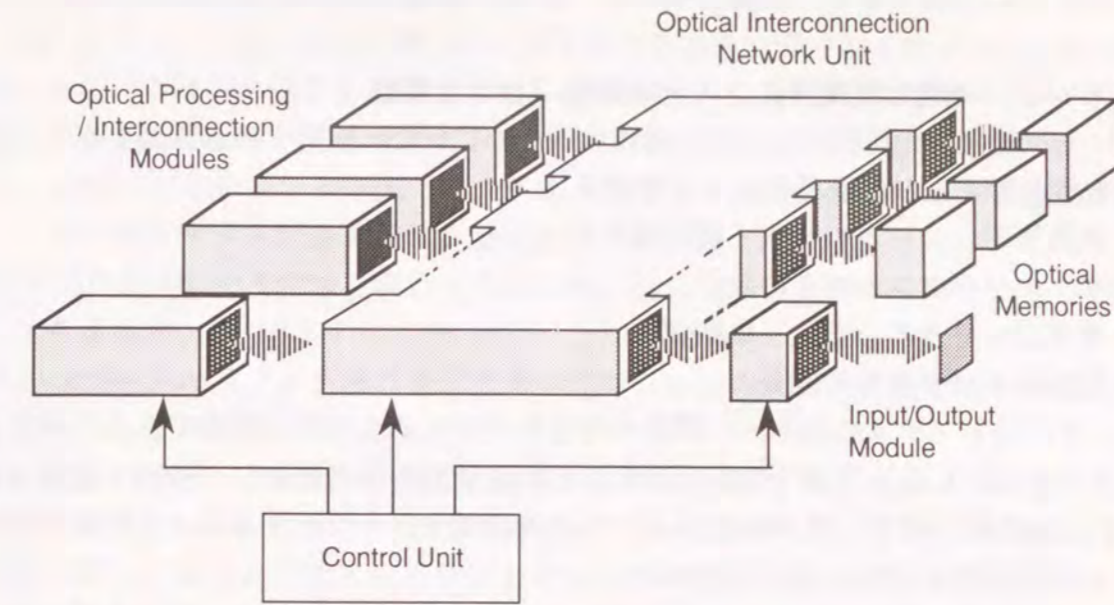


図1.4 モジュール統合型光演算システムの概念図

モジュール化の考えをさらに発展させたアーキテクチャとして、様々な光演算モジュールや光接続モジュールを光接続ネットワークで連結して、大規模な光演算システムを構築することを考える。この概念に基づく光演算システムをモジュール統合型光演算システムと呼ぶ。

図1.4にモジュール統合型光演算システムの概念図を示す。モジュール統合型光演算システムは、光演算モジュール、光接続モジュール、モジュール間光接続ネットワークユニット、制御ユニット、メモリーユニット、入出力ユニットから構成される。文献[15]で提案されている画像論理代数アーキテクチャや、文献[48]で提案されている専用光演算モジュールを用いた並列光演算システムは、モジュール統合型光演算システムの一形態とみなせる。

モジュール統合型光演算システムに基づいて並列光演算システムを構成する利点を以下にあげる。

- 1) 生産性の向上. 各モジュールの規模は比較的小さいものですむため、光機能素子や光学系に対する要求が緩和され、製造が容易になる。
- 2) 耐故障性の向上. 欠陥・故障が生じた場合は、他のモジュールへ回避させたり、モジュール単位で交換することが可能である。
- 3) 拡張性の向上. モジュールの追加により、容易に処理容量や機能の拡張を図ることができる。
- 4) 処理の効率化. 光アレイロジックでは複数の相関演算を同時に実行する必要があるが、複数の相関器モジュールを用いることにより、効率的に実行できる。また、頻繁に利用される演算を演算モジュールとして用意することにより、効率化を図れる。
- 5) 高機能化. 相関器では実行困難な処理を、様々な光接続モジュールの導入により

効率的に実現できる。光接続モジュールの具体例については1.3.5で述べる。

### 1.3.3 モジュール統合型光演算システム開発における課題

モジュール統合型光演算システムを構成するために新たに検討すべき課題として、特に重要であると考えられる事項を以下に挙げる。

- 1) 光演算モジュールの種類・構成数の決定。
- 2) ネットワークユニットの設計。
- 3) 各モジュールの小型化・集積化。
- 4) 制御アルゴリズムの開発

1), 2) はシステムの基本的な機能や性能を決定する上で特に重要である。実行するアプリケーションにより最適な構成は変わることが予想されるため、一般的な議論は困難である。1.3.4~1.3.6では、光演算モジュールと光接続ネットワークユニットに関する基礎的な要求と利用可能な技術について述べる。

3) については、多くのモジュールを組み合わせる必要があるため、微小光学技術や光電子集積回路技術を利用して各モジュールの小型化・安定化を図ることが重要となる。近年、様々な3次元光学系集積技術[27-32, 53, 54]が開発されており、これらを利用することができる。また、本研究では、新しい光学系実装法として反射型ブロック光学系を第6章において提案する。

4) については、効率良く処理を実行させるためには、各モジュールによる処理を効果的に組み合わせる必要がある。スケジューリングをうまく行わないと処理の効率化は望めない。そこで、効率的なスケジューリングを行い得る制御アルゴリズムの開発が重要な課題となる。

### 1.3.4 光演算モジュール

光演算モジュールは、2次元画像データに対する様々な演算を行う処理単位となる(図1.5)。光演算モジュールとしては、光の並列性や接続能力が十分に活かされており、光学系での実現が容易なものが望ましい。また、モジュールを統合するためには、各モジュールのデータ入出力部の標準化が必要である。

光アレイロジックを実行するためには、基本処理要素として符号器、相関器、復号器が必要である。光アレイロジックでは、任意の演算を実現するために一つの符号化画像に対して複数の相関演算を行う必要がある。そこで、相関器を複数用意し、符号器出力を分配器で分配した後、相関器に接続させる構

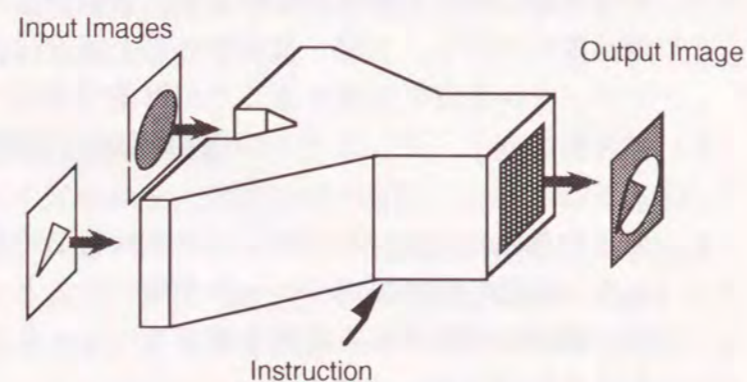


図1.5 光演算モジュールの概念図

成により処理の効率化が可能である。

一方、モジュール統合型光演算システムを考える場合、光アレイロジックを実行するモジュールだけでは不十分である。システムの高機能化には、新たに専用モジュールを用意することが必要となる。この専用モジュールは以下の状況において有用である。

- 1) 極端に大きなシフトや大ファンアウト演算など、相関演算において非常に大きなカーネルサイズが要求される場合。
- 2) プログラム中で頻繁に実行されるため、符号化・復号のオーバーヘッドが顕著になる場合。
- 3) スペースバリエーション演算など光アレイロジックの通常の手順では処理効率が低下してしまう場合。

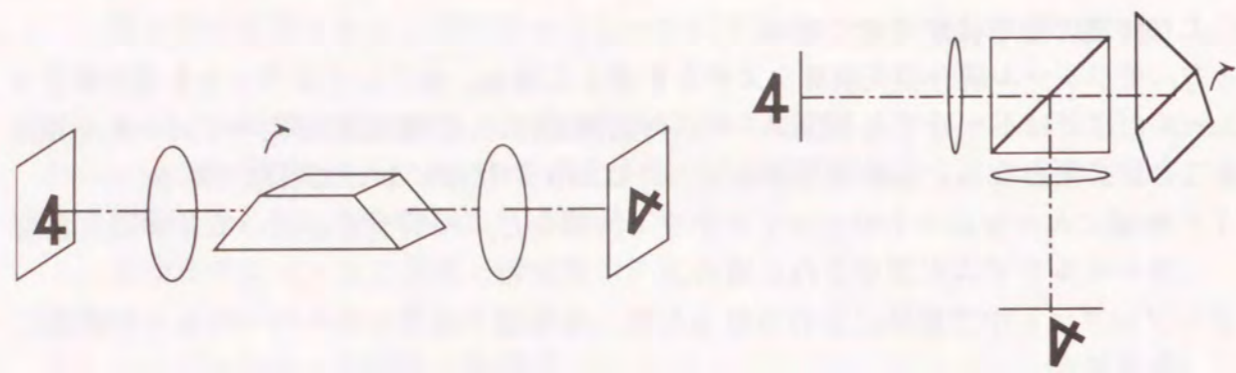
1), 2) に対しては文献[15, 48]で検討されている。また、1) は第4章で述べるカーネル分割処理によっても対処できる。次項では、3) の場合を想定して、相関器以外の専用光接続モジュールによる光アレイロジックシステムの能力拡張について検討する。

### 1.3.5 光接続モジュール

スペースバリエーション接続を行う一つの手法として、像面と瞳面の両方にプリズムやホログラム等の偏向素子を置き、像面上の偏光制御素子で接続パターンを選択する手法がある[55-57]。しかし、この方法では、空間帯域幅積とスペースインバリエーションとの間にトレードオフの関係があるため、接続のスペースバリエーション性が高くなるにつれて処理画素数が低下する[57]。そこで、既存の光学素子を基礎にして、できる限り光学系の空間帯域幅積を損なわずに光接続モジュールを実現する方法を考える。この場合、接続パターンは固定であり、各接続モジュールは単一の機能しか持たないが、モジュール間ネットワークの制御により処理の自由度を確保する。以下、光学処理で簡単に実行できる反転、回転、拡大、縮小、反復写像を実行する光接続モジュールを検討する。本節で検討する光接続モジュールは結像系に若干の変更を加えるだけで実現できる。接続パターンは規則的なものしか実現できないが、高いスペースバリエーション性を持つ光接続を高い並列性を保ったまま実行できる点で優れている。また、接続距離に関わらず、すべての画素における光接続光路長が等しいため、高速に並列信号を伝達するとき問題となる信号間の伝達時間のずれ(スキュー)は原理的に生じない。

#### A. 反転モジュール

ダブプリズムやルーフミラーを用いることにより、ある対称軸に関する画像の反転変換が行える(図1.6) [58]。画素が正方格子状に配列している場合、図1.7に示すように変換の対称軸が水平方向に対して $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ であれば、変換の前後で画素区画は変化しない。 $N \times N$ 画素を持つ入力画像の画素値を $a(i, j)$  ( $i, j = 1, 2, \dots, N$ )とする。ただし、 $a(1, 1)$ を画像の左端の画素とし、垂直方向の座標を $i$ 、水平方向の座標を $j$ とする。水平方向に対して左回りに $q^\circ$ の角度を持つ軸を対称に反転変換を行ったときの出力画像の画素値を $t_q(i, j)$  ( $i, j = 1, 2, \dots, N$ )とすると、



(a) ダブルプリズムの利用 (b) ルーフミラーの利用

図1.6 反転接続を実行する光学系

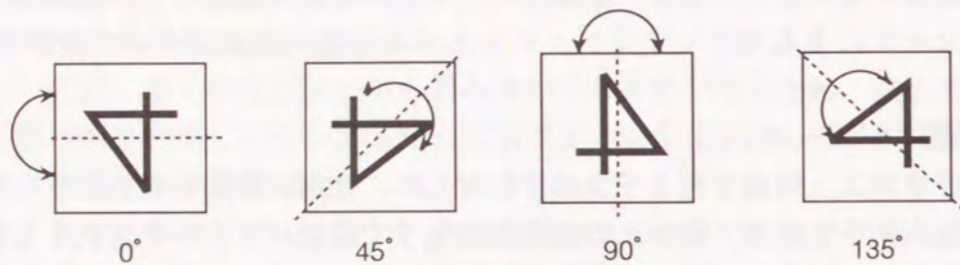


図1.7 反転接続における反転軸

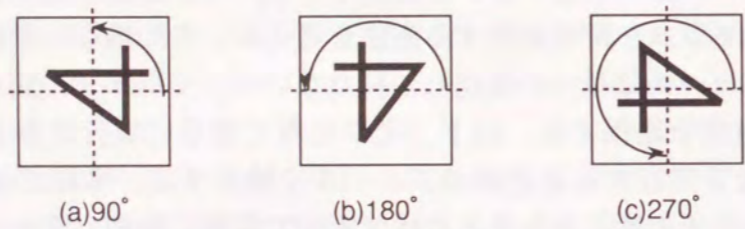


図1.8 回転接続の例

$$t_0(i,j) = a(N-i+1, j) \quad (1.1)$$

$$t_{45}(i,j) = a(N-j+1, N-i+1) \quad (1.2)$$

$$t_{90}(i,j) = a(i, N-j+1) \quad (1.3)$$

$$t_{135}(i,j) = a(j, i) \quad (1.4)$$

と定義できる。

反転変換の応用として、行列やベクトルの転置が実行できる[59]。数値データをビットプレーン展開し、各データを2次元に配列して行列データとする。各ビットプレーンを順に反転光学系に入力し、135°方位の対角線を軸として反転させてデータ配置を変換する

ことにより、行列の転置が実現できる。

B. 回転モジュール

画像の回転は、反転軸を変えて2回反転させれば実現できるので、反転と同様にダブルプリズム、ルーフミラーを用いて行われる。左周りに $q^\circ$ 回転した画像の画素値を $r_q(i,j)$  ( $i, j = 1, 2, \dots, N$ )とすると、90°、180°、270°の回転による画素配置の変換(図1.8)は、それぞれ次式のように表せる。

$$r_{90}(i,j) = a(N-j+1, i) \quad (1.5)$$

$$r_{180}(i,j) = a(N-i+1, N-j+1) \quad (1.6)$$

$$r_{270}(i,j) = a(j, N-i+1) \quad (1.7)$$

例えば、式(1.5)で表される90°の回転は、式(1.1)と式(1.2)で表される0°と45°の反転変換を順に行えば実行できる。

C. 拡大・縮小モジュール

拡大・縮小は結像系の横倍率を変えれば簡単に実現できる。ズームレンズを用いれば、拡大率・縮小率を可変にすることができる。アナモルフィックな光学系を用いるとx方向とy方向で拡大率・縮小率を変えることができる。図1.9に示すようなサニャックインバータでは、直線偏光の方向を制御することにより、光学系中を進む光の方向を切り替えることができ、拡大・縮小のスイッチが実現できる[60]。

$N \times N$ 画素を持つ入力画像の画素値を $a(i,j)$  ( $i, j = 1, 2, \dots, N$ )とし、 $i$ 方向の拡大率を $p (> 1$ : 自然数)  $j$ 方向の拡大率を $q (> 1$ : 自然数)としたときの拡大画像の画素値を $m_{(p,q)}(i,j)$ とする。拡大変換した画像は、画素間隔が入力画像と等しく、画素数が $pN \times qN$ に拡大されるとすると、入力画像の1画素の値が出力画像の複数の画素へ分配されることになる。した

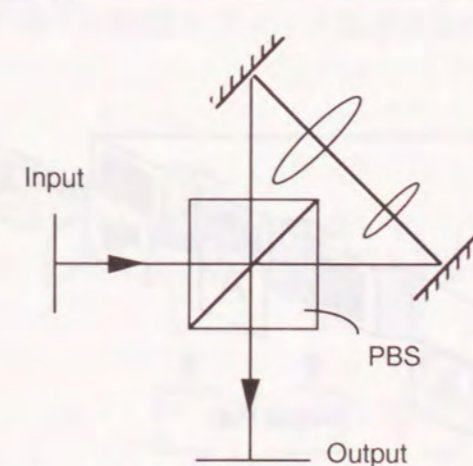


図1.9 サニャックインバータを用いた拡大・縮小の切り替えが可能な光学系

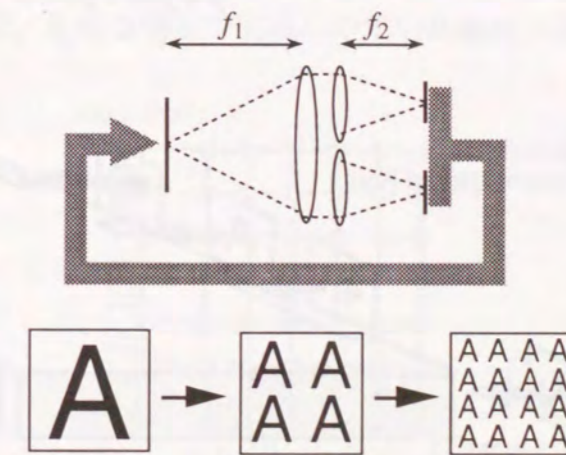


図1.10 反復写像モジュール

がって、拡大による画素配置の変換は次式で表せる。

$$m_{(p,q)}(i,j) = a\left(\left\lceil \frac{i}{p} \right\rceil, \left\lceil \frac{j}{q} \right\rceil\right) \quad (1.8)$$

ただし、 $\lceil x \rceil$ は $x$ 以上の最小の整数とする。

一方、縮小を行った場合、入力画像の複数の画素値が出力画像の一つの画素へ足し合わされることになる。 $i$ 方向の縮小率を $1/s$  ( $s > 1$ : 自然数)  $j$ 方向の縮小率を $1/t$  ( $t > 1$ : 自然数) としたときの縮小画像の画素値を $r_{(s,t)}(i,j)$ とすると、縮小による画素配置の変換は次式で表せる。

$$r_{(s,t)}(i,j) = \sum_{l=s(i-1)+1}^{si} \sum_{m=t(j-1)+1}^{tj} a(l,m) \quad (1.9)$$

#### D. 反復写像モジュール

縮小・複製を行う光学系を反復的に作用させると、簡単な光学系で多数の像の複製ができる(図1.10)。縮小率は複製数に従って大きくなる。あるパターンを画面全体に分散させるような処理を行う場合に、その分散の度合いや、パターンの大きさを反復回数により制御することができる。

例えば、図1.10の複製光学系は、それぞれのレンズの焦点距離を $f_1 = 2f_2$ とし、縮小率 $1/2$ 、複製数 $2 \times 2$ としている。この光学系による複製像を再び入力して反復処理を $n$ 回繰り返すと、縮小率 $1/2^n$ 、複製数 $2^n \times 2^n$ でパターンの複製ができる。一般に複製光学系の縮小率を $r$  ( $r < 1$ )、複製数を $m$  (自然数) とすると、 $n$ 回反復処理して得られる複製像の縮小率は $r^n$ 、複製数は $m^n$ となる。複製光学系の配置パターンを $P$ 、縮小率 $x$ で縮小したパターンを $P^{(x)}$ と表し、 $*$ をパターンの2次元コンポリューションと定義すると、 $n$ 回反復処理したときの複製像の配置パターンは、

$$P * P^{(r)} * P^{(r^2)} * \dots * P^{(r^{n-1})} \quad (1.10)$$

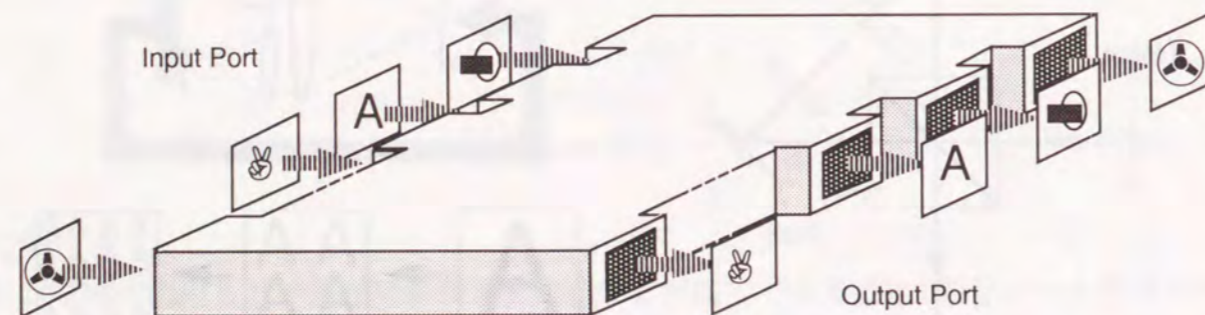


図1.11 モジュール間接続ネットワークユニット

と表される。この配置パターンはフラクタル画像的な入れ子構造を持つ。

#### 1.3.6 モジュール間接続ネットワークユニット

図1.11に示すように、接続ネットワークユニットは多くの光演算モジュールからの出力画像データを任意のモジュールへ転送する機能を持つ。本項では、伝送方式、接続可変性、トポロジーと光学的実現法について検討する。

##### A. 画像データの高速伝送

光演算モジュールは2次元画像を処理対象とするため、光接続ネットワークユニットは画像データを高速に伝送する必要がある。そこで、結像系に基づく並列画像伝送の利用が有望である。一方、モジュール当たりの画素数が $16 \times 16$ 程度の小規模なものでよい場合には、シリアル光通信に基づく高速伝送が利用できる[61]。この手法は、既存技術を基礎としており、光ファイバのような柔軟な信号伝達媒体が利用できるため、複雑なモジュール間ネットワークの構成に適している。また、マルチモード光ファイバを用いて画像情報を伝送する手法も提案されている[62]。この手法は光ファイバの柔軟性と並列伝送能力を備えた有望な画像伝送技術である。

##### B. 接続の可変性

接続ネットワークは、スイッチング要素を用いてデータ転送の接続経路を動的に変更できる動的接続方式とスイッチング要素を介さない静的接続方式がある。静的接続方式では、ある目的モジュールに接続するために目的以外のモジュールを経由する必要があり、データ転送を制御するルータを各モジュールに備える必要が生じる。光演算モジュールの複雑化を防ぐためには動的接続方式を採用するほうが望ましい。動的接続方式ではネットワークの転送経路の切り替え速度がシステムの処理能力に大きく影響する。

##### C. 接続トポロジーと光学的実現法

並列コンピュータの分野では、接続トポロジーの観点から様々な接続ネットワークが検討されている[63]。一方、接続ネットワークの光学的実現についても多くの提案がなされている。比較的モジュール数が少ないときは、単純な構造で実現しやすい共有バス接続が

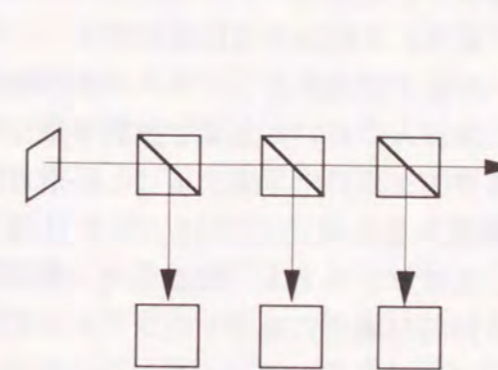


図1.12 共有バス接続

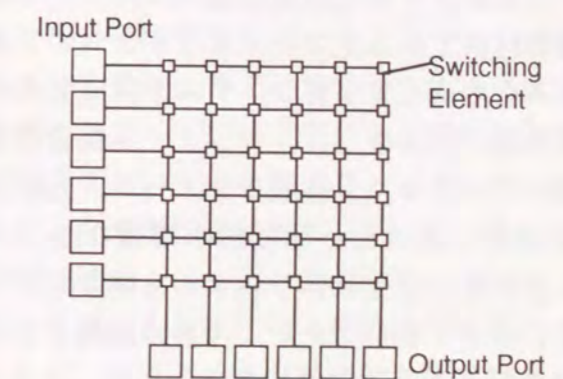


図1.13 クロスバーネットワーク

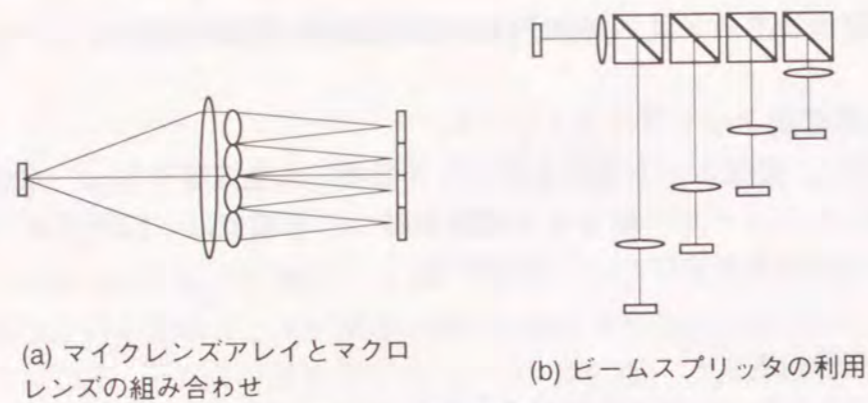


図1.14 画像分配器

適している(図1.12) [48]. しかし, 共有バス接続はモジュール数の増加および接続パターン複雑化に対して, 伝送効率の低下が顕著になる. クロスバーネットワークは, 図1.13に示すように, 全装置間を一段のスイッチを介して接続するネットワークである. これは, 接続自由度の大きなネットワークであり, すべてのモジュール間の結合をスイッチ一段分の遅延時間で実現することができる[64]. しかし, 接続ポート数の2乗に比例してスイッチング要素数が増加するため, モジュール数が多くなると急激に実現が困難になる. したがって, 比較的モジュール数が少なく, 複雑なモジュール間結合が必要な場合に有効である. クロスバーネットワークよりスイッチング要素数が少なく, 実現が容易な接続ネットワークとしては, 小さなスイッチング要素を組み合わせた多段接続ネットワークが有効である. その光学的実現法として, 光バスネットワーク[65], バンヤンネットワーク[66, 67]の他様々なものが提案されており[68-73], これらを利用することができる. 第5章ではバンヤンネットワークに基づく画像接続ネットワークの新しい実現法を提案する.

一方, 光アレイロジック固有の接続トポロジーとして, 分配ネットワークがあげられる. これは, 光アレイロジックにおける相関演算の並列実行を支援するもので, 符号化画像を複数の相関器に分配して処理効率を高める目的に使われる. 図1.14に分配器として利用できる複製光学系の例を示す.

#### 1.4 結言

本章では, 本論文における研究対象として設定する並列光演算システムの基本概念を明らかにした. 並列光演算の基本原則として離散相関演算を定義し, それを発展させた並列光演算技術である光アレイロジックについて述べた. また, 比較的小規模な演算モジュールを組み合わせて光演算システムを構成するモジュール統合型光演算システムの基本概念について述べた. さらに, モジュール統合型光演算システムにおいて重要な役割を果たす光演算モジュール, 光接続モジュール, 光接続ネットワークに対する要求項目と利用可能な技術について述べた. 比較的小規模なモジュールを組み合わせることにより大規模なモジュール統合型光演算システムを構築する手法は, 光演算システムの高機能化, 実現性の向上に対して有益である. 今後の課題としては, 具体的な演算にそくしたシステムの設計評価を行うことが重要である.

## 第2章 光・電子複合型並列光アレイロジックシステム H-OPALSの試作

### 2.1 緒言

光演算システムは新しい概念に基づく情報処理システムであるため, 構成法やアルゴリズムについて, 既成のシステムの知識をそのまま利用できないことが多い. そこで, 実際に光演算システムを実際に設計・試作し, システムを動作させて問題点を明らかにすることが必要である. 現在のところ, 光演算システム構成用の機能素子は開発途上にあり, 十分な性能を持つ素子の入手は難しい. しかし, 現在入手可能な光機能素子を用いても, 処理能力は不十分ながら, 光演算システムを構成し, 動作させることは可能である. そのような予備実験システムにおいても, 試作の過程で得られる種々の知見は, 次のシステム開発につながる有益な情報となる.

本章では, 光アレイロジックを演算原理とする並列光演算システムOPALSの試作と, 試作システムにおける並列演算の実行について述べる. 試作するOPALSの構成方式は, 既存の技術を用いて製作が可能な光・電子複合型OPALS(H-OPALS)とした. H-OPALSの試作例としては, 液晶パネルを利用したH-OPALS 1が報告されている[37]. このH-OPALS 1は, コンピュータによる逐次処理と液晶パネルによるデータ表示がボトルネックとなって, 処理速度が抑えられていた. そこで本研究では, OPALSの重要な特性である処理の並列性を重視して, 各画素ごとに電子回路を用意することにより完全並列処理が可能な3種類のH-OPALSを試作した. 試作システムは, 処理画素数 $3 \times 3$ で, シンプルな構造のピンホール相関器を用いたH-OPALS 2 [110, 116]; 処理画素数 $3 \times 3$ で, カーネル選択型コヒーレント相関器を用いたH-OPALS 3 [114, 117]; そして, 処理画素数 $16 \times 16$ で, 2048フレーム分のメモリを備えたH-OPALS 16<sup>2</sup> [118]である. 2.2では, H-OPALSの概要について説明する. 2.3から2.5では, 試作した3種類のH-OPALSについてそれぞれの構成および動作実験結果について述べる. 2.6では, 試作システムの問題点と解決策を検討する.

### 2.2 光・電子複合型並列光アレイロジックシステム: H-OPALS

OPALSの具体的な実現方法としていくつかの方式が提案されている[21, 51, 52]. その中で, H-OPALSは, 近年進歩の著しい光エレクトロニクス技術を利用し, 電子処理を積極的に導入する構成方式である. 光情報処理の特性を十分発揮するためには, すべての処理を光学的に実現するシステムが望ましい. しかし, 符号化や復号で必要となる非線形処理や一時記憶を純光学的に実行する手法は十分開発されておらず, 将来的にも実現には困難が予想される. 一方, 近年の光電子集積化技術のめざましい進歩を考えると, 光入力用の光検出素子と光出力用の発光素子や光変調素子を備えた光電子集積回路を用いて, 多彩な機能を実現することが期待できる. そこで, H-OPALSでは, 符号器と復号器に電子処理を, 相関器およびその他の並列伝送に光学処理を用いる構成をとる. 符号化や復号処理における非線形処理は電子回路で簡単に実現でき, しかも, 各画素独立な局所的な配線パターンで構成できるため電子処理系に適している. 一方, 相関演算では, 画素間の複雑な接続が

必要であるため光学処理系が必要となる。このように、光・電子複合型OPALSは光学処理と電子処理の両方の特性を活かした実現性の高い光演算システムであり、現在の技術を用いても製作可能である。

本研究で目標とするように、ボトルネックを生じさせずにOPALSの並列性を保つためには、すべての画素に対して同一の電子回路を用意する必要がある。また、光・電子複合型システムで高い処理能力を得るためには、空間光変調素子や発光ダイオードアレイ、フォトダイオード等の光電変換素子の変換効率、応答速度など性能向上が必要である。一方、光学系に対しては、画素密度、コントラスト、均一性、光の利用効率、安定度、演算カーネルの自由度などの向上が検討課題となる。

### 2.3 H-OPALS 2

#### 2.3.1 基本構成

図2.1にH-OPALS 2のブロック図を示す。符号器と復号器を電子回路により実現し、相関器を光学的に実現した。二つの入力画像を符号器により符号化し、発光ダイオードアレイに表示する。この符号化画像に対して相関演算を行い、相関画像をフォトトランジスタアレイにより検出する。検出画像に対して、復号器で反転、論理和演算を行い、発光ダイオードアレイ上に表示する。反復処理を行うために、結像光学系を利用したフィードバック伝送路により出力画像を符号器へ再入力することができる。フィードバック伝送路は1対1の配線であるため、電気配線を用いてもたやすく実現できる。しかし、符号器、相関器、復号器などの機能モジュールを光入出力ポートを介して連結するシステム構成[52]を想定したため、フィードバック伝送路も光学的に実現することにした。この構成では、必要に応じて様々な光接続モジュールをフィードバック系に挿入することができ、より柔軟なシステムを実現することが可能となる。電子回路を全画素に対して独立に用意したの

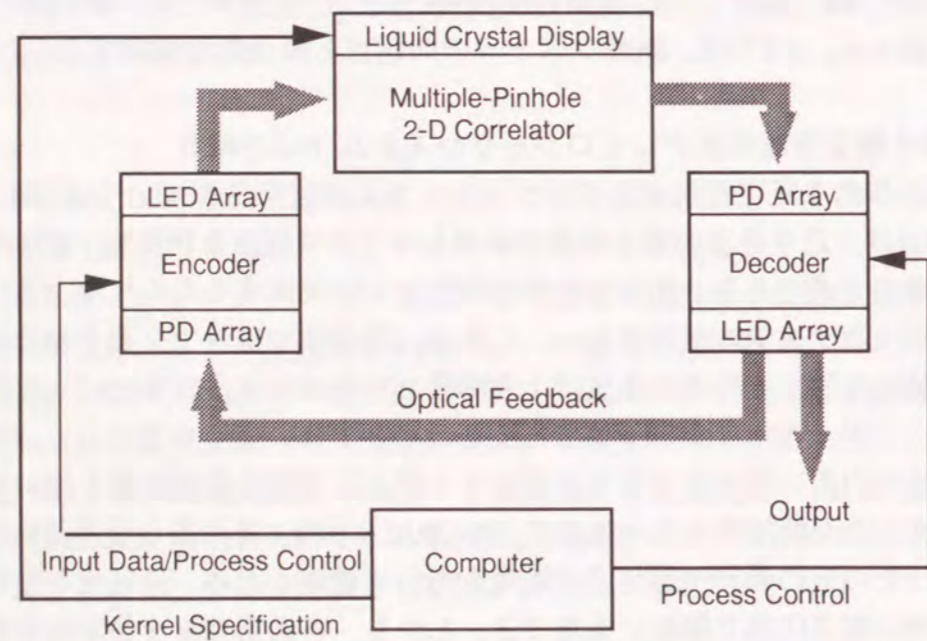


図2.1 H-OPALSのブロック図

で、システム内におけるデータの処理や伝送は各画素に対して並列に行える。各処理はパーソナルコンピュータにより制御される。

試作システムでは3×3画素分の並列処理回路を製作した。この画素数は並列処理システムとしてはたいへん少ないものである。しかし、小規模の並列システムは比較的容易に製作することができるため、試行錯誤が必要となる初期実験システムとしては妥当であると考えられる。

#### 2.3.2 多重ピンホール相関器

H-OPALS 2では、相関器として多重ピンホール相関器を用いた。図2.2に示すように、入力画像の各画素が拡散光源の場合、ピンホールの位置をずらすことにより出力画像の位置がシフトする。そこで複数のピンホールを用意し、必要に応じて、ピンホールを開閉してシフト画像を重ね合わせることで、入力画像とピンホールのパターンとの相関演算が実行できる。この多重ピンホール相関器は、非常に簡単な構造をしており、レンズを用いないため広い像面でも各種の収差が生じない利点をもつ。

試作システムでは、符号化画像を6×6の発光ダイオードアレイに表示する。演算カーネルパターンは透過型液晶ディスプレイに表示し、各カーネル点をピンホールとみなして多重ピンホールによる離散相関演算を行う。その結果、相関画像が受光器アレイ上に得られる。

#### 2.3.3 電子処理部

試作システムは、3×3画素の画像を並列に処理できる電子回路を備える。電子回路で処理した結果を表示するために、赤色発光ダイオード（東芝製TLRA130-C）を用いた。光検出器としてはフォトトランジスタ（東芝製TPS613）を用いた。デジタル回路はTTL-

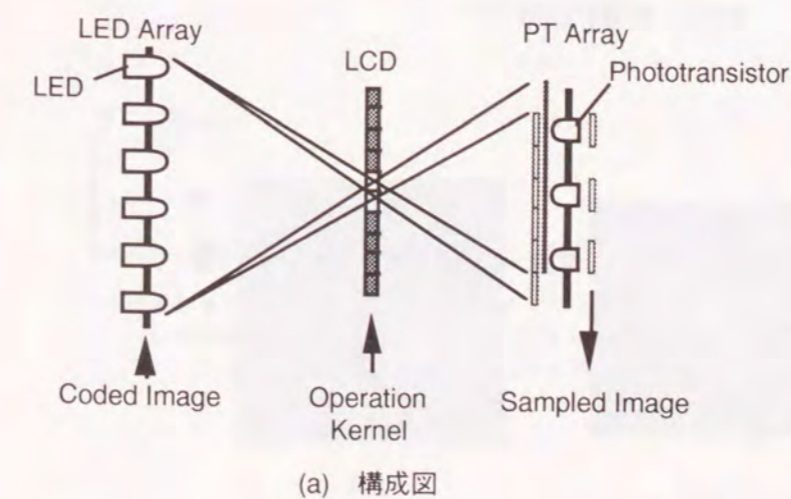


図2.2 多重ピンホール相関器

ICを用いて製作した。

符号化回路は、図2.3に示すように、光入力と電気入力のセクタ、データラッチ用のフリップフロップ、2ビットデコーダから構成され、各画素ごとに独立した処理要素を構成している。入力データは電気的にも光学的にも読み込めるようにした。入力画像A、Bの各画素値のデータはそれぞれラッチに保持される。発光ダイオードアレイでは2×2の発光ダイオードが1画素ごとに割り当てられており、そのうちの 하나가符号化ルールにしたがって発光することで符号化された画素データを表示する。

復号器は各画素独立に図2.4に示すような電子回路を備えている。相関画像に対して水平・垂直方向に1画素おきにフォトトランジスタを設置し、光信号を検出して復号回路で処理を行う。相関演算は暗論理であるため、論理値を反転させて明論理に変換する。JKフリップフロップを各画素ごとに用意し、複数の相関演算結果に対して時系列的に論理和をとる。演算結果は発光ダイオードアレイに表示される。

これらの回路は並列入出力インターフェースを介して、パーソナルコンピュータ(エプソ

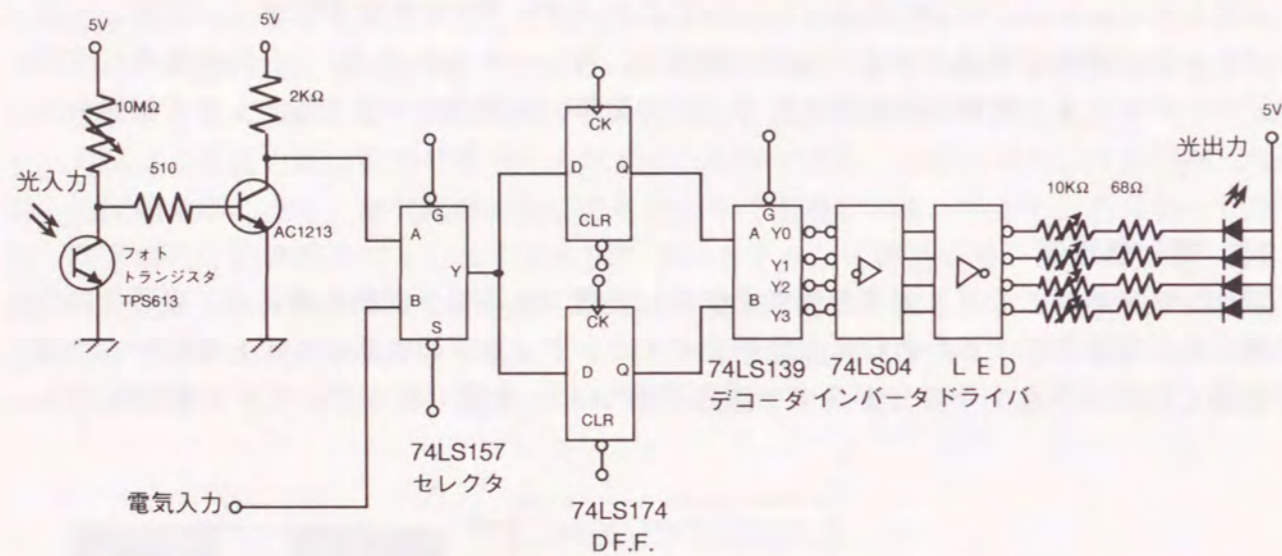


図2.3 符号化回路

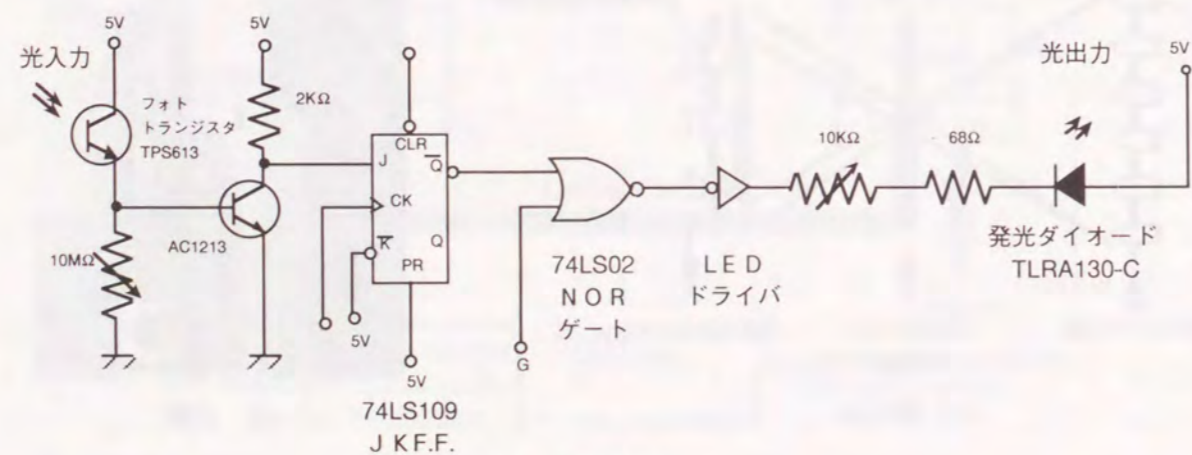


図2.4 復号回路

ン製PC-286VS)により制御される。

### 2.3.4 実験結果

#### A. 並列論理演算

2変数論理演算はデジタル演算において基本的かつ重要な演算である。まず、試作システムの動作を確認するために並列対応画素間論理演算を実行した。図2.5(a)、(b)の入力画像A、Bに対して、図2.5(c)示す符号化画像が得られた。図2.5(d)、(e)は入力画像間のAND演算とXOR論理和演算を実行した結果を示す。

#### B. 3ビット加算

3ビット加算の実験結果を示す。加算のアルゴリズムとして、パターン論理とビット並列型の桁上げ伝搬法に基づく方法[41]を用いた。図2.6(a)、(b)に、入力画像であるアトリビュート画像とデータ画像を示す。データ画像上に、各ビットの1、0を画素の明暗で表したデータオブジェクトとして'1'と'3'の二つの数値を配置した。アトリビュート画像上のアトリビュートパターンはデータの位置を識別するために用意した。半加算における桁上げと和の演算結果はそれぞれ出力画像の1行目と2行目に得られる。この加算演算で用いられる演算カーネルは次式で表される。

$$\begin{bmatrix} 0 & 01 \\ 1 & 11 \\ 0 & .. \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 00 \\ 11 \\ 10 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

1回の演算結果は次のステージの入力データ画像として用いられる。加算処理を完了する

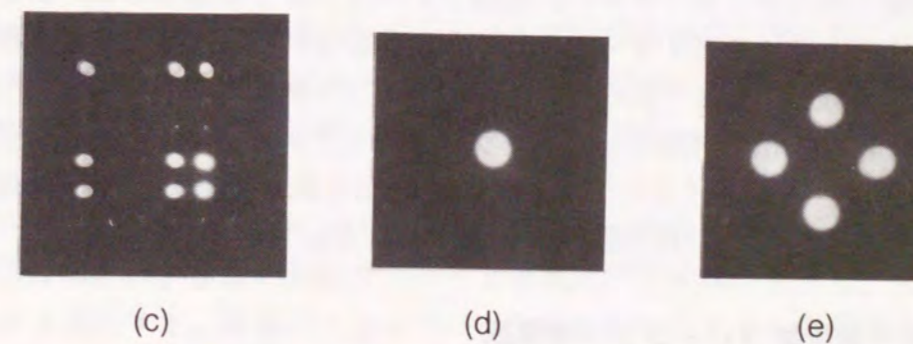
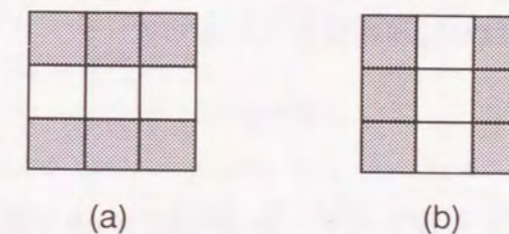


図2.5 対応画素間論理演算の実験結果



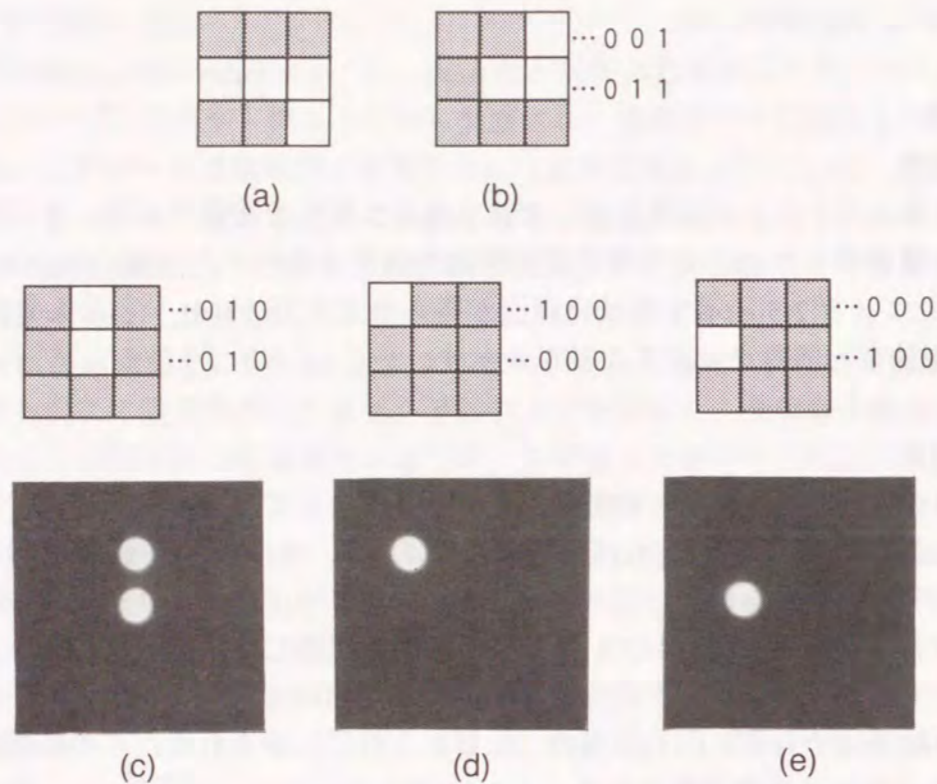


図2.6 加算演算結果

ためには、同様の処理を必要なビット数だけ繰り返す。図2.6(e)に示すように、3回の反復により、出力画像の2行目に加算結果として4を表すデータパターンが得られた。

電子回路系の処理速度は主に光信号増幅器の応答によって制限されており、一回の相関演算結果を検出するために約1msを要した。一方、相関器の処理速度は液晶ディスプレイの書き換え速度によって決まり、約20msであった。したがって、試作したシステムの処理能力は毎秒45.5サイクル（3276論理和演算）であった。

## 2.4 H-OPALS 3

### 2.4.1 基本構成

図2.7にH-OPALS 3のブロック図を示す。H-OPALS 3の基本構成、および、符号器、復号器はH-OPALS 2とほぼ同じであるが、相関器の実現方式が異なる。相関器は、光アドレス型空間光変調器、光シャッターアレイ、相関フィルタアレイで構成されている。符号器で得られた符号化画像は発光ダイオードアレイ上に表示され、光アドレス型空間光変調器に書き込む。それをレーザー光で読みだしてコヒーレント画像に変換し、相関フィルタを用いた相関演算を行う。相関画像はフォトトランジスタアレイで検出され、復号器で処理される。演算結果は、発光ダイオードアレイ上に表示され、さらに、反復処理のために光フィードバック伝送路により符号器へ再入力することができる。

### 2.4.2 カーネル選択型コヒーレント相関器

図2.8にH-OPALS 3で用いたカーネル選択型コヒーレント相関器を示す。この相関器は文

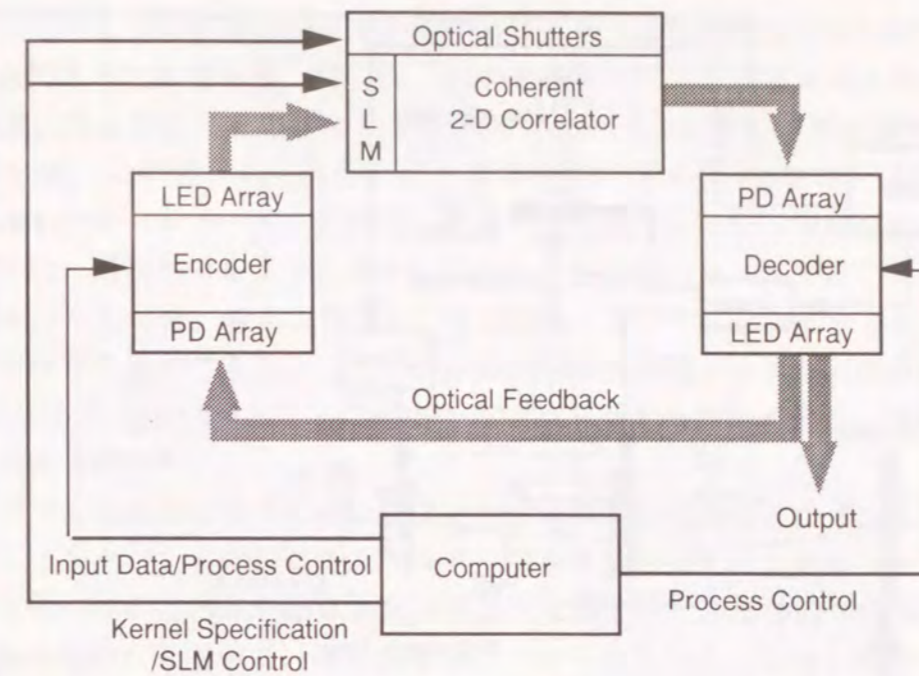
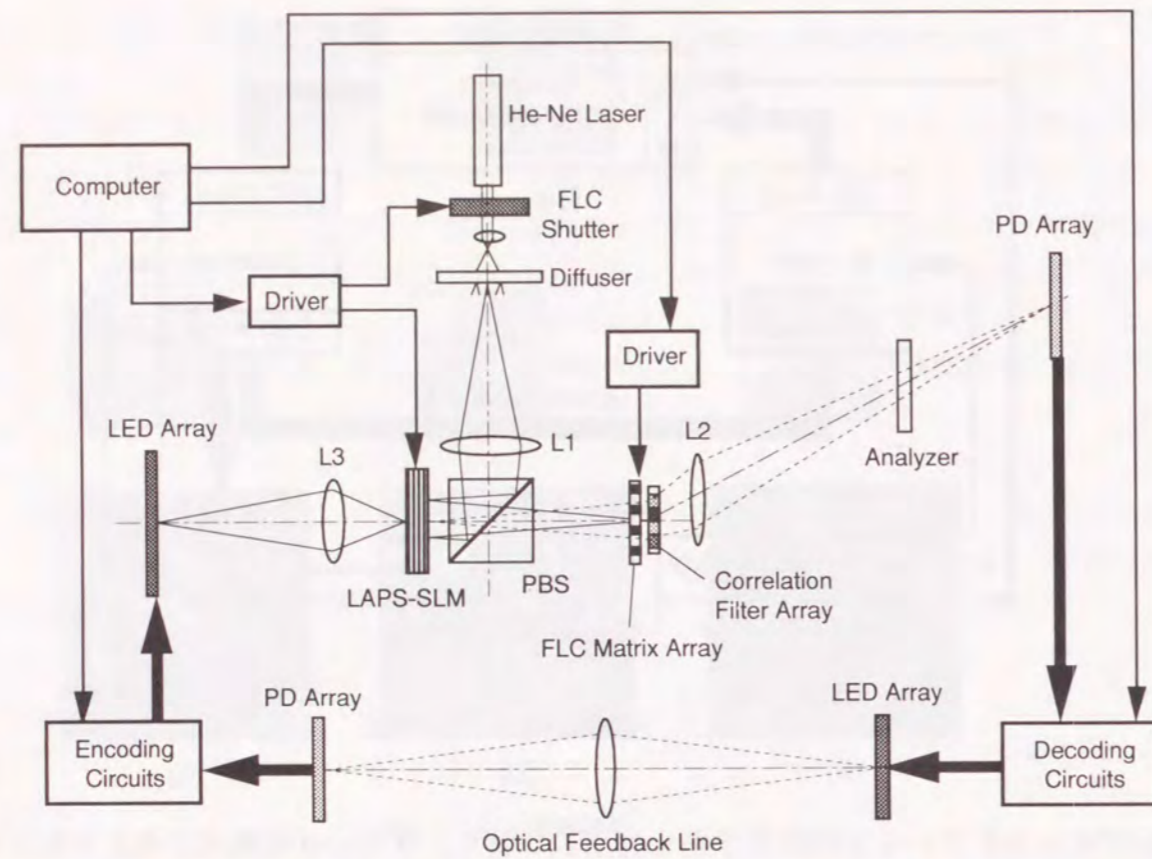


図2.7 H-OPALS3のブロック図

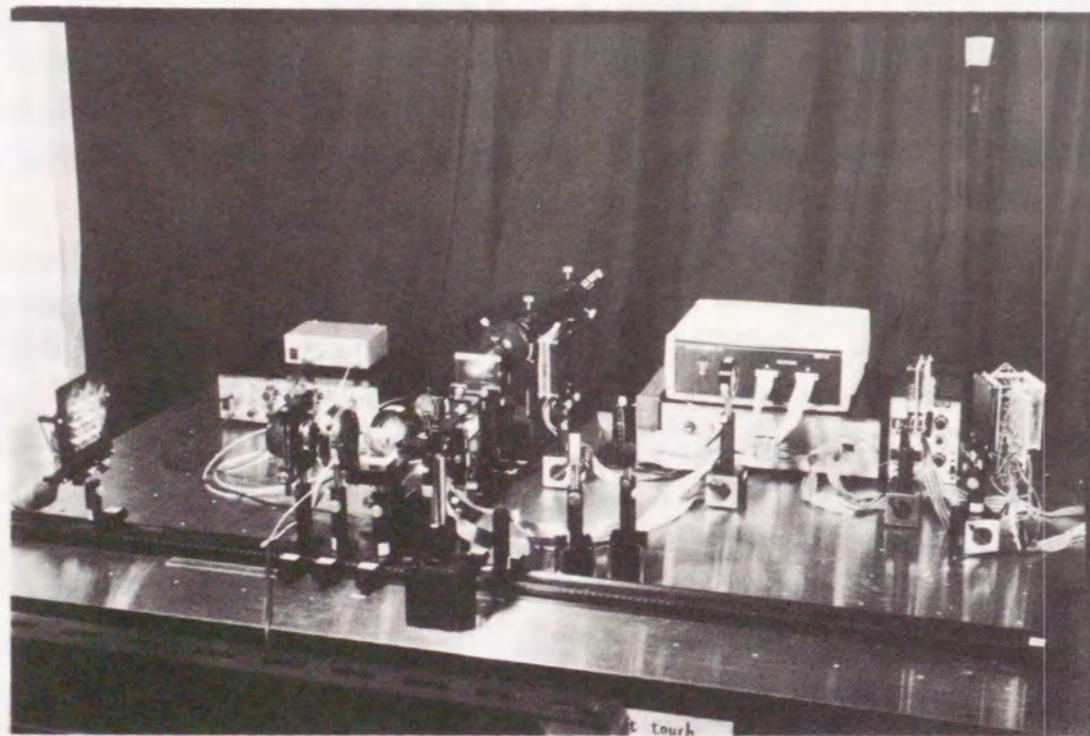
献[74]で述べられている2f相関光学系を利用しており、通常の4f相関光学系よりもコンパクトな構成が可能である。拡散板とフィルタアレイをそれぞれレンズL1の共役面に配置し、空間光変調器と光検出器アレイをレンズL2の共役面に配置した。空間光変調器に書き込まれた符号化画像を、レンズL1による収束光により読み出すことにより、フィルタ面上に2次の位相項がかかった符号化画像のフーリエ変換を得ることができる[75]。この2次の位相項はレンズL2によって補正される。また同時に、レンズL2はフィルタ面上のパターンのフーリエ変換を行う。相関画像にも2次の位相項がかかるが、強度で検出するため出力結果には影響しない。この光学系のフィルタ面に演算カーネルに相当する相関フィルタを置いて、符号化画像との相関演算を行う。

発光ダイオードアレイに表示された符号化画像をコヒーレント変換するために、空間光変調器LAPS-SLM(light addressed photoconductor and smectic C\* liquid crystal spatial light modulator)を用いる[76]。この素子は、光の偏光状態を変調するために強誘電性液晶を利用しており、検光子や偏光ビームスプリッタを用いると、光の強度変調が実現できる。LAPS-SLMの解像力は約100 lp/mmで、コントラストは約150:1、フレームレートは1.5 kHzである。今回用いた素子には液晶層と光検出層との間に反射膜が設けられていない。そこで、読み出し光による不要な書き込みを避けるために、読み出し光用のHe-Neレーザーの直後に光シャッターを配置して、空間光変調器へ信号を書き込む時には読み出し光を遮った。

相関フィルタとしては、演算カーネルパターンのフーリエ変換ホログラムを用いた。異なる演算を実行するため、数種の相関フィルタを2次元アレイ状に配置し、光路を切換えて相関フィルタを選択する。演算カーネルのフーリエ変換ホログラムを製作するときは、カーネル点を1点ごとに記録を行い、すべてのカーネル点を多重記録して一つの相関フィ



(a)



(b)

図2.8 H-OPALS3のカーネル選択型コヒーレント相関器

ルタとする。このように多重記録を用いた理由は、カーネル点間の干渉に基づく不要な回折光の発生を抑えるためである。例えば、AND演算を実行する演算カーネルは三つのカーネル点で構成されるため、そのフィルタを作製するために3回の多重記録を行う。

試作実験では、ホログラム材料として、銀塩乾板（アグファゲバルト社製10E75）とサーモプラスチック（ニューポート社製）を用いて記録を行った。銀塩乾板を用いたフィルタについては、回折効率を上げるために漂白して位相型のフィルタとして用いた。10回の多重記録を行った場合、銀塩乾板については12%、サーモプラスチックについては15%の回折効率を得ることができた。これらの回折効率が位相型ホログラムの理論的な最大回折効率33.9%よりも小さい値となった理由としては、露光条件の不適性、感材での光の吸収等が考えられる。

プログラマブルな処理を行うためにはフィルタを動的に選択する機構が必要である。そこで、相関フィルタアレイの前に光シャッターアレイを設置した。光シャッターアレイとして、アレイ数6×6の並列アクセス可能な液晶光変調素子である強誘電性液晶マトリックス（Displaytech社製）を用いた。この素子は、フレームレート10 kHzで動作でき、液晶を用いた光シャッターとしては高速な動作が可能である。相関フィルタ全体へ光を広げるために拡散板を挿入し、光シャッターの開閉により必要な相関フィルタを選択する。一度に複数のフィルタを選択して演算の自由度を上げることも可能である。拡散板によるスペクルノイズが相関画像上に発生するが、スペクルパターンが相関画像の画素サイズよりも十分小さければ、その影響を無視することができる。

### 2.4.3 電子処理部

電子処理の部分は、2.3.3で述べたものとはほぼ同じである。ただし、相関器からの出力光強度が低いため、復号器へ入力するための光信号の増幅率をH-OPALS 2よりも大きくした。

### 2.4.4 実験結果

試作したシステムにより3種類の並列処理を実行した。まず、システムの基本的な動作を確認するために簡単な画像間並列論理演算を行った。次に、試作システムによる連続動作の能力を示すために、画素値の反転の反復処理を行った。これらの処理は対応画素間演算であり、動的なフィルタの選択は必要ない。そこで、3番目の処理として、近傍画素間演算とフィルタ選択による処理の切り替えを確認するために、画像内の4方向へのデータ転送を行った。

#### A. 並列論理演算

図2.9は、AND演算、XOR演算、OR演算を行った実験結果を示す。図2.9(a)に示した入力画像A、Bが符号化され、6×6発光ダイオードアレイ上に図2.9(b)に示すような符号化画像が表示される。図2.9(c)に、相関フィルタアレイを示す。15種類の2変数論理演算を実行する相関フィルタが一つの銀塩写真乾板上に作成されている。符号化画像に対して、フィルタアレイからAND演算、XOR演算、OR演算を行うフィルタをそれぞれ選んで相関演算

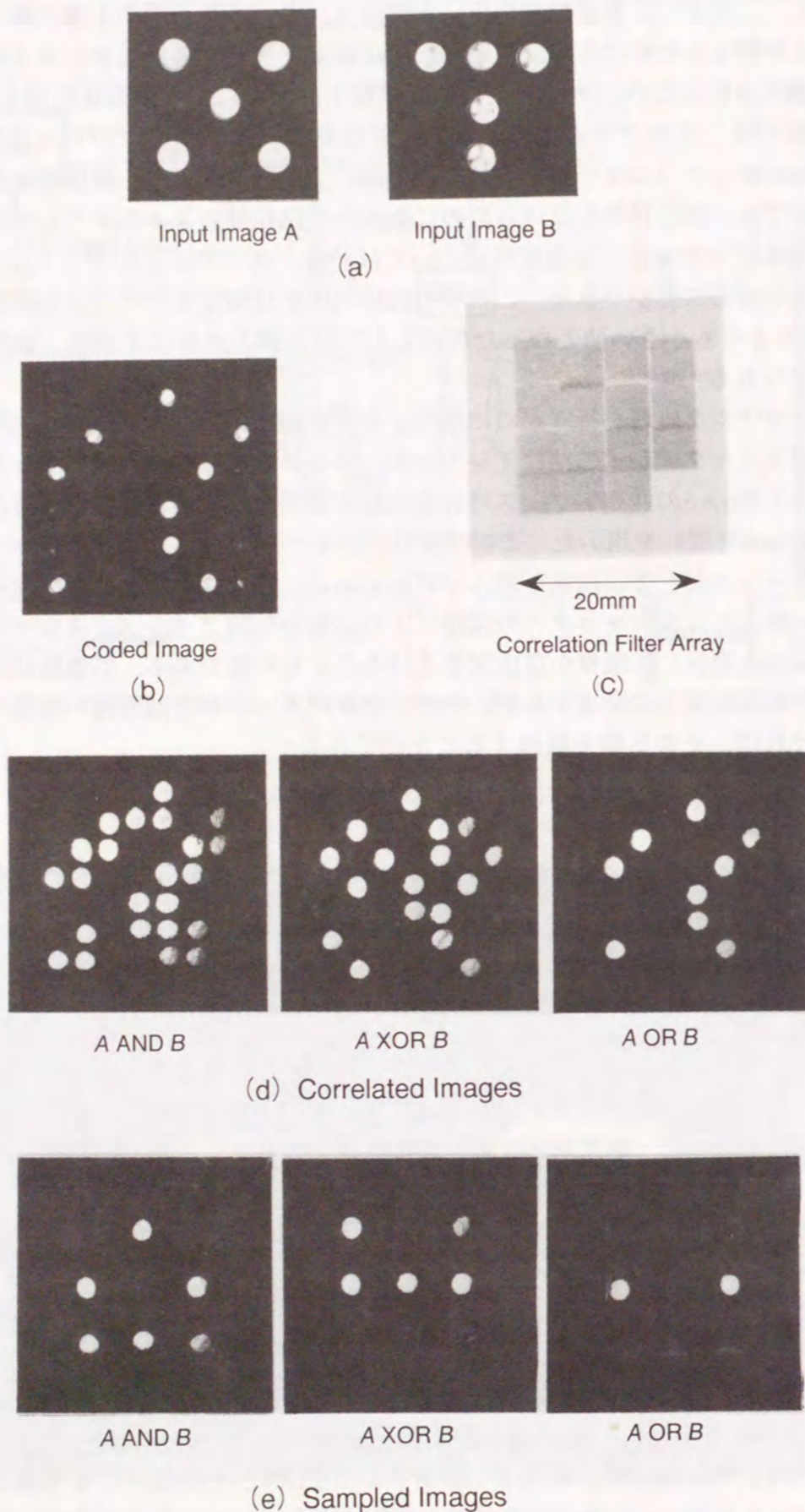


図2.9 H-OPALS3による対応画素間論理演算の実験結果

を実行した結果を図2.9(d)に示す。相関画像から、サンプリングを行う画素のみを残してマスクをかけると、図2.9(e)のように所望の演算結果が得られる。ただし、この結果は暗い画素を論理値1とみる暗論理で得られている。したがって、入力画像と同じ明論理として最終的な結果を得るためには、相関画像をサンプリングして復号器で画素値を反転する必要がある。

B. 画素値反転の反復処理

簡単な反復処理の例として、画素値の反転を繰り返して実行した。この処理では、画像中の各画素値が処理ステップごとに反転する。図3.10に、それぞれ、1) 空間光変調器への印加電圧、2) 読み出し光強度、3) 光検出器の応答、4) 画素値の状態、に対応する波形を示している。空間光変調器の印加電圧において、正電圧、負電圧、無電圧の期間はそれぞれ消去、書き込み、保持の期間に相当する。書き込み時には、光シャッターにより読み出し光を遮っている。空間光変調器が消去期間に入る直前に3)の光信号を取り込み、その反転値を4)の画素値としている。これらの波形から、相関フィルタの動的な選択を行わない場合、試作システムは約278 frame/secで動作することがわかる。この速度は光検出器による光電流の増幅の応答時間により制限されている。

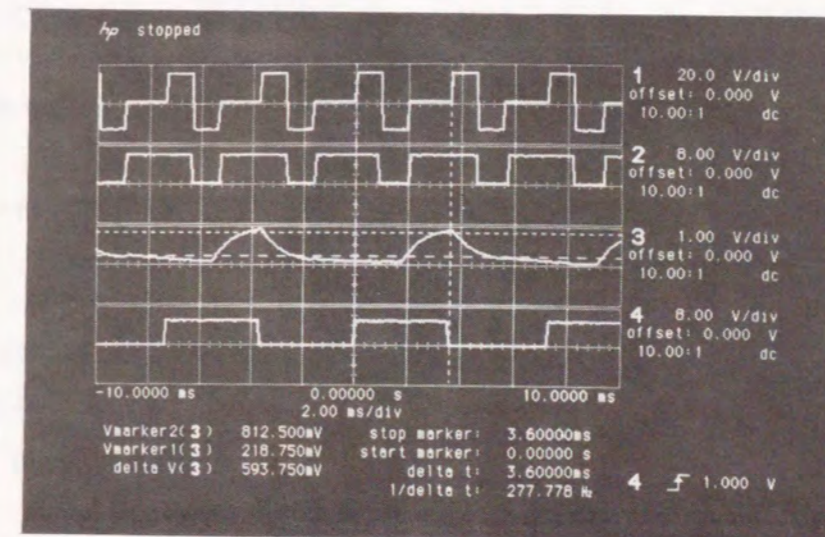


図2.10 反復反転演算の制御・出力波形

C. データ転送の反復処理

データ転送は、特定のデータを処理面内の所望の位置へ転送する演算であり、文献[43]で述べられているflexible-structured data processingにおいて必要な処理である。処理自体は並列シフト演算で実行できる。図2.11(c)は上方向へのサイクリックなシフト演算を行う演算カーネルを示す。演算カーネル中の四角のハッチングは近傍領域の中心画素の位置を表す。この処理により最上段の画素データは最下段の画素へシフトし、その他の画素データは1画素上へシフトする。

4方向へのサイクリックシフト演算を行う四つの相関フィルタを一つのサーモプラスチック上に製作して、相関フィルタアレイとした。この相関フィルタアレイを実験系にセットし、シャッターアレイにより一つの相関フィルタを選択する。図2.11は中心画素から上方向へシフトさせた結果を示す。図2.11(a)は入力画像Bを示しており中心画素にデータ点が置かれている。入力画像Aは全画素値を0とした。図2.11(b)に6×6の発光ダイオードアレイ上に表示された符号化画像を示す。図2.11(d)は、(c)のカーネルパターンと符号化画像との相関結果を示す。図2.11(e)は、相関画像をサンプリングし、明暗の反転を行った出力画像である。所望の結果が得られていることがわかる。

データ転送の反復処理の例として、液晶シャッターアレイを用いて選択する相関フィルタを動的に変更し、4方向のシフト演算を反復実行した。論理値1のデータが1ステップごとに移動し、4画素間を移動するように相関フィルタを選択した。その時の各画素値が変化の様子を図2.12に示す。次の画素へデータが移るまでの時間は図より約7msであるため、約143 frame/secの動作速度となる。処理速度は光検出信号の増幅の応答速度によって制限されている。

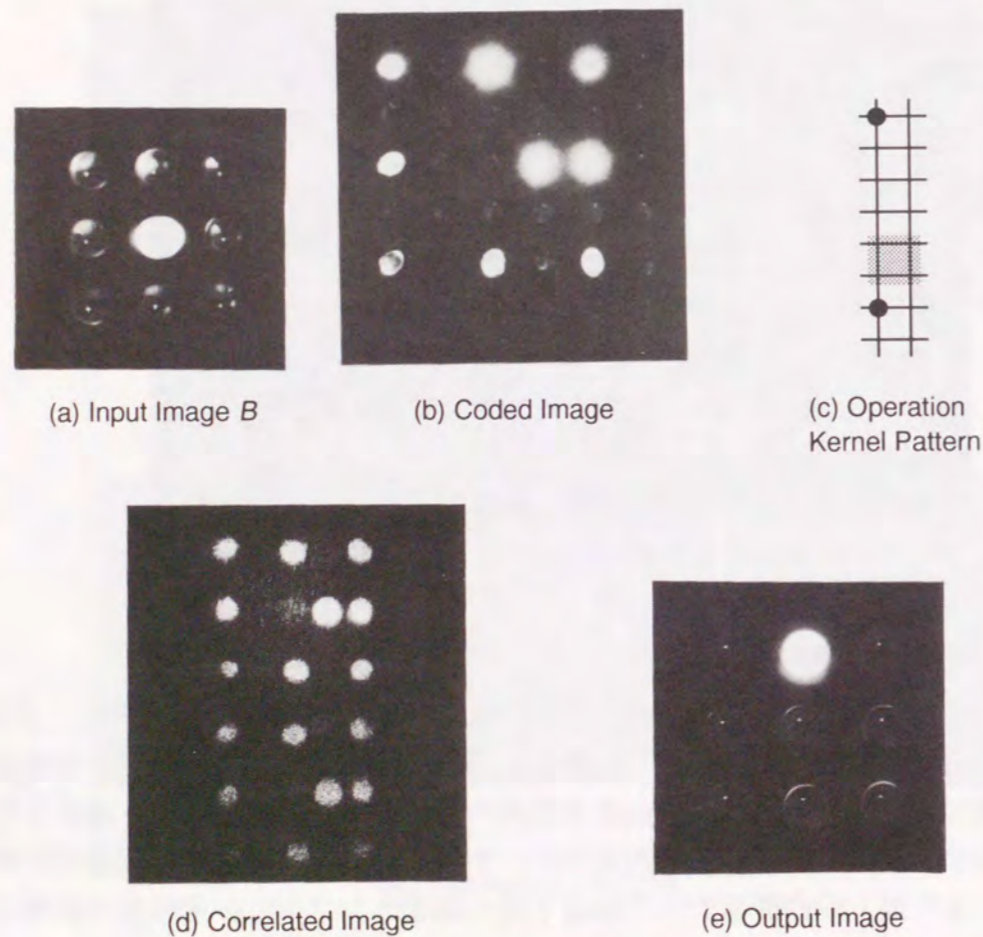


図2.11 上方向へのシフト演算の実験結果

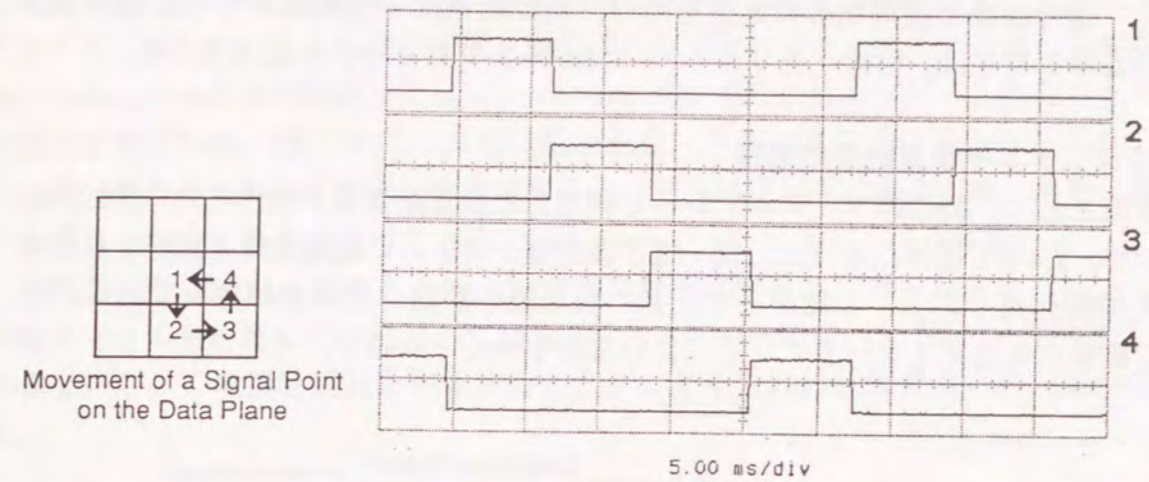


図2.12 反復シフト演算の出力波形

## 2.5 H-OPALS 16<sup>2</sup>

### 2.5.1 基本構成

図2.13にH-OPALS 16<sup>2</sup>の概念図を示す。これは基本的なOPALSの構成に、入力セレクタと画像メモリを付け加えたものである。画像メモリは、画像データの並列入出力を行えるため、データアクセスにおけるボトルネックを起さず、柔軟な並列演算の実行に役立つ。

図2.14に試作したH-OPALS 16<sup>2</sup>の構成図を示す。画像の符号化、復号、画像メモリ、データ入出力、システム制御を電子的に構成し、電子処理系としてまとめている。相関演算のみを光学系で行う。一度に扱う画素数は16×16画素とした。

H-OPALS 16<sup>2</sup>のデータの流について次に述べる。まずパーソナルコンピュータから画像メモリへ必要な画像データを入力する。次に、メモリから符号化回路へ入力画像A、Bを

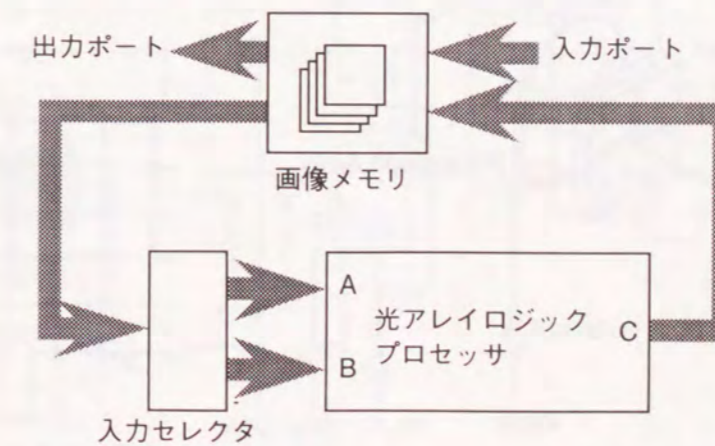


図2.13 入力セレクタと画像メモリを備えたOPALSの概念図

送り、符号化を行い、 $32 \times 32$ 発光ダイオードアレイに符号化画像を表示する。相関器で相関演算を実行し、サンプリングマスクを装着した $16 \times 16$ フォトダイオードアレイでサンプリングする。復号回路で論理和等の処理を行い、演算結果は一旦画像メモリに格納される。最終的な演算結果は、画像メモリからパーソナルコンピュータへ転送される。

### 2.5.2 プリズムアレイ多重結像相関器

相関光学系として、 $2 \times 2$ のプリズムアレイを利用した多重結像系を製作した。図2.15に光学系を示す。2.4でも述べたように、光・電子複合型システムの処理速度を制限する要素は光信号増幅回路である。したがって、光の利用効率が高い相関器が必要である。また、符号化画像は発光ダイオードアレイにより表示されているので、インコヒーレント画

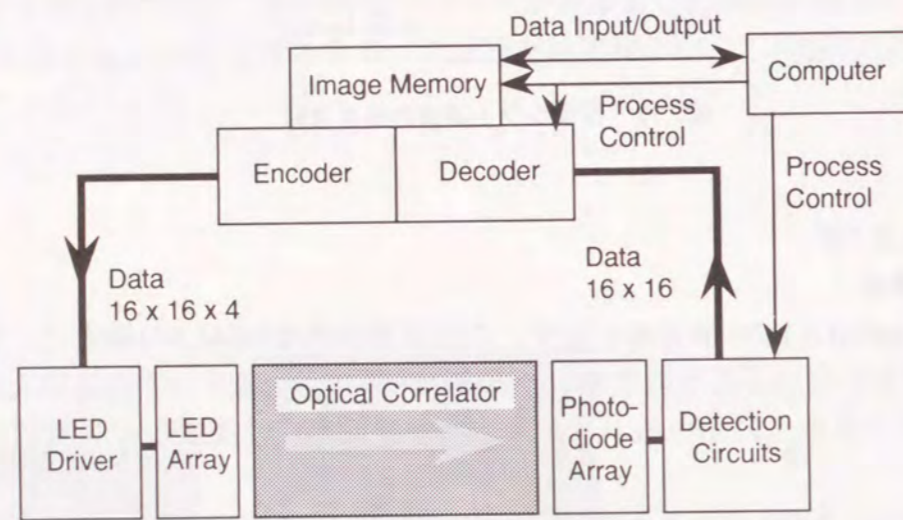


図2.14 H-OPALS  $16^2$ の構成図

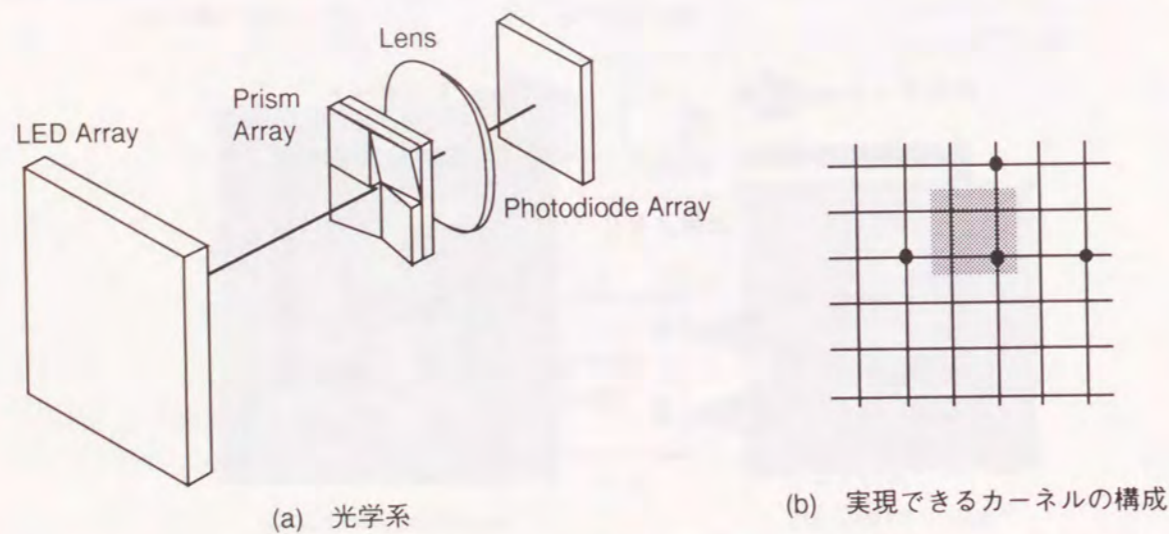


図2.15 プリズムアレイ多重結像相関器

像を直接扱える相関器が望ましい。プリズムアレイを用いた多重結像系はこれらの要求を満たす。 $2 \times 2$ 個のプリズムのシフト作用により四つのカーネル点可以实现できる。今回は、近傍画素間の接続ができるように、図2.15(b)に示すようなカーネルパターン用のプリズムアレイを用意した。中心画素と近傍3画素に対してそれぞれ一点ずつのカーネル点から構成される。対応画素間の演算として、NAND演算が実行される位置に各画素のカーネル点が設定されている。各プリズムの前に置かれたマスクにより光の通るプリズムを選択して、実行するカーネルパターンを決定する。マスクは固定式であるため、処理の過程で動的にカーネルを変えることはできない。

相関器の接続能力を高めるため、出力画像が倒立像として得られるようにフォトダイオードアレイを設置した。用意した $2 \times 2$ プリズムアレイでは、3方向の近傍接続しか实现できないが、この倒立接続を利用することにより4方向の近傍画素との接続が可能となる。

### 2.5.3 電子処理系

本試作システムは、使用デバイスとして発光ダイオードやTTL-IC、フォトダイオード、CMOSスタティックRAM (SRAM)などの個別デバイスを用いた。将来の実働システムでは電子処理系の集積化が必要である。

#### A. 符号化回路

1画素当たりの符号化回路を図2.16に示す。256ビットの並列処理を行うために、同様の回路を256個用意した。符号化回路への入力データはレジスタAとレジスタBに保持される。データの空間的符号化は、H-OPALS 2およびH-OPALS 3と同様に2ビットデコーダを用いて行われる。1画素当りに $2 \times 2$ 個の発光ダイオード(東芝製TLRA160)を割り当てて

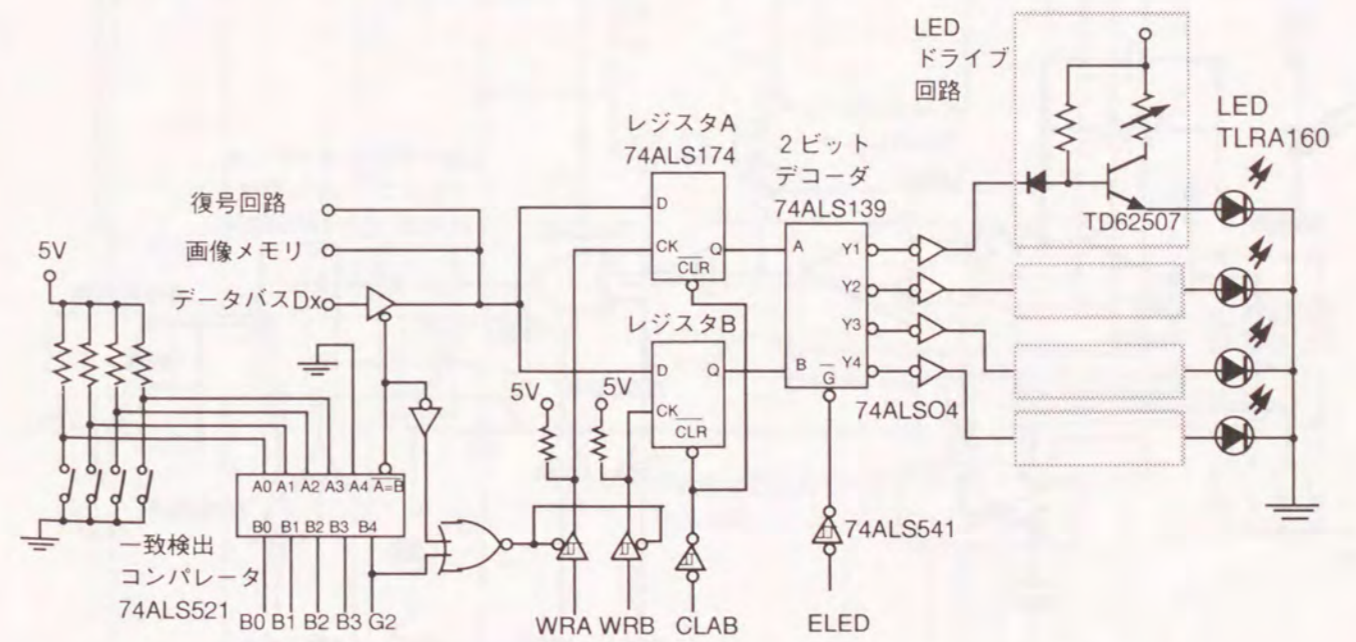


図2.16 符号化回路

おき、レジスタA, Bの値に従って2ビットデコーダにより一つの発光ダイオードを点灯させて符号化画像を表示する。二つのレジスタへ入力してから発光ダイオードが点灯するまで約150ns要する。LEDドライブ回路は約600kHzまで動作可能である。

B. 復号回路

復号回路を図2.17に示す。各画素ごとに並列処理を行うため、同様の回路を256個用意した。相関画像は、サンプリングマスクを通してPINフォトダイオードアレイ（浜松ホトニクス製S3805）で検出する。OPアンプにより光電流の電流・電圧変換および増幅を行い、ボルテージコンパレータにより0V/5Vの二値信号に変換する。光アレイロジックでは相関結果の結果に対して暗論理を適用するため、論理値を反転させる必要がある。しかし、処理の柔軟性を得るため、XORゲートを用いて信号の反転と非反転を選択できるように設計した。逐次的論理和はJKフリップフロップにより行う。フリップフロップからの出力は、非反転値と反転値を選択することができる。通常の光アレイロジックのプログラムではそのまま出力するが、積項数を減らして演算効率を高めるために負論理[48]のプログラミング技法を用いる場合は、さらに値を反転させる必要がある。そこで、電子系のわずかな変更により演算効率を大幅に上げる可能性があるため、反転/非反転の選択機能を設けた。

復号回路で要する時間は、光信号の検出時間の占める割合が大きい。TTL-ICの応答時間はそれぞれ数~数十ns, コンパレータの立ち上がりは1.5 μs以下である。フォトダイオードおよび増幅回路の応答は光強度に依存する。フォトダイオード上での照度を約2 μs/mm<sup>2</sup>から約442 μs/mm<sup>2</sup>まで変化させた場合、増幅器を含めた光検出回路の応答周波数は、実測値として約12 kHzから約89 kHzの間で変化した。

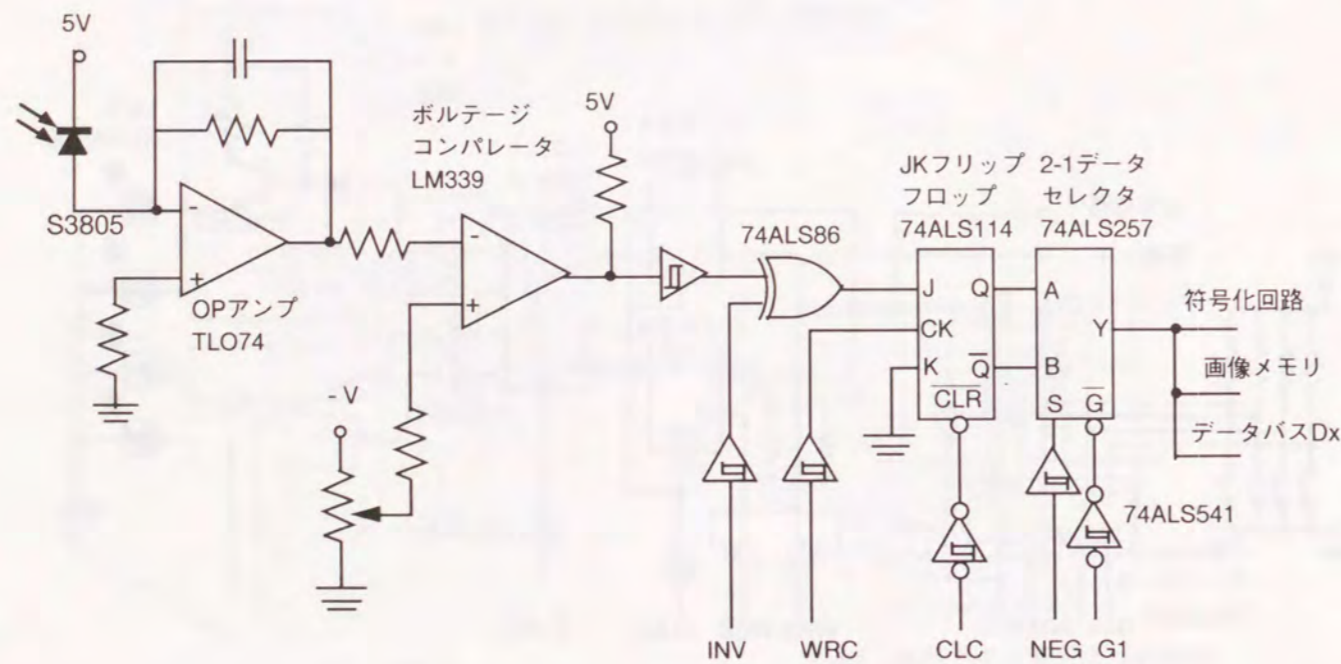


図2.17 復号回路

C. 画像メモリ

OPALSのように並列度の高い演算システムでは、そのシステムの機能を十分発揮するために、同程度の並列入出力能力を持つ記憶装置が必要である。H-OPALS 16<sup>2</sup>では、システムの並列処理画素数と同じ256ビットの並列入出力が行える二値画像メモリを用意した。記憶容量は256ビット画像に対して2048フレームに相当する。メモリの各入出力ポートは各画素の符号化/復号回路と一対一に対応しているため、各画素の処理要素が局所メモリを持っていると見なすこともできる。

メモリ周辺の回路図を図2.18に示す。使用メモリは8ビット同時にデータを入出力する

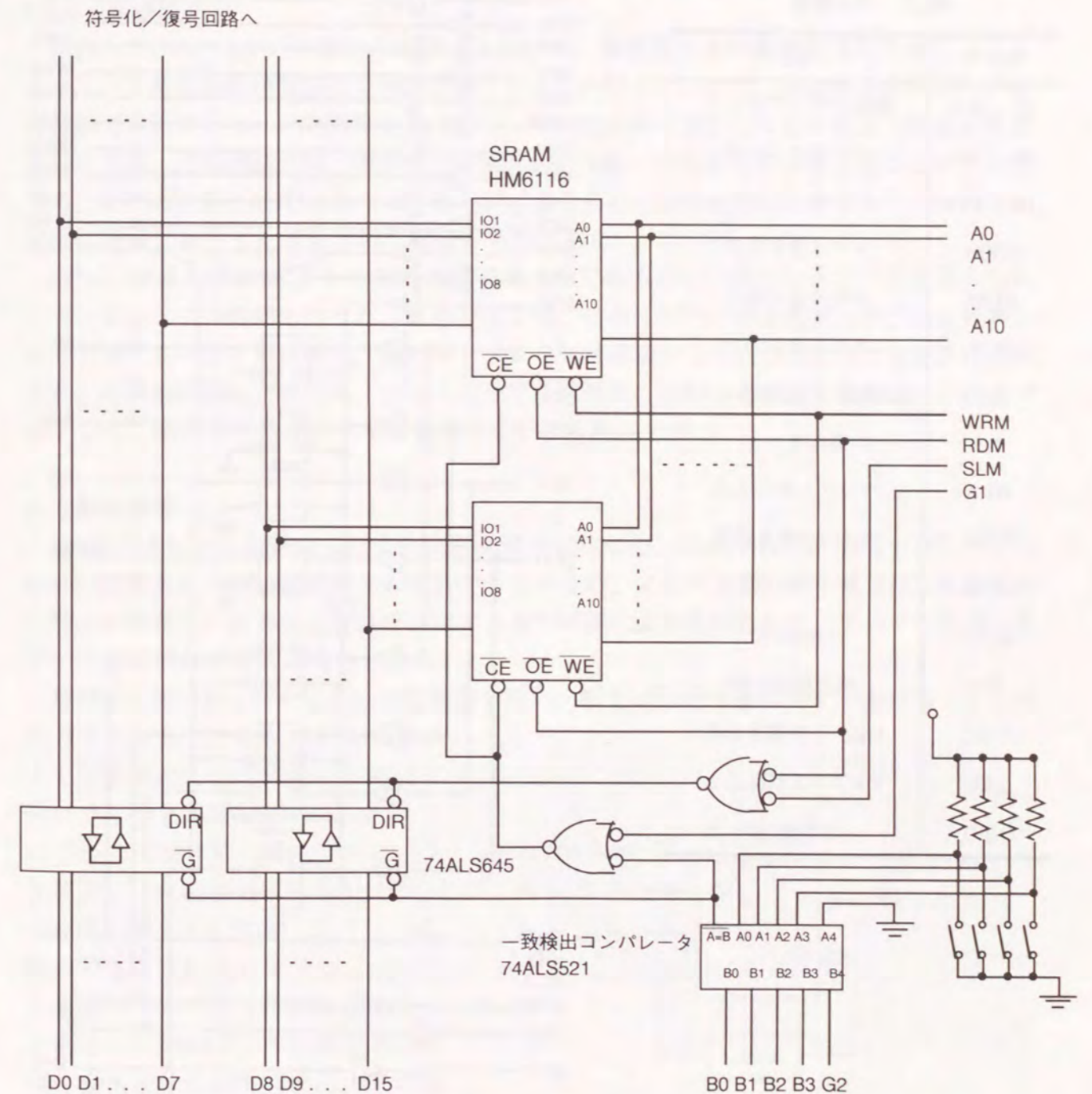


図2.18 画像メモリ回路

16KビットスタティックRAM(日立製LHN6116LP-3)を32個用い、これらを同時に動作させて256ビットの同時入出力を行う。このSRAMはデータアドレスを入力してから150ns以内でデータを取り出せる。したがって、メモリを並列動作させることにより、約150nsで256ビット画像データを読み出すことができる。パーソナルコンピュータとの画像データのアクセスを行う場合は、16ビットのデータバスを用いる。16ビットの出力は約150nsかかる

表2.1 バス信号

信号名	内容
A0 ... A10	画像メモリアドレス
B0 ... B3	ボードアドレス
D0 ... D15	データ
WRM	メモリ書き込み
RDM	メモリ読み出し
SLM	メモリセレクト
G1	復号器/メモリ出力セレクト
G2	動作モード
WRA	ラッチA書き込み
WRB	ラッチB書き込み
CLAB	ラッチクリア
ELED	LED発光
INV	検出信号反転
WRC	ORラッチ書き込み
CLC	ORラッチ読み出し
NEG	出力値反転

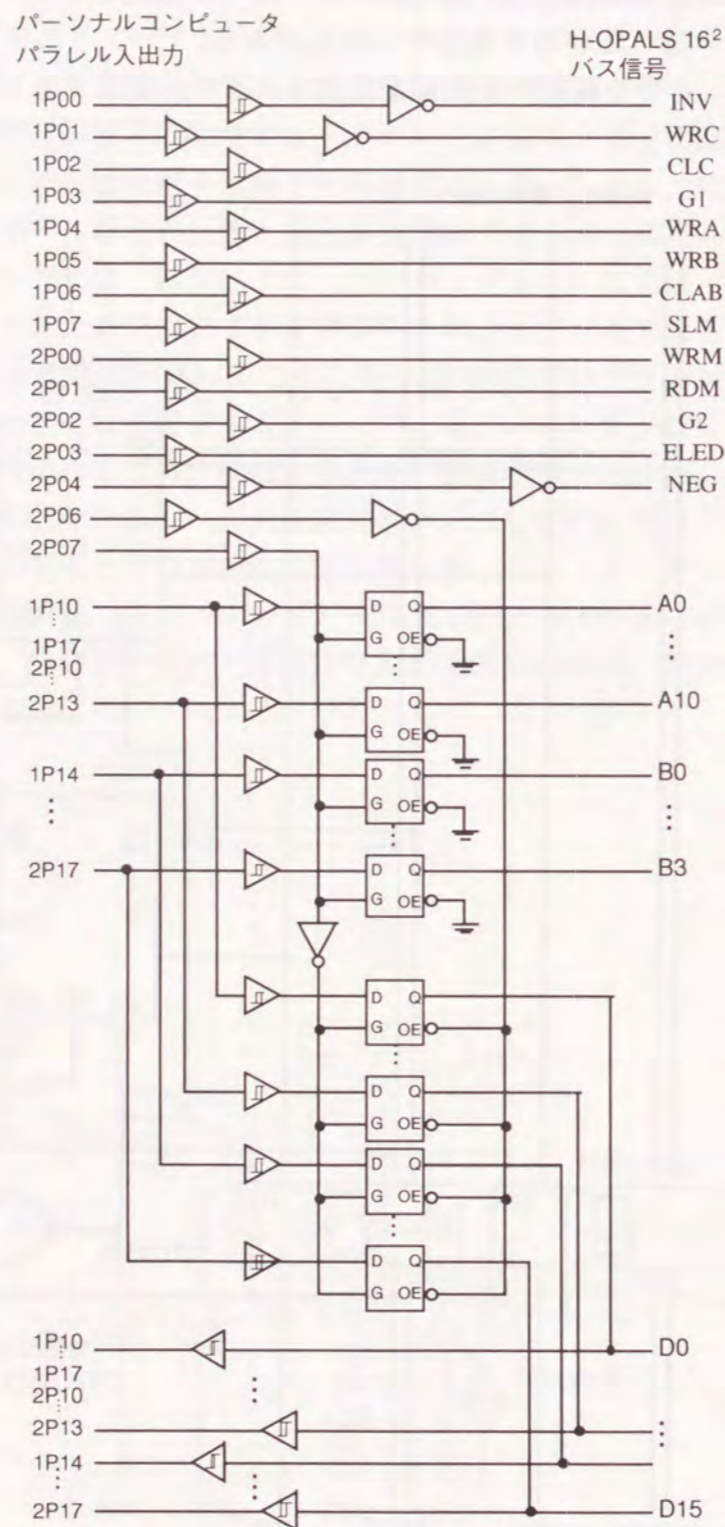


図2.19 バス制御用インターフェイス回路

ため、256ビットのデータは最速で約2.4μsで出力できる。

D. システム制御

システムにおけるバス信号を表2.1に示す。システムバスは、図2.19の回路を介して48ビットパラレル入出力モジュールを装備したパーソナルコンピュータと接続されている。システム制御は、バス信号をパーソナルコンピュータにより制御して行った。各画素に対応する処理回路を共通のコントロールバスによって制御するので、全システムは、容易にSIMD動作させることが可能である。

2.5.4 実験結果

試作したH-OPALS16<sup>2</sup>の動作を確認するために、数種類の並列処理を実行させた。プリズムアレイ多重結像相関器は2×2のカーネルしか扱えないので、対応画素間演算は一对一接続で実現できるNAND演算を利用した。NAND演算の組合せにより任意の論理演算が実行できる。復号回路では、検出信号の論理値の反転・非反転を切り替えることができるため、NAND演算とAND演算の切り替えが可能である。近傍画素間接続は3方向のシフトと倒立接続により4近傍画素間の接続が可能である。

OPALSは基本的に1ビットの処理要素の集まりであるため、多ビットデータを扱うためにビットシリアル処理を行った。この方法では、2次元データの各ビットごとに分割してビットプレーンを形成する。各ビットプレーンは画像メモリ内の異なるアドレスに格納され、逐次的に読みだされる。ビットシリアル処理は、データのビット長を自由に設定でき、また、演算カーネルのサイズを小さくできる利点を持つ。

A. 数値演算

256個の8ビット整数対に対する四則演算を実行した。H-OPALS 16<sup>2</sup>では一度に一つのNAND演算あるいはAND演算しか実行できないため、メモリを用いてそれらの演算結果を一時的に保存し、必要なときに呼び出すことで所望の演算を実行した。すべての処理は各データ対に対して並列に実行される。

加算は、図2.20に示すように全加算器を用い、桁上げ信号を遅延させて上位ビットに伝搬させながらビットシリアル処理により和を求めていく桁上げ伝搬法を用いた。全加算器は図2.21(a)のように二つの半加算器で構成できる。半加算器は、NANDゲートとANDゲートを用いると図2.21(b)に示すように構成できる。作成システムは、1回の処理ステップで1つのNANDゲートあるいはANDゲートに相当する処理を全画素並列に実行する。その処理結果を一時的にメモリーに保存

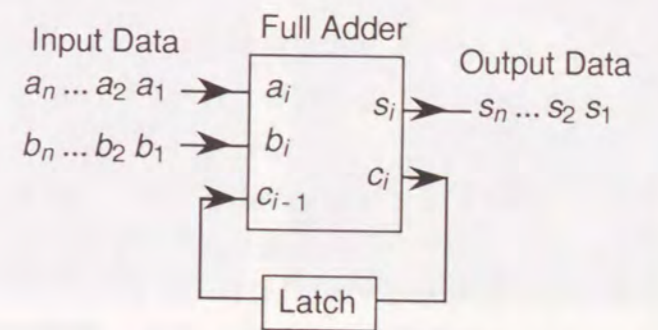


図2.20 全加算器によるビットシリアル加算の実行

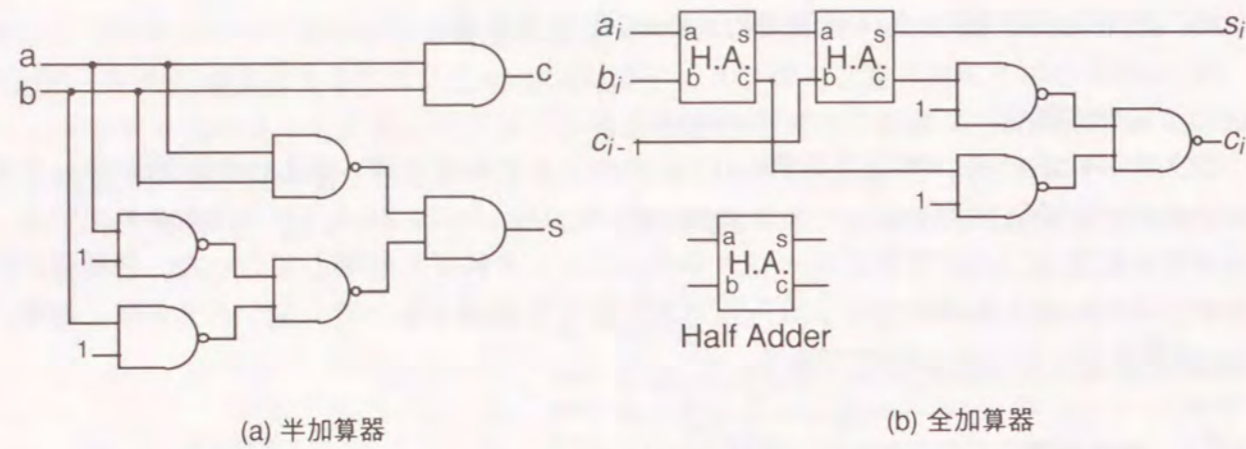


図2.21 加算器の実現

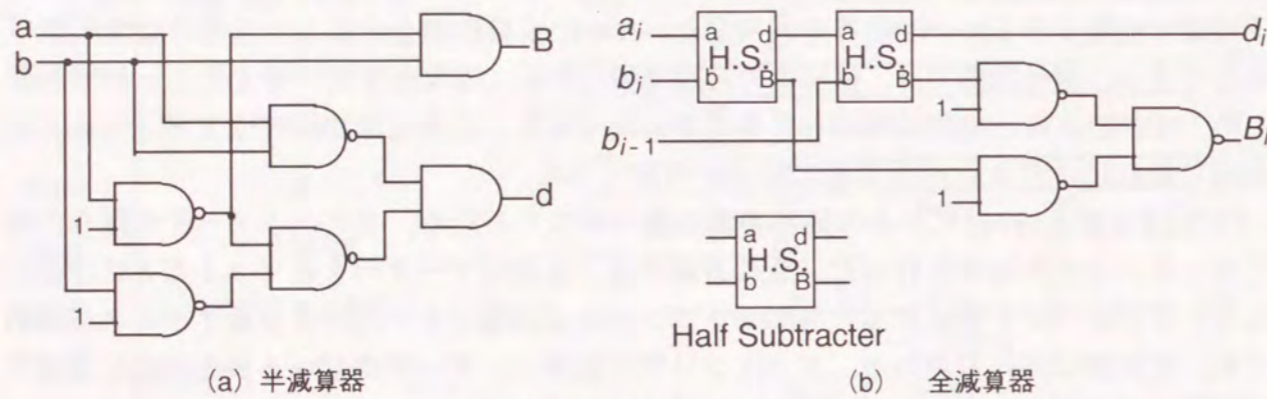


図2.22 減算器の実現

し、必要なときに呼び出して他の論理ゲートに相当する演算に用いる。以上のような処理を繰り返して、作成システムにより図2.21の加算回路をエミュレートする。減算についても、加算と同様に、図2.22に示すような半減算器を作成システムによりエミュレートして実現した。

乗算は、筆算による計算と同様の手法で行った[77]。すなわち、乗数の各位ごとに被乗数に対する積演算を行い、それらの結果の加算を行う。積演算は、まず乗数の各ビットの値と被乗数とのAND演算を行い、その結果を乗数のビットの位に応じて上位ビットへシフトさせて求められる。例えば最下位ビットならシフトなし、第2位ビットなら1ビットシフト、第n位ならn-1ビットシフトとする。このビットのシフトは、データを格納するメモリアドレスのシフトで簡単に行える。加算は先に述べた方法を用いた。

除算には引き放し法を用いた[77]。商のnビットを求めるために、被除数から除数を引いて剰余を求め、その結果が正なら商として1をたて、負なら0をたてる。剰余を1ビット下位にシフトさせ、再び剰余を引いて商のn-1ビットを同様にして求める。下位ビットについてもこれらの処理を繰り返す。剰余が負になる場合は、引き過ぎであるから除数を加えて元へ戻せばよいが、それだけ演算時間が増えることになる。そこで引き放し法では、nビット目の剰余が負になっても、除数を加えずにそのまま剰余を上位ビットにシフトさせ、n-1ビット目で剰余を求めるときに除数を加える。商のn-1ビット目も剰余の正

表2.2 四則演算における処理性能

	Addition	Subtraction	Multiplication	Division
Data size of Operands	8 bit + 8bit	8 bit - 8bit	8 bit × 8bit	16 bit ÷ 8bit
Data size of Output	8 bit	8 bit	16 bit	8 bit
Number of NAND/AND Sequence	111	126	912	1312
Total Processing Time (ms)	5.8	6.7	48	68
Processing Time per a Pair of Data (μs)	23	26	190	265

負から求め、以下同様に下位ビットの計算を行っていく。剰余の正負の判断は、最上位ビットを符号ビットとして、それが0の時は正、1の時は負とする。減算を行う場合は、減数のビットを反転し、さらに1を加えて補数を求め、被減数との加算を行う。ビットのシフトはメモリアドレスのシフトで行い、加算は先に述べた方法を用いた。

表2.2は試作システムで実行した四則演算、データサイズ、NAND/AND演算の回数、全処理の実行時間、一つのデータ当たりの実行時間をまとめる。これらの結果から、H-OPALS 16<sup>2</sup>の平均処理速度は約19 kframes/sec.であることがわかる。この場合、システム内部のクロックサイクルは約200 kHzである。

### B. 多値画像処理

画像メモリの有効性を示すため、システムの処理要素数よりも多い画素数を持つ画像の加算処理を実行した。8ビット整数データで128×128画素からなる2つの画像を、それぞれ16×16画素からなる64枚のサブ画像に分割し、画像メモリに格納する。ビットプレーン展開するため、1枚の画像を格納するため、512フレーム分のメモリ領域を要した。画像

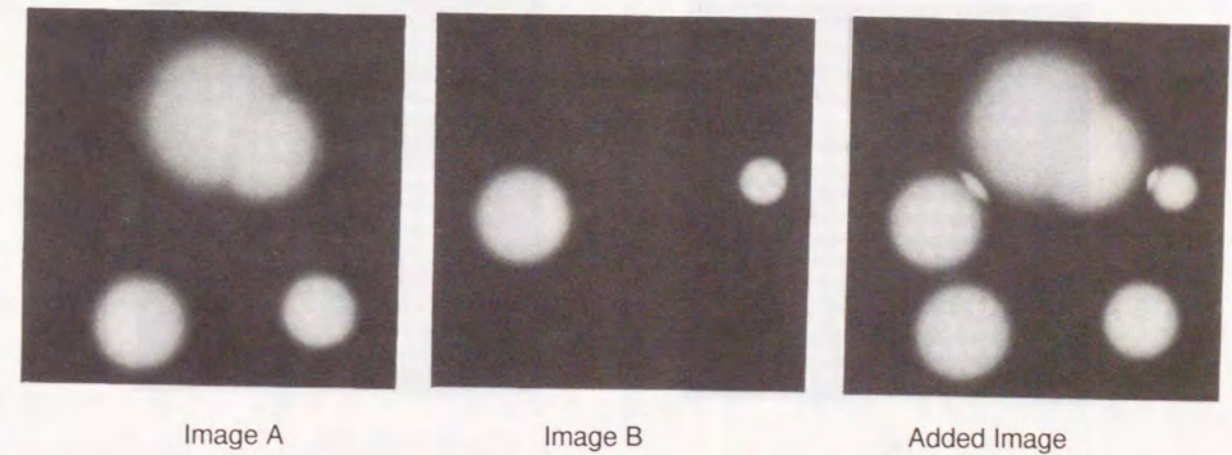


図2.23 多値画像の加算結果。8ビット128×128画素構成。



の加算は、通常の8ビット加算処理を64枚のサブ画像に対して実行した。図2.23は得られた結果を濃淡画像に変換して表示したものである。この処理を完了するのに約372ms秒を要した。

C. 数値形態学的画像処理

プリズムアレイ多重結像相関器による近傍画素間演算を試すために、数値形態学的画像処理[78]におけるクロージング演算を実行した。クロージング演算は、数値形態学の基本演算である膨張・侵蝕を続けて行うことで実現できる。ここでは、値1を持つ画素を右側へ1画素分だけ膨張させ、次に侵蝕を行い、二値画像中の画素値0の孤立ノイズ除去を行った。この膨張と侵蝕の演算を、入力画像の画素を $a(i, j)$ とし、出力画像の画素値 $c(i, j)$ としたときの近傍画素間演算で表すと、それぞれ次式のようにかける。

$$c(i, j) = a(i, j) + a(i-1, j-1) \quad (2.2)$$

$$c(i, j) = a(i, j) a(i+1, j+1) \quad (2.3)$$

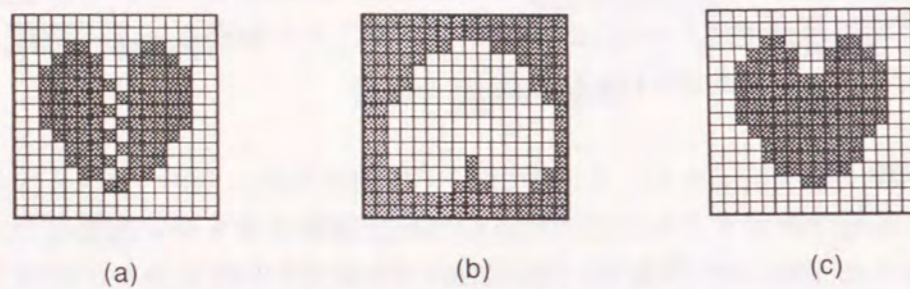


図2.24 クロージング演算の論理出力

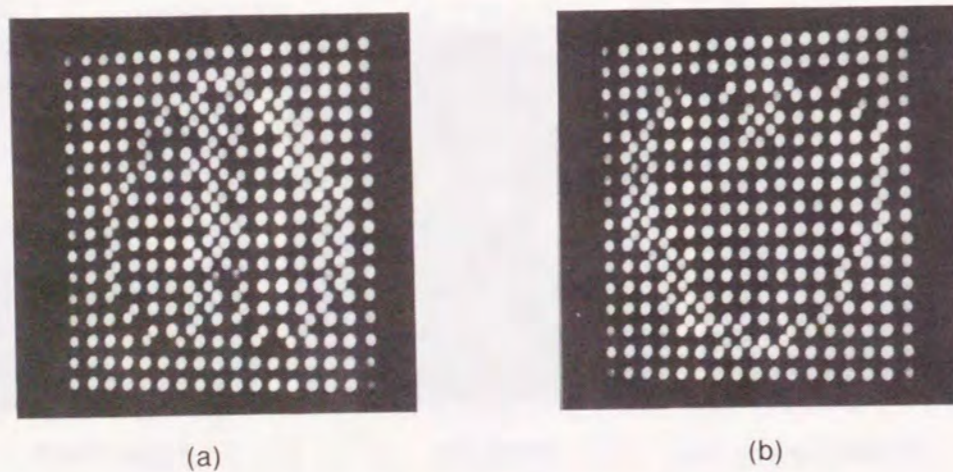


図2.25 クロージング演算における相関画像

ここで、座標は垂直下向きに $i$ をとり、水平右向きに $j$ をとるものとする。膨張演算を表す式(2.2)は項を二つ持つが、負論理[48]を用いて次式のように一つの項にまとめると、1回の相関演算で膨張演算を実行することができる。

$$\overline{c(i, j)} = \overline{a(i, j) a(i-1, j-1)} \quad (2.4)$$

つまり、式(2.3)と式(2.4)で表される2ステップの演算を実行することにより、クロージング演算が実行できる。この演算を実行するため、相関器のプリズムアレイから直進と右へのシフトとの二つのプリズムを選択して相関演算を行った。図2.24(a)は入力画像を表しており、ハート形のパターンの上に画素値0のノイズがのっている。図2.24(b)は画像の膨張を行った結果である。図中のパターンが1画素分膨張し、ノイズは除去されている。ただし、演算結果は画素値が反転されており、相関器での倒立接続のために倒立像となっている。侵蝕演算では、シフトの方向は膨張の場合と逆向きであるが、膨張演算の出力は倒立像になっているため、実際の処理では膨張演算の時と同じプリズムを選択して相関演算を行うことができる。図2.24(c)は侵蝕演算を実行した結果を示す。ノイズの除去されたハート形のパターンが得られている。図2.25(a), (b)に、膨張・侵蝕のそれぞれのステップで得られたフォトダイオードアレイ上の相関画像を示す。

2.6 考察

各試作システムにおける処理能力を制限する要因とその改善方法について考察する。

まず、処理画素数について検討する。試作システムの処理画素数はいずれも用いた相関光学系の解像点数よりもはるかに少ない値である。しかし、光・電子変換や電子回路のために個別の素子を用いているかぎり、16×16以上の画素数の実現は困難である。処理画素数を増加させ、さらに、高い安定性・信頼性を得るためには、光電子集積技術を利用してH-OPALS専用の光電子デバイスを開発する必要がある。電子処理は各画素ごとに独立な処理要素を用意すればよいので大規模集積化に向いている。

ここで、光電変換部に必要な消費パワーを概算する。光検出器としてフォトダイオードを用いたとき、最小の検出パワー $P_{\min}$ は次式で表すことができる[79]。

$$P_{\min} = 2\sqrt{\pi} \frac{h\nu\Delta\nu}{e\eta} \sqrt{kT_c C_d} \quad (2.5)$$

ただし、 $\Delta\nu$ は要求される変調帯域幅、 $C_d$ は接合容量、 $\eta$ は量子効率、 $T_c$ は等価雑音温度を表す。符号化画像はレーザーダイオードアレイなどの発光素子を用いて表示されるとする。演算カーネルのサイズを $K \times K$ としたとき、一つの発光素子から発せられた光は $K^2$ に分割されて、各フォトダイオードへ到達すると仮定する。この条件より、各発光素子に要求される最小のパワー $P_c$ は次式で表される。

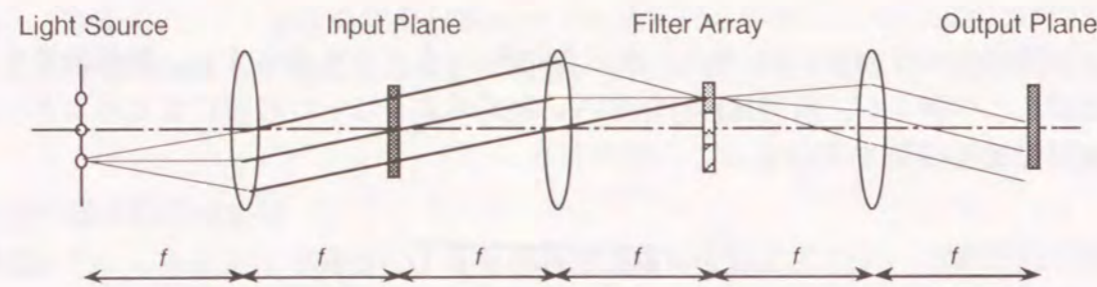


図2.26 点光源アレイによるカーネル選択機構

$$P_e = \frac{K^2 P_{\min}}{\eta_{co} A} \quad (2.6)$$

ただし、 $\eta_{co}$ は発光素子の量子効率、 $A$ は光シャッター等による光学的な損失とする。例えば、使用波長 $1.4\mu\text{m}$ 、 $C_d=1\text{pF}$ 、 $\Delta v=1\text{GHz}$ 、 $\eta=50\%$ 、 $T_e=1490\text{K}$ の条件では、 $P_{\min}=9 \times 10^{-7}$ となる。このとき、 $A=80\%$ 、 $K^2=22^2$ とし、 $\eta_{co}=30\%$ の発光素子を用いたとすると、 $P_e \approx 1.8\text{mW}$ となり、実現可能な値が得られることがわかる。

次に、処理速度について検討する。試作システムにおいて処理速度を制限している主要因は、カーネル選択の部分と相関結果の光信号増幅回路である。H-OPALS 2、H-OPALS 3では、カーネルを選択するために液晶による光の変調を利用していたが、液晶を用いたデバイスの動作速度をこれ以上向上させるのは困難である。そこで、カーネルの高速な変更が可能な相関器として、図2.26に示すように、光源として2次元レーザーダイオードアレイを用いた光学系を利用することが考えられる。レーザーダイオードアレイとフィルタ面を共役関係にしておき、各レーザーダイオードと相関フィルタが1対1の関係になるように配置しておく。対応するレーザーダイオードを発光させることにより、高速にフィルタを選択することができる。

一方、光検出の応答特性は入射する光強度が大きいほど早くなるので、高速化のためには光源の高輝度化と光学系の光利用率の向上が必要である。光利用率の向上のためには、まず各光素子の改良が必要である。H-OPALS 3では、使用した空間光変調器の反射率が数10%と低いが、反射膜を設けることにより改善が可能である。また、相関フィルタの回折効率は、体積ホログラムやブレース化した計算機ホログラムの利用によりさらに向上させることができる。

光の利用率の高い光学系の形態を検討することも必要である。H-OPALS 2の多重ピンホール相関器は、ピンホールを通る光のみを用いるため原理的に光の利用率が低く、これ以上の改善は困難である。H-OPALS 3のカーネル選択型コヒーレント相関器は、単一のレーザー光源からの光を全体の画素に分配し、さらに相関フィルタアレイの全体にも分配しているため、光の利用率が低い。この問題を解決する一つの方法は、図2.26に示すように、光源として2次元レーザーダイオードアレイを用いることである。この方法では、一つのレーザーダイオードが一つのフィルタによる相関演算に用いられるため、一つの光源からの光パワーをすべてのフィルタに分配する方法と比べて、光の利用率が高い。ま

た、レーザーダイオードの数を増やせば、各検出器へ到達する光パワーを減らすことなくフィルタ数を増やすことができる。

他の光の利用率のよい相関光学系としては、レーザーダイオードアレイに符号化像を表示する方式が考えられる[80]。この方式では、レーザーダイオードからの光パワーは演算カーネルのカーネル数だけ分割されるが、その数は普通画素数よりも小さい値である。したがって、各検出器へ到達する光の利用率はこれまでに述べた2方式よりも優れており、画素数に対して高い拡張性を持っている。また、この相関器は空間的にインコヒーレントとなるためコヒーレントノイズを生じない。空間光変調器の照明系が不要であるため、コンパクトに構成できる利点も持つ。

## 2.7 結言

本章では、完全並列処理が可能な三つのH-OPALSの試作、ならびに並列処理の実行結果について述べた。H-OPALS 2は $3 \times 3$ 画素の2値画像に対して45 frame/sec、H-OPALS 3は $3 \times 3$ 画素の2値画像に対して278 frame/sec、H-OPALS  $16^2$ では、 $16 \times 16$ 画素の2値画像に対して19 kframe/secで動作できた。試作システムの処理能力は、デジタル演算システムとして利用するには十分とはいえない。しかし、OPALSに必要な基本的機能は備えているため、将来のシステム実現におけるひな形となりうる。今後の実用化、高性能化に対する研究が必要である。システムの動作速度はおもに光強度の不足が原因となるため、光の利用率のよい光機能素子および光学系の構成が必要であることがわかった。また、画素数の増やすためには、高密度に集積されたOPALS専用光機能素子と光学系の効率的な構成法の開発が重要であることを明らかにした。さらに、処理の信頼性・安定性の向上、および高精度のアライメントを実現するためには光学系の効率的な構成手法の開発が必要である。

### 第3章 反射型多重投影相関器

#### 3.1 緒言

第2章で述べた光・電子複合型OPALSの試作システムは、製作の容易さから個別の電子部品や光学素子を用いて光学定盤上に構成されている。しかし、OPALSをより実用的なシステムに発展させるためには、光電子集積回路技術[16]や集積光学技術[27-33, 53, 54, 81]を用いてシステムの集積化・一体化を図り、安定性・信頼性を得る必要がある。特に、OPALSにおいて中心的な役割をする相関光学系の設計と実現方法が重要な課題となる。コンパクトな離散相関器を構成するためには多重投影光学系は非常に有効である。しかし、多重投影光学系では入力面と出力面を別々に用意する必要があるため、システムの集積化に適した実装が困難であるという問題が生じる。

本章では、光・電子複合型OPALSの集積化を目的とした反射型多重投影相関器を提案し、その高密度化について検討する[111, 112]。以下、3.2では、反射型多重投影相関器の構成を説明し、3.3で原理検証実験の結果を示す。3.4では、システムの処理能力を決定する処理画像の画素点数とシフト量について考察し、さらに処理能力向上のための方法を提案する。

#### 3.2 反射型多重投影相関器

##### 3.2.1 多重投影光学系とシステム集積化における問題点

図3.1に示す多重投影光学系[36]はコンパクトに離散相関器を構成する上で非常に有用である。多重投影光学系では、透過型の空間光変調器に符号化画像を表示し、発光ダイオード等の点光源アレイにカーネルパターンを表示する。点光源からの光はレンズによって平行光になるので、投影された像は元の像と等倍率になる。光源の点灯位置を変えると像を投影する平行光の傾きが変わり、投影像はシフトを受ける。複数の点光源を点灯させたときこのシフトと複数の投影像の重ね合わせの結果、符号化画像とカーネルとの離散相関演算が実現される。その後、光アレイロジックの手順にしたがって、光検出素子により相関画像を1画素おきにサンプリングし、復号処理として反転論理和演算を行うことにより種々の論理演算を実現できる。

しかしながら、多重投影光学系を用いた光・電子複合型OPALSの集積化を考える場合、入力面と出力面が離れているため、光変調素子、光検出素子、符号化回路、復号回路等を一体化して集積することができない。符号化回路と光変調素子あるいは復号回路と光検出素子はそれぞれ一組の光電子集積回路として用意できる。しかし、演算結果をフィードバックして反復処理を行うためには、二つの光電子集積回路を接続するフィードバック伝送路が必要となる。処理の並列性を保つためには、各画素データを並列に伝送できる必要があるが、これを電気的に行うのは困難である。光接続技術の適用も考えられるが、発光・受光素子を新たに付加する必要があり、消費エネルギーや製作の困難さが増すことになる。

##### 3.2.2 反射型多重投影相関器の原理

多重投影光学系における集積化の問題を解決するために、反射型多重投影相関器を考案した。これは、同一基板上に符号化回路、光変調素子、光検出素子、復号回路を集積できるように、反射光学系を導入して入力面と出力面を同一平面に配置したものである。図3.2にその構成を示す。光電子集積回路の部分は、反射型光変調素子[19, 18, 82, 83]4セルと光検出素子、符号化回路、復号回路を1画素区画分の処理要素として、この処理要素を処理画素数だけアレイ状に配置したものである。

この相関器の動作は以下の通りである。四つの光変調素子の内の一つがオン状態になることで符号化画像の1画素区画の情報を表示する。光変調素子で変調された光信号を同一面にある光検出素子へ折り返すために、光を透過する部分と反射する部分を持つパターンミラーを用いる。点光源アレイには演算カーネルのパターンを表示する。各点光源からの光は、コリメータレンズにより傾いた平行光となり、パターンミラーの透過部から光変調素子へ入射する。光変調素子で反射された光は、パターンミラーで再び反射されて光検出素子へ入射する。幾何学的関係により、入射光の角度によって光変調素子から光が届く位置までの距離が変わる。この距離を画像シフト量と呼ぶとすると、点光源の点灯位置によって画像シフト量が変わる。像面とパターンミラー面との距離を $z_M$ 、レンズの焦点距離を $f$ とすると、画像シフト量 $\delta_x$ と点光源の光軸からの位置 $x_0$ との関係は、

$$\delta_x = \frac{2z_M x_0}{f} \quad (3.1)$$

と表せる。各点光源からの光により、点光源の位置に対応した画像シフト量を伴って符号

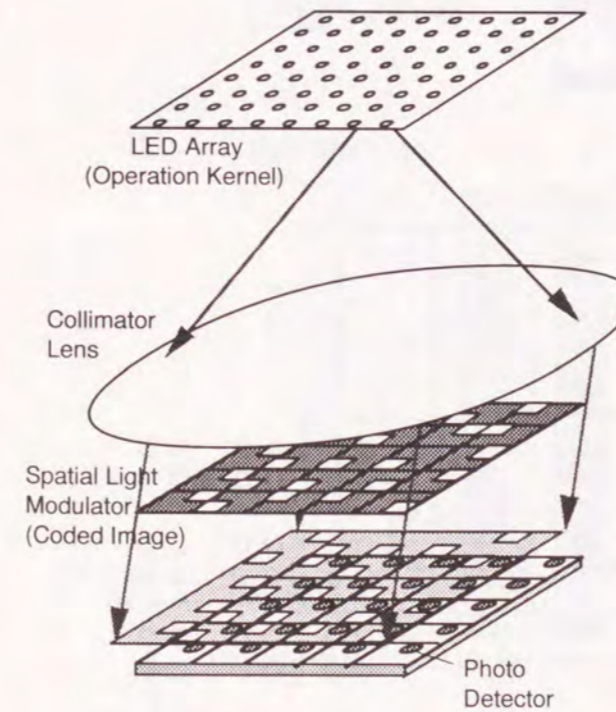


図3.1 コリメータレンズを用いた多重投影光学系

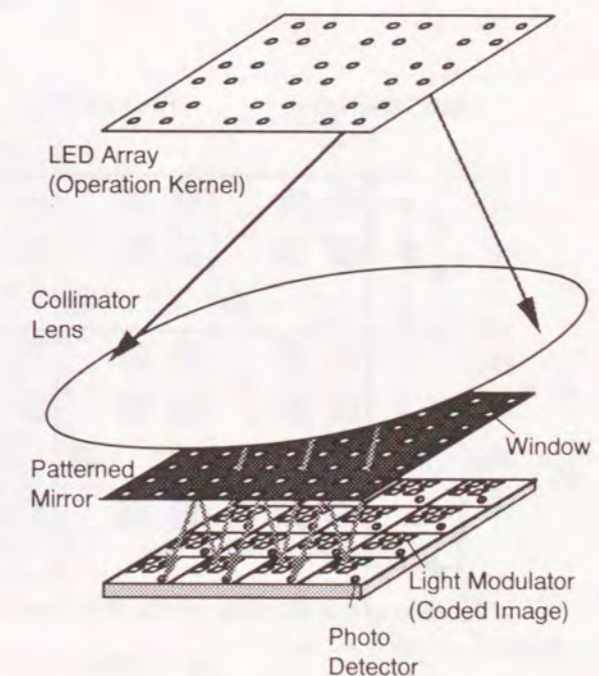


図3.2 反射型多重投影相関器

化画像が投影される。点光源アレイに相関カーネルを表示すると、複数の点光源による投影像が重ね合わせられ、カーネルパターンと符号化画像との相関演算を行うことができる。

図3.3と図3.4に、2通りの素子配置の例を断面図、上面図、点光源配置図により示す。断面図には、一つの光検出素子に入射し得る光路が示されている。不要な光の入射を避けるため、光変調素子や光検出素子を配置できない部分が存在する。1画素区画に必要な領域のサイズを $d_p \times d_p$ としたとき、図3.3と図3.4の系における光変調素子の1辺の長さ $d_1$ 、 $d_2$ はそれぞれ、

$$d_1 \leq \frac{d_p}{6} \quad (3.2)$$

$$d_2 \leq \frac{d_p}{4} \quad (3.3)$$

を満たす必要がある。光検出素子とパターンミラーの透過部の大きさは光変調素子の大き

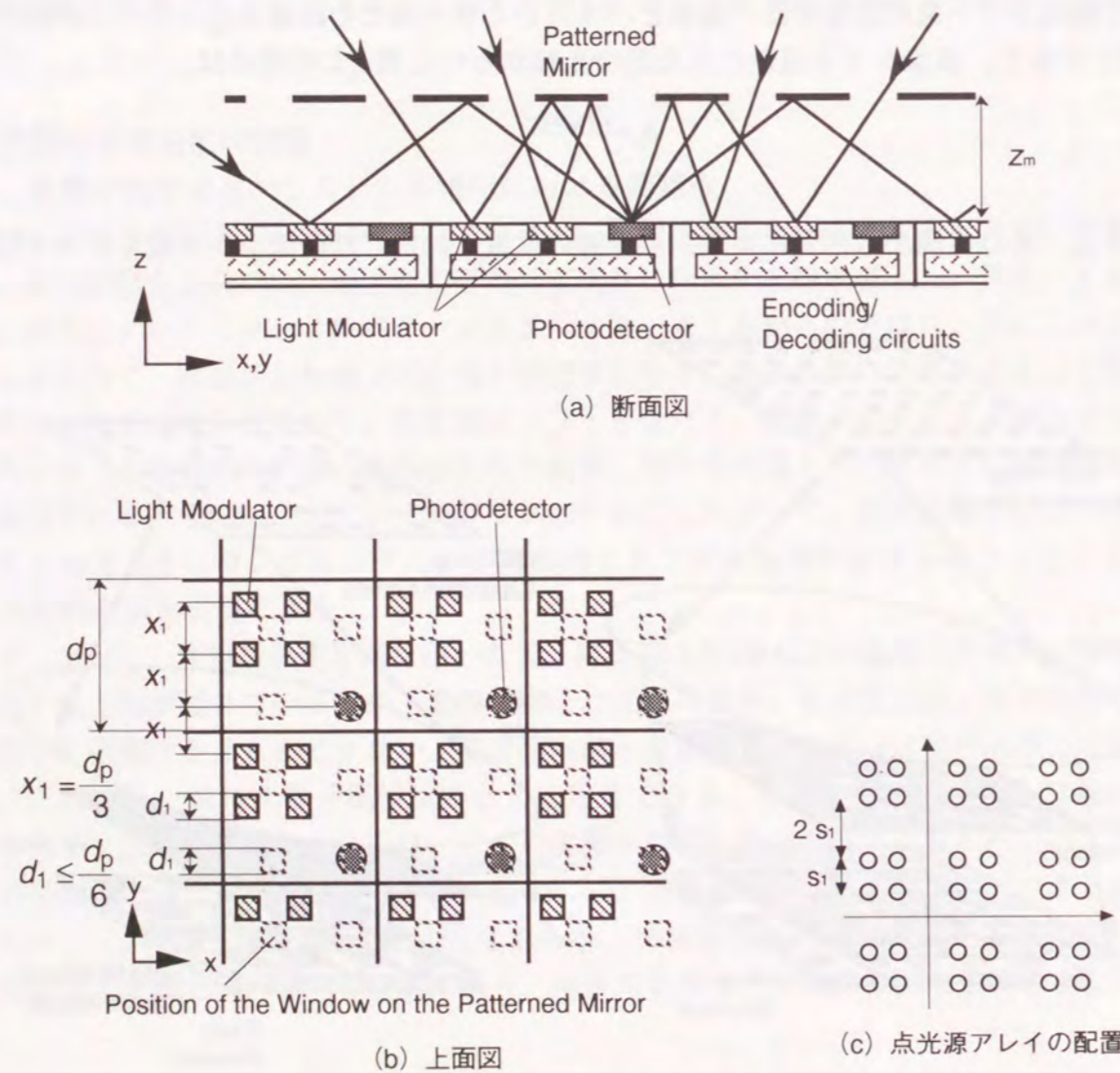
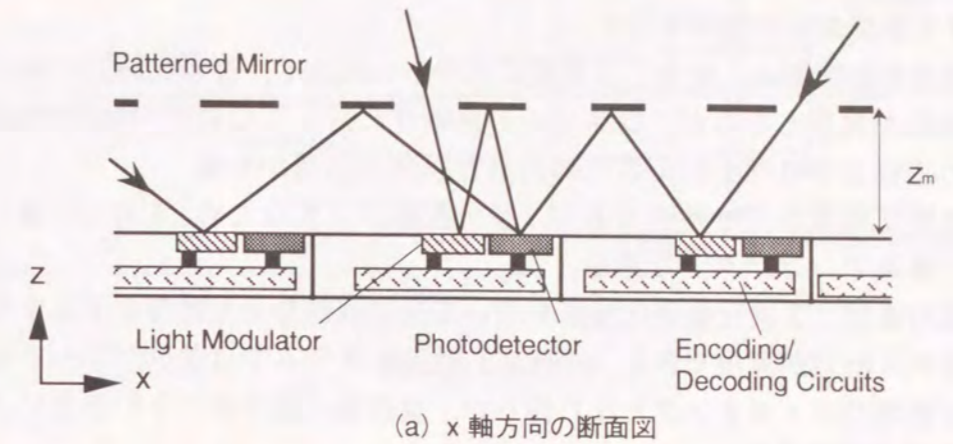


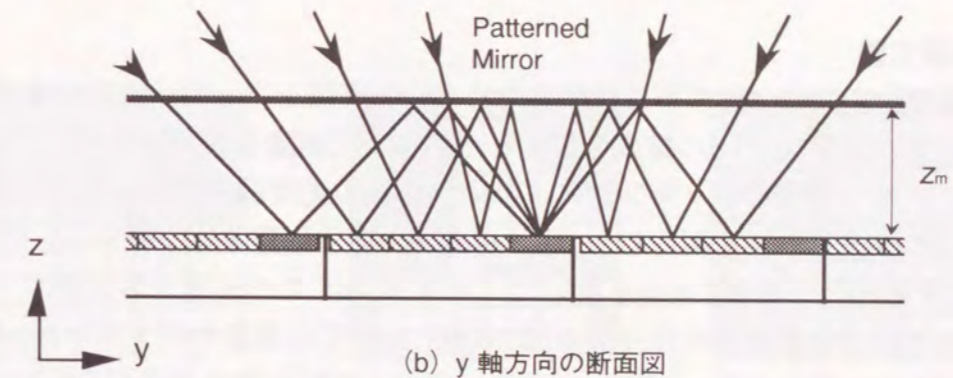
図3.3 素子の配置例1

さと等しいものとする。これら二つの素子配置を比較すると、図3.4の方が空間的な無駄が少なく、高密度化に適している。図3.3の点光源間隔 $s_1$ は式(3.1)より次式で表せる。

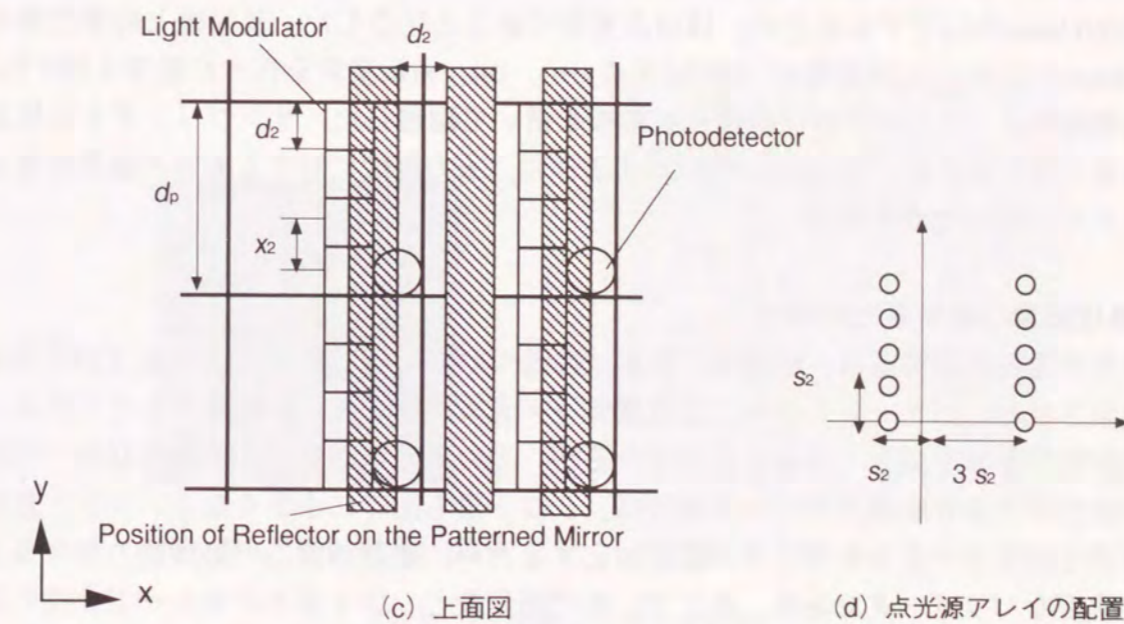
$$s_1 = \frac{fx_1}{2z_M} \quad (3.4)$$



(a) x軸方向の断面図



(b) y軸方向の断面図



(c) 上面図

(d) 点光源アレイの配置

図3.4 素子の配置例2 (スリット状パターンミラーの利用)

ここで、 $x_1$ は光変調素子の間隔を表す。図3.4の点光源間隔 $s_2$ についても、同様に、

$$s_2 = \frac{fx_2}{2z_M} \quad (3.5)$$

ただし、 $x_2$ は光変調素子の間隔を表す。

反射型多重投影相関器は、従来の多重投影光学系に比べて、符号化画像の表示面における空間的な無駄が欠点となるが、システム集積化に対しては以下の利点を持つ。

- 1) 一つの基板上で処理を行えるため入出力面間の伝送が不要。
- 2) 電子処理は画素単位で独立であり、長い配線が不要なため、LSI化に適している。
- 3) 構造が簡単でコンパクトである。

また、基板の裏側に3次元集積化技術を用いて光変調器や受光器等を用意すれば、容易にデータの並列入出力が実現できる。一般に、並列システムでは並列プロセッサ本体とのデータ交換が処理のボトルネックとなり得るが、並列光入出力ポートの装備によりこの問題を回避することができる。

### 3.3 原理検証実験

反射型多重投影相関器の原理を確認するために検証実験を行った。実験の光学系を図3.5に示す。各素子の配置は図3.3の構成を仮定した。符号化画像を表示する反射型光変調器の代用として、アルミ蒸着とエッチングによりオン状態の光変調器セルに相当する部分だけ光を反射するミラーアレイを製作した(図3.6(d))。符号化画像は、図3.6(a), (b)に示す入力画像A, Bを符号化した図3.6(c)を用いた。パターンミラーもガラス基板にアルミ蒸着し、エッチングにより透過部を作った(図3.6(e))。符号化画像のサイズは20mm角、各セルのサイズは0.4mm角とした。パターンミラーでは、0.4mm角の透過部を0.7mm間隔で並べた。点光源として中心波長660nmのLEDを用いた。LEDの間隔 $s_1$ は17mmとした。LEDの発光部は0.5mm角以下であるため、ほぼ点光源であると見なした。反射鏡と符号化像の間隔は5.8mmとした。入力画像A, Bに対するAND, OR, XOR演算を行った結果を図3.7に示す。処理結果は、ミラーアレイ直後に拡散板を置いて観察した。サンプリングする位置以外の不要な光を遮ると、図3.7の右列に示すように、入力画像に対する所望の論理演算結果が得られていることがわかる。

### 3.4 処理画素の高密度化の検討

反射型多重投影相関器は、原理的に投影法に基づいているため、画素密度は回折現象により制限される。パターンミラーと光変調素子/光検出素子面との距離を小さくすることにより回折の影響を減少させることができるが、光の入射角がレンズの軸外収差や光変調素子の特性等により制限されている場合は、シフト量も同時に小さくなる。シフト量は、実行可能な演算カーネルのサイズに直接対応するため、離散相関器の処理能力を評価するうえで重要なパラメータである。そこで、処理画素数とシフト量とのトレードオフの関係を導き、反射型多重投影相関器の処理能力の評価を行う。さらに、回折の影響を減少させ

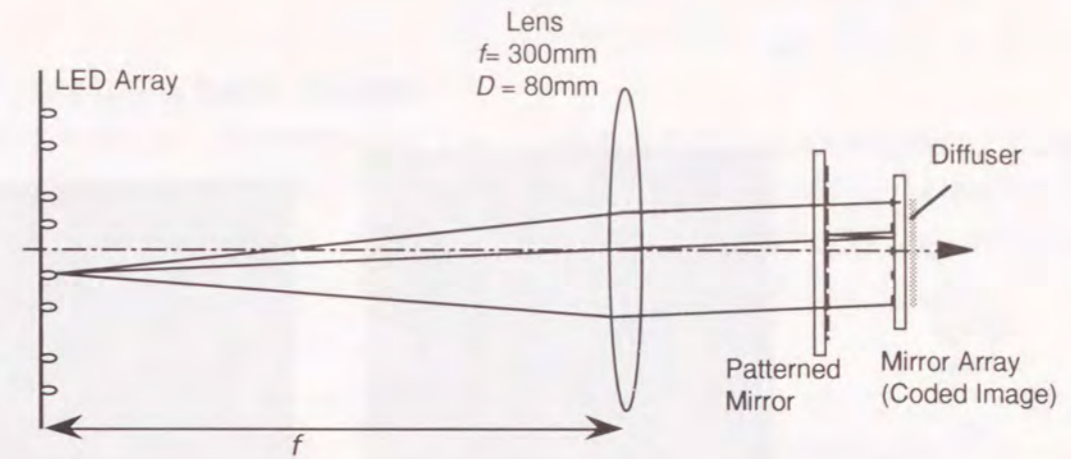
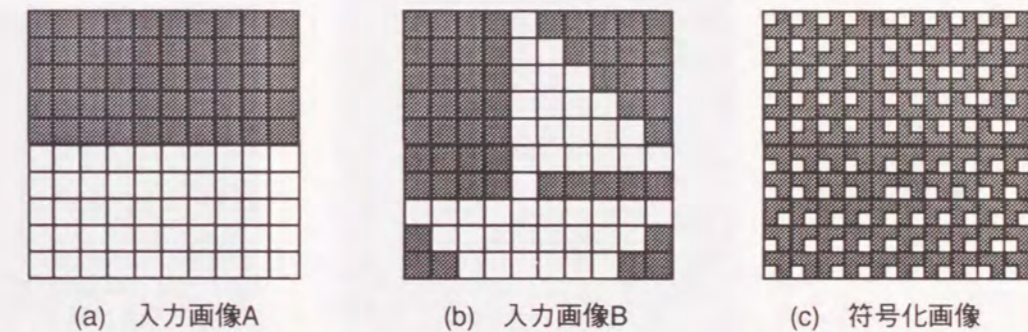
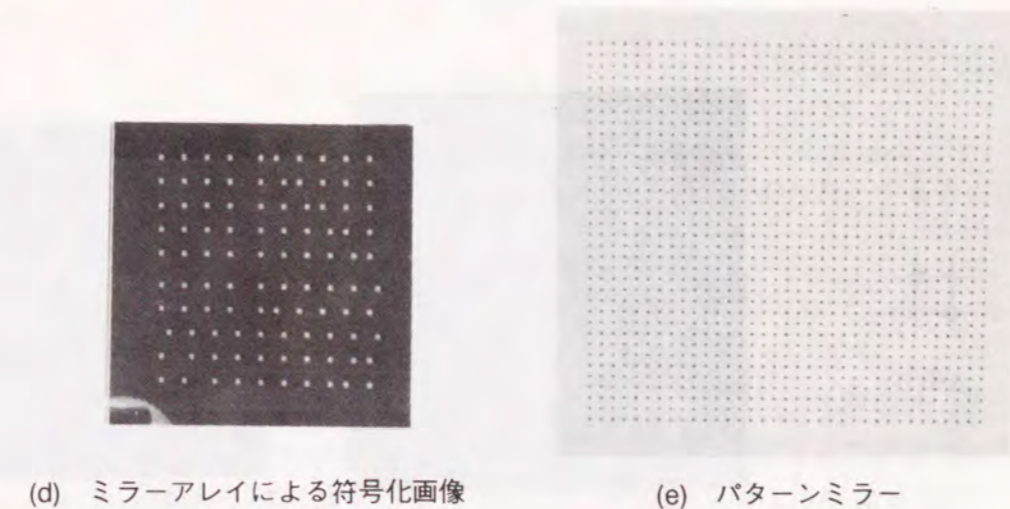


図3.5 実験光学系



(a) 入力画像A (b) 入力画像B (c) 符号化画像



(d) ミラーアレイによる符号化画像 (e) パターンミラー

図3.6 入力画像とパターンミラー

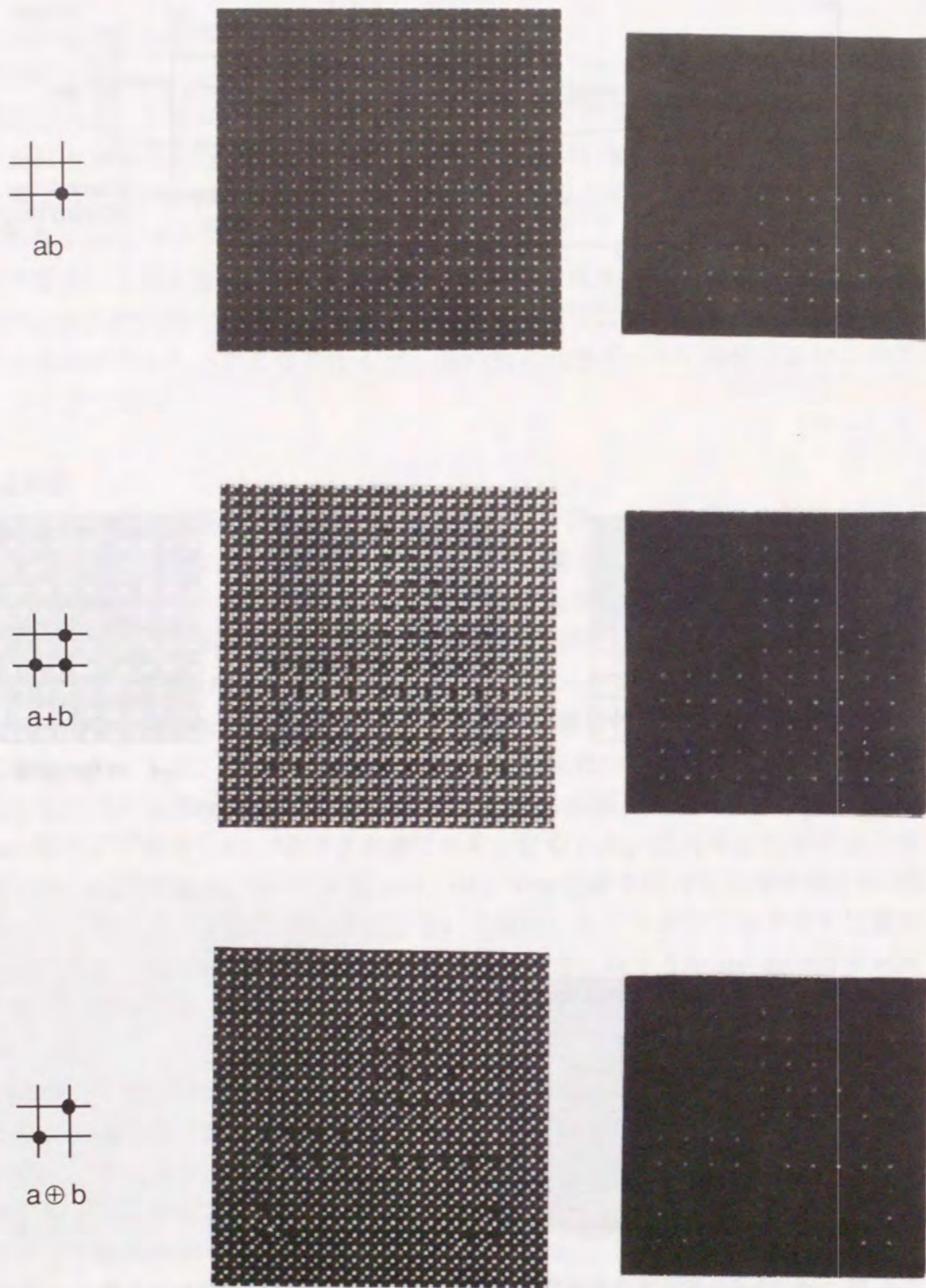


図3.7 実験結果

る方法として、ビームスプリッタあるいはマイクロレンズアレイを利用する光学系を提案する。

3.4.1 回折による処理能力の制限

投影光学系では、画素密度を上げていくと各画素のエッジからの回折により投影像のぼけが大きくなり、幾何光学近似が成り立たなくなる。画素の幅を $d$ 、画像の表示面と投影面との距離を $z$ としたとき、投影光学系において幾何光学近似が成立する範囲を、parageometrical光学[84]の手法を用いて評価すると次式のように表せる[36]：

$$z \ll \frac{d^2}{\lambda} \tag{3.6}$$

ただし $\lambda$ は波長とする。この式を図3.3に示す反射型多重投影相関器に当てはめると、パターンミラーにおける幅 $d_1$ の透過部から入射した光が、2回反射して検出素子に到達するまで幾何光学近似の成り立つ条件として、

$$3z_M \ll \frac{d_1^2}{\lambda} \tag{3.7}$$

が得られる。2×2個の光変調素子と1個の光検出素子を含めた1画素分の処理要素の幅を $d_p$ とすると、式(3.2), (3.7)より、

$$3z_M \ll \frac{d_p^2}{108\lambda} \tag{3.8}$$

となる。

入射角の最大値を $\theta_{\max}$ としたとき、最大シフト量は $2z_M \tan \theta_{\max}$ で表せる。これを、 $d_p$ で割って、処理要素単位で最大シフト量 $N_s$ を表し、式(3.8)を代入すると、

$$N_s = \frac{2z_M \tan \theta_{\max}}{d_p} \ll \frac{d_p \tan \theta_{\max}}{54\lambda} \tag{3.9}$$

となる。ここで、処理画素数を $N_p \times N_p$ 、画像全体の大きさを $D \times D$ とすると、 $d_p = D / N_p$ より、

$$N_s N_p \ll \frac{D \tan \theta_{\max}}{54\lambda} \tag{3.10}$$

が得られる。式(3.10)から、系のサイズと最大入射角によって、処理可能な画素数と最大シフト量との積が制限されていることがわかる。このとき実行可能な演算カーネルユニット数、すなわち近傍画素間演算を行える領域は $(2N_s+1) \times (2N_s+1)$ で表せる。

図3.4の構成を用いた場合は、式(3.3)を用いて、式(3.7), (3.10)と同様に、

$$z_M \ll \frac{d_p^2 \tan \theta_{\max}}{48\lambda}, \quad (3.11)$$

$$N_s N_p \ll \frac{D \tan \theta_{\max}}{24\lambda}, \quad (3.12)$$

が得られる。

例えば、式(3.12)において、 $x \ll y$ の成り立つ条件を $10x \leq y$ と仮定すると、 $D = 30\text{mm}$ 、 $\lambda = 600\text{nm}$ 、 $\theta_{\max} = 30^\circ$ とした場合、 $N_s N_p \leq 120$ となる。これは、例えば、 $40 \times 40$ 画素の画像に対して、3画素分のシフト演算、つまり、 $7 \times 7$ 近傍領域内での近傍画素間演算が実行できることを示している。

以上のように、投影法に基づいた光学系を極端に高密度化すると、回折現象の影響が大きくなり光学系の情報処理能力が低下する。そこで、処理画素数の増加を図るためには、例えばウエハスケールの大型基板を利用することが考えられる。提案したシステムでは、近傍画素間の接続を光で行い、画素内の処理を電氣的に行っているため、電気配線は局所的なものです。したがって、配線を長く引き回したときに問題となる浮遊容量やクロックスキュー等による処理速度の低下を避けることができる。

### 3.4.2 ビームスプリッタの利用による画素密度の向上

図3.3あるいは図3.4の光学系において、パターンミラーにおける回折が画素密度を制限する大きな要因であることがわかった。そこで、図3.8に示すように、パターンミラーの代わりにビームスプリッタを用いて画素密度を向上させる方法を考える。ビームスプリッタの透過光が光変調素子をへずに直接光検出素子に入射するのを防ぐために、入射光を直線偏光とし、光検出素子の直前に検光子を置く。そして、光変調素子がオン状態の時に変調光の偏光方位を $90^\circ$ 回転させるようにしておく、変調光は光検出素子で検出可能となる。この光学系は二つの利点を持つ。一つはパターンミラーを取り除くことができる点であり、もう一つの利点は、光変調素子の幅 $d_3$ に対する制限が、 $d_3 \leq d_p/3$ になり、パターンミラーを用いた場合よりも緩くなる点である。

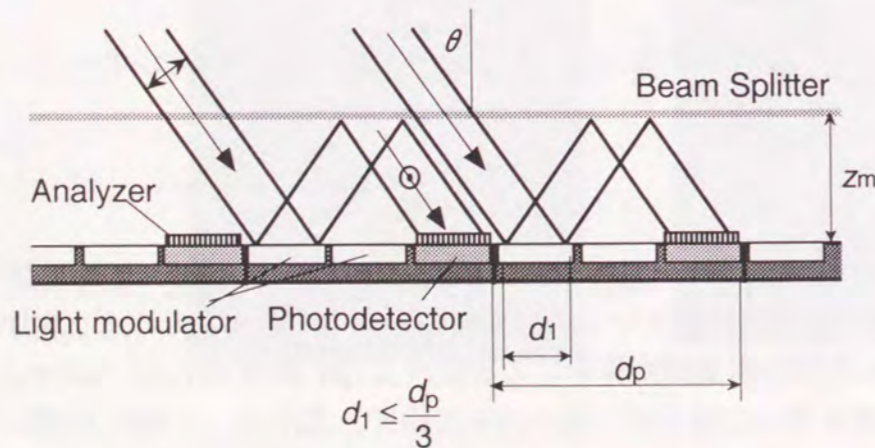


図3.8 ビームスプリッターを用いた反射型多重投影相関器

ハーフミラーを用いた構成における処理画素数とシフト量の評価を3.4.1と同様の手法で評価する。幅 $d_3 \leq d_p/3$ の光変調素子の投影像が一度ビームスプリッタで反射してから光検出素子に届くまでの間で、幾何光学近似が成り立つ条件を求めればよい。その結果として次式が得られる、

$$2z_M \ll \frac{d_s^2}{\lambda} \leq \frac{d_p^2}{9\lambda},$$

$$\therefore z_M \ll \frac{d_p^2}{18\lambda}. \quad (3.13)$$

(3.10)と同様の操作により、最大シフト量 $N_s$ と処理画像の1辺当たりの処理画素数 $N_p$ との積は次式で表される

$$N_s N_p \ll \frac{D \tan \theta_{\max}}{9\lambda}. \quad (3.14)$$

式(3.10)と比較すると、 $N_s$ と $N_p$ の積で6倍の向上を図ることができる。ただし、この光学系では、ビームスプリッタを通るたびに光量が半分減少するため、光パワーの利用効率はパターンミラーを用いた場合よりも劣っている。

### 3.4.3 マイクロレンズアレイの利用による画素密度の向上

光パワーの損失を少なくし、かつ、回折の影響を減らす方法として、マイクロレンズをパターンミラー透過部に用いる方法が考えられる。例えば、図3.3の素子配列に対して、図3.9に示すようにパターンミラーの透過部に焦点距離 $f = z_M$ のマイクロレンズを置き、光変調素子上に集光してパターンミラーの辺からの回折の影響を抑える。パターンミラーの反射部の前に焦点距離 $f_1 = z_M$ のマイクロレンズを置くと、ミラーで反射してマイクロレンズを2回通るため、光変調素子と光検出素子の間の結像レンズとして働く。

一方、図3.4の素子配列に対して、回折の影響を減らすためにマイクロレンズを適用した例を図3.10に示す。この形態ではパターンミラーの透過部がスリット状になっているので、円筒マイクロレンズアレイ[85]を使用する。パターンミラーの形状がy軸方向に長い

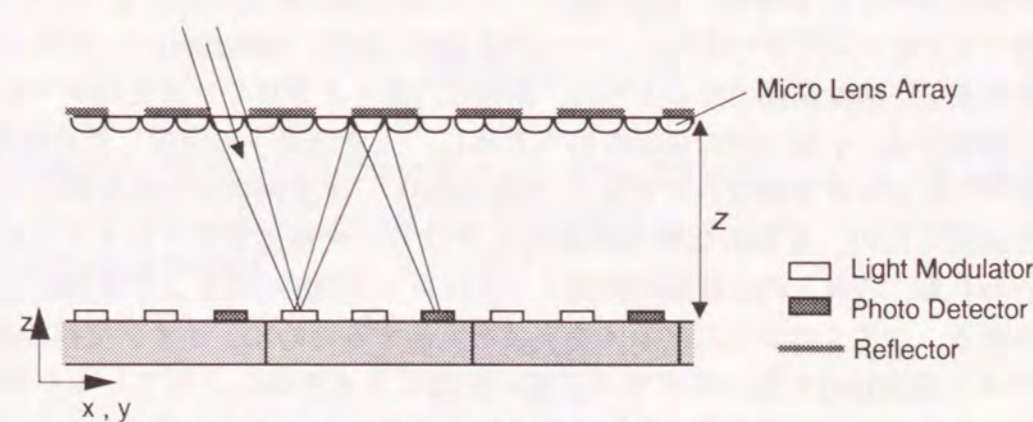
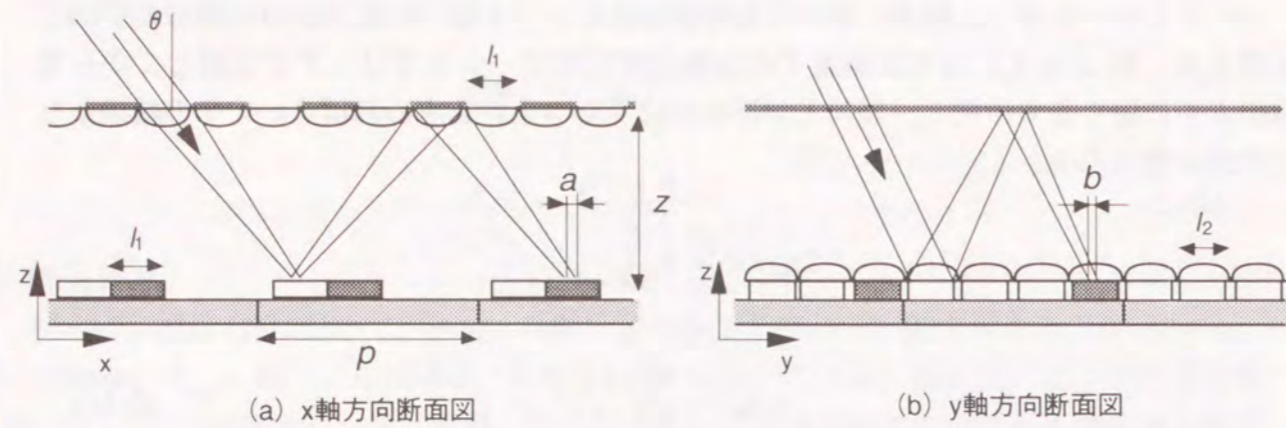
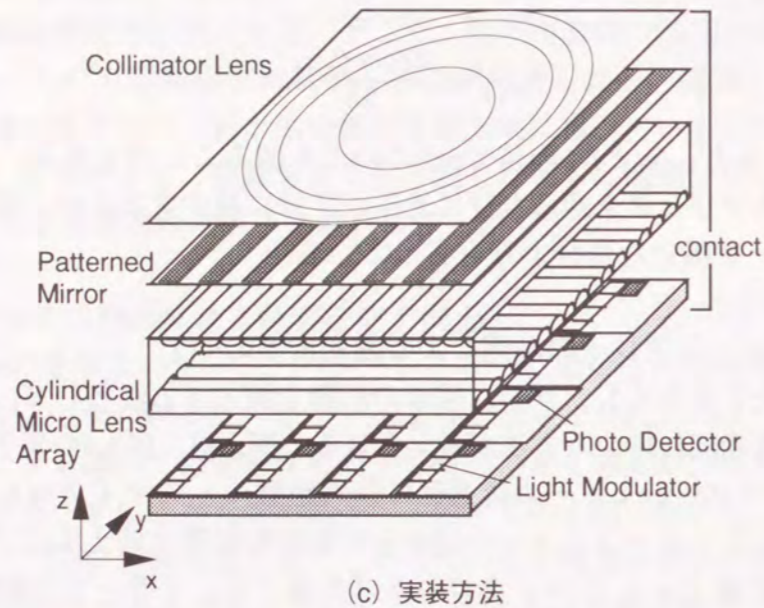


図3.9 マイクロレンズアレイによる回折の抑制 (図3.3の素子配列例1に適用。)



(a) x軸方向断面図

(b) y軸方向断面図



(c) 実装方法

図3.10 円筒マイクロレンズによる回折の影響の低減方法  
(図3.4の素子配列例2に適用.)

スリット状になっている場合、光変調素子上に x 軸方向の集光を行うように焦点距離  $f_2 = z_M$  の円筒マイクロレンズをパターンミラーの透過部に置く (図3.10(a))。また、光変調素子と光検出素子が結像関係になるように、同様の円筒マイクロレンズをパターンミラーの反射部に配置する。y 軸方向の集光を行うために、光変調素子の直前に焦点距離  $f_3 = 4z_M$  の円筒マイクロレンズを密着させて置く (図3.10(b))。光変調素子での反射により光はレンズを2回通るため、実質的な焦点距離は  $2z_M$  となり、光検出素子アレイ上で y 軸方向の集光が行われる。これらの2種類の円筒マイクロレンズの組合せにより光検出素子上に点像が得られる。マイクロレンズアレイを実装を実装するために、イオン交換技術[27]やリソグラフィ技術[86]を用いてガラス平板の表面にマイクロレンズアレイを製作し、図3.10(c)に示すように光変調素子、光検出素子等を集積した光電子集積回路と密着させる。パターンミラーと光電子集積回路との間隔  $z_M$  は、マイクロレンズアレイが集積されてい

るガラス平板の厚さで設定することができる。

次に、マイクロレンズを用いた反射型多重投影相関器の処理能力について考察する。ただし、ここでは、レンズの収差等は無視できるものとし、レンズ開口の回折効果に基づいて評価を行う。図3.6の場合、1画素分の処理要素の幅を  $d_p$ 、パターンミラーに密着しているマイクロレンズの直径  $l_1 = d_p/6$ 、焦点距離  $f_1 = z_M$  であるため、受光素子上に集光した点像の幅  $a$  は、

$$a = \frac{2\lambda f_1}{l_1} = \frac{12\lambda z_M}{d_p} \quad (3.15)$$

となる。この点像が光変調素子の受光領域に収まるように  $a \leq d_p/6$  とすると、 $z_M$  の制限として次式が成り立つ。

$$z_M \leq \frac{d_p^2}{72\lambda} \quad (3.16)$$

式(3.16)を用いて、式(3.10)と同様の操作により、最大シフト量  $N_s$  と処理画像の1辺の画素数  $N_p$  との積は次式で表される。

$$N_s N_p \leq \frac{D \tan \theta_{\max}}{36\lambda} \quad (3.17)$$

図3.7の光学系の場合、パターンミラーに密着している円筒マイクロレンズの x 方向の幅  $l_2 = d_p/4$ 、焦点距離  $f_2 = z_M$  であるため、受光器上に集光した点像の x 方向の幅  $a$  は、

$$a = \frac{2\lambda f_2}{l_2} = \frac{8\lambda z_M}{d_p} \quad (3.18)$$

となる。この点像が光変調素子に収まるように  $a \leq d_p/4$  とすると、 $z_M$  の制限として次式が成り立つ。

$$z_M \leq \frac{d_p^2}{32\lambda} \quad (3.19)$$

また、光変調素子に密着した円筒マイクロレンズの y 方向の幅  $l_3 = d_p/4$ 、焦点距離  $f_3 = 4z_M$  であるが、レンズを2回通るため実質的な焦点距離は  $2z_M$  となる。したがって、光検出素子上の点像の y 方向の幅  $b$  は

$$b = \frac{2\lambda f_3}{l_3} = \frac{16\lambda z_M}{d_p} \quad (3.20)$$

となり、 $b$  の範囲を  $a$  と同様に  $b \leq d_p/4$  とすると、 $z_M$  に対する制限として、次式が成り



立つ。

$$z_M \leq \frac{d_p^2}{64\lambda} \quad (3.21)$$

式(3.19)と式(3.21)のうち、より制限の厳しい後者の条件を用いて、式(3.10)と同様の操作により、最大シフト量 $N_s$ と処理画像の1辺の処理画素数 $N_p$ との積の制限は次式のようになる。

$$N_s N_p \leq \frac{D \tan \theta_{\max}}{32\lambda} \quad (3.22)$$

例えば、 $D = 30\text{mm}$ 、 $\lambda = 600\text{nm}$ 、 $\theta_{\max} = 30^\circ$  とした場合、式(3.22)より、 $N_s N_p \leq 902$ となる。これは、例えば $100 \times 100$ 画素の画像に対して、9画素分のシフト演算、つまり、 $19 \times 19$ 近傍領域内の近傍画素間演算が実行できることを示している。 $D = 30\text{mm}$ 、 $\lambda = 600\text{nm}$ 、 $\theta_{\max} = 30^\circ$  と仮定したときの、これまで述べた反射型多重投影相関器における $N_s$ 、 $N_p$ の最大値を、式(3.10)、(3.12)、(3.14)、(3.17)、(3.22)より求め、図3.11に図示した。ただし、式(3.10)、(3.12)、(3.14)については、 $x \ll y$ の成り立つ範囲を $10x \leq y$ と仮定した。

### 3.5 結言

光・電子複合型OPALSの集積化に適した相関器として反射型多重投影相関器を提案し、簡単な原理検証実験によりその動作を確認した。回折による処理能力の制限を評価し、さらに、マイクロレンズや円筒レンズの導入により回折の影響を減らして処理能力の向上を図る手法を提案した。本研究ではレンズの回折限界を元にして処理能力を評価したが、よ

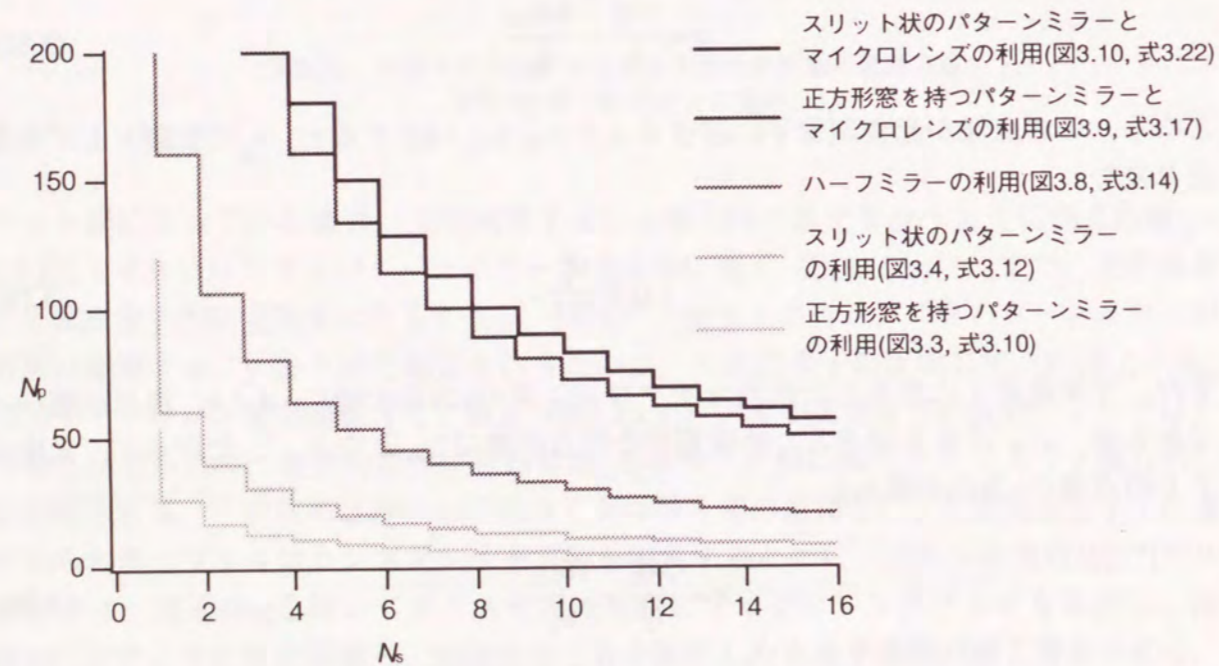


図3.11 反射型多重投影相関器の処理能力の比較

り詳しい検討を行うためにはレンズの収差、迷光、光の損失等の影響を考慮する必要がある。

反射型多重投影相関器を用いることによって、従来の投影光学系では困難であったシステムの集積化を効率良く実現できる。また、他の結像系に基づいた相関器よりもコンパクトに実装できる。ただし、反射型多重投影相関器は回折により処理画素数とシフト量の積で処理能力が制限される。したがって、比較的カーネルサイズの小さなコンパクトな相関器としての利用に適している。その上で、シフト量の大きい他の相関器との併用によりモジュール統合型光演算システムを構成すれば、処理能力をさらに向上させることが期待できる。

## 第4章 カーネル分割処理による離散相関器の拡張

### 4.1 緒言

離散相関演算を実行する光学系に対して要求される能力は、1) 入力データやカーネルの切り替えを高速に行えること、2) 処理画素点数が多いこと、3) カーネルサイズが大きいこと、4) カーネル点数が多いことなどが挙げられる。1), 2) は処理のスループットに直接影響する。3) は演算可能な近傍画素領域を決め、4) は多数の画素を対象とする複雑な演算を行う場合に重要になる。広範囲の接続や大ファンアウトの実現は電気的な接続より光接続のほうが有利である。離散相関器に対する3), 4) の要求は、この接続の範囲とファンアウト数の拡大に対応するので、光演算システムの有効性を十分発揮させるためには、これらの要求を満たすことが重要になる。離散相関光学系の接続能力を最大限に使う場合として、画素数 $N \times N$ の画像に対して全画素間を完全に接続する場合を考えると、最大 $(2N-1) \times (2N-1)$ のカーネル点で構成されるカーネルが必要である。光アレイロジックを用いた並列演算技法において大きなカーネルを必要とする具体例としては、トークン伝搬法[48]がある。トークン伝搬法は、光の並列性と優れた接続能力を有効に利用して効率的に処理画像上でのデータの転送を行う演算技法で、推論機構[46]、データベース処理[49]、データフロー処理[48]の実現に有用である。トークン伝搬法では、データ画像の全面にわたって特定の画素パターンを多数複製するため、離散相関演算にはカーネル点数が多く、大きなサイズの演算カーネルが必要である。複製光学系を用いてパターン展開専用モジュールを使用する手法が提案されているが[46]、この場合、展開パターンは固定となるので可変性・汎用性が犠牲になる。

第2章において試作の対象とした並列光演算システムOPALSは、ハードウェアの有効利用を考えて、基本的に符号器・相関器・復号器を1組用意して反復処理する方式であった。しかし、単一の光学系で上に挙げた要求をすべて満たすことは難しい。そこで、2) の処理画像領域の拡大に対処する手法として、入力画像を光学系で処理可能な画素数のページに分割し、ページ単位で処理を行う2次元仮想記憶機構がすでに考案されている[87]。本章では、3), 4) のカーネルサイズ、カーネル点数の大きな相関演算を効率的に処理する手法として、カーネルを分割し、複数の相関演算により実現する方法を検討する。

4.2では、相関演算を実行する光学系のモデルとして瞳分割離散相関光学系を仮定し、その処理能力について検討する。4.3では、離散相関演算におけるカーネル分割の手順を説明し、4.4と4.5ではカーネル分割の実行手法として、多重離散相関器と多段離散相関器の利用を提案する。4.6では、多段離散相関器の設計例を示し、単純離散相関器との比較により本手法の有効性の評価を行う。

### 4.2 瞳分割離散相関光学系

結像系に基づくプログラマブルな離散相関光学系として、第2章で述べた相関フィルタアレイやプリズムアレイを用いた光学系や、分割鏡[37]、レンズアレイ[38]、回折格子[88]

を用いた光学系が提案されている。これらの光学系は、瞳面に様々な偏向角を持つ偏向素子を2次元アレイ状に用意しておき、シャッタアレイや照明光の制御によりそれらを選択的に機能させてプログラマブルな離散相関演算を実現している。これらの光学系では、偏向素子アレイの構成数だけ瞳が分割されているので、これらを瞳分割離散相関光学系と呼ぶ。

瞳分割離散相関光学系は他の相関光学系に比べて多くの利点を持つ。例えば、相関光学系の一つである多重投影光学系では、回折の影響により画素の高密度化と最大シフト量が制限されるが、一方、瞳分割離散相関光学系は、レンズの結像作用により画素の高密度化が期待でき、シフト量を偏向素子の設計次第で大きくとることが可能である。また、書き換え可能なホログラムを用いた相関器[79, 89]が提案されているが、高速応答・高分解能の両方の特性を併せ持つ十分な性能のホログラム記録材料が未だ開発されていない。それに対して、瞳分割相関光学系は既存の技術により構成することができ、高速化も可能である。

離散相関光学系の処理能力を示す指標として、処理画素数、カーネルサイズ、カーネル点数を考える。カーネル点数とは、離散相関演算におけるカーネル中に含まれるデルタ関数の個数である。光システムのファンアウト・ファンイン数を考慮したとき、一度の相関演算において実行できるカーネル点数の最大値を最大カーネル点数と呼ぶ。また、カーネル基本構造を形成する格子の間隔、および格子の交差している点の数を、カーネル格子間隔、およびカーネル格子点数と呼ぶ。カーネル点は、カーネル格子点の上に配置される。相関器では、一つの格子点が一つの偏向素子に相当する。偏向素子としてホログラムを用いる場合には、一つのホログラムで複数のカーネル点に対応させることもできるが、ここでは簡単のために、一つの偏向素子が一つのカーネル点に対応するものとする。したがって、用意されている偏向素子の数、すなわち、瞳の分割数がカーネル格子点数と等しくなる。カーネル点数は実際に相関演算を実行するとき、光シャッタ等により選択されて使用される偏向素子の数に相当する。カーネル格子間隔は各偏向素子を適切に設計することにより自由に設定できるものとする。

一般に、使用するレンズの直径および焦点距離が一定のとき、瞳を分割するほど有効な開口数が小さくなるため、点像がぼけて解像点数が減少する。そのことから、処理画素数とカーネル格子点数の間には一定のトレードオフが予想される。そこで、図4.1のような4f

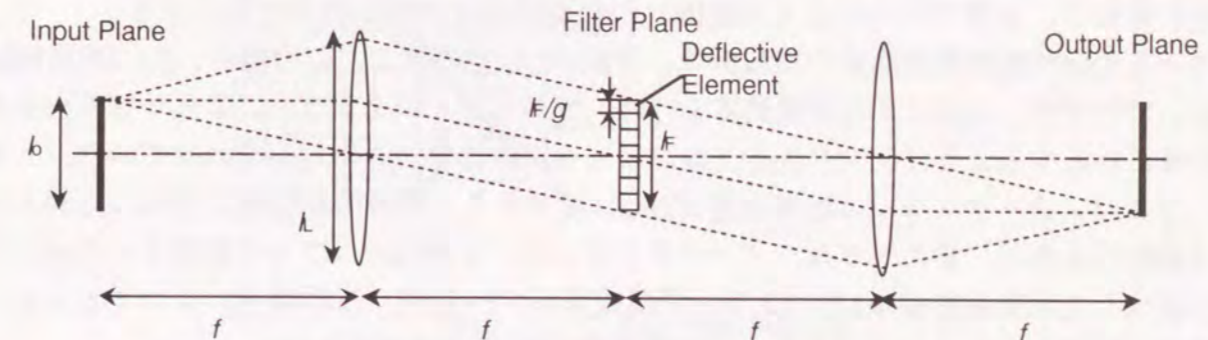


図4.1 瞳分割離散相関光学系

光学系のフィルタ面に偏向素子アレイを設置した瞳分割離散相関器を考える。入出力画像の大きさを $l_o \times l_o$ 、レンズを $l_L \times l_L$ の正方形開口とし、焦点距離を $f$ 、フィルタ面の大きさを $l_F \times l_F$ 、フィルタ面の分割数、つまりカーネル格子点数を $g \times g$ 、光の波長を $\lambda$ とする。このとき、フィルタ面は分割されて有効な開口の大きさは $l_F/g \times l_F/g$ となるため、解像限界 $a$ は次式のように表わされる。

$$a = \frac{2\lambda fg}{l_F} \quad (4.1)$$

処理画素数を $N \times N$ とすると、画素データを解像する条件は、

$$N \leq \frac{l_a}{a} \quad (4.2)$$

と表せる。ここで、レンズによるケラレを生じない条件として $l_o = l_F = l_L/2$ とおくと、式(4.1), (4.2)より、

$$Ng \leq \frac{l_L^2}{8\lambda f} \quad (4.3)$$

となり、開口の制限に基づく処理画素数と最大カーネル点数間のトレードオフの関係が得られる。例えば、 $l_L = 20\text{mm}$ 、 $f = 80\text{mm}$ 、 $\lambda = 630\text{nm}$ としたとき、 $Ng \leq 992$ となる。画像内の完全接続を行うために、 $g = 2N$ とした場合、 $N$ はたかだか22までしか取れない。

以上のように、瞳分割相関光学系においてカーネル格子点数を増加させると、処理の並列性が犠牲になる。一方、1度の相関演算における最大カーネル点数は、光変調素子からのファンアウト数および光検出素子へのファンイン数に相当するため、光変調素子のコントラスト、光検出素子の閾値のばらつき、光強度の不均一性などにより制限される。その結果、単体の瞳分割相関光学系は演算能力・自由度の点で問題を持つ。

### 4.3 離散相関演算におけるカーネル分割

瞳分割離散光学系における問題点を解決する方法として、カーネルを分割して処理する手法を検討した(図4.2)。手順は、まず相関演算の対象となる全体カーネルを、用いる相関光学系で処理可能なカーネル点数のサブカーネルに分割する。まず各サブカーネルの中心から全体カーネル中心までの方向と距離に相当するシフト演算を入力画像に対して実行して、次にサブカーネルによる相関演算を行う。全サブカーネルに関する相関演算結果を足し合わせると、全体カーネルと入力画像との相関演算と等価な結果が得られる。

カーネル分割離散相関演算の実現例は、文献[37]に見られる。この場合、 $2 \times 2$ の分割鏡を用いてサブカーネルによる相関演算を行い、ガルバノメータミラーによりサブカーネルの位置に対応するようにシフトさせ、コンピュータ内でデータを足し合わせていた。しかし、ガルバノメータミラーは応答速度が1ms程度であり、機械的駆動部分を持つため高速化は期待できない。また、ガルバノメータミラーは、2次元のシフトを実現するために互いに直交した回転軸を持つ2枚のミラーで構成されているが、この場合、シフトとともに画像が回転するという欠点が生じ、高密度画像の処理には適さない。

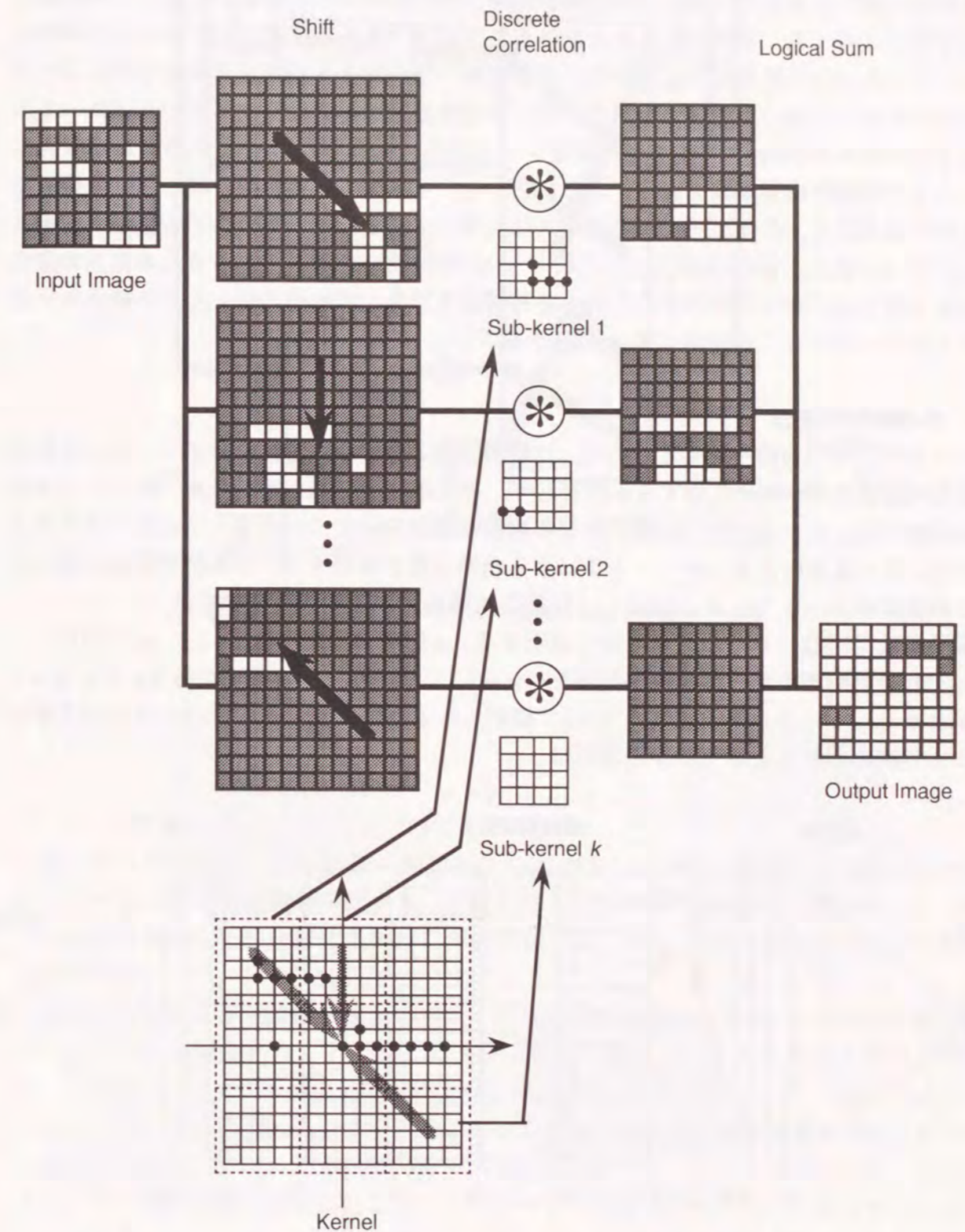


図4.2 カーネル分割離散相関演算

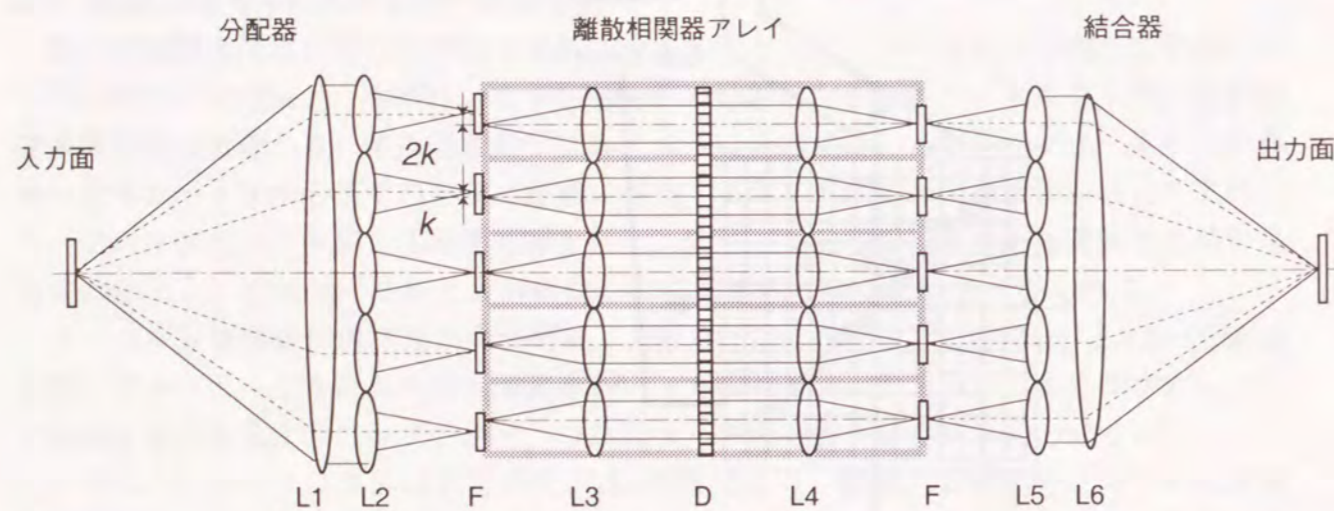
4.4 多重離散相関器

カーネル分割処理を効率的に実行する相関器として、多重離散相関器を考案した。これは、図4.3に示すように、複数の相関器を用意しておき、各サブカーネルによる相関演算を同時並列に実行するものである。各相関器には、分配器を用いて複製されたデータ画像を入力する。このとき、全体カーネルにおける各サブカーネルの位置に応じたシフトが得られるように入力の位置をずらしておく。各サブカーネルによる相関画像は結合器によって足し合わされて所望の相関画像を得る。この多重離散相関器では、すべてのサブカーネルによる相関演算を同時に実行でき、画像シフトのための駆動部分もないので、効率的にカーネル分割離散相関演算を実行できる。しかし、サブカーネルの数と同じだけの相関器が必要であるため、全体カーネルのサイズに比例して必要なハードウェアの量が増加する欠点を持つ。また、実際の処理において、一つの相関演算で用いられるカーネル点の分布は局在するため、全サブカーネルに対する相関器を用意してもそのほとんどが使用されずに多くのハードウェアが無駄になる問題がある。

4.5 多段離散相関器

ハードウェアの有効利用するために、比較的少ない数の相関器により、カーネル分割型離散相関演算を効率的に実行する手法として、多段離散相関器を提案する(図4.4)。多段離散相関器は、カーネル格子間隔の異なる離散相関器をいくつか用意しておき、その組み合わせにより任意の大きさのカーネルによる相関演算を実行する。各相関器間を再構成可能な画像接続ネットワークで接続し、任意の相関器との連絡を可能にする。

多段離散相関器における処理手順を説明する。 $n$ 種類の相関器 $C_i (i=1, \dots, n)$ を用意し、それぞれの相関器のカーネル格子間隔を $s_i (i=1, \dots, n)$ 、カーネル格子点数を $g_i \times g_i (i=1, \dots, n)$ とする。カーネル格子点数 $g_i$ は4.2で検討したように、光学系の設計や入力画素数などにより決められる。カーネル点間隔は、



D: レンズアレイ、プリズムアレイ等の可変偏向素子  
F: 光機能素子

図4.3 多重離散相関器

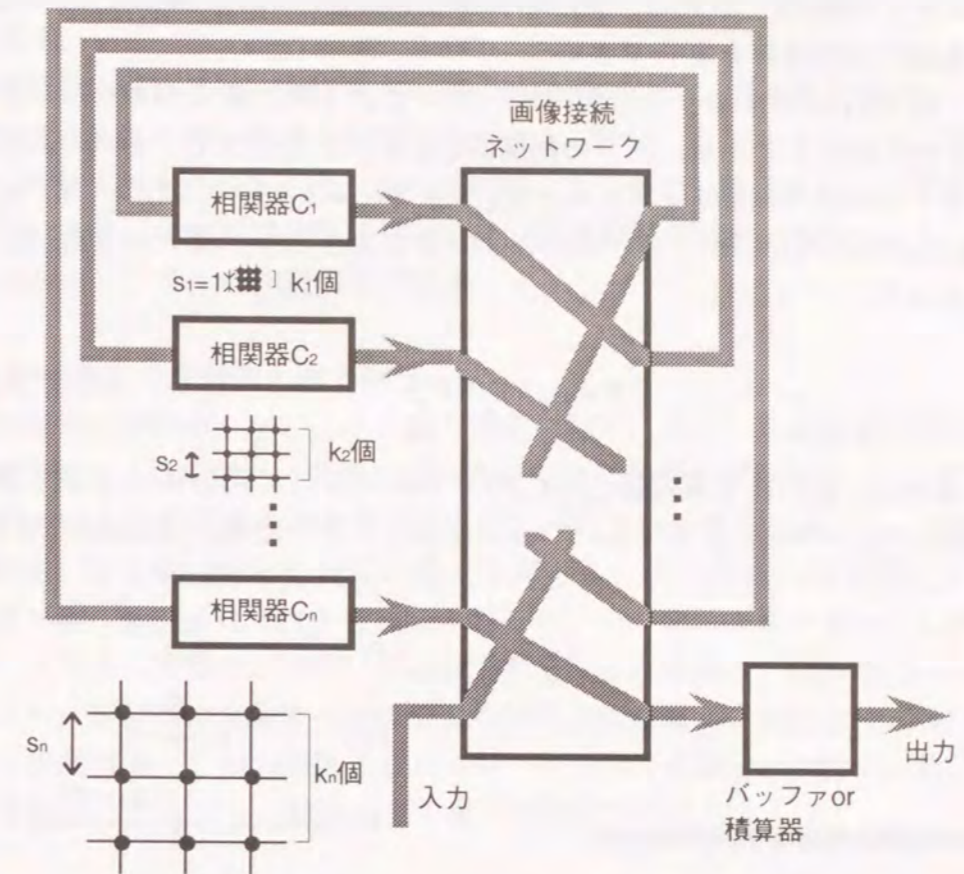


図4.4 画像接続ネットワークで接続された多段離散相関器

$$s_1 = 1, \tag{4.4}$$

$$s_i = g_{i-1} s_{i-1}, \tag{4.5}$$

を満たすようにする。この場合、相関器 $C_2 \sim C_n$ がシフト演算を実行し、相関器 $C_1$ がサブカーネルによる相関演算を実行する。この手順をサブカーネルの数だけ繰り返し、全サブカーネルに関する相関演算結果を足し合わせることで、全体カーネルによる相関演算結果を得る。

通常、カーネル格子間隔が画素間隔より大きい相関器 $C_2 \sim C_n$ では、一つのカーネル点を用いてシフト演算を行う。しかし、パターン展開を実行するカーネルのように、同じパターンを繰り返してカーネルが構成されている場合には、相関器 $C_2 \sim C_n$ で二つ以上のカーネル点を使用して処理の効率化を図ることができる。多段に相関器を通して得られる相関結果は、各相関器で用いたすべてのカーネルのコンボリューションパターンを一つのカーネルとして用いた場合と等価になる。したがって、相関器 $C_2 \sim C_n$ で二つ以上のカーネル点を設定することにより、相関器 $C_1$ でのサブカーネルを複数個含むような大きなカーネルパターンによる相関演算を、サブカーネルに分割せずに1回の手順で実現できる。別の表現をすれば、目的とするカーネルがカーネル格子間隔 $s_i (i=1, \dots, n)$ のカーネル群のコンボ

リユージョンとして表現できれば、カーネル群を相関器 $C_i$ のカーネルとして用いることにより、効率的に相関演算を実行できる。

例として、図4.5(a)に示すように27個のカーネル点が1列に並んだカーネルを用いてパターン展開を行う場合を考える。三つの相関器 $C_1, C_2, C_3$ を用意し、それぞれのカーネル格子点数とカーネル格子間隔を $g_1 \times g_1 = g_2 \times g_2 = g_3 \times g_3 = 3 \times 3$ ,  $s_1 = 2, s_2 = 6, s_3 = 18$ とする。今、図4.5(a)および(b)に示すカーネルおよびサブカーネルパターンを $P, P_1, P_2, P_3$ と記述する。すると、

$$P = P_1 * P_2 * P_3, \quad (4.6)$$

と表現できるため、 $P_1 \sim P_3$ を相関器 $C_1 \sim C_3$ のカーネルとして用いることができる。ここで、 $*$ は2次元パターンのコンボリューションを表す。その結果、図4.5(c)に示すように、

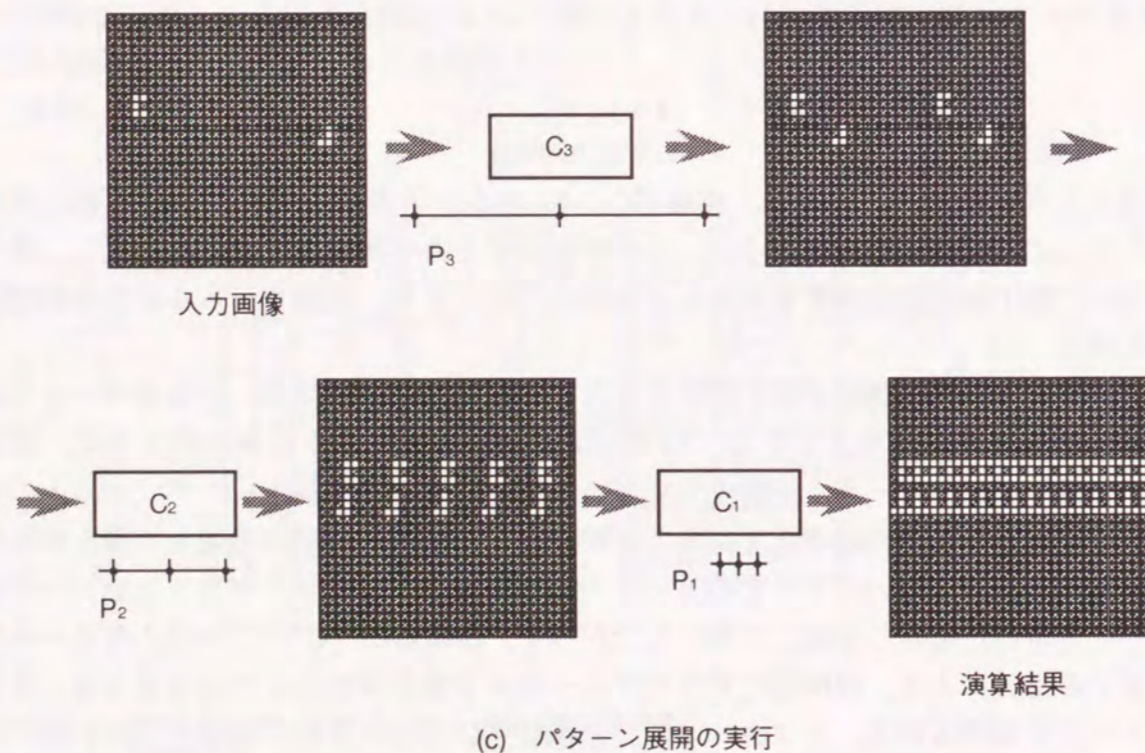
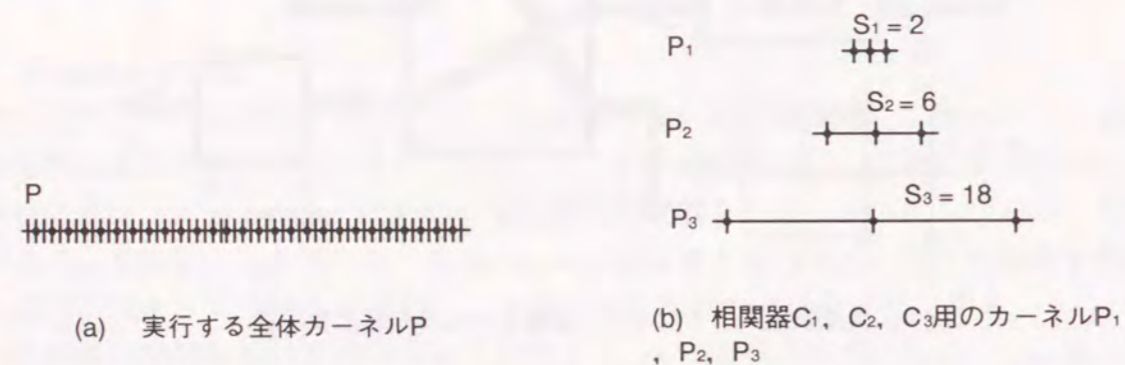


図4.5 多段相関器によるパターン展開の実行例

各相関器で1回ずつ相関演算を行うだけで、図4.5(a)のカーネルによる相関演算の結果を得ることができる。

上述の多段離散相関器では、各カーネル格子間隔に一つずつ相関器を用意したが、それぞれ複数個用意することで、処理の効率化が行える。特に、サブカーネルの演算を行う相関器 $C_1$ は最も頻繁に使用されるため、他の相関器よりも多めに用意することで処理効率を高めることができる。各相関器の数については、処理内容や用意できるハードウェア等を考慮する必要があり、今後の検討課題である。

#### 4.6 多段離散相関器の設計例と能力評価

多段離散相関器の設計例を示し、その能力評価を行う。また、単純離散相関器を多段型の相関器の数と同じだけ用意し、並列に動作させた場合との比較を行う。ここでは、図4.6のように、カーネル格子間隔の異なる相関器 $C_1 \sim C_4$ を四つ直列に連結し、画素数 $100 \times 100$ の出力画像を得る多段離散相関器の構成を考える。入力画像が相関器 $C_4$ から入力され、各相関器で順に処理されて $C_1$ から出力されると、一つのサブカーネルによる相関演算が行われる。サブカーネル全てについて相関演算を行った結果は、積算器において逐次的に足し合わされ、最終的に全体カーネルによる相関演算結果が得られる。式(4.3)で評価したように、1相関器あたりの入力画素数 $N_i$ とカーネル格子点数 $g_i$ との積は、光学系の条件により上限を持つ。そこで、一般的な光学素子を利用するものとして、

$$N_i g_i \leq 1000, \quad (4.7)$$

に制限されていると仮定する。この値に基づき、四つの相関器 $C_1 \sim C_4$ のカーネルサイズ、カーネル格子間隔、入力画素数を決定することになる。

まず、考慮すべき制限として、カーネルサイズと入力画像の画素数との関係について述

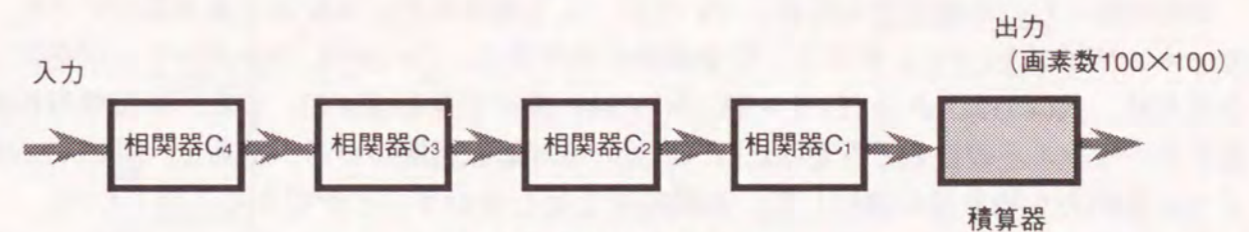


図4.6 多段離散相関器の構成

表4.1 多段相関器の設計例

相関器	$C_4$	$C_3$	$C_2$	$C_1$
カーネル格子点数 $g \times g$	$3 \times 3$	$3 \times 3$	$5 \times 5$	$9 \times 9$
カーネル格子間隔 $s_i$	135	45	9	1
入力画素数 $N \times N_i$	$299 \times 299$	$234 \times 234$	$144 \times 144$	$108 \times 108$

べる。ここで、カーネルサイズ  $l_i \times l_i$  はカーネル格子点数  $g_i \times g_i$  とカーネル格子間隔  $s_i$  から

$$l_i = g_i s_i, \quad (4.8)$$

で得られるとする。一般に、相関演算では、画像境界付近において画像領域外からの影響が現われる。この影響を除外するためには、出力画像より大きい入力画像を用意する必要がある。すなわち、出力画像で  $P \times P$  の画素値を得るためには、

$$N_i = P + l_i - 1, \quad (4.9)$$

を満たす画素数  $N_i \times N_i$  の入力画像を用意しなければならない。この設計では、出力画像の画素数  $P = 100$  であるため、式(4.7), (4.8), (4.9)より、

$$g_1 (g_1 + 99) < 1000. \quad (4.10)$$

そこで、この条件を満たす最大の自然数  $g_1$  として  $g_1 = 9$  と決定できる。ここで、 $s_1 = 1$  であることに注意を要する。また、式(4.8), (4.9)より  $N_1 = 108$  となる。

次に、式(4.5)より、 $s_2 = g_1 s_1 = 9$ 。同様に、式(4.7), (4.8), (4.9)より、

$$g_2 (9g_2 + 99) < 1000. \quad (4.11)$$

この条件を満たす最大の自然数  $g_2$  は6であるが、カーネル格子点数が偶数の場合、カーネルが原点に対して非対称の広がりを持ち、処理に不自由を生じさせる。そこで、 $g_2 = 5$  とする。このとき  $N_2 = 144$  である。以下同様な手順で相関器  $C_3, C_4$  の仕様を決定できる。表4.1に、各相関器の仕様を示す。

比較対象とした単純離散相関器については、入力画素数を  $N_s \times N_s$ 、出力画素数を  $P_s \times P_s$ 、カーネルサイズを  $l_s \times l_s$  とすると、完全接続の条件から、 $l_s = 2P_s - 1$ 、 $N_s = P_s + l_s - 1$  が必要となるため、式(4.7)より  $P_s = 12$ 、 $l_s = 23$ 、 $N_s = 34$  と決定できる(表4.2)。また、多段離散相関器とハードウェアの量をそろえるため、上述の単純離散相関器を四つ用意し、図4.7に示すように各出力を積算器に連結して、相関結果を足し合わせるものとした。

処理対象は  $500 \times 500$  画素を持つ画像とし、実行するカーネルの格子点数を  $G \times G$  とする。離散相関器の入力画素数以上の画像を処理するために、2次元仮想記憶機構[87]の手順により、 $100 \times 100$  画素のページに分割し、ページ単位の処理を行うものとする。また、多段離散相関器ではパイプライン処理による並列化が可能であるとする。各相関器で1回の処理に必要な時間を  $\tau$  とすると、多段離散相関器の場合、1ページの画素数が  $100 \times 100$ 、サブカーネルのサイズが  $9 \times 9$  であるので、全体画像、全体カーネルの処理が終了するまでの時間の上限は次式で表せる。

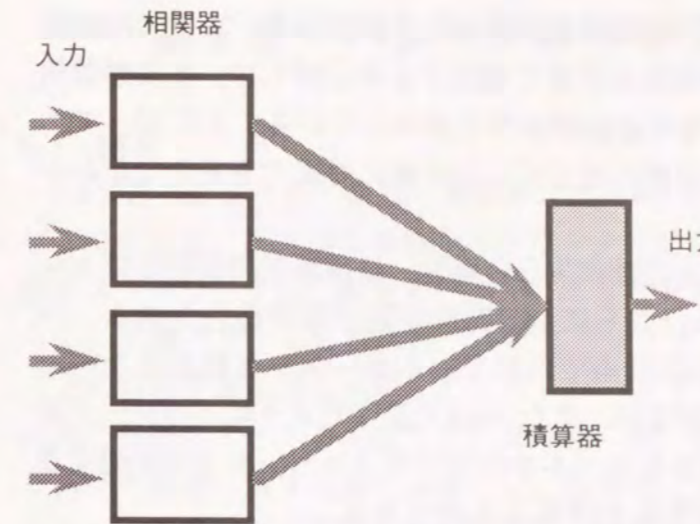


表4.2 単純離散相関器の設計例

カーネルサイズ $l_s \times l_s$	23×23
カーネル格子間隔 $s_s$	1
入力画素数 $N_s \times N_s$	34×34
出力画素数 $P_s \times P_s$	12×12

図4.7 単純離散相関器の構成

$$T_m \leq \left( \left\lceil \frac{500^2}{100^2} \right\rceil \left\lceil \frac{G^2}{9^2} \right\rceil + 4 \right) \tau \quad (4.12)$$

ただし、 $[x]$  は  $x$  以上の最小の整数とする。

一方、単純離散相関器の場合は、1ページ画素数が  $12 \times 12$ 、サブカーネルサイズが  $23 \times 23$ 、並列度が4であるから、処理時間は次式で表せる。

$$T_s \leq \left( \frac{1}{4} \left\lceil \frac{500^2}{12^2} \right\rceil \left\lceil \frac{G^2}{23^2} \right\rceil \right) \tau \quad (4.13)$$

実行カーネルの格子点数  $G$  と、 $T_m$  および  $T_s$  の関係を図4.8に示す。図4.8からわかるよう

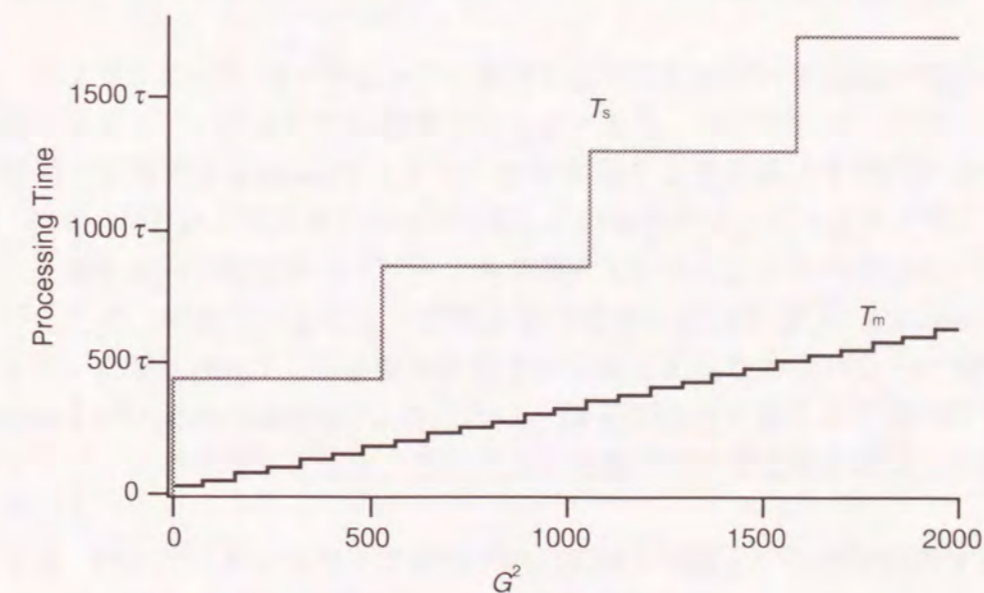


図4.8 反射型離散相関器の処理能力の比較

に、多段離散相関器の方が処理時間が短く、処理効率が高いことがわかる。また、単純離散相関器の場合、 $G$ が $23^2$ 増えるごとに処理時間が大きく増加するのに対して、多段離散相関器の場合は、 $G$ が $9^2$ 増えるごとに処理時間が比較的小さく増加している。したがって、多段離散相関器のほうがカーネルサイズの変化に対してより柔軟に対応できることがわかる。

その他、相関器で実行可能な最大カーネル点数が少ない場合、単純離散相関器ではカーネルをさらに分割処理する必要があるため、さらに処理時間が伸びる可能性がある。一方、多段離散相関器の場合は、各相関器に割り当てられているカーネル点数が少ないため、さらに分割処理を必要とする可能性は少ない。また、4.5で述べたように、パターン展開など、カーネルパターンが格子間隔の異なるカーネルのコンボリューションで記述できる場合、多段離散相関器では大幅に処理効率を上げることができる。

#### 4.7 結言

カーネルサイズの大きな離散相関演算を分割・分散処理して効率的に実行する手法として、カーネル分割処理を提案し、それを効率的に実行する多重離散相関器と多段離散相関器を提案した。さらに、多段離散相関器の設計例を示し、大きな画像サイズとカーネルサイズを持つ相関演算を対象としたときの処理能力を単純離散相関器と比較して、多段離散相関器の有効性を示した。多段離散相関器を導入して分散処理を行うことにより、各々の離散相関器に対する要求が軽減されるため、処理能力を保ったまま光アレイロジック演算モジュールの実現性を高めることができる。

## 第5章 バンヤンネットワークの光学的実現法

### 5.1 緒言

1.4で述べたように、複数の演算モジュールにより構成されるシステムを効率良く動作させるためには、高性能な接続ネットワークが必要である。並列光演算システムに用いる光接続ネットワークは、転送データとして2次元画像をそのまま扱えることが望ましい。さらに、接続パターン可制御性、スキューレス性、コンパクト性などが要求される。

光の自由空間伝播を利用したクロスバースイッチ[15]は、1段のスイッチング層のみで任意の接続パターンを実現でき、原理的に高い接続能力を持つ。しかし、それだけハードウェアの実現に対する要求は厳しい。光学的に実現する場合、画素数 $N$ の画像を転送データとし、入出力ポート数を $M$ とすると、 $M^2$ 個のスイッチング要素を用意し、それらへ画像を複製する必要がある。クロスバースイッチを実現する光学系の空間帯域幅積を $P$ としたとき、入出力ポート数は、

$$M \leq \sqrt{\frac{P}{N}}, \quad (5.1)$$

に制限される。

比較的スイッチング要素数が少なく、実現の容易な自由空間光接続ネットワークとして、パーフェクトシャッフル[68-71]、バンヤンネットワーク[66,67]、クロスオーバーネットワーク[90]といった多段接続ネットワークが提案されている。しかし、これらのうちパーフェクトシャッフルとクロスオーバーネットワークは2次元画像を扱うネットワークには適していない。なぜならば、パーフェクトシャッフルを実現するには拡大やマスク処理が必要であり、クロスオーバーネットワークを実現するためには画像の反転操作が必要であるため、データ画像の配列だけでなく、各データ画像自体が変形されてしまうからである。

一方、バンヤンネットワークはシフト演算に基づくためデータ画像が変形せず、2次元画像を扱うネットワークとして利用することができる。バンヤンネットワーク、あるいは同様の構造で実現できるBenesネットワークを実現する光学系はすでにいくつか提案されている。松本ら[91]および山本ら[92]が提案している手法は、ビームスプリッタやプリズムを用いて光線を偏向させてネットワークを実現している。これらの手法は、平行光線の伝播に基づくため、転送データとして画像を扱う場合には適さない。Cloonanらによるホログラムを用いた手法[93]は、不必要な光信号の分配があるため光パワーの損失が生じる。Jahns[66]およびMcCormick[67]による方法は、偏光を利用することで光パワーの損失の少ないネットワークが実現できるが、三つ以上の光路に分ける必要があるため複雑な光学系になっている。

本章では、バンヤンネットワークを光学的に実現する新しい手法を提案する[113]。この実現法は、光パワーの損失が少なく、レンズの解像力を十分に活かすことができる。ま

た、信号の伝達時間のずれ（スキュー）がなく、単純な光学系で構成できる特長を持つ。

### 5.2 バンヤンネットワーク

バンヤンネットワークは図5.1に示すような接続パターンを持つ多段接続ネットワークである。入力データ数を $M$ としたとき、各ステージは $M/2$ 個のノードで構成されており、直進と2方向シフトからなるバタフライ接続を介して、 $\log_2 M$ 段のステージが連結されている。各ノードは、図に示すような接続状態の切り替えが可能で、 $2 \times 2$ のスイッチング要素である。各スイッチングノードにおける接続状態の制御により、入出力ポート間で任意のデータ転送を行うことができる。スイッチングノードが交差と直進の切り替えのみを行う場合は、1対1の接続が実現でき、スイッチングノードがファンアウトを行える場合には、さらにデータのブロードキャストが実現できる。

転送データとして画像の2次元アレイを扱える3次元バンヤンネットワークは、光学系の空間帯域幅積を有効に活かすことができる。3次元バンヤンネットワークは、helded perfect shuffle[71]と同様に2次元バンヤンネットワークを折りたんだ構造を持つ。3次元バンヤンネットワークの接続トポロジは、2次元バンヤンネットワークと等価である。図

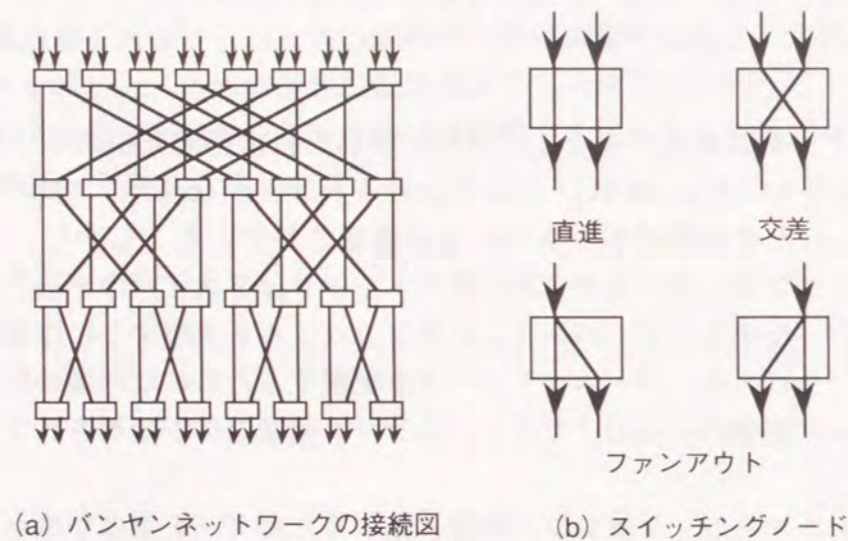


図5.1 バンヤンネットワーク

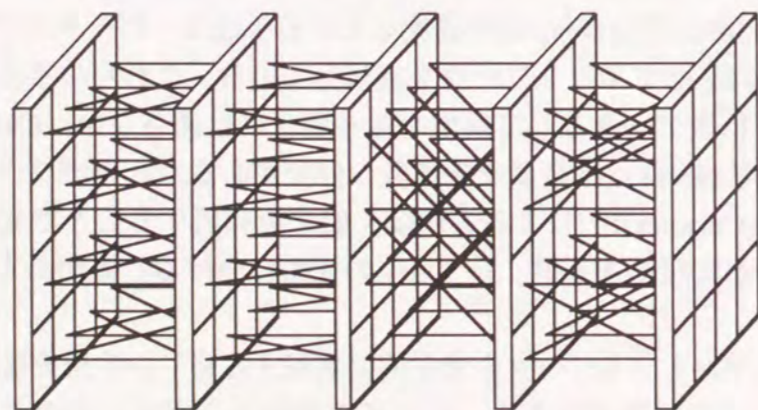


図5.2 3次元バンヤンネットワーク

5.2にステージあたり $4 \times 4$ ノードを持った3次元バンヤンネットワークの接続構造を示す。各ステージ4個ノードを持つ水平方向の2次元バンヤンネットワーク4層と、各ステージ4個のノードを持つ垂直方向の2次元バンヤンネットワーク4層が連結された構造を持つ。

### 5.3 サニヤックインバータを用いたバンヤンネットワーク

#### 5.3.1 バタフライ接続の実現

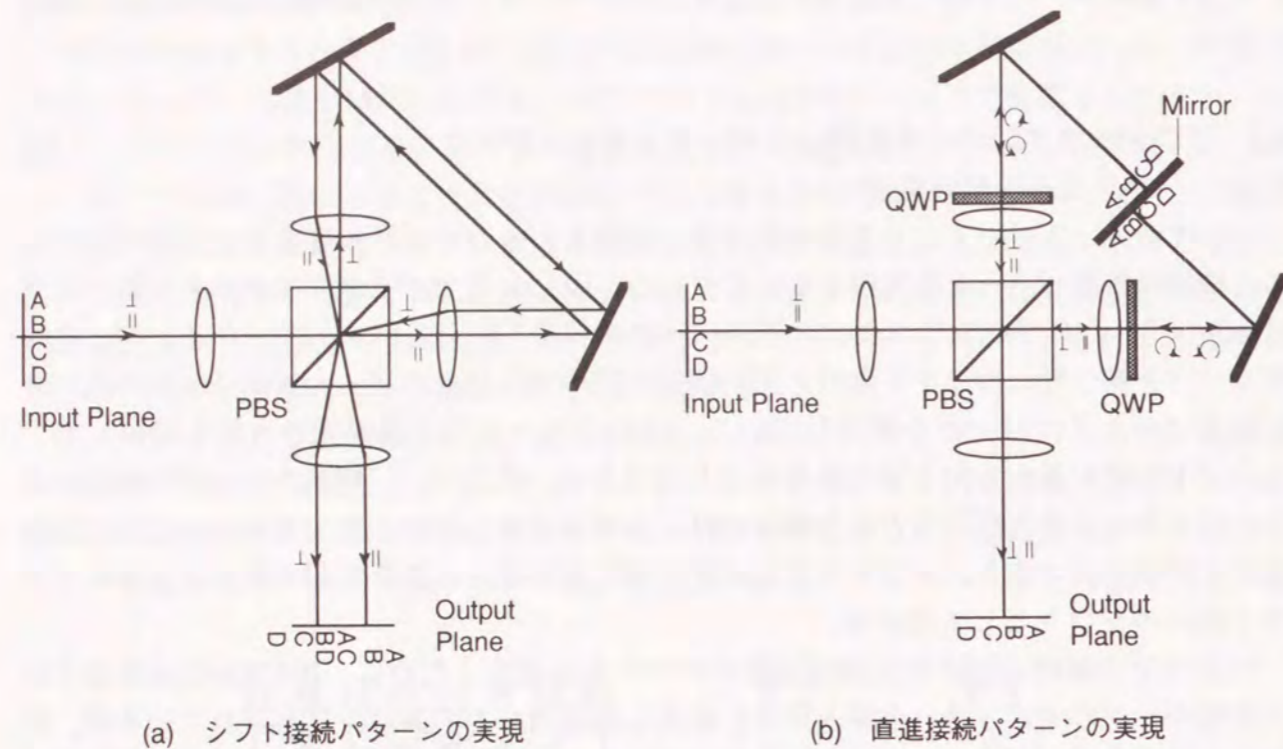
バンヤンネットワークに必要なバタフライ接続を行うためには、直進と2方向のシフトの3種類の接続パターンを実現する必要がある。図5.3に提案する光学系を示す。これは文献[60]で述べられているサニヤックインバータを利用している。サニヤックインバータは閉ループを持つサニヤック干渉計と似た構造を持つが、通常のビームスプリッタの代わりに偏光ビームスプリッタを使用している。そのため、入力直線偏光の方位を制御して、ループ中を光が進む方向を切り替えることができる。そこで、三角形のループを構成する二つのミラーを少し傾けると出力画像は横にシフトする。このとき、光がループ中を回る方向を逆回りにすると、シフトの方向が逆方向に変わる。この2方向へのシフトをバタフライ接続のシフトとして用いる。

バタフライ接続における直進の接続パターンを実現するために、図5.3(b)に示すように三角形ループの中にミラーを挿入する。挿入したミラー上の像はシフトされているが、反射して光路を逆へ戻ると反対方向へシフトするため、出力面ではシフトしない位置に像が得られる。挿入したミラーで反射した光が偏光ビームスプリッタを通過して出力面へ到達できるように、 $1/4$ 波長板を挿入して反射光の偏光方位を $90^\circ$ 回転させる。

これらのシフトと直進の接続を同時に行うために、図5.3(c)に示すように、反射部と透明部を持つパターンミラーをループ中に挿入する。そして、入力画像がパターンミラー上に結像されるように配置する。パターンミラーで反射した光が出力面へ到達できるように、二つの $1/4$ 波長板を使用する。このとき、パターンミラーを透過した光も出力面へ到達できるように、二つの $1/4$ 波長板の光学軸が互いに垂直になるように配置する。その結果、パターンミラーからの反射光は偏光方位が $90^\circ$ 回転し、透過光は元の偏光状態が保たれる。また、入力画像アレイ中の一つの画像について、ループ内の光の進行方向にしたがい、パターンミラーの反射部と透過部にそれぞれ結像されるようにミラーの傾きとパターンミラーの反射部分のパターンを設定する。ループ中での光の進行方向は入力面における偏光方位によって決まる。したがって、入力光の偏光方位の制御により、パターンミラー上での反射・透過を選択でき、その結果、シフト・直進の接続パターンを選択できる。バンヤンネットワークでは各ステージごとにバタフライ接続のパターンが異なるため、それぞれのステージごとにミラーの角度とパターンミラーの構成を変える必要がある。

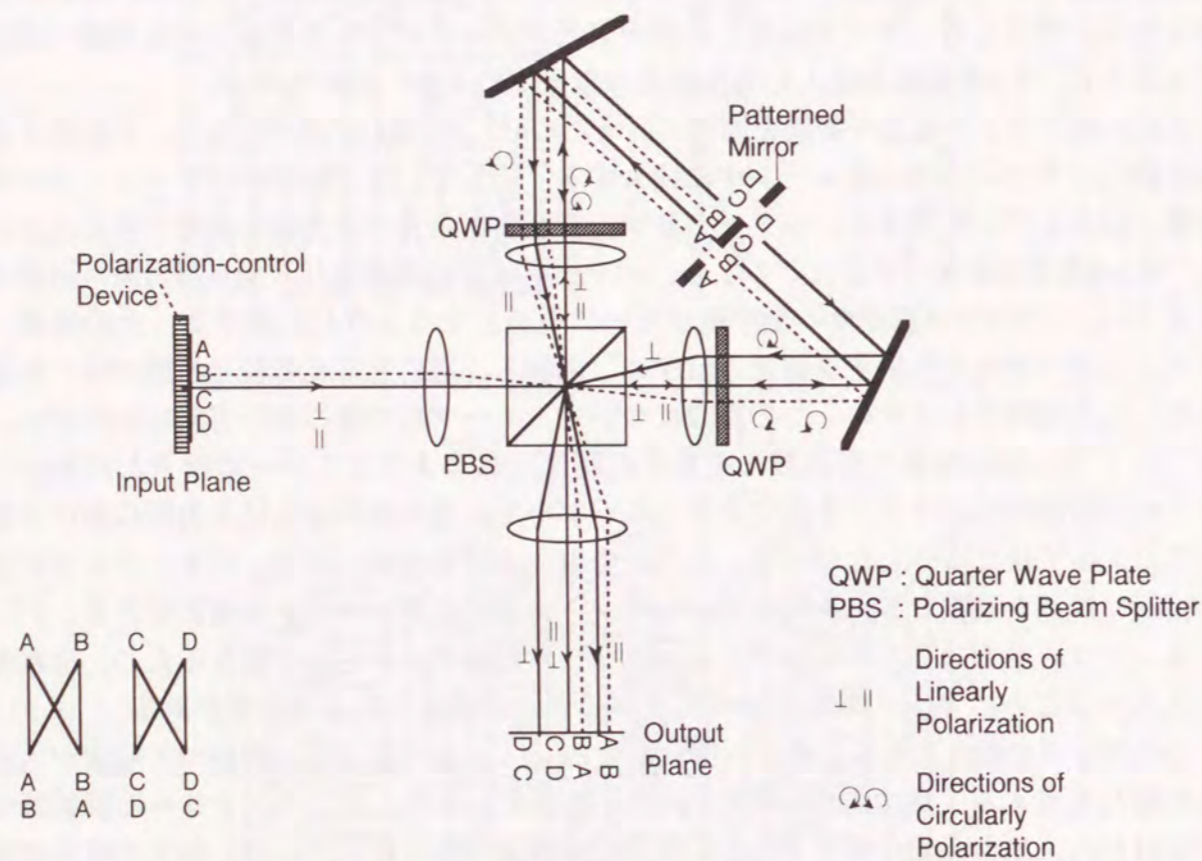
この光学系の働きを見るために、図5.3(c)のように、A, B, C, Dの四つの画像が入力された場合を考える。画像Aからの光がPBSを透過する場合、パターンミラーの反射部で像が反射され、出力面ではシフトしない位置に画像Aが得られる。一方、偏光方位を変化させて画像Aからの光をPBSで反射させた場合は、パターンミラーの透過部を通り、出力面ではシフトした位置に画像Aが得られる。一方、画像Bについては、PBSを透過させるとパ





(a) シフト接続パターンの実現

(b) 直進接続パターンの実現



(c) パターンミラーの導入によるシフト/直進接続パターンの実現

図5.3 サニャックインバータを用いたバタフライ接続光学系

ターンミラーの透過部を通り、出力面では画像Aと反対の方向にシフトした位置に画像Bが得られる。画像Bからの光をPBSで反射させた場合は、パターンミラーの反射部で反射され、出力面ではシフトしない位置に画像Bが得られる。他の画像C, DについてもそれぞれA, Bと同様の配置に設定することにより、バンヤンネットワークの1ステージ分のバタフライ接続が実現できる。

提案した光学系で扱えるデータ量について考える。光学系の空間帯域幅積をPとし、転送データとして扱う画像の画素数をNとする。同じ位置にあるデータでも、偏光方位が直交していれば分離できるので、Pの2倍のデータ量が扱える。したがって、画像データ数をMとした場合、次の式が成り立つ。

$$M \leq \frac{2P}{N} \quad (5.2)$$

クロスバーネットワークの場合の式(5.2)と比較すると、光学系の空間帯域幅積が同等の場合、バンヤンネットワークの方が多くのデータを扱うことができる。

ここで提案したバンヤンネットワーク光学系の長所を以下に挙げる。

- 1) 全解像点に対してレンズの全開口を利用することができるので、光学系の空間帯域幅積を有効利用することができる。
- 2) 偏光の状態を変化させることで接続パターンを切り替えることができる。
- 3) 偏光の利用により原理的に光のパワー損失がない。
- 4) 構成が比較的簡単である。
- 5) すべての接続パターンの光路長が等しいため、信号伝送時間のずれを起こさない。

### 5.3.2 スイッチングノードの実現

バンヤンネットワークを構成するためには、各ステージごとにスイッチングノードを用意し、5.3.1で述べた光学系を用いて多段に連結する。出力面ではシフトしてきた像と直進の像が同じ位置に重なるが、偏光方向は互いに直交しているため分離可能である。

接続パターンの切り替えを行うために入力信号の偏光状態を制御する方法としては、例えば強誘電性液晶空間光変調器 (FLC-SLM) が利用できる。この素子は、表面安定形強誘電性液晶モードにおける複屈折効果を利用することにより、マイクロ秒オーダーの応答速度でオン・オフが可能な位相板として働かせることができる[94]。液晶層の厚さを調節してオン・オフ可能な1/2波長板を構成してやれば、各ノードの入射光の偏光方位を垂直・水平に切り替えることができるので、2入力信号の交差と直進を切り替えるスイッチング要素となる。これを用いて光学系を多段に連結すれば、原理的には損失のないバンヤンネットワークを構成することができる。また、液晶層の厚さを調節してオン・オフのスイッチ可能な1/4波長板を構成し、1/2波長板と併用すれば、各ノードへの直線偏光を円偏光に変換できるため、スイッチングノードにおいてファンアウトを行うことができる。液晶のスイッチング速度はマイクロ秒オーダーであるが、光は液晶層を通り抜けるだけであるため、全ステージにおいて光速で信号伝送させることができる。したがって、接続の切り替

えの頻度が少なく、データ転送レートが高い接続ネットワークを構成する場合に適しているといえる。

マイクロ秒以下のスイッチング速度が必要な場合は、液晶以外の光機能素子を用いる必要がある。例えば、半導体の多重量子井戸構造を用いた光変調素子は、サブナノ秒のスイッチングが期待できる[19,95]。この素子は偏光の変換作用を持たないが、読み出し光の偏光を制御すればスイッチングノードとして用いることができる。光変調素子は光アドレス型のものを用い、ノードへの入力光を1度検出して光変調素子の駆動信号とする。読み出し用光源として偏光方向が水平・垂直の2種類の半導体レーザーを用意しておく。それらの光源の制御により偏光方位の切り替えを行えば、接続パターンを変更することができる。

また、スイッチングノードとして、受光素子、電子回路、発光素子を集積化した光電子集積回路を利用することが考えられる[16,96]。電子回路でスイッチング機能を実現することによって、より高機能なノード処理の実行が期待できる。しかし、発光素子の発熱の除去や集積度の限界などの問題がある。

5.4 バンヤンネットワークの一体構成の検討

バンヤンネットワークを構成するためには、図5.3と同様の光学系を多段に接続する必要がある。多くの光学系を組み合わせることになるため、コンパクトな光学系の構成法の検討が重要な課題となる。そこで、2次元バンヤンネットワーク光学系を順次重ね合わせて全ステージを一体化する方法を考案した。

5.3で述べたバンヤンネットワークの実現法では、画像データアレイ中の各画像を区別してパターンミラーの反射部か透過部に割り当てる必要があるため、パターンミラー上に画像を結像する必要がある。そこで、図5.4(a)に示すように、各画像データに対して一つレンズを対応させたレンズアレイを用いることを考える。そうすることにより、各画像デー

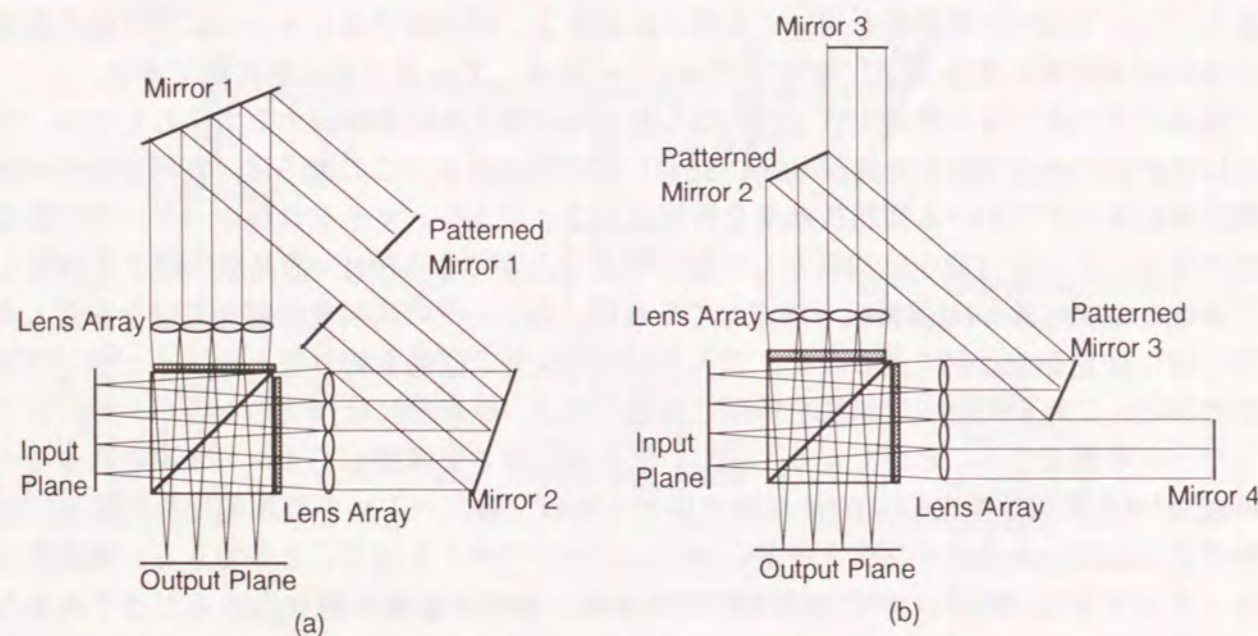


図5.4 レンズアレイを用いたバンヤンネットワーク光学系の構成

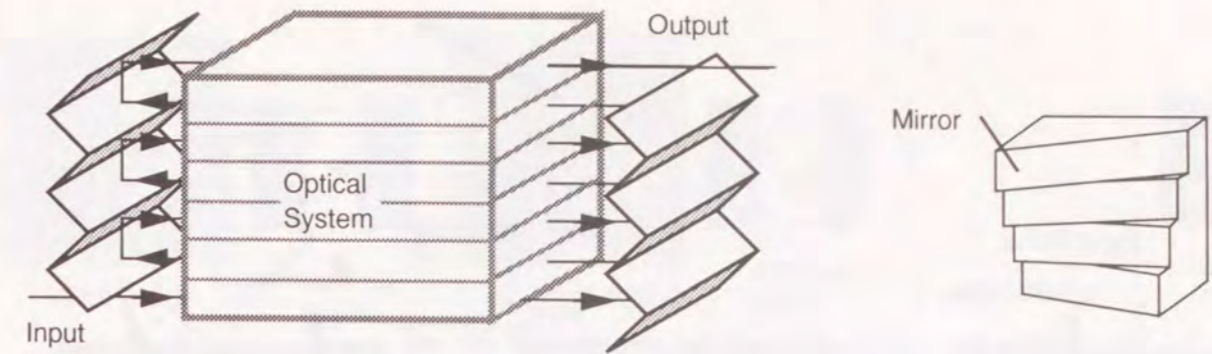


図5.5 ステージ間接続に用いるルーフミラーアレイ。

図5.6 傾きを持ったミラーアレイ

タの光路は各レンズごとに分離されるため、パターンミラー上に画像を結像させなくても、画像ごとに区別して反射部、透過部を割り当てることができる。また、図5.4(a)のMirror 1, 2をパターンミラーに置き換え、図5.4(b)のような構成にすることにより、三角形ループ内のパターンミラーを取り除くことができる。パターンミラーを透過した光は、その先のミラーMirror 3, Mirror 4により反射されて光路を逆行し、直進の接続パターンを実現する。パターンミラーで反射された光は三角形ループを回ってシフトの接続パターンを実現する。

入力は1次元アレイの画像データアレイとする。1段分の接続には2次元のバタフライ接続を用いる。次段は前段の上に重ねていき、全段を一体化して構成する。上の段へ画像データアレイを伝送するために、図5.5のようなルーフミラーを用いる。ミラーやパターンミラーの傾きは各段ごとに異なり、それらのミラーを順次上に重ねるため、図5.6に示すような、細長いミラーを各段ごとに傾きを変えて重ね合わせたミラーアレイが必要である。図5.4(a)の光学系の場合、Mirror 1, 2, およびループ中のPatterned Mirror 1に対して、それぞれ傾きを段ごとに変える必要があるため、図5.6のようなミラーアレイが三つ必要である。一方、図5.4(b)の方は、Patterned Mirror 3, Patterned Mirror 4について段ごとに傾きを変える必要があるため、二つのミラーアレイが必要である。ここで、Mirror 3, 4は段ごとに傾きを変える必要がないため、それぞれ1枚の平面ミラーを用いることができる。図5.4(a)の光学系は、コンパクトに構成できる点で有利である。一方、図5.4(b)の光学系は、製作が困難と思われるミラーアレイの数が少なくすむため、製作の容易さで有利である。

5.5 実験結果

提案した光学系の機能を確認するため、図5.7に示すようなバンヤンネットワークの1ステージ分の光学系を構成して実験を行った。入力画像アレイのサイズは9mm×9mm、レンズの焦点距離は200mm、直径は40mmとした。入力光の偏光方向の制御は偏光子と1/2波長板(ポラロイド社製)により行った。パターンミラーとしては、ガラス平板上にアルミニウムを蒸着し、エッチングにより反射部と透過部のパターンを形成したものを用いた。光源にはタングステンランプを用い、偏光素子の適合波長(633nm)に合わせるために、波長620nm以下をカットする周波数フィルターを挿入した。

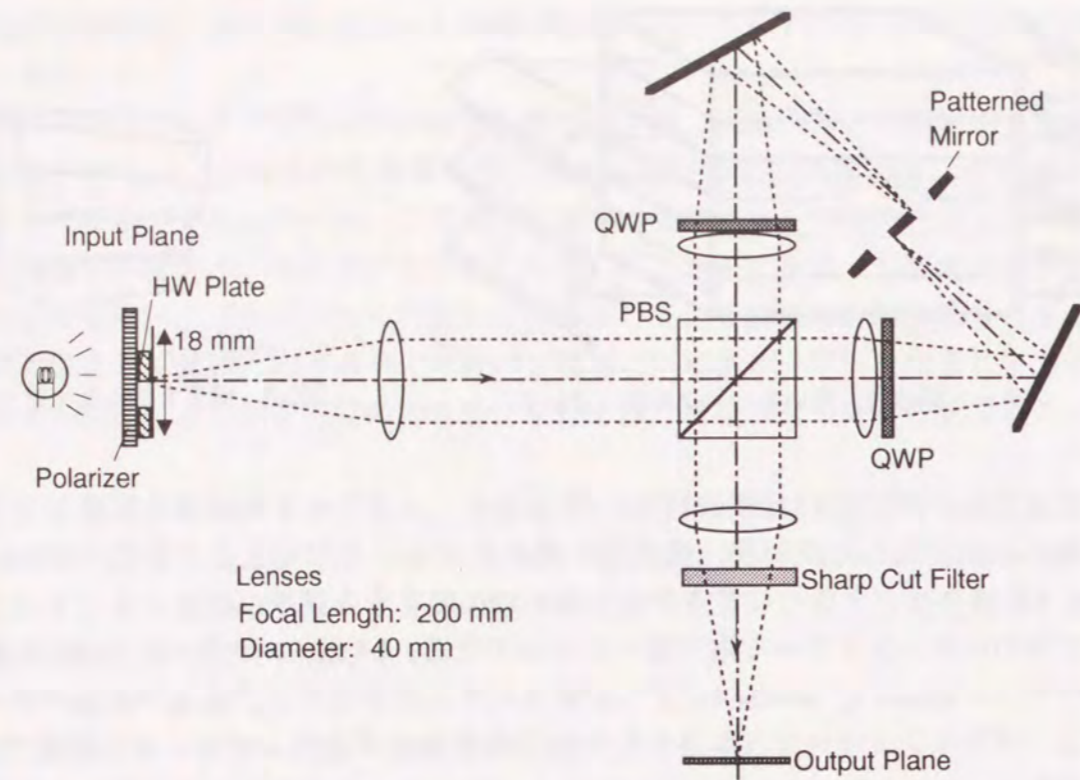


図5.7 バンヤンネットワークの実験光学系

図5.8に、実験における入力画像、パターンミラー、出力画像を示す。入力の偏光方位は入力画像のハッチングの方向で示されている。図5.8(a)では、画像アレイの右半分と左半分の入れ替えを行っている。図5.8(a)の場合と光学系の設定は同じままで、入力の偏光方位のみを90°回転させると、図5.8(b)に示すように、入力での配置のまま出力されている。図5.8(c)は、図5.8(a)と同様の光学系の設定で、無偏光で照明した結果を示す。この場合、シフトと直進の接続パターンが同時に実現されるため、データがファンアウトされている。これらの結果より、入力での偏光制御によって接続パターンの変更が可能であることが確認できる。図5.8(d)は、画像アレイの1/4ごとに水平方向の入れ替えを行った結果を示す。この処理はバンヤンネットワークの2段目の処理に相当する。図5.8(e)は、画像アレイの1/4ごとに垂直方向の入れ替えを行った結果を示す。これらの結果より、パターンミラーの構成とミラー傾きを変更することで、さまざまなシフト量やシフト方向を設定することが可能であることが確認できる。

試作光学系の結像特性を評価するために、入力面にUSAF解像力テストターゲットを置いたときの出力画像を図5.9に示す。観察像から約20 lp/mmの解像力が確認できる。入力画像のサイズは約15mm×15mmであるため、全体で9.0×10<sup>4</sup>の解像点数が得られる。無収差のレンズの分解能は

$$w = 1.22\lambda F \quad (5.3)$$

と表せる。ただし、λは波長、Fは有効Fナンバーを表す。ここで、F=200/40、λ=650 nm

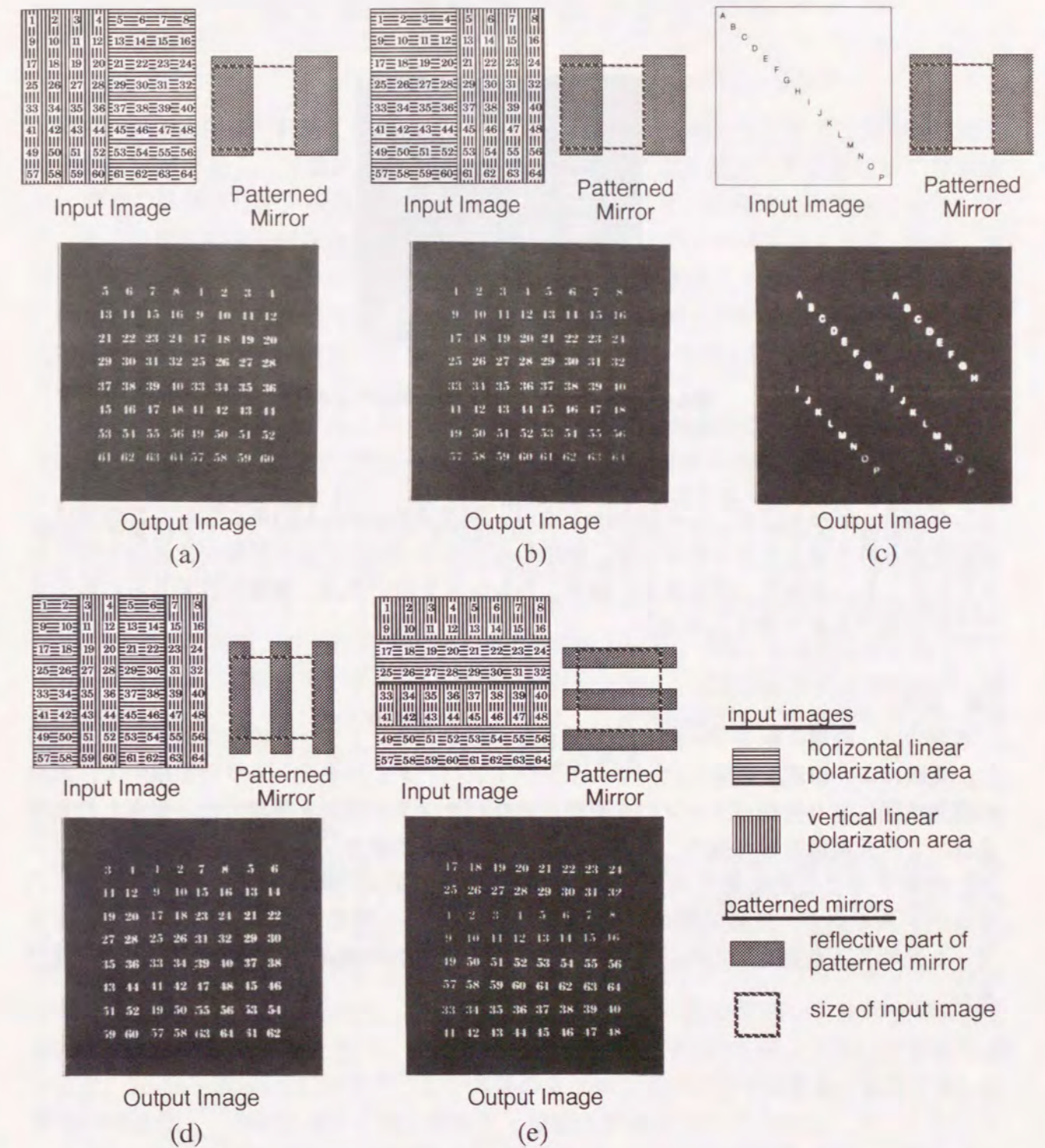


図5.8 バンヤンネットワーク光学系の実験結果

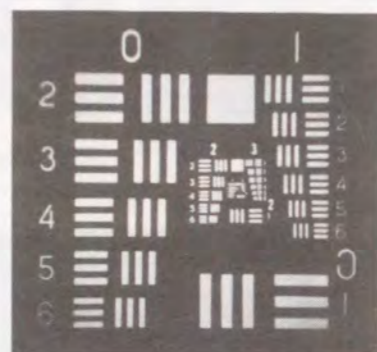


図5.9 バンヤンネットワーク光学系による結像実験結果

とした場合、式(5.3)より、 $w = 3.97\mu\text{m}$ となり、解像点数は約 $1.4 \times 10^7$ となる。この値は、実験で得られた値と大きく異なるが、使用したレンズの収差による影響が大きいものと考えられる。したがって、収差をよく補正したレンズを用いれば、解像点数をさらに増やすことが可能であると考えられる。

### 5.6 結言

本章では、画像を転送データとして扱えるバンヤンネットワークの光学的実現法を提案し、実験により原理を確認した。サニヤックインバータとパターンミラーを用いて、入力の偏光状態により接続パターンの変更が可能なバタフライ接続を実現した。提案した光学系は、2次元画像を取り扱うことができるので並列光演算モジュール間の接続ネットワークに使用することが可能である。また、光パワーの損失が原理的になく、高解像、スキューレスであり、比較的簡単な構造をしているという特長を持つ。本バンヤンネットワーク光学系は光交換システム[24]やデジタル光回路[97]の構成等に応用することも可能である。

## 第6章 反射型ブロック光学系

### 6.1 緒言

自由空間の光伝播を利用した光演算システムにおいて、実用的な光学系実装技術の開発は重要な課題である。光接続や光演算システムがその性能を発揮するためには、位置決め・調整の高精度化や、振動・ゴミの侵入・空気の攪乱等の耐環境性が要求される。また、多くの構成要素を組み合わせる必要があるため、取り扱いの簡便さも重要である。本研究での光演算システムの試作においては、光学定盤上に個別光学素子を配置して光学系を構成したが、上述の要求を満たすことは困難である。これらの問題を解決するために、光学系の集積化に関する研究が活発化しているが、それらの多くは口径数mm以下の微小な系を対象としたものである[27-29, 53, 86, 98]。

本章では、光演算システムにおける処理容量の大規模化と光演算モジュールの統合化を考慮して、より大きな口径(数mm~数cm)を有する光学系の集積技術について検討する。6.2では、すでに提案されているいくつかの3次元光学系集積技術について述べ、その問題点を検討する。6.3では、新しい実装技術として反射型ブロック光学系を提案する[115, 119, 120, 121]。6.4では、反射型ブロック光学系の応用例として、半導体レーザ等の光電子素子を用いた光接続システムと、デジタル光演算システムで有用な離散相関器の構成例を示す。6.5では反射型ブロック光学系の原理確認実験として行った、結像系と4f空間フィルタリング光学系の実験結果を示す。6.6では、反射型ブロック光学系における位置決め・調整方法や入射角、迷光について考察する。なお、口径数mm以下の光学系をマイクロ光学系、数mm~数cmの光学系をマクロ光学系と呼び区別する。

### 6.2 3次元光学系実装技術

光導波路に基づく集積化技術を用いれば、安定な光回路の実現が可能である[79]。しかし、光導波路技術では利用できる空間が1次元ないし2次元に限定されているため、光の3次元空間伝搬特性が有効に利用されていない。近年、光学系の3次元性を損なわない実装技術として、平板マイクロレンズアレイを用いた積層光学系[27]、リソグラフィ技術を利用したプレーナ光学系[29]、プロトンリソグラフィ技術を用いた集積光学系[53, 54]、ロッドレンズを用いた光バス接続光学系[81]等が提案されている。これらの技術を用いると、 $10\mu\text{m}$ ~数mmの口径を持つレンズ等のマイクロな光学素子を精度良く実装でき、光学系の固体化・一体化により、高い安定性・信頼性を得ることができる。

しかし、これらの実装技術は微細加工技術に基づいているため、数~数十mmレベルのマクロ光学系への適用は技術的に困難である。マクロ光学系は並列光演算システムの重要な構成要素であり、マイクロ光学系と比べて1) 高い空間帯域幅積、2) 広い像面、3) 長い伝送距離といった特徴を持つ。1)に関しては、レンズの開口数と光の波長を一定のまま光学系のサイズを小さくしていくと、レンズ開口での回折の影響により空間帯域幅積が低下していくことが知られている[99]。したがって、マクロ光学系の方が情報伝達容量を大きくすることができる。2)に関しては、マクロ光学系の方が広い像面を利用すること

ができるため、画像内の遠くの画素と接続でき、光の接続能力をより効果的に活かすことができる。3) については、マクロ光学系の方が物体面と像面の距離を大きく取ることができるため、より長い距離の高密度並列信号伝送が可能である。信号伝送距離が長いほど、配線遅延やエネルギー消費の面で光接続は電気接続よりも有利になることが知られている[100]。したがって、マクロ光学系の方が電気接続に対する光接続の有効性を発揮することができる。このように、光の特徴がより効果的に活かされ、光学処理の有効性がより明確であるという点でマクロ光学系は重要である。

比較的大きな光学系を対象とした実装技術としてはソリッド光学系が提案されている[32,33,101]。ソリッド光学系は、個別部品により構成される光学系の空間部分を透明固体媒質で充填し、固体媒質の屈折率差を利用してレンズ効果を得る。しかし、固体媒質間の屈折率差はあまり大きく取ることができないため、多くの屈折面を組み合わせる必要があり、製作が難しいという欠点を持つ。

光学系の集積化・小型化のためは回折型レンズが適しており、従来より集積光学系への利用が検討されている。しかし、回折型レンズは軸外収差が大きく、像面をあまり大きく取れないため、画像情報の光学処理にはあまり適していない[102]。

### 6.3 反射型ブロック光学系の原理

反射型ブロック光学系(Reflective Block Optics: REBOP)は、固体光伝播媒質と反射型光学素子からなるブロックの組み合わせにより、固体化・一体化して構成される光学系である。具体的には、キューブ型のガラスブロックやビームスプリッタを基礎ブロックとして、反射型レンズと組合せて構成する。図6.1に反射型ブロック光学系による4f光学系の構成例を示す。反射型レンズは、平凸レンズの凸面に反射膜を蒸着させて実現する。反射膜をコーティングした球面の曲率半径を $r$ としたとき、反射型レンズの焦点距離 $f$ は、

$$f = -\frac{\lambda}{2}, \quad (6.1)$$

で得られる[103]。

入射光は直線偏光とし、偏光ビームスプリッタと1/4波長板を用いることにより損失なく光を伝搬させる。図6.1において、入力面から入射したP偏光はビームスプリッタを透過して反射型レンズで反射される。このとき、1/4波長板の光学軸を入力偏光方位に対して $45^\circ$ になるように設置しておくこと、入力光は1/4波長板を2回通過してS偏光に変換される。S偏光は偏光ビームスプリッタで反射され、フィルタ面へ到達する。このように、光が反射されるたびに偏光

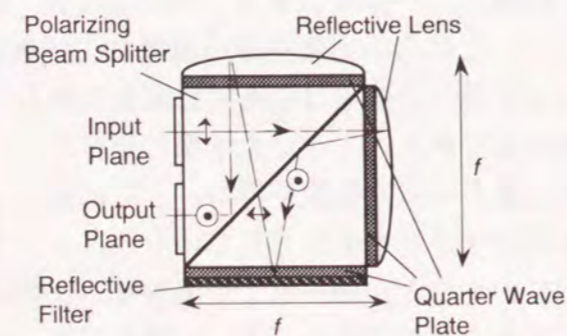


図6.1 反射型ブロック光学系を用いた4f光学系の構成例

方位を $90^\circ$ 回転させることにより、偏光ビームスプリッタ内で損失なく光を伝搬させる。

図6.1は比較的簡単な光学系の例であるが、さらに多くの光学素子からなる複雑な光学系も基礎ブロックの組合せにより構成する。その具体的な例については次節で示す。

反射型ブロック光学系は以下の特長を持つ。

- 1) 一体化により振動に強く安定性が高い。
- 2) 固体媒質で充填されているためゴミなどの侵入がなく、信頼性が高い。
- 3) あおりと軸方向の調節が不用なため、位置合わせ・調節を簡略化できる。
- 4) 凹面鏡によるレンズ作用では色収差が生じない。
- 5) 回折型のレンズよりも軸外収差が少ないので大きな像面が使える。
- 6) 回折型や屈折率分布型のレンズを用いた集積光学系よりも大口径の光学系に適用でき、高い空間帯域幅積と接続能力を持つ。
- 7) 反射光学系により光路を折り畳むことができ、光学系全体をコンパクトに実装できる。

### 6.4 応用例

本節では、反射型ブロック光学系を並列光演算モジュールに応用することを考える。反射型ブロック光学系はマクロ光学系の実装に適している。しかし、平板マイクロレンズをはじめとするマイクロ光学系も、開口数や生産性等の点で無視することはできない。そこで、その双方の特長をいかした光学系がいくつか提案されている。以下では反射型ブロック光学系によるマイクロ/マクロハイブリッド光接続と離散相関光学系の構成について検討する。

#### 6.4.1 マイクロ/マクロハイブリッド光接続

マイクロ/マクロハイブリッド光接続システムはマクロ光学系とマイクロ光学系を組み合わせによる光接続システムであり、両者の光学系の特長を合わせ持つ[104]。マクロ光学系は、マイクロ光学系に比べて信号伝送距離が長い、像面が広い、接続能力が高い等の点で優れている。一方、マイクロ光学系は、高い開口数が得られる、光電子素子との集積化が容易であるなどの利点を持つ。

光接続システムが要求される例として、レーザーダイオードアレイと光検出素子アレイを用いたチップ間の1対1並列光接続を考える。レーザーダイオードからの発光は大きな広がり角を持つため、光パワーの損失を抑えるために開口数の高いレンズが必要である。しかし、大開口数のマクロレンズを製作するのは困難である。そこでマイクロレンズによりレーザーダイオードからの光の広がり角を小さくした上で、接続能力の高いマクロレンズを適用するマイクロ/マクロハイブリッド光学系が提案されている[104]。マイクロ/マクロハイブリッド光学系は、マクロ光学系やマイクロ光学系のみを用いた時に比べて、高密度な光源アレイからの光を遠くまで並列伝送することができる。マイクロ/マクロハイブリッド光学系を実現するためには、マクロ光学系とマイクロ光学系を融合した実装技術の開発が必要である。そこで、マクロ光学系の構成に反射型ブロック光学系の概念を利用することを考える。

図6.2に、反射型ブロック光学系を用いたマイクロ/マクロハイブリッド光学系を示す。レンズアレイには平板マイクロレンズ[27]やフレネルレンズアレイ[86]の様な平面での接着が可能であるものを用いる。各レーザーダイオード、受光素子に一つずつマイクロレンズが割り当てられるように配置して、マイクロレンズアレイをレーザーダイオードアレイと受光器アレイと一体集積化する[30, 105]。マクロ光学系で実現可能な開口数に放射光が収まるように、マイクロレンズによりレーザーダイオードからの光の放射角を抑える。光検出素子に対しても同様にマイクロレンズを用いる。集光スポットを小さくすることにより、光検出素子のサイズを小さくして容量を減らし、応答速度を向上させることができる。マクロ光学系は反射型ブロック光学系の概念に基づいて、偏光ビームスプリッタ、反射型レンズ、1/4波長板を用いて構成される。キューブビームスプリッタとマイクロレンズアレイを面で接着して、光学系全体を一体化する。

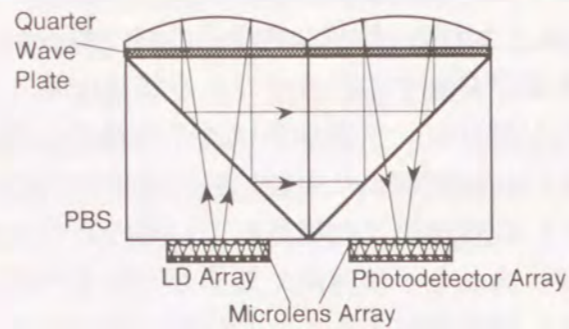


図6.2 マイクロ/マクロハイブリッド光接続システム

6.4.2 離散相関器に基づくデジタル光演算モジュール

反射型ブロック光学系による離散相関器の構成法について考える。離散相関器は、これまでも述べてきたように、光アレイロジックやその他の並列デジタル光演算技術において中心的な役割を果す重要な光学系である。マイクロ光学系とマクロ光学系を組み合わせた相関器として、図6.3(a)に示すような光学系が提案されている[38]。この光学系は、マクロレンズとマイクロレンズアレイにより入力画像を多数複製し、再び重ね合わせる。このとき、マイクロレンズと出力面の位置を軸方向に少しずつずらしてやると、複製像が少しずつ重ね合わされ、結果として離散相関演算が行われる。光シャッターアレイを用いてマイクロレンズを選択することにより、カーネルパターンを制御することができる。この離散相

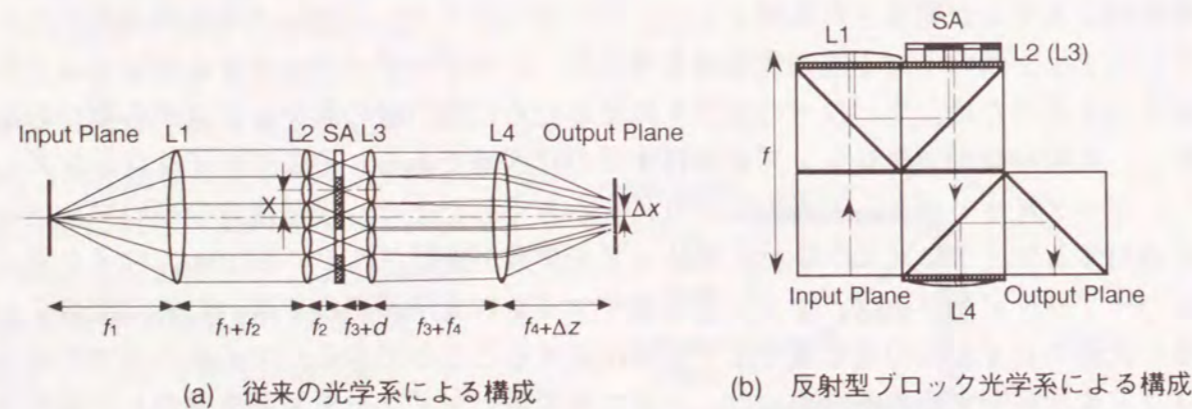


図6.3 レンズアレイを用いた離散相関光学系  
L2,L3: レンズアレイ, SA: シャッターアレイ

関器は、結像に基づくため高解像であり、カーネル点間隔の設定が比較的自由であるといった特徴を持つ。

この離散相関器を実現するためには、マイクロ光学系とマクロ光学系を組み合わせる必要があるため、微小光学技術に基づく光学系集積技術のみで実装することは困難である。そこで、反射型ブロック光学系の利用を考える。レンズアレイには微小光学素子を用い、マクロレンズは反射型ブロック光学系の概念を用いて実装することにより、図6.3(b)に示すような離散相関器を構成することができる。透過型のレンズアレイを使用し、ミラーで光を反射させることにより、一つのレンズアレイで二つ分のレンズアレイ(図6.3(a)におけるレンズL2とL3)の働きを兼ねる。図6.3(a), (b)と比較すると、(b)の反射型ブロック光学系に基づく相関器は、固体化・一体化により安定性が増し、系を折り畳むことによりコンパクト化されていることがわかる。

次に、図6.4(a)に示すような、多重離散相関器を用いた光演算モジュールを考える。光アレイロジックや記号置換論理において任意の論理演算を行うためには、一つの入力画像に対して複数の相関演算を実行し、それらの結果を足し合わせる必要がある。そこで、相関器の多重化により処理効率を上げることができる。このシステムは、複数の相関器を並列に用意しておき、入力画像を各相関器に複製して同時に複数の相関演算を実行し、それらの結果を足し合わせて演算結果を得る。図中の光機能素子には、受光/発光素子機能を備

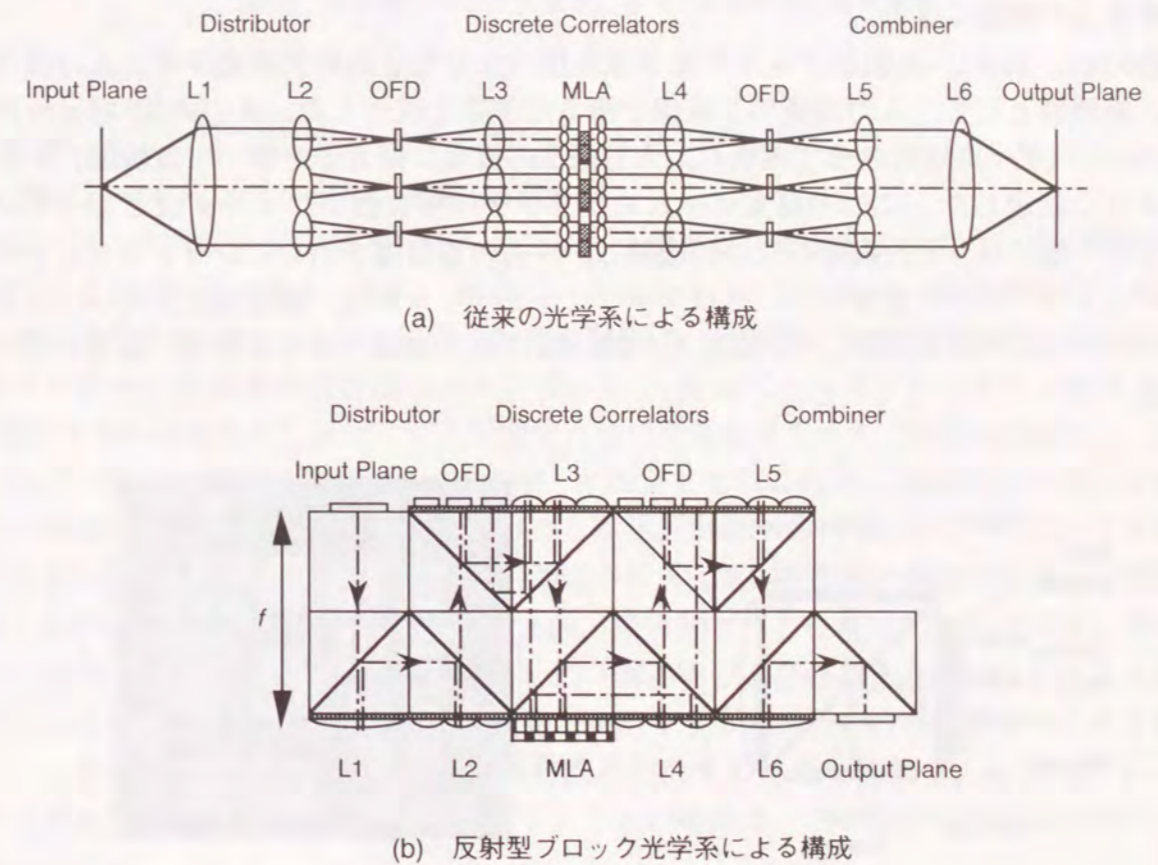


図6.4 多重離散相関器と分配/結合器からなる光演算モジュール  
L1~L6: レンズ, OFD: 光機能素子, MLA: マイクロレンズアレイ

えた光電子集積回路や非線形光学素子を利用して、画像のサンプリング、発光、閾値処理、増幅、反転、空間的符号化等を実行させる。光変調素子を用いる場合は、読み出し用の光学系を付加する必要がある。離散相関器には図6.3(a)と同様の光学系を複数用意する。なお、この光演算システムは、各相関器への入力画像をあらかじめシフトさせて入力すれば、4.4で述べたカーネル分割処理への応用も可能である。

図6.4(b)の光演算モジュールを反射型ブロック光学系の概念を用いて構成すると、図6.4(b)に示すよう光学系が実現できる。図6.3(b)と同様に、レンズL1~L6に反射型レンズを用い、レンズアレイとして透過型のマイクロレンズアレイを用いている。基礎ブロックの組み合わせにより、このような複雑な光学系もコンパクトかつ安定に構成することができる。

### 6.5 実験結果

反射型ブロック光学系の原理確認のために、結像系と4f光学系の実験を行った。実験には、20mm角のキューブ偏光ビームスプリッタ、曲率半径 $r=51.90\text{mm}$ の平凸レンズを用い、レンズの凸面にアルミニウムを蒸着して反射型レンズとした。このとき、反射型レンズの焦点距離は、式(6.1)より $r/2=25.95\text{mm}$ となる。図6.5(a)に、反射型ブロック光学系を用いた結像の実験光学系を示す。入力面にUSAF解像力テストターゲットを置き、He-Neレーザーからの光を拡散板を通して照明した。図6.5(b)に示す出力像から、およそ16lp/mmの解像力が確認できた。

図6.6(a), (b)に、反射型ブロック光学系を用いた4f光学系の実験光学系と入力画像を示す。処理例として、入力画像の2重像を得る光学系を試作した。入力画像は5mm角で、He-Neレーザーを拡散させて照明し、入力画像の直後に偏光子を置いて直線偏光が得られるように設定した。二つの偏光ビームスプリッタの接合面がフィルタ面となっている。フィルタ面には、入力画像を二つに複製し、片方の複製像を斜めにシフトさせるホログラフィックフィルタを設置した。ホログラフィックフィルタは、銀塩乾板を用い、2種類のグレーティング多重記録して作成した。図6.6(c)に出力画像を示す。所望の結果が得られている。

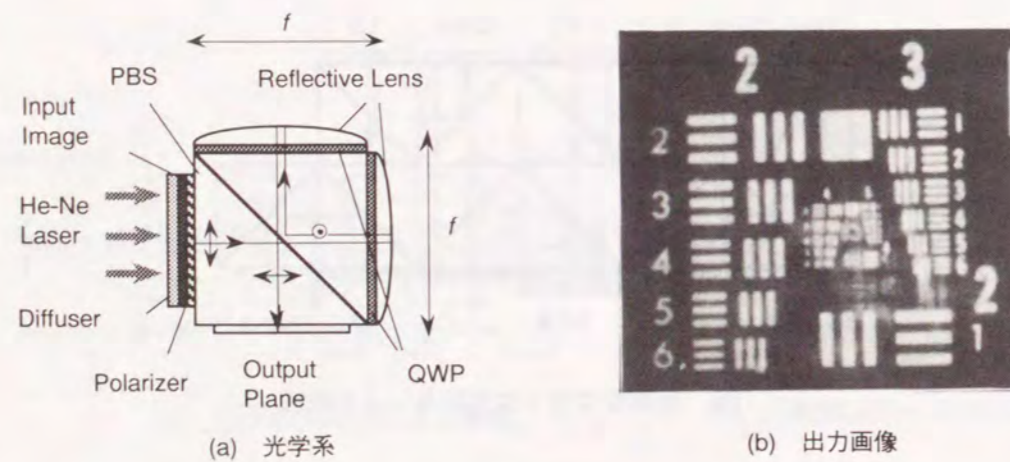


図6.5 反射型ブロック光学系による結像実験

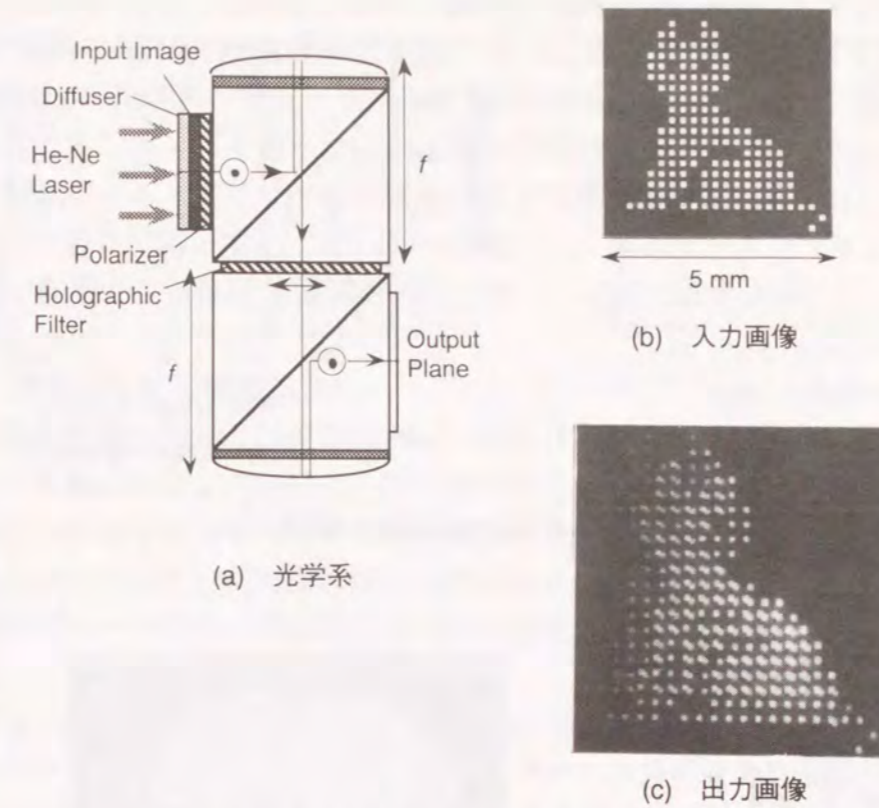


図6.6 反射型ブロック光学系に基づく4f光学系の実験結果

### 6.6 考察

#### 6.6.1 偏光ビームスプリッタの入射角依存性

反射型ブロック光学系では偏光ビームスプリッタが重要な働きをするため、その特性の評価を行うことが必要である。特に、偏光ビームスプリッタの反射率・透過率は光の入射角に大きく依存する[106]。この光線の入射角の制限は、光学系の空間帯域幅積や接続能力を制限するため、重要な検討課題である。図6.7に、偏光ビームスプリッタに入射するP波・S波それぞれの透過率・反射率の入射角依存性の計算結果を示す(付録Aを参照)。偏光フィルター用の多層膜の構成は $(L/2HL/2)^5$ と仮定した。これは、3層構造の誘電体基本膜を5層重ねたものている。低屈折率層L/2と高屈折率層Hは、入射角 $45^\circ$ において光路長がそれぞれ1/8波長と1/4波長となるように設定される。高屈折率層の屈折率を2.05、低屈折率層の屈折率を1.38、ガラスの屈折率を1.619、頂角を $45^\circ$ とした[107]。また $\theta$ は、多層膜への入射角 $\theta_0$ に対して $\theta = \theta_0 - 45^\circ$ とした。透過率および反射率が85%以上となる条件を仮定すると、図6.7より $\pm 10^\circ$ 以内の光線が利用できる。波長の許容範囲を狭くするかわりに、入射角の制限を緩和するように多層膜を設計することも可能である[108]。レーザー等の単色光を利用する光接続や光演算システムの場合は、この波長の制限は不利な条件とはならない。

図6.8は、反射型ブロック光学系に基づく4f光学系に均一光を入射した場合の出力画像を示す。レンズは直径20mm、焦点距離25.95mmのものを用いた。入射平行光は、反射型レ

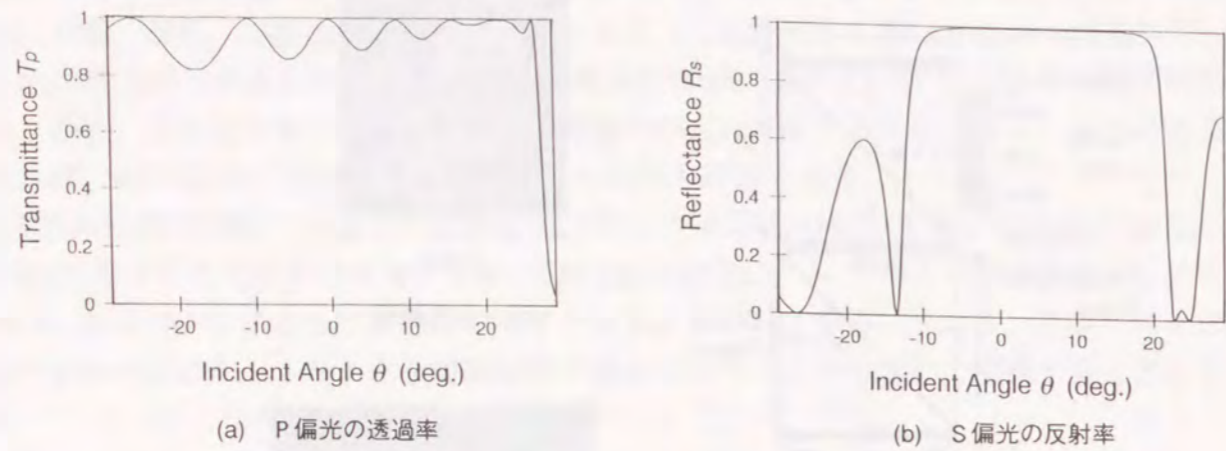
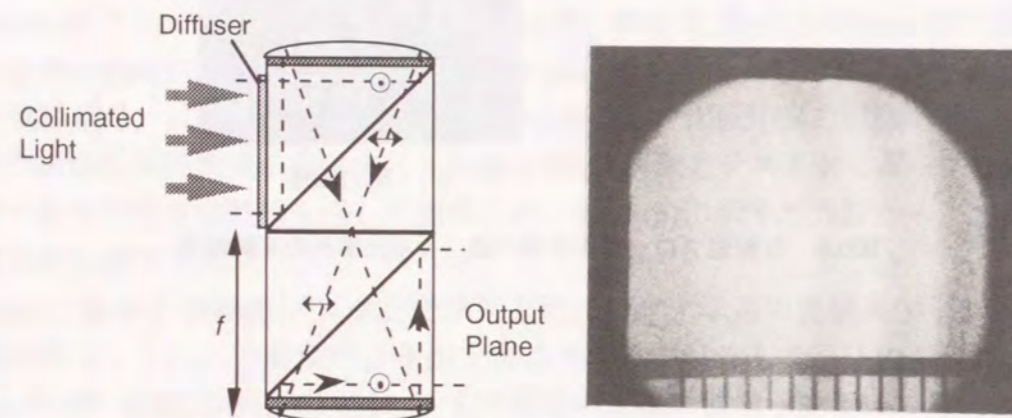
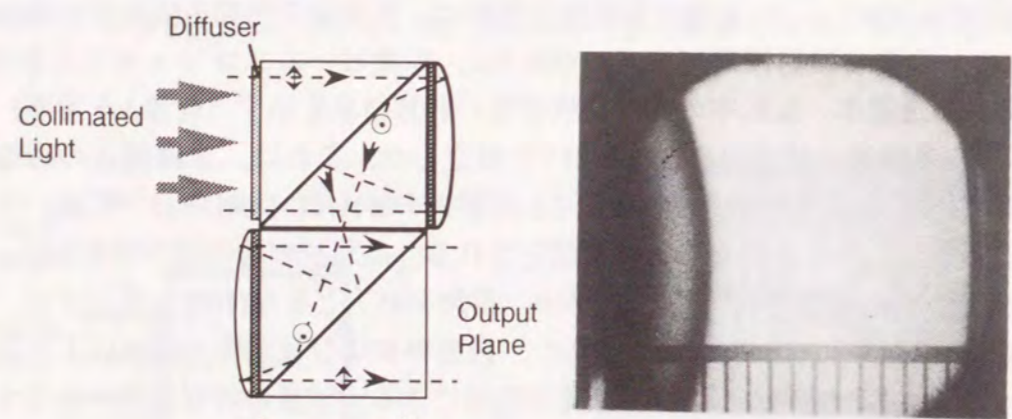


図6.7 偏光ビームスプリッタの入射角依存性



(a) P偏光が斜入射する場合



(b) S偏光が斜入射する場合

↑ p-polarized light      ⊙ s-polarized light

図6.8 均一光入力時の4f光学系の特性

レンズで反射されると、収束光となって偏光ビームスプリッタに入射する。図6.8(a)の光学系の配置では、入射光はP偏光の収束光となり、偏光ビームスプリッタで透過される。一方、図6.8(b)の光学系の配置では、入射光はS偏光の収束光となり、偏光ビームスプリッタで反射される。レンズを通った後の光線の入射角は、像面での位置によって一意に決まるため、偏光ビームスプリッタの入射角に対する透過率・反射率変化は、出力面での空間的強度分布の変化に対応する。図6.8の出力像から、偏光ビームスプリッタの入射角依存性によって、使用できる像面の領域が制限されていることがわかる。

### 6.6.2 位置合わせ・調整方法

軸方向の距離やあおりの位置合わせ・調整は各ブロックの接着だけで容易に行われる。しかし、光軸に垂直な方向については何らかの調整機構を備える必要がある。多くの部品を組み合わせる場合を考えると、複雑な調整機構を用いるよりは、できる限り簡単な機構が望ましい。そこで、反射型ブロック光学系では、図6.9に示すように各ブロックに溝を付け、ガイドレールのついた基板にそれらを配置することで、光軸の位置合わせ・調整を簡単化する。

位置合わせ精度は各ブロックの加工精度に依存するが、多くのブロックを接続する場合、各ブロックの製作誤差が蓄積され、最終的に出力面で大きなずれを生じる可能性がある。そこで、誤差の蓄積を吸収するために補正用ブロックを導入する。ある程度ブロックを組み合わせ、光学系を構成した後、焦点のずれや面内の位置ずれを測定する。そして、そのずれ量に合わせた補正用ブロックを挿入して、所望の位置に結像するように調節する。軸方向の距離ずれには、光路長を補正するように厚さを調節したガラスブロックを挿入する。また、面内の位置ずれには、図6.10に示すように、光屈折率の異なるガラス板を傾けて固定した微小シフトブロックを挿入して、シフト量を調整する。

### 6.6.3 迷光

6.5の反射型ブロック光学系の基礎実験において、出力面上にゴースト像の発生が見られた。その原因としては、ブロックの接合面や側面での反射、偏光ビームスプリッタや1/4波長板の特性の不完全さ、反射面での偏光の変化等が考えられる。接合面での反射については、隣接するブロック接合面にマッシングオイルを用いて空気層を取り除き、屈折率の

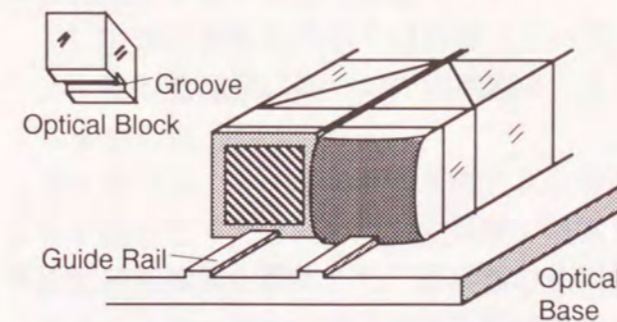


図6.9 ガイドレールによるブロックの位置合わせ

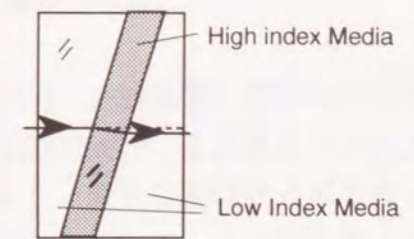


図6.10 位置ずれ補正用微小シフトブロック



マッチングを正確に行うことで避けることができる。側面での反射を抑さえるためには、吸収層の設置や不要な光の遮光などの対策が必要である。偏光に関する問題については偏光フィルターや位相板を最適に設計し、検光子により不要な偏光を取り除くことが必要である。

### 6.7 結言

並列光演算モジュールの構成手法として、反射型レンズ、偏光ビームスプリッタ、1/4波長板等からなる基礎ブロックを組み合わせて、光学系を安定かつコンパクトに構成する反射型ブロック光学系を考案した。具体的な応用例として、マイクロ/マクロハイブリッド光接続システムとレンズアレイを用いた離散相関器の構成法を示した。結像と4f空間フィルタリング光学系の実験結果を示し、反射型ブロック光学系の原理を確認した。反射型ブロック光学系はマクロな光学系の実装を目指しており、ミクロな光学系との融合や、様々な光演算モジュールを統合する光学系の構成などにおいて有効であると思われる。今後、製作精度、クロストーク、光量の損失、熱膨張の影響などを考慮した実用化への検討をさらに行う必要がある。

## 総括

本論文では、並列光演算システムの高機能化と実用性の向上を目指して、モジュール統合型光演算システムを提案し、さらに、システム試作による性能検証、高性能化の検討、光システム構成方法の提案を行った。以下、本研究で得られた成果を章ごとに総括し、今後の検討課題について検討する。

第1章では、本論文で対象として設定した光演算システムの基本概念を明らかにした。光演算の基本原則として離散相関演算を定義し、それを発展させた光演算技術である光アレイロジックについて述べた。そして、光演算システムを構成する基本概念として、モジュール統合システムについて述べた。さらに、そのシステムにおいて重要な役割を果たす光演算モジュール、光接続モジュール、光接続ネットワークに対する要求項目と利用可能な技術について述べた。比較的小規模なモジュールを組み合わせることにより、大規模・高性能なシステムを構築する手法は、光演算システムの構成において、1) 生産性の向上、2) 故障耐性の向上、3) 拡張性の向上、4) 処理の効率化、5) 高機能化に対して有効であることを示した。

第2章では、三つのタイプの並列光演算システムH-OPALS 2, H-OPALS 3, H-OPALS 16<sup>2</sup>の試作と、並列処理の実行結果について述べた。H-OPALS 2は3×3画素の2値画像に対して45 frame/sec, H-OPALS 3は3×3画素の2値画像に対して278 frame/sec, H-OPALS 16<sup>2</sup>では、16×16画素の2値画像に対して19 kframe/secで動作できた。数値演算、画像処理の実験結果により、システムの能力と処理の柔軟性を示した。試作システムの検討から、より実用的なシステムへ発展させるためには、特に以下の問題を解決する必要があることを明らかにした。

- 1) システムの動作速度は主として光強度不足が原因となるため、光の利用効率のよい光機能素子と光学系の検討・開発が必要である。
- 2) 画素数を増やすためには、OPALS専用光機能素子と効率的な光学系構成法の開発が必要である。

第3章では、光・電子複合型OPALSの集積化に適した相関器として、反射型多重投影相関器を提案した。回折による処理能力の制限を評価し、さらにマイクロレンズや円筒レンズの導入により回折の影響を減らして処理能力の向上を図る手法を提案した。反射型多重投影相関器を用いることにより、

- 1) 従来の投影光学系では困難であったシステムの集積化を効率良く実現できる、
- 2) 他の結像系に基づいた相関器よりもコンパクトに構成できる、

ことを示した。

第4章では、カーネルサイズの大きな離散相関演算を分割・分散処理して効率的に実行する手法として、カーネル分割処理を提案し、それを効率的に実行する多重離散相関器と多段離散相関器を提案した。多段離散相関器の設計例を示し、大きな画像サイズとカーネルサイズを持つ離散相関演算の処理能力を単純離散相関器と比較して、その有効性を示した。多段離散相関器を導入することにより、

- 1) 光学系でカーネルサイズが制限されていても、仮想的に大きなカーネルを実現できるため、光アレイロジックのプログラミングの自由度が保証される。
- 2) 分散処理によって各々の離散相関器に対する要求を軽減できるため、光演算システムの実現性を高めることができる。

第5章では、バンヤンネットワークを実現する光学系を提案し、実験により原理を確認した。提案した光学系の特長は以下のとおりである。

- 1) 2次元画像データの任意の転送が行えるため、並列光演算モジュール間の接続ネットワークに使用できる。
- 2) 光パワーの損失が少ない。
- 3) 解像点数が多い。
- 4) 信号スキューを原理的に生じない。
- 5) 比較的簡単な構造を持つ。

第6章では、並列光演算システムに必要な光学系を安定かつコンパクトに構成する手法として、反射型ブロック光学系を考案した。具体的な応用例として、マイクロ/マクロハイブリッド光接続とレンズアレイを用いた離散相関器の構成法を示した。結像光学系とホログラフィックフィルタを用いた4f光学系を構成して実験を行った結果を示し、反射型ブロック光学系の有効性を示した。反射型ブロック光学系の特長を以下に示す。

- 1) 一体化により振動に強く安定性が高い。
- 2) 固体媒質で充填されているためゴミなどの侵入がなく、信頼性が高い。
- 3) あおりと軸方向の調節が不用なため、アライメントが簡略化できる。
- 4) 凹面鏡によるレンズ作用は、色収差が生じず、また、回折型のレンズよりも軸外収差が少ないので大きな像面が使える。
- 5) 回折型や屈折率分布型のレンズを用いた集積光学系よりも口径の大きな光学系に適用できるので、空間帯域幅積の向上を図る場合や広域のインターコネクションに用いる場合に有利である。
- 6) 反射光学系を用いるので、系が折り畳まれて全体のサイズが小さい。

モジュール統合型光演算システムの基本的な構成について検討したが、具体的な構成については今後さらに検討する必要がある。これらのモジュールで実現できるのは限定された規則的な接続パターンであるため、これらを有効に活用し、光の接続能力を活かせるようなアルゴリズム、アプリケーションを開発する必要がある。本研究で提案した光接続モジュールが実際に処理でどのように用いられ、どの程度の処理の効率化が可能であるか評価する必要がある。

実際に実用的なシステムを開発するためには、光機能素子の実用化が不可欠である。システムアーキテクチャは使用する素子の特性に合わせて大きく変わるものであるため、独自に決められるものではない。したがって、光機能素子の開発は最重要課題である。一方で、いくら優れた光機能素子が開発されても、それを活かす術がなくては光演算システムは実現しない。したがって、本研究のようなシステム構成法の開発と光機能素子の開発との研究協力を行うことが必要である。本研究で得られた光演算システムを構成手法に関する

る成果の多くは、新しい方式の提案であるため、実用的なものにするためには検討を重ねて多くの問題を解決する必要がある。そのためには、実際にシステムを作製して性能の評価や改良を重さねていき、実用的な光演算システムを実現するための技術を蓄積していくことが重要である。

## 謝辞

本研究は、大阪大学工学部応用物理学科において、一岡芳樹教授の御指導の下に行ったものである。終わりに臨み、終始懇切なる御指導と御助言を賜りました一岡教授に深く感謝の意を表わすと共に厚く御礼申し上げます。

本学工学部樹下行三教授、ならびに本学産業科学研究所豊田順一教授には、本論文作成にあたり御検討頂き、貴重な御助言を頂きました。ここに深く御礼申し上げます。

本学工学部伊東一良助教授には、常に有益な御指導、御指摘を頂きました。心から御礼申し上げます。

本学工学部講師谷田純博士には、研究を遂行するあたり、終始適切な御指導、御助言を頂き、また、本論文を細部にわたり御検討頂きました。ここに深く感謝致します。

本学工学部助手井上卓氏には、日頃から親切な御指導、御指摘を頂きました。深く御礼申し上げます。

大阪工業技術試験所主任研究官谷川英夫氏には、第3章および第5章の実験において多大な御協力を頂きました。厚く御礼申し上げます。

第2章の実験において、セイコー電子工業株式会社より貴重な光機能素子を利用する機会を賜りました。岩城忠雄氏ならびにセイコー電子工業株式会社の皆様に深く御礼申し上げます。

一岡研究室卒業生の福井将樹氏（現日本電信電話株式会社）、岩田昌也博士（現フランス国立航空宇宙研究所、特別研究員）には、有益なる御助言、御指摘を頂きました。各氏に心より感謝致します。

一岡研究室卒業生の柿崎順氏（現株式会社日立製作所）には、在学中に第2章に関する共同研究をして頂き、卒業後も貴重な御助言を頂きました。心から感謝致します。

一岡研究室卒業生の西村康規氏（現日本電気株式会社）、河野努氏（現コニカ株式会社）、ならびに、一岡研究室の小西毅氏、粟辻安浩氏には、第2章の実験において多大なる御協力を頂きました。各氏に心から感謝致します。

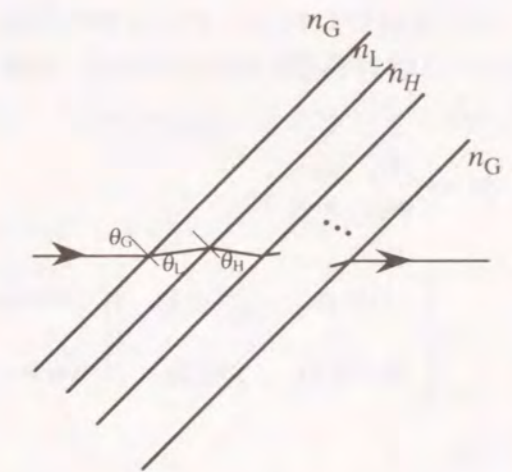
本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、一岡研究室の皆様には終始惜しめない御協力と御援助を頂きました。特に、本論文の作成にあたり、津村徳道氏、的場修氏、平井亜紀子氏、請園信博氏、黒川和範氏、藤井勇作氏には、多大なるご協力を頂きました。皆様に心から感謝致します。

本研究の遂行にあたり、日本育英会より奨学金を、日本学術振興会より研究奨励金を、文部省より科学研究補助金を頂きました。ここに深く感謝致します。

最後に、本研究遂行にあたり、様々な形で御協力、御援助を頂いた研究室内外の皆様に深く感謝致します。

## 付録A 偏光ビームスプリッタにおける反射率・透過率の入射角依存性

キューブ偏光ビームスプリッタは、屈折率の異なる2種類の誘電体層により構成される多層膜を、二つの直角プリズムの間にはさんだ構造をしている[106,109]。各誘電体層の境界面で光がブリュースター角で入射するように多層膜を構成することで、P偏光の反射率を0にすることができる。一方、S偏光は、高反射膜を構成して反射させる。図A.1に示すような偏光ビームスプリッタを考える。高屈折率層の屈折率を $n_H$ 、低屈折率層の屈折率を $n_L$ 、プリズムの屈折率を $n_G$ とし、各層の光の入射角 $\theta_H$ 、 $\theta_L$ 、 $\theta_G$ を図のように定める。スネルの法則より、



図A.1 偏光ビームスプリッタ用多層膜

$$n_H \sin \theta_H = n_L \sin \theta_L = n_G \sin \theta_G \quad , \quad (\text{A.1})$$

が成り立つ。プリズムから第1層への入射角を $45^\circ$ とした時、ブリュースター角の入射条件を満たしていれば、

$$n_G^2 = \frac{2n_H^2 n_L^2}{n_H^2 + n_L^2} \quad , \quad (\text{A.2})$$

が成り立つ[109]。例えば、 $n_H = 2.05$  ( $\text{ZrO}_2$ )、 $n_L = 1.38$  ( $\text{MgF}_2$ )としたとき、 $n_G = 1.619$ が得られる。

具体的な偏光ビームスプリッタの構成として、 $(L/2 \text{ H } L/2)^q$ を考える。これは、誘電体3層膜 $(L/2 \text{ H } L/2)$ を基本周期層として $q$ 層重ねた構造をしている。誘電体膜 $H$ と $L/2$ は、光の波長を $\lambda$ としたとき、高屈折率層と低屈折率層の実効的な膜厚をそれぞれ $\lambda/8$ と $\lambda/4$ に設定することを表す。高屈折率層と低屈折率層の膜厚をそれぞれ $d_H$ 、 $d_L$ とすると、入射角 $\theta_G = 45^\circ$ のときに、

$$n_H d_H \cos \theta_H = \frac{\lambda}{4} \quad , \quad (\text{A.3})$$

$$n_L d_L \cos \theta_L = \frac{\lambda}{8} \quad , \quad (\text{A.4})$$

を満たす必要がある。式(A.1)、(A.3)、(A.4)より、

$$n_H d_H = \frac{\lambda}{4 \cos \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{n_G}{\sqrt{2} n_H} \right) \right\}} \quad , \quad (\text{A.5})$$

$$n_L d_L = \frac{\lambda}{8 \cos \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{n_G}{\sqrt{2} n_L} \right) \right\}}, \quad (\text{A.6})$$

が得られる。

光学薄膜の特性は、2行2列の四端子行列で表わされる[107]。基本周期層となる(L/2H L/2)の3層対称膜の特性行列は、各層の特性行列の積を取ることで次式のように求められる。

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos g_L & \frac{i}{u_L} \sin g_L \\ i u_L \sin g_L & \cos g_L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos g_H & \frac{i}{u_H} \sin g_H \\ i u_H \sin g_H & \cos g_H \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos g_L & \frac{i}{u_L} \sin g_L \\ i u_L \sin g_L & \cos g_L \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

ここで、

$$g_H = \frac{2\pi n_H d_H \cos \theta_H}{\lambda}, \quad (\text{A.8})$$

$$g_L = \frac{2\pi n_L d_L \cos \theta_L}{\lambda}. \quad (\text{A.9})$$

さらに、S偏光に対しては、

$$u_H = n_H \cos \theta_H, \quad (\text{A.10})$$

$$u_L = n_L \cos \theta_L, \quad (\text{A.11})$$

P偏光に対しては、

$$u_H = \frac{n_H}{\cos \theta_H}, \quad (\text{A.12})$$

$$u_L = \frac{n_L}{\cos \theta_L}. \quad (\text{A.13})$$

をそれぞれ用いる。

多層膜(L/2HL/2)<sup>q</sup>の特性行列はMのq乗で求められる。特に、多層膜が対称な構造をしている場合は、等価屈折率N、等価膜厚Dを用いて、

$$[\mathbf{M}]^q = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Theta & \frac{i}{N} \sin \Theta \\ iN \sin \Theta & \cos \Theta \end{pmatrix}, \quad (\text{A.14})$$

$$\Theta = \frac{2\pi ND}{\lambda}, \quad (\text{A.15})$$

と表わすことができる。ここで、基本周期層が対称である場合、等価屈折率N、等価膜厚

Dは、基本周期層の特性行列Mの要素を用いて、

$$N = \sqrt{\frac{m_{21}}{m_{12}}}, \quad (\text{A.16})$$

$$ND = q \frac{\lambda}{2\pi} \cos^{-1} m_{11}, \quad (\text{A.17})$$

で求めることができる。多層膜のエネルギー反射率は、特性行列[M]<sup>q</sup>の各要素とプリズムの屈折率n<sub>G</sub>を用いて次式のように表わされる。

$$\begin{aligned} R &= \frac{(c_{11} + c_{12} u_G) u_G - (c_{21} + c_{22} u_G)}{(c_{11} + c_{12} u_G) u_G + (c_{21} + c_{22} u_G)} \\ &= \frac{\left\{ \frac{1}{2} \left( \frac{N}{u_G} - \frac{u_G}{N} \right) \sin \Theta \right\}^2}{1 + \left\{ \frac{1}{2} \left( \frac{N}{u_G} - \frac{u_G}{N} \right) \sin \Theta \right\}^2}, \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

ここで、S偏光に対しては、

$$u_G = n_G \cos \theta_G, \quad (\text{A.19})$$

P偏光に対しては、

$$u_G = \frac{n_G}{\cos \theta_G}, \quad (\text{A.20})$$

をそれぞれ用いる。

エネルギー透過率Tは、反射率Rを用いて

$$T = 1 - R, \quad (\text{A.21})$$

で求められる。

## 参考文献

- [1] 稲場文男, 編, 光コンピュータ. (オーム社, 東京, 1985).
- [2] D. G. Feitelson, *Optical computing: A survey for computer scientists* (The MIT Press, 1988).
- [3] 石原聡, 光コンピュータ (岩波書店, 東京, 1989).
- [4] A. D. McAulay, *Optical computer architectures* (Wiley-Interscience, New York, 1991).
- [5] 一岡芳樹, “光コンピューティング,” 電気通信 **55**, 54-64 (1992).
- [6] A. Huang, “Architectural considerations involved in the design of an optical digital computer,” *Proc. IEEE* **72**, 780-786 (1984).
- [7] 谷田貝豊彦, 岡田正勝, 谷田純, 一岡芳樹, 久間和生, 光コンピューター読本 (サイエンス社, 東京, 1989).
- [8] 長嶋雲兵, “スーパーコンピュータの応用: 化学分野における応用,” 信学誌 **75**, 133-141 (1992).
- [9] 千田淳, “やらかな情報処理への挑戦,” 日経コンピュータ **4-5**, 38-53 (1993).
- [10] 岩田穆, “新概念の集積システムを求めて,” 信学誌 **75**, 321-325 (1992).
- [11] 林敏男, 阿江忠, 小柳光正, “光インタコネクション,” 信学誌 **75**, 951-961 (1992).
- [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.* **A2**, 1245-1253 (1985).
- [13] K.-H. Brenner, A. Huang and N. Streibl, “Digital optical computing with symbolic substitution,” *Appl. Opt.* **25**, 3054-3060 (1986).
- [14] K.-S. Huang, B. K. Jenkins and A. A. Sawchuk, “Image algebra representation of parallel optical binary arithmetic,” *Appl. Opt.* **28**, 1263-1278 (1989).
- [15] M. Fukui and K. Kitayama, “Image logic algebra and its optical implementations,” *Appl. Opt.* **31**, 581-591 (1992).
- [16] I. Hayashi, “Optoelectronic integration (OEIC): the key to the optical computing,” in *Optical Computing 88*, J. W. Goodman, P. Chavel and G. Roblin, eds., *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **963**, 10-14 (1989).
- [17] 笠原健一, “光演算用機能デバイス,” 光学 **18**, 330-336 (1989).
- [18] J. A. Neff, R. A. Athale and S. H. Lee, “Two-dimensional spatial light modulators: A tutorial,” *Proc. IEEE* **78**, 826-855 (1990).
- [19] D. A. B. Miller, “The quantum well self-electro-optic effect device: Optoelectronic bistability and oscillation, and self-linearized modulation,” *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-21**, 1462-1476 (1985).
- [20] 伊賀健一, “面発光レーザーと面形機能デバイス,” 信学論 **J75-C-I**, 245-256 (1992).
- [21] J. Tanida and Y. Ichioka, “OPALS: Optical parallel array logic system,” *Appl. Opt.* **25**, 1565-1570 (1986).
- [22] K. S. Huang, A. A. Sawchuk, B. K. Jenkins, P. Chavel, J. M. Wang, A. G. Weber, C. H. Wang and I. Glaser, “Implementation of a prototype digital optical cellular image processor (DOCIP),” *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **963**, 687-694 (1988).
- [23] R. G. A. Craig, B. S. Wherrett, A. C. Walker, F. A. P. Tooley and S. D. Smith, “Optical cellular logic image processor: implementation and programming of a single channel digital optical circuit,” *Appl. Opt.* **30**, 2297-2308 (1991).
- [24] F. B. McCormick, F. A. P. Tooley, T. J. Cloonan, J. L. Brubaker, A. L. Lentin, R. L. Morrison, S. J. Hinterlong, M. J. Herron, S. L. Walker and J. M. Sasian, “Experimental investigation of a free-space optical switching network by using symmetric self-electro-optic-effect devices,” *Appl. Opt.* **31**, 5431-5446 (1992).
- [25] J. Tanida, Y. Nishimura and Y. Ichioka, “A design of optical parallel multiprocessor based on optical array logic modular architecture,” in *Optical Computing, 1991*, Technical Digest Series **6**, PdP1-1 (Optical Society of America, Washington, DC, 1991).
- [26] F. B. McCormick, F. A. P. Tooley, J. L. Brubaker, J. M. Sasian, T. J. Cloonan, A. L. Lentin, R. L. Morrison, R. J. Crisci, S. L. Walker, S. J. Hinterlong and M. J. Herron, “Design and tolerance comparisons for S-SEED-based free-space switching fabrics,” *Opt. Eng.* **31**, 2697-2711 (1992).

- [27] K. Iga, M. Oikawa, S. Misawa, J. Banno and Y. Kokubun, “Staked planar optics: an application of the planar microlens,” *Appl. Opt.* **21**, 3456-3460 (1982).
- [28] K. Hamanaka, “Optical bus interconnection system by using selfoc lenses and planar microlens arrays,” in *Optical Computing, 1991*, Technical Digest Series **6**, 32-35 (Optical Society of America, Washington, DC, 1991).
- [29] J. Jahns and A. Huang, “Planar integration of free-space optical components,” *Appl. Opt.* **28**, 1602-1605 (1989).
- [30] K. Rastani, M. Orenstein, E. Kapon and A. C. V. Lehmen, “Integration of planar Fresnel microlenses with vertical-cavity surface-emitting laser arrays,” *Opt. Lett.* **16**, 919-921 (1991).
- [31] 河合滋, 荒木壮一郎, 笠原健一, 窪田恵一, “光学素子とVSTEPを一体化した光インターコネクションモジュール,” 信学技報 **OCS92**, 1-8 (1992).
- [32] H. J. Caulfield, “Solid Optics: The application of precision manufacturing to small, complex optical systems,” in *Structural Mechanics of Optical Systems II*, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **748**, 60-62 (1987).
- [33] M. Temmen and C. Hester, “Solid Optical Correlators,” in *Digital Optical Computing II*, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1215**, 422-431 (1990).
- [34] 福井将樹, 谷田純, 北山研一, 一岡芳樹, “光並列演算における離散デジタル相関,” 光学 **22**, 137-141 (1993).
- [35] J. N. Mait and K.-H. Brenner, “Optical symbolic substitution: system design using phase-only holograms,” *Appl. Opt.* **27**, 1692-1700 (1988).
- [36] J. Tanida and Y. Ichioka, “Optical logic array processor using shadowgrams,” *J. Opt. Soc. Am.* **73**, 800-809 (1983).
- [37] J. Tanida, J. Nakagawa, E. Yagyu, M. Fukui and Y. Ichioka, “Experimental verification of parallel processing on a hybrid optical parallel array logic system,” *Appl. Opt.* **29**, 2510-2521 (1990).
- [38] J. Tanida and Y. Ichioka, “Discrete correlators using multiple imaging for digital optical computing,” *Opt. Lett.* **16**, 599-601 (1991).
- [39] S. Kakizaki, D. Miyazaki, E. Yoshikawa, J. Tanida and Y. Ichioka, “Hybrid optical array logic system,” in *Optics for Computers: Architectures and Technologies*, eds., *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1505**, 199-205 (1991).
- [40] A. A. Sawchuk and T. C. Strand, “Digital optical computing,” *Proc. IEEE* **72**, 758-779 (1984).
- [41] J. Tanida, M. Fukui and Y. Ichioka, “Programming of optical array logic 2: Numerical data processing based on pattern logic,” *Appl. Opt.* **27**, 2931-2939 (1988).
- [42] J. Tanida and Y. Ichioka, “Programming of optical array logic 1: Image data processing,” *Appl. Opt.* **27**, 2926-2930 (1988).
- [43] M. Fukui, J. Tanida and Y. Ichioka, “Flexible-structured computation based on optical array logic,” *Appl. Opt.* **29**, 1604-1609 (1990).
- [44] M. Iwata, J. Tanida and Y. Ichioka, “Inference engine using optical array logic,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **19**, L1259-L1261 (1990).
- [45] 岩田昌也, 谷田純, 一岡芳樹, “光アレイロジックを用いたソーティングの検討,” 第22回画像工学コンファレンス論文集, 215-218 (1991).
- [46] M. Iwata, J. Tanida and Y. Ichioka, “Inference engine for expert system by using optical array logic,” *Appl. Opt.* **31**, 5604-5613 (1992).
- [47] S. Kakizaki, J. Tanida and Y. Ichioka, “Gray-image processing using optical array logic,” *Appl. Opt.* **31**, 1093-1102 (1992).
- [48] 岩田昌也, “光アレイロジックを用いた並列演算法に関する研究,” 大阪大学工学部 博士論文 (1992).
- [49] 岩田昌也, 谷田純, 一岡芳樹, “光アレイロジックによるデータベース処理,” 並列処理シンポジウム *JSP'92*, 論文集, 383-390 (1992).
- [50] M. Iwata, J. Tanida and Y. Ichioka, “Database management using optical array logic,” *Appl. Opt.* **32**, 1987-1995 (1993).
- [51] Y. Ichioka and J. Tanida, “Optical parallel logic gates using a shadow-casting system for optical digital computing,” *Proc. IEEE* **72**, 787-801 (1984).

- [52] J. Tanida and Y. Ichioka, "Modular components for an optical array logic system," *Appl. Opt.* **26**, 3954-3960 (1987).
- [53] K.-H. Brenner, "3D-integration of digital optical system," in *Optical Computing, 1991*, Technical Digest Series **6**, 25-28 (Optical Society of America, Washington, DC, 1991).
- [54] S. Kufner, M. Kufner, M. Frank, A. Müller and K. Brenner, "3D integration of refractive microoptical components by deep proton irradiation," *Pure Appl. Opt.* **2**, 111-124 (1993).
- [55] B. K. Jenkins, P. Chavel, R. Forchheimer, A. A. Sawchuk and T. C. Strand, "Architectural implications of a digital optical computer," *Appl. Opt.* **23**, 3465 (1984).
- [56] K. Hwang and D. K. Panda, "High-radix symbolic substitution and superposition techniques for optical matrix algebraic computations," *Opt. Eng.* **31**, 2422-2433 (1992).
- [57] G. E. Lohman and K.-H. Brenner, "Space-variance in optical computing systems," *Optik* **89**, 123-134 (1992).
- [58] W. J. Smith, *Modern optical engineering* (McGraw-Hill, 1966).
- [59] P. Horan, A. Jennings, B. Kelly and J. Hegarty, "Optical implementation of a second-order translation-invariant network algorithm," *Appl. Opt.* **32**, 1311-1321 (1993).
- [60] A. W. Lohmann, "What classical optics can do for the digital optical computer," *Appl. Opt.* **25**, 1543-1549 (1986).
- [61] 谷田純, 宮崎大介, 岩田昌也, 一岡芳樹, "モジュラー型光アレイロジックアーキテクチャ," 光学連合シンポジウム, 予稿集 162-164 (応用物理学会分科会 日本光学会, 1992).
- [62] S. Fukushima and T. Kurokawa, "Direct image transmission through a multi-mode fiber using an optically addressed spatial light modulator," in *Optical Computing '92*, A. M. Goncharenko, F. V. Karpushko, G. V. Sinitsyn and S. P. Apanasevich, eds., *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1806**, 243-249 (1992).
- [63] L. N. Bhuyan, Q. Yang and D. P. Agrawal, "Performance of multiprocessor interconnection networks," *Computer* **22**, 25-37 (1989).
- [64] M. Fukui and K. Kitayama, "Design considerations of the optical image crossbar switch," *Appl. Opt.* **31**, 5542-5547 (1992).
- [65] A. W. Lohmann, "Optical bus network," *Optik* **74**, 30-35 (1986).
- [66] J. Jahns, "Optical implementation of the banyan network," *Opt. Commun.* **76**, 321-324 (1990).
- [67] F. B. McCormick and M. E. Prise, "Optical circuitry for free-space interconnections," *Appl. Opt.* **29**, 2013-2018 (1990).
- [68] A. W. Lohmann, W. Storke and G. Stucke, "Optical perfect shuffle," *Appl. Opt.* **25**, 1530 (1986).
- [69] G. Eichmann and Y. Li, "Compact optical generalized perfect shuffle," *Appl. Opt.* **26**, 1167-1169 (1987).
- [70] K.-H. Brenner and A. Huang, "Optical implementation of the perfect shuffle interconnection," *Appl. Opt.* **27**, 135-137 (1988).
- [71] M. W. Haney and J. J. Levy, "Optically efficient free-space folded perfect shuffle network," *Appl. Opt.* **30**, 2833 (1991).
- [72] V. B. Fyodorov, "Optoelectronic multistage interconnection network for 2-D information image," in *Optical Computing '92*, A. M. Goncharenko, F. V. Karpushko, G. V. Sinitsyn and S. P. Apanasevich, eds., *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1806**, 666-677 (1993).
- [73] V. B. Fyodorov, "Crossbar switch for 2-D optical information channels," in *Optical Computing '92*, A. M. Goncharenko, F. V. Karpushko, G. V. Sinitsyn and S. P. Apanasevich, eds., *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1806**, 417-426 (1993).
- [74] K. H. Fielding, J. L. Horner and C. K. Makekau, "Modified two-focal-length optical correlator," *Appl. Opt.* **29**, 4332-4333 (1990).
- [75] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier optics* (McGraw-Hill, New York, 1986).
- [76] S. Yamamoto, R. Sekura, J. Yamanaka, T. Ebihara, N. Kato and H. Hoshi, "Optical pattern recognition with LAPS-SLM (1)/Light addressed photoconductor and smectic C\* liquid crystal spatial light modulator," in *Computer and Optically Formed Holographic Optics*, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1211**, 273-283 (1990).

- [77] 佐藤達男, 電子計算機 (オーム社, 東京, 1980).
- [78] 間瀬茂, 上田修功, "モルフォロジーと画像解析(I)," *信学誌* **74**, 168-174 (1991).
- [79] A. Yariv, 光エレクトロニクスの基礎 (丸善, 東京, 1988).
- [80] E. G. Paek, A. V. Lehmen, J. R. Wullert II and R. Martin, "Compact and robust incoherent holographic correlator using a surface-emitting laser-diode array," *Opt. Lett.* **16**, 937-939 (1991).
- [81] K. Hamanaka, H. Nemoto, M. Oikawa, E. Okuda and T. Kishimoto, "Multiple imaging and multiple Fourier transformation using planar microlens arrays," *Appl. Opt.* **29**, 4064-4070 (1990).
- [82] T.-Y. Hsu, U. Efron, W.-Y. Wu, J. N. Schulman, I. J. D'Haenens and Y.-C. Chang, "Multiple quantum well spatial light modulator for optical processing applications," *Opt. Eng.* **27**, 372-384 (1988).
- [83] D. A. Jared and K. M. Johnson, "Optically addressed thresholding very-large-scale-integration/liquid-crystal spatial light modulators," *Opt. Lett.* **16**, 967-969 (1991).
- [84] A. W. Lohmann, *Optical Information Processing* (Lohmann, Erlangen, Federal Republic of Germany, 1979).
- [85] 及川正尋, 今西秀樹, 西沢紘一, "シリンドリカル平板マイクロレンズアレイ," 第53回応用物理学会学術講演会秋季, 919 (応用物理学会, 1992).
- [86] T. Shiono, K. Setsune, O. Yamazaki and K. Wasa, "Rectangular-apertured micro-Fresnel lens arrays fabricated by electron-beam lithography," *Appl. Opt.* **26**, 587-591 (1987).
- [87] 岩田昌也, 谷田純, 一岡芳樹, "並列デジタル光演算システム用2次元仮想記憶機構," *光学* **22**, 203-209 (1993).
- [88] R. Thalmann, G. Pedrini and K. J. Weible, "Optical symbolic substitution using diffraction gratings," *Appl. Opt.* **29**, 2126-2134 (1990).
- [89] A. Kirk, T. Tabata and M. Ishikawa, "Cellular processing with diffractive optical elements," in *Optical Computing, 1993*, Technical Digest **7**, 284-287 (Optical Society of America, Washington, DC, 1993).
- [90] J. Jahns and M. Murdocca, "Crossover networks and their optical implementation," *Appl. Opt.* **27**, 3155-3160 (1988).
- [91] 松本隆男, 野口一博, 古賀正文, "光を用いた新しい信号処理技術と多次元光回路," *信学論 J75-C-1*, 223-234 (1992).
- [92] 山本毅, 伊藤裕康, 中神隆清, "偏光制御型多チャンネルスイッチ," *信学論 J75-C-1*, 379-386 (1992).
- [93] T. J. Cloonan and M. J. Herron, "Optical implementation and performance of one-dimensional and two-dimensional trimmed inverse augmented data manipulator networks for multiprocessor computer systems," *Opt. Eng.* **28**, 305-314 (1989).
- [94] N. A. Clark and S. T. Lagerwall, "Submicrosecond bistable electro-optic switching in liquid crystals," *Appl. Phys. Lett.* **36**, 899-901 (1980).
- [95] 天野主税, 松尾慎治, 黒川隆志, "面形光スイッチ (EARS) の素子動作特性," *信学論 J75-C-1*, 349-355 (1992).
- [96] F. E. Kiamilev, P. Marchand, A. V. Krishnamoorthy, S. C. Esener and S. H. Lee, "Performance comparison between optoelectronic and VLSI multistage interconnection network," *J. Lightwave Technol.* **9**, 1674-1692 (1991).
- [97] M. Murdocca and T. J. Cloonan, "Optical design of a digital switch," *Appl. Opt.* **28**, 2505-2517 (1989).
- [98] T. Shiono and H. Ogawa, "Diffraction-limited blazed reflection diffractive microlenses for oblique incidence fabricated by electron-beam lithography," *Appl. Opt.* **30**, 3643 (1991).
- [99] A. W. Lohmann, "Scaling Laws for lens systems," *Appl. Opt.* **28**, 4996-4998 (1989).
- [100] M. R. Feldman, S. C. Esener, C. C. Guest and S. H. Lee, "Comparison between optical and electrical interconnects based on power and speed considerations," *Appl. Opt.* **27**, 1742-1751 (1988).
- [101] H. J. Caulfield, H.-I. Jeon, J. Brown and P. Werbos, "Variable and fixed rank-1  $N^4$  interconnections," *Appl. Opt.* **29**, 2019-2023 (1990).
- [102] 西脇青児, "グレーティングレンズの収差解析," *光学* **19**, 310-318 (1990).
- [103] 辻内順平, 光学概論I (朝倉書店, 東京, 1979).

- [104] A. W. Lohmann, "Image formation of dilute arrays for optical information processing," *Opt. Commun.* **86**, 365-370 (1991).
- [105] M. J. Goodwin, A. J. Moseley, M. Q. Kearley, R. C. Morris, C. J. G. Kirkby, J. Thompson, R. C. Goodfellow and I. Bennion, "Optoelectronic component arrays for optical interconnection of circuits and subsystems," *J. Lightwave Technol.* **9**, 1639-1645 (1991).
- [106] R. P. Netterfield, "Practical thin-film polarizing beam-splitters," *Optica Acta* **24**, 69-79 (1977).
- [107] 藤原史郎, 編, 光学薄膜. (共立出版, 東京, 1986).
- [108] J. Mouchart, J. Begele and E. Duda, "Modified MacNeille cube polarizer for a wide angle field," *Appl. Opt.* **28**, 2847-2853 (1989).
- [109] M. Banning, "Practical methods of making and using multilayer filters," *J. Opt. Soc. Am.* **37**, 792-797 (1947).

## 著者発表論文

## 学術論文誌

- [110] D. Miyazaki, J. Tanida, and Y. Ichioka, "Construction of modularized OPALS using optoelectronic devices," *Jpn. J. Appl. Phys.* **29**, L1550-L1552 (1990).
- [111] D. Miyazaki, J. Tanida, and Y. Ichioka, "Reflective correlator for optoelectronic integration of hybrid optical parallel array logic system," *Optik* **89**, 101-106 (1992).
- [112] 宮崎大介, 柿崎順, 谷田純, 一岡芳樹, "光・電子複合型並列光アレイロジックシステム: H-OPALS構成用集積型相関器," *信学論* **J75-C-1**, 296-304 (1992).
- [113] D. Miyazaki, J. Tanida, and Y. Ichioka, "Optical implementation of the banyan network using a Sagnac inverter with a patterned mirror," *Opt. Commun.* **93**, 283-288 (1992).
- [114] D. Miyazaki, S. Kakizaki, T. Konishi, J. Tanida, and Y. Ichioka, "Iterative processing on hybrid optical parallel array logic system with selectable coherent correlator," *Appl. Opt.* **32**, 3053-3058 (1993).
- [115] D. Miyazaki, J. Tanida, and Y. Ichioka, "Reflective block optics for packaging of optical computing systems," *Appl. Opt.*(submitted).

## 会議・研究会抄録等

- [116] D. Miyazaki, J. Tanida, and Y. Ichioka, "Construction of modularized OPALS using optoelectronic devices," in *Optical Computing 92*, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. **1359**, 59-60 (1990).
- [117] S. Kakizaki, D. Miyazaki, E. Yoshikawa, J. Tanida and Y. Ichioka, "Hybrid optical array logic system," in *Optics for Computers: Architectures and Technologies*, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. **1505**, 199-205 (1991).
- [118] J. Tanida, D. Miyazaki, and Y. Ichioka, "H-OPALS: Hybrid optical parallel array logic system," in *Optical Computing 92*, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. **1806**, 568-574 (1993)
- [119] 宮崎大介, 谷田純, 一岡芳樹, "反射型ブロック光学系," *信学技報* **OCS92-46**, 31-35 (1992).
- [120] 宮崎大介, 谷田純, 一岡芳樹, "並列光演算システム構成用反射型ブロック光学系," 第23回画像工学コンファレンス論文集, 313-316 (1992).
- [121] D. Miyazaki, J. Tanida, and Y. Ichioka, "Reflective block optics for optical computing systems," *Optical Computing Technical Digest, 1993*, **7**, 30-33(Optical Society of America, Washington, D.C., 1993).

