

静岡大学 博士論文

空間光変調器の開発と
並列光情報処理への応用
に関する研究

2004年7月

向坂 直久

概要

光が原理的に持つ、高速伝播性・並列性・非干渉性・広帯域等の特徴を利用できる点で、光を媒体とした情報処理は有望である。とりわけ、光の高い並列性を生かした並列光情報処理の研究が盛んに行われている。なかでも、従来の逐次処理型コンピュータの延長線上の技術では困難とされる、空間的に高密度な並列処理機構の実現可能性に期待が集まっている。並列光情報処理を支えるキーデバイスは空間光変調器であり、一般的に2次元の光の位相・偏波面・振幅あるいは強度の分布を、他の2次元の光情報又は電気信号によって変調するものである。空間光変調器については様々な提案がなされ、その実用化に向けて精力的な研究開発が行われているが、デバイス性能がシステム側の要求とマッチせず、有効な応用研究が進んでいないのが現状である。この状況を打破するためには、現状のデバイス特性を十分に理解・把握し、その特性を有効に使う事が重要である。すなわち、現状のデバイス性能を有効利用した応用研究を進めると共に、そこでの問題点等の結果をデバイス開発にフィードバックし、さらに高性能な空間光変調器を開発するといった、応用研究とデバイス開発の密な連携が必要不可欠である。

本研究では、このような状況を踏まえ、我々のグループにおいて開発された空間光変調器（空間光変調管・液晶空間光変調管・強誘電性液晶空間光変調器・並行配向ネマティック液晶空間光変調器）について、並列光情報処理に応用する上で重要な特性について検討を加えながら、その特性を有効活用して具体的な応用システムへの展開を試みると共に、デバイスの改良を進めた。

空間光変調管（MSLM）は電子管の構造を持ち、入力感度が高く、多くの内部演算が可能な特徴を備え、様々な並列光情報処理の研究に利用されてきた。本研究では、MSLMにおける光損傷及びフォトリフレクティブ効果による最大読み出し光量の制限打破、相反する動作速度と解像度の克服のために、光変調材料を非線形光学無機結晶（ LiNbO_3 ）から液晶に置き換えた液晶空間光変調管（LC-MSLM）を開発した。また、並列光論理演算システム及び、内部演算機能を最大限に利用した2次元ロックインアンプの応用、さらに、大規模並列処理が基本とされる脳を模倣した学習型情報処理機構のひとつである、光ニューロコンピューティングへの応用を検討し、その有効性を示した。

MSLMの特徴を生かして様々な応用研究がなされ、大きな成果を得てきたが、実際の応用を考えると、動作速度・動作電圧・解像度・サイズ等の点が問題となる。そこで実際の応用に使えるデバイスを目指して、光変調材料に強誘電性液晶とネマティック液晶を用いた液晶空間光変調器を開発した。強誘電性液晶空間光変調器（FLC-SLM）は高速動作と2値メモリー機能の特徴を備え、より高度な並列光情報処理への応用の可能性を持つ。その特徴を有効に利用して、スペックルパターン相関演算法による実時間速度計測システムの構築を試みた。本システムではFLC-SLMの2値メモリー機能により物体からのスペックルパターンを一定時間間隔で2度の多重露光を行い、JTC型相関演算によって一定時間間隔内の移動量を定量化する。その結果、

対象物の移動速度をリアルタイムに計測することに成功した。

平行配向ネマティック液晶空間光変調器 (PAL-SLM) は、液晶を平行に配向することにより強度変調を伴わない純粋な位相変調を得ることが可能なデバイスである。その特徴を生かした JTC 型光相関システムへの応用を検討した。さらに、その際に重要なポイントとなる回折効率について詳細な解析を行い、理論限界に近い回折効率を得られることを明らかにした。また、実応用においては電子システムとの親和性が必要不可欠であることから、光書き込み型の PAL-SLM を、電気信号で書き込めるように改良したデバイスを開発した。このデバイスについて、PAL-SLM と同様の特性解析及び検討を行った結果、電気書き込み時においても十分な位相変調を行うことが可能で、理論限界に近い回折効率を得られることがわかった。さらに、電気書き込み時における走査型制御の変調特性への影響を確認するために、1KHz の高速フレームレートで撮像可能な CMOS イメージセンサを用いて、2 次元的な時間応答特性を評価した。その結果、電気書き込み時においても、光書き込み時と同等の 2 次元時間応答特性が得られていることを確認した。

以上のように、並列光情報処理において重要な要素技術である空間光変調器について詳細な特性評価を行い、具体的な応用システムへの展開を試み、その有効性を示した。また、それらの結果を元にデバイスの改良も進めた。本研究で得られた成果は、これからの応用研究において有用であるものと確信する。これらの結果を踏まえた並列光情報処理システムの更なる展開を期待するものである。

目次

第 1 章 序論	7
1.1. 研究の背景	7
1.2. 本研究の目的と概要.....	8
1.3. 本論文の構成.....	9
1.4. 第 1 章の参考文献.....	11
第 2 章 空間光変調器の開発	14
2.1. まえがき	14
2.2. 空間光変調管 : MSLM.....	15
2.2.1. MSLM の構造.....	15
2.2.2. MSLM の動作原理.....	16
2.2.3. MSLM の特性.....	20
2.3. 液晶空間光変調管 : LC-MSLM	23
2.3.1. LC-MSLM の構造	23
2.3.2. LC-MSLM の動作原理	24
2.3.3. LC-MSLM の特性	25
2.3.4. LC-MSLM における課題	27
2.4. 強誘電性液晶空間光変調器 : FLC-SLM.....	28
2.4.1. FLC-SLM の構造.....	28
2.4.2. FLC-SLM の動作原理.....	29
2.4.3. FLC-SLM の特性.....	30
2.5. 並行配向ネマティック液晶空間光変調器 : PAL-SLM	34
2.5.1. PAL-SLM の構造.....	34
2.5.2. PAL-SLM の動作原理.....	34
2.5.3. PAL-SLM の特性.....	36
2.6. あとがき	40
2.7. 第 2 章の参考文献.....	41
第 3 章 液晶空間光変調器に関する詳細な検討	43
3.1. まえがき	43
3.2. PAL-SLM による位相変調特性.....	44
3.2.1. はじめに.....	44
3.2.2. PAL-SLM の構造及び動作原理	44
3.2.3. PAL-SLM の位相変調特性.....	44
3.2.4. PAL-SLM の回折効率.....	46

3.2.5.	PAL-SLMにおける回折効率の解析	49
3.3.	LCD 結合型 PAL-SLM による位相変調特性	54
3.3.1.	はじめに	54
3.3.2.	LCD 結合型 PAL-SLM の構成	54
3.3.3.	LCD 結合型 PAL-SLM の位相変調特性	55
3.3.4.	2 値位相回折格子による回折効率の解析	57
3.3.5.	多値位相回折格子による回折効率の解析	60
3.4.	液晶空間光変調器の 2 次元時間応答特性の評価	62
3.4.1.	はじめに	62
3.4.2.	2 次元時間応答測定システム	62
3.4.3.	LCD における 2 次元時間応答特性の評価	65
3.4.4.	PAL-SLM における 2 次元時間応答特性の評価	67
3.4.5.	LCD 結合型 PAL-SLM における 2 次元時間応答特性の評価	69
3.5.	あとがき	72
3.6.	第 3 章の参考文献	73
第 4 章	MSLM の並列光情報処理システムへの応用	75
4.1.	まえがき	75
4.2.	偏光符号化法を用いた並列光論理演算	76
4.2.1.	はじめに	76
4.2.2.	偏光符号化法の原理	76
4.2.3.	システム構成	77
4.2.4.	実験結果及び考察	79
4.3.	MSLM における 2 次元ロックイン機能の応用	81
4.3.1.	はじめに	81
4.3.2.	光波コヒーレンス関数の合成による光情報処理	81
4.3.3.	MSLM による 2 次元ロックイン動作の応用	83
4.3.4.	実験結果及び考察	83
4.4.	あとがき	85
4.5.	第 4 章の参考文献	86
第 5 章	MSLM を用いた光ニューロコンピューティング	89
5.1.	まえがき	89
5.2.	連想記憶モデル	90
5.2.1.	基本モデル	90
5.2.2.	アソシアトロンの演算構造と相関学習	91
5.2.3.	光アソシアトロンの演算構造と直交学習	91

5.3.	光アソシアトロンシステムのシステムアーキテクチャ	93
5.3.1.	空間光変調管 (MSLM)	93
5.3.2.	空間コーディング法	95
5.3.3.	MSLM と光学系のみによる構成	97
5.3.4.	実験システム	98
5.4.	実験結果及び考察	100
5.4.1.	基礎実験結果	100
5.4.2.	想起実験結果	101
5.4.3.	学習過程における記憶行列の収束結果	105
5.4.4.	学習過程の振る舞い	107
5.4.5.	学習後の想起結果	108
5.4.6.	出力関数の振る舞い	108
5.4.7.	学習ゲイン可変の学習方式	110
5.5.	あとがき	111
5.6.	第 5 章の参考文献	112
第 6 章	液晶空間光変調器の光相関システムへの応用	113
6.1.	まえがき	113
6.2.	FLC-SLM を用いたスペックル相関演算法による実時間速度計	114
6.2.1.	はじめに	114
6.2.2.	実時間速度計の動作原理	114
6.2.3.	実時間速度計のシステム構成	116
6.2.4.	露光間隔の適応的制御方法	118
6.2.5.	実験結果及び考察	119
6.3.	PAL-SLM を用いた光相関システム	122
6.3.1.	はじめに	122
6.3.2.	JTC 型光相関実験システム	122
6.3.3.	入力光強度の相関強度への影響	124
6.3.4.	パターンの空間周波数特徴の相関強度への影響	125
6.4.	あとがき	126
6.5.	第 6 章の参考文献	127
第 7 章	結論	129
	謝辞	131
	本研究に関する論文リスト	132

用語集

SLM (Spatial Light Modulator)

空間光変調器。2次元の光をスイッチング制御する並列(2次元)三端子素子。電子回路ではトランジスタに相当する基本的なデバイス。

MSLM (Microchannel Spatial Light Modulator)

マイクロチャンネル空間光変調管。MCP(下記参照)を用いた、電子管構造の空間光変調器。光電面で発生した電子をMCPで増倍し、ニオブ酸リチウム(LiNbO₃:LN)無機結晶上に電荷として蓄積させる。その電荷に応じた電界が結晶内に生成され、LNの電気光学効果により2次的に光を変調する。

LC-MSLM (Liquid Crystal - Microchannel Spatial Light Modulator)

液晶マイクロチャンネル空間光変調管。MSLMの欠点を改良すべく開発された、MSLMでの変調材料であるニオブ酸リチウム無機結晶の代わりにネマティック液晶を変調材料とした空間光変調器。

FLC-SLM (Ferro-electric Liquid Crystal - Spatial Light Modulator)

a-Si:H(下記参照)をアドレス材料とし、表面安定化強誘電性液晶(SSFLC)を変調材料とした空間光変調器。a-Si:Hの光導電効果でFLCに掛かる電圧を制御することにより、2次的に光を変調する。

PAL-SLM (Parallel Aligned Nematic Liquid Crystal - Spatial Light Modulator)

FLC-SLMの変調材料であるFLCの代わりに、並行配向させたネマティック液晶を変調材料とした空間光変調器。平行に配向させることにより、光の位相のみを変調することが可能。

MCP (Micro Channel Plate)

マイクロチャンネルプレート。無数に穴のあいたガラス板構造のデバイスで、両側に高電圧を印加することにより、入射した電子を2次的に増倍する機能を持つ。

a-Si:H

水素化アモルファスシリコン。水素化することにより暗抵抗を高くした光導電性材料。

第1章 序論

1.1. 研究の背景

光は原理的に、高速伝播性、非干渉性、並列性、広帯域等の多くの特徴を備えており、我々の身近でもこれらの恩恵にあずかっている。例えば、光速で伝播することから遅延の少ない高速な伝送が期待でき、周波数が高いことにより広帯域の伝送が可能となる等の特徴を生かして、通信の分野では光ファイバやレーザーダイオードの技術進歩に伴い、高速大容量光通信として大きく成長している。さらに、光の直交性を利用して同一の光ファイバに異なる波長の光を同時に伝送する波長多重技術なども開発され実用化されつつある。現在、光産業と呼ばれている分野は主にこれら光通信のことを指していると考えられる。

しかしながら、光はその他にも空間並列性といった大きな特徴を持っており、通信分野においてもその光の高い並列性を生かすための技術開発、さらには、光を媒体として並列処理を高速に行おうとする並列光情報処理の研究も盛んに行われている¹⁾⁻¹⁰⁾。なかでも、従来の逐次処理型コンピュータの延長線上の技術では難しいとされている空間的に高密度な並列処理機構の実現可能性に期待が集まっている。さらに近年では、光の性質そのものに着目し、光の位相を制御して、これまで位相歪により見えなかったものを見ようとする、補償光学の取り組みも盛んになってきている^{11), 12)}。

このような並列光情報処理を支えるキーデバイスは空間光変調器 (Spatial Light Modulator : SLM) である^{13), 14)}。SLM はアドレス部と光変調部とから構成され、書き込み情報により光変調部の光学的特性を変化させ、その変化に応じて読み出し光が変調され、書き込み情報を反映した光出力を得る並列3端子デバイスである。つまり、光の位相・偏波面・振幅・強度・伝搬方向の分布等を、書き込んだ情報により変調させるデバイスである。電子産業では、真空管・トランジスタ・IC・LSI・VLSI といったデバイスがそれにあたり、その劇的な開発ペースに支えられて大きな発展を遂げることができた。光産業においても、デバイスの進展無くしては今後の発展は望めないと考えられる。このような状況の中、並列光情報処理のキーデバイスとなる SLM について様々な提案がなされ、その実用化に向けて精力的な研究開発が行われている¹⁵⁾⁻¹⁹⁾。

1970年代に主な SLM として、電気光学結晶である DKDP を光変調材料とし、アドレス材料として光導電体である a-Se を使用した Photo-Titus^{20)- 22)}、液晶を変調材料とし、光導電体である CdS をアドレス材料とした LCLV^{15), 23)}、光導電効果と電気光学効果を併せ持った BSO を用いた PROM^{24), 25)}等が開発された。Photo-Titus は適当な解像度 (15 lp/mm)、感度 (10 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$) 及び蓄積特性 (1 時間) を持ち、デバイス内で加減算・輪郭強調などの演算ができるが、 -50°C に冷却する必要があることから使用するのに困難なデバイスであった。PROM は適当な解像度 (15 lp/mm) と感度 (5 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$) で、外部印加電圧の制御により、加減算・コントラスト反転・

輪郭強調などの演算機能を有したが、書き込みには短波長の光（緑色光から紫外光）が必要で、読み出しには光導電効果が小さい赤色光を用いなければならず、デバイスを光フィードバックやカスケードで使用することは困難であった。LCLV は、入力感度 ($2 \mu\text{J}/\text{cm}^2$)・解像度 (30 lp/mm) 共に良好なデバイスであり、低電圧で動作することから優れたデバイスであったが、液晶層の構造がツイストネマティック構造であるために、位相変調のみを行うことが不可能であった。以上のように、これまでに開発されてきた空間光変調器は、実際にそれらを使う側にとっては様々な問題点を抱えていた。

つまり、デバイスの性能がシステムサイドの要求とマッチせず、空間光変調器を駆使した光情報処理における有効な応用開発が進んでいないのが現状である。この現状を打破し、電子産業の発展と同じような並列光情報処理の進展を目指すためには、現状のデバイスの性能をフルに発揮した応用研究を進めると共に、その結果をデバイスの開発にフィードバックして問題点を解決しつつ、さらに有効な空間光変調器を開発していくことが重要である。そのためには、デバイスの持つ特性を十分に理解・把握し、その特性を生かしきる使い方が重要なポイントとなる。その過程で明らかとなった課題について十分な検討を行い、応用研究との密な連携を図っていくことも必要不可欠と考えられる。

そこで我々は、冷却が不要で、書き込み光と読み出し光を一致させることが可能であり、なおかつ、ユニークな内部演算機能を有する空間光変調素子である MSLM を開発した。また、MSLM の高電圧駆動・解像度・応答速度などの問題点を解決し、位相変調のみを行える液晶空間光変調器を開発してきた。筆者は、これらのデバイスを用いた応用研究を手掛けると共に、デバイスの特性の評価を行いながら、デバイスの改良及び新規デバイスの開発に携わってきた。

1.2. 本研究の目的と概要

本研究では、光の高い並列性を積極的に利用した並列光情報処理へのアプローチに対して、並列光情報処理を構成するキーデバイスの側からその特性の評価及び有効な利用方法などを検討し、その結果をフィードバックする形でデバイスの改良を行った。さらに、その結果を踏まえて具体的な応用についての展開を試み、SLM の並列光情報処理への応用に対して一つの道筋を示すことを目的とした。

並列光情報処理を構成する主なキーデバイスである SLM は、一般的に 2 次元の光の位相・偏波面・振幅あるいは強度の分布を、他の 2 次元の光情報又は電気信号によって変調するものである。ここでは、我々のグループにおいて開発された SLM について、並列光情報処理に応用する上で重要な特性について評価を行い、その特性を生かす形でそれぞれの具体的な応用システムへの展開を試みた。

空間光変調管 (Microchannel Spatial Light Modulator : MSLM) は電子管の構造を持ち、入力感度が高く、多くの内部演算が可能な特徴を備えた SLM であり、並列光論理演算システムなど様々な並列光情報処理の研究に利用されてきた。本研究では、MSLM の変調部における光損

傷やフォトリフラクティブ効果による最大読み出し光量の制限の打破、相反する動作速度と解像度の問題を克服するために、光変調材料を無機電気光学結晶 (LiNbO_3) から液晶に置き換えた液晶空間光変調管 (Liquid Crystal Microchannel Spatial Light Modulator : LC-MSLM) の開発を試みた²⁶⁾。また、並列光情報処理の代表的な応用システムとも言える並列光論理演算システム^{27) -29)}及び、MSLM の持つ内部演算機能を最大限に利用した 2 次元ロックインアンプの応用³⁰⁾ について議論した。さらに、大規模並列処理が基本とされる脳を模倣した学習型情報処理機構のひとつである、光ニューロコンピューティングへの応用を検討した³¹⁾⁻³³⁾。

MSLM に対して、高解像度・高速性と小型・低電圧駆動を実現し、更なる応用研究の展開を果たすべく、a-Si:H 光導電体をアドレス材料に、液晶を光変調材料に用いた液晶空間光変調器を 2 種類開発した。強誘電性液晶空間光変調器 (Ferroelectric Liquid Crystal Spatial Light Modulator : FLC-SLM) は高速動作と 2 値メモリー機能の特徴を備え、より高度な並列光情報処理への応用の可能性を持っている。本研究ではそれらの特徴を有効に利用して、スペックルパターン相関演算法による実時間速度計測システムの構築を試みた³⁴⁾。さらに、液晶を平行に配向することにより強度変調を伴わない純粋な位相変調を行うことが可能な、平行配向ネマティック液晶空間光変調器 (Parallel-aligned nematic Liquid crystal Spatial Light Modulator : PAL-SLM) を開発し、その特徴を生かした JTC (Joint Transform Correlation : 結合変換相関) 型光相関システムへの応用を検討した³⁵⁾⁻³⁷⁾。FLC-SLM に対して動作速度面では劣るものの、デバイス構成と動作条件の最適化による高速化も図った³⁸⁾。

システム開発者にわれわれの開発したデバイスを有効に利用してもらうためには、デバイス特性の詳細な評価を行い、その結果をシステム開発者にアピールする事が重要である。また、その結果がシステム要求に応えられない場合には、その点をいかに改良するかが重要課題となる。いずれにせよ、デバイス特性の詳細な評価・検討は不可避なものである。ここで、PAL-SLM の有効な応用とされる光相関システムにおいて回折効率は重要なポイントである。そこで本研究では、PAL-SLM における回折効率について理論解析を交えて詳細な検討を加えた³⁹⁾。また、実応用を目指した場合には、コンピュータシステムとの連携は避けて通れない点であることから、コンピュータシステムからの制御による電気書き込み型の空間光変調器として、LCD パネルで強度変調されたパターンにより PAL-SLM を制御する方法を提案し、その位相変調特性について同様の解析及び検討を行った^{40),41)}。電気書き込み型とすることにあたって使用した LCD パネルには走査型の制御が使用されており、その走査型制御に起因する変調特性への影響が危惧された。そこで、1KHz の高速フレームレートで撮像可能な CMOS イメージセンサ⁴²⁾を利用して、2 次元的な時間応答特性を評価した⁴³⁾。このように、新規デバイスの開発における重要と思われる流れを実践し、今後のデバイス開発に生かすことを念頭において研究を行った。

1.3. 本論文の構成

本研究では、並列光情報処理に対してデバイス面からの検討を行うと共に、その結果を踏ま

えて具体的な応用についての展開を試みた。さらに、その成果を元にデバイスの改良を進めることにより、デバイスとシステムの橋渡しの重要性を示すことを目指した。

第1章は序文であり、並列光情報処理の現状と本論文のアプローチ方法について述べた。第2章では、我々のグループにおいて開発されてきた空間光変調器 (SLM) について、構造・動作原理・特性について解説すると共に、本研究において空間光変調管 (MSLM) を改良すべく開発された液晶空間光変調管 (LC-MSLM) について述べる。第3章では、近年、実応用化を見据えた空間光変調器として注目されている液晶空間光変調器について詳細な検討を行う。まず、PAL-SLM の位相変調特性に注目し、その回折効率について理論解析を交えて詳細な評価を行う。さらに、電子システムとの親和性を考慮して PAL-SLM を電気書き込み型に改良した空間光変調器を提案し、同様にその特性を評価する。また、電気書き込み型とすることにより生じる走査制御の影響についても議論する。第4章では、MSLM の持つ特徴を生かして並列光情報処理に応用した例として、偏光符号化法を用いた並列光論理演算システムと、MSLM による2次元光ロックインアンプの応用について述べる。第5章では、空間的に高密度な配線及び並列演算に光を利用した例として、光ニューロコンピューティングへの MSLM の応用について詳しく述べる。第6章では、液晶空間光変調器を光相関システムに応用した例として、強誘電性液晶空間光変調器 (FLC-SLM) の高速性とメモリー機能を有効利用した実時間速度計に関する応用と、並行配向ネマティック液晶空間光変調器 (PAL-SLM) の位相変調特性を有効利用した JTC 型光相関システムについて述べる。第7章で本論文を結ぶ。

1.4. 第 1 章の参考文献

- 1) 辻内順平, 村田和美編集, “光学情報処理”, 朝倉書店, (1974)
- 2) W.P.Bleha, L.T.Lipton, E.Wiener-Avneer, J.Gringer, P.G.Reif, D.Casasent, H.B.Brown and B.V.Markevitch, “Application of the liquid crystal light valve to real-time optical data processing”, *Opt. Eng.*, Vol.17, pp.371-384 (1978).
- 3) S.Ishihara, “Recent advances in optical computing in Japan”, *Proc.SPIE*, Vol.634, pp.31-50 (1986).
- 4) F.S.Yu, Q.W.Song, Y.Suzuki, M.H.Wu, “Application of a microchannel spatial light modulator to real-time joint transform correlation”, *Proc. SPIE*, Vol.963, pp.322-326 (1988).
- 5) 原勉, “空間光変調器と光アナログ演算”, *OplusE*, Vol.184, pp.101-108 (1995).
- 6) N.McArdle, M.Naruse, A.Okuto and M.Ishikawa, “Design of a pipelined optoelectronic processor”, *Proc. SPIE*, Vol.3490, pp.302-305 (1998).
- 7) 谷田貝豊彦, “光コンピュータ研究の現状と課題”, *応用物理*, Vol.57, pp.1136-1150 (1999).
- 8) 武田光夫, “光コンピューティング-その多様性と体系化”, *光学*, Vol.28, p.1 (1999).
- 9) 谷田純, “光コンピューティングの現状と将来”, *光学*, Vol.28, pp.2-6 (1999).
- 10) 谷田貝豊彦, “知的光情報処理システム”, *光学*, Vol.28, pp.15-21 (1999).
- 11) 藤森康朝, 高岡隆, “アダプティブ・オプティクス (補償光学)”, *光学*, Vol.8, pp.2-9 (1979).
- 12) A.D.Fisher and C.Warde, “Simple closed-loop system for real-time optical phase measurement”, *Opt. Lett.*, Vol.4, pp.131-133 (1979).
- 13) 原勉, 鈴木義二, “空間光変調器の最近の動向”, *オプトロニクス*, Vol.4, pp.73-79 (1985).
- 14) A.D.Fisher and J.N.Lee, “The current status of two-dimensional SLM technology”, *Proc.SPIE*, Vol.634, pp.352-370 (1986).
- 15) T.D.Bare, W.P.Bleha and S.Y.Wong, “A liquid crystal light valve”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.22, pp.90-92 (1973).
- 16) B.A.Horwitz and F.J.Corbett, “The PROM theory and applications for pockels readout optical modulator”, *Opt. Eng.*, Vol.17, pp.353-364 (1978).
- 17) L.A.Hornbeck and W.E.Nelson, “Spatial light modulator and applications”, *OSA Technical Digest Series*, Vol.8, pp.107-110 (1988).
- 18) U.Efron, “Spatial light modulator technology”, Marcel Dekker Inc., (1995).
- 19) 帰山敏之, “DMD の可能性”, *映像情報インダストリ*, Vol.2, pp.15-18 (2000).
- 20) J.Donjon, F.Dumont, M.Grenot, J.Hazman, G.Marie and J.Pergrale, “A Pockels-Effect Light Valve: Phototitus. Applications to Optical Image Processing”, *IEEE Trans. Electron. Devices*, Vol.ED-20, pp.1037-1042 (1973).
- 21) G.Marie, “Light Valves using DKDP operated near its curie point: TITUS and Phototitus”, *Ferroelectrics*, Vol.10, pp.9-14 (1976).
- 22) D.Casasent, “Photo DKDP light Valve: A Review”, *Opt. Eng.*, Vol.17, pp.365-370 (1978).
- 23) T.Gringer, A.Jacobson, W.Bleha, L.Miller, L.Fraas, D.Boswell and G.Myer, “A New Real-Time Non-Coherent To Coherent Light Image Converter, The Hybrid Field Effect Liquid Crystal Light Valve”, *Opt. Eng.*, Vol.14, pp.217-225 (1975).
- 24) B.A.Horwitz and F.J.Corbett, “The PROM-Theory and Applications for Pockels Readout Optical Modulator”, *Opt. Eng.*, Vol.17, pp.353-364 (1978).
- 25) S.G.Lipson and P.Nisenson, “Imaging Characteristics of the Itek PROM”, *Appl. Opt.*, Vol.13,

- pp.2052-2060 (1974).
- 26) N.Mukozaka, T.Hara and Y.Suzuki “Microchannel spatial light modulator using liquid crystal for modulating material.” Jpn. J. Appl. Phys. Part 2, Vol.29, pp.L1227-L1230 (1990).
 - 27) M.Hashimoto, K.Kitayama and N.Mukozaka, “Space-variant operations using an optical parallel processor based on polarization encoding”, Opt. Lett., Vol.14, pp.384-386 (1989).
 - 28) M.Hashimoto, K.Kitayama and N.Mukozaka, ” Programmable optical parallel processor based on polarization modulation : Cascade operarion”, Appl. Opt., Vol.28, pp.4305-4312 (1989).
 - 29) M.Hashimoto, K.Kitayama and N.Mukozaka, “Neighborhood operations of optical parallel processor”, Jpn. J. Appl. Phys. Part 2, Vol.29, pp.L1256-L1258 (1990).
 - 30) Z.He, K.Hotate and N.Mukozaka, “Selective Image Extraction by Synthesis of the Coherence Function Using Two-Dimensinal Optical Lock-in Amplifier with Microchannel Spatial Light Modulator”, IEEE Photonic Technol Lett., Vol.9, pp.514-516 (1997).
 - 31) M.Ishikawa, N.Mukozaka, H.Toyoda and Y.Suzuki, ”Optical associatron: A simple model for optical associative memory”, Appl. Opt., Vol.28, pp.291-301 (1989).
 - 32) M.Ishikawa, N.Mukozaka, Y.Toyoda and Y.Suzuki, ”Experimental studies on learning capabilities of optical associative memory”, Appl. Opt., Vol.29, pp.289-295 (1990).
 - 33) H.Toyoda, N.Mukozaka, Y.Suzuki and M.Ishikawa, ”Adaptive optical processing system with optical associative memory”, Appl. Opt., Vol.32, pp.1354-1358 (1993).
 - 34) Y.Kobayashi, T.Takemori, N.Mukozaka, N.Yoshida and S.Fukushima, “Real-time velocity measurement by the use of a speckle-pattern correlation system that incorporates a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator”, Appl. Opt., Vol.33, pp.2785-2794 (1994).
 - 35) 豊田晴義, 吉田成浩, 向坂直久, 小林祐二, 原勉, “位相変調型空間光変調器を用いた光相関システム”, 光学, Vol.23, pp.315-320 (1994).
 - 36) H.Toyoda, Y.Kobayashi, N.Mukozaka, N.Yoshida, T.Hara and T.Ohno, “Frame-Rate Displacement Measurement System Utilizing an Ultra-High-Speed Shutter Camera and an Optical Correlator”, IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol.44, pp.755-758 (1995).
 - 37) Y.Kobayashi, H.Toyoda, N.Mukozaka, N.Yoshida and T.Hara, “Fingerprint Identification by an Optical Joint Transform Correlation System”, Opt. Rev., Vol.3, pp.403-405 (1996).
 - 38) Y.Igasaki, N.Yoshida, H.Toyoda, Y.Kobayashi, N.Mukozaka and T.Hara, “High Speed Parallel Aligned Liquid Crystal Spatial Light Modulator at 180Hz”, Opt. Rev., Vol.4, pp.167-169 (1997).
 - 39) N.Mukozaka, N.Yoshida, H.Toyoda, Y.Kobayashi and T.Hara, “Diffraction efficiency analysis of a parallel-aligned nematic-liquid spatial light modulator”, Appl. Opt., Vol.33, pp.2804-2811 (1994).
 - 40) F.Li, N.Mukozaka, N.Yoshida, Y.Igasaki, H.Toyoda, T.Inoue, T.Hara and Y.Kobayashi, “Phase Modulation Characteristics Analysis of Optically-Addressed Parallel-Aligned Mematic Liquid Crystal Phase-Only Spatial Light Modulator Combined with a Liquid Crystal Display”, Opt. Rev., Vol.5, pp.174-178 (1998).
 - 41) Y.Igasaki, N.Yoshida, H.Toyoda, T.Inoue, N.Mukozaka, Y.Kobayashi, T.Hara and F.Li, “High Efficiency Electrically-Addressable Phase-Only Spatial Light Modukator”, Opt. Rev., Vol.6, pp.339-344 (1999).
 - 42) S.Mizuno, K.Fujita, H.Yamamoto, N.Mukozaka and H.Toyoda, “A 256X256 compact CMOS Image Sensor With On-chip Motion Detection Function”, Journal of Solid-State Circuits, Vol.38, pp.1072-1075 (2003).
 - 43) N.Mukozaka, B.Ye and N.Yoshida, ”Spatial Temporal Analysis of Electrically-Addressable

Phase-Only Spatial Light Modulator”, Opt. Rev., Vol.10, pp.361-365 (2003).

第2章 空間光変調器の開発

2.1. まえがき

我々のグループでは、2次元の光情報によって別の2次元の光をスイッチング制御する並列(2次元)三端子素子である光アドレス型空間光変調器(SLM)を、光情報処理の基本デバイスとして開発してきた。SLMは、基本的にはアドレス材料と光変調材料の組み合わせから成る。空間光変調管(Microchannel Spatial Light Modulator: MSLM)は、アドレス材料に光電面を、光変調材料に電気光学結晶(LiNbO₃:LN)を用いた真空管構造を成し、浜松ホトニクス(株)の保有する真空管技術を最大限に利用して開発された。MSLMは様々な内部演算機能や高い入力感度を有することから、光コンピューティングをはじめとする並列光情報処理の研究におけるキーデバイスとして広く利用されてきた¹⁾⁻¹⁰⁾。

本研究では、MSLMにおける光変調材料であるニオブ酸リチウム(LiNbO₃)のphotorefractive効果や光損傷に起因する最大読み出し光量の限界打破、及び、相反する動作速度と解像度の問題を克服するために、光変調材料を電気光学結晶から液晶に置き換えた液晶空間光変調管(Liquid Crystal Microchannel Spatial Light Modulator: LC-MSLM)を開発した¹¹⁾。さらに、高解像度・高速性と小型・低電圧駆動を実現すべく、a-Si:H光導電体をアドレス材料に、液晶を光変調材料に用いた液晶空間光変調器を開発した¹²⁾⁻¹⁵⁾。使用する液晶の種類により、高速動作・2値メモリー機能の特徴を持った強誘電性液晶空間光変調器(Ferroelectric Liquid Crystal Spatial Light Modulator: FLC-SLM)及び、一般的なネマティック液晶を平行に配向させた並行配向ネマティック液晶空間光変調器(Parallel-aligned nematic Liquid crystal Spatial Light Modulator: PAL-SLM)の2種類がある。本章では、これらのSLMについて、構造・動作原理・特性について示す。

2.2. 空間光変調管 : MSLM

MSLM は、本研究開始当初に開発を終えている、ある意味完成されたデバイスである。本研究では、MSLM を利用した応用研究を進めると共に、その問題点を指摘し改良を加える。ここでは、応用研究に必要なデバイスの特性について述べ、その特徴をまとめる。

2.2.1. MSLMの構造

MSLM は、光アドレス材料として光電面、光変調材料としてニオブ酸リチウム非線形光学結晶 (LiNbO_3 : LN) を用いた、図 2-1 に示すような真空管型の SLM である。図 2-2 にデバイスの断面構造を示す¹⁶⁾。光電面・加速・集束電子レンズ系及びマイクロチャンネルプレート (MCP) の構造は、通常のイメージインテンシファイヤーと同じものを用いた。デバイスの光電面は、マルチアルカリ光電面 (S20) で、MCP には出力電流の大きく取れる低抵抗の物を用いた。MCP の出力側には 2 次電子放出特性を制御する¹⁷⁾ためのメッシュ電極と光変調材料である LN 単結晶ウェハが配置されている。LN 単結晶は 55° カットされた厚さ $70\mu\text{m}$ のもので、電荷蓄積面側には読み出し光の反射効率を上げる誘電体多層膜ミラー¹⁶⁾がコーティングされている。



図 2-1 MSLM の外観写真

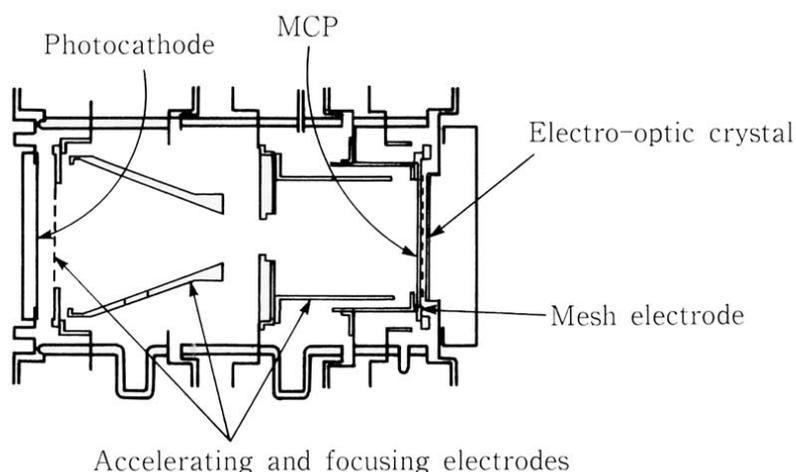


図 2-2 MSLM の断面構造

2.2.2. MSLMの動作原理

MSLMの基本動作原理を図2-3に示す。入力パターンは光電面上に結像され、外部光電効果により光電子像に変換される。電子レンズ系でMCPに結像された電子像は数千～1万倍に増倍され、メッシュ電極を通して電気光学結晶上に電荷像として形成される。この電荷像により電気光学結晶中に電界分布が形成され、電気光学効果による屈折率分布が起こる。この電気光学結晶中に読み出し光を透過させることで、屈折率分布に応じた読み出し光の光変調がなされる。ここで、結晶表面すなわち誘電体ミラー表面に*i*[A]の電子流が到達すると考えると次式が成り立つ。

$$i = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot S(\lambda) \cdot A \cdot L \cdot G \quad (2.1)$$

上式で、 α_1 と α_2 はそれぞれグリッドとメッシュ電極における電子の透過率であり、 $S(\lambda)$ [A/W]は光電面の感度、 A [m²]は光電面の有効面積、 L [W/m²]は光電面上での光の強度、そして G はMCPの増倍率を表す。このようにして電荷パターンが結晶表面上に形成される。結晶表面上での電荷の授受はメッシュ電極と結晶表面上の電圧によって制御され、結晶表面の電荷量*Q* [C]は次式で与えられる。

$$Q = i \cdot T(\delta - 1) \quad (2.2)$$

ここで*T* [S]はデバイスへの書き込み時間(露光時間)、 δ は2次電子放出比の平均値を表す。

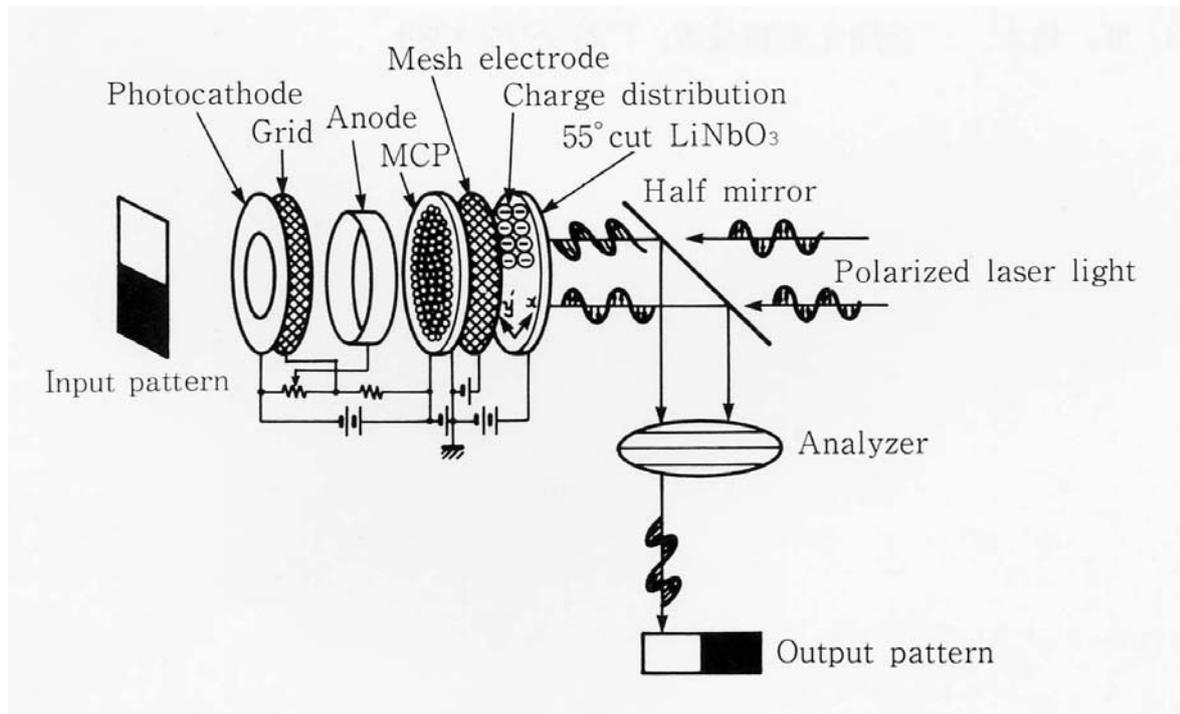


図2-3 MSLMの基本動作原理

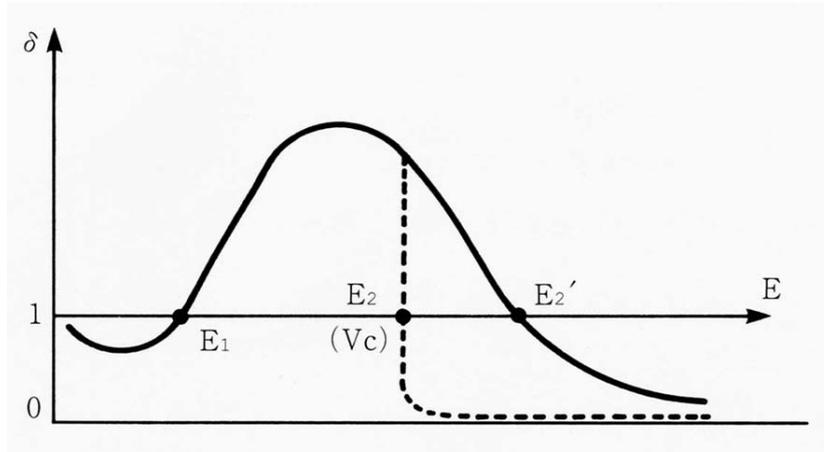


図 2-4 2 次電子放出特性

結晶表面への電荷の授受（書き込み・消去動作）は、図 2-4 に示す 2 次電子放出特性を利用することで制御される^{17), 18)}。結晶表面（あるいは誘電体ミラー表面）の特性は通常実線で示され、 E_1 は数 10[eV]~100[eV]、 E_2 は数[KeV]~10[KeV]の値である。しかし、メッシュ電極に E_2 に相当する電圧を印加すると、その特性は破線で示すようになる。もし、 $\delta < 1$ ならば、結晶表面に入射する電子の数が出て行く電子の数よりも多いので結晶表面には電子が蓄積して負に帯電し、電子蓄積モードと呼ぶ。逆に、 $\delta > 1$ ならば、結晶表面に入射してくる電子の数よりも出て行く数のほうが多いため、結晶表面からは電子が取り除かれて正に帯電し、2 次電子放出モードと呼ぶ。このように、2 次電子放出特性で結晶表面の電位を様々な条件で制御することにより、MSLM の内部で様々な演算を行わせることができる。

形成された電荷に応じて結晶の厚さ方向の電圧は次式のように変化する。

$$V = \frac{Q}{C} \tag{2.3}$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon^* \cdot A}{d}$$

C [F]は結晶の静電容量、 ϵ_0 [F/m]は真空の誘電率、 ϵ^* は結晶の比誘電率、 d [m]は結晶厚を表す。この電圧により形成される結晶内の電界によって結晶の屈折率が変調される。

続いて、電気光学結晶中での光変調について概説する。一般的に結晶中の光波の伝播には屈折率楕円体³⁾が使用され、次式及び図 2-5 で表される。

$$\frac{x^2}{n_{x0}^2} + \frac{y^2}{n_{y0}^2} + \frac{z^2}{n_{z0}^2} = 1 \tag{2.4}$$

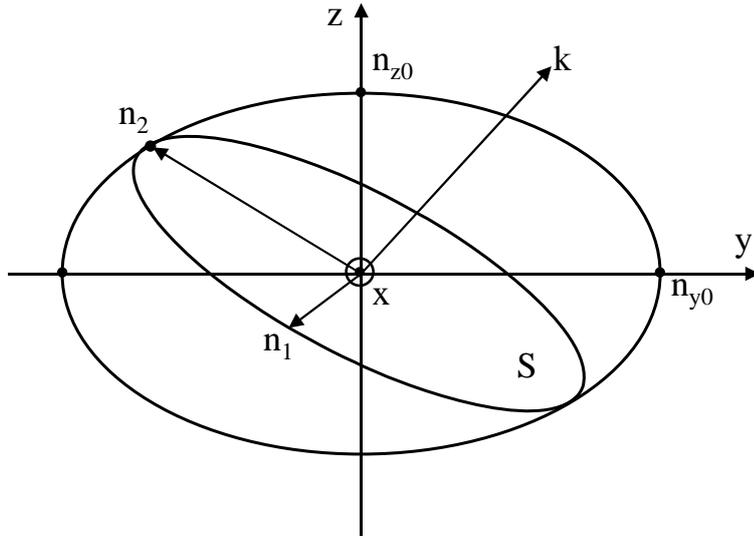


図 2-5 屈折率楕円体

MSLM では、電気光学結晶 (LiNbO₃) の持つ 1 次電気光学効果 (ポッケルス効果) を利用しており、電界 $\mathbf{E}(E_x, E_y, E_z)$ により屈折率楕円体の変化分 Δ は下記のように表される。

$$\left(\frac{1}{n_{x0}^2} + \Delta \frac{1}{n_x^2}\right)x^2 + \left(\frac{1}{n_{y0}^2} + \Delta \frac{1}{n_y^2}\right)y^2 + \left(\frac{1}{n_{z0}^2} + \Delta \frac{1}{n_z^2}\right)z^2 + 2\Delta \frac{1}{n_{yz}}yz + 2\Delta \frac{1}{n_{xz}}xz + 2\Delta \frac{1}{n_{xy}}xy = 1 \quad (2.5)$$

ここで、印加電界 $\mathbf{E}(E_x, E_y, E_z)$ による屈折率分布の変化分は、1 次電気光学係数テンソル r_{ij} を用いて以下のように示される。

$$\begin{bmatrix} \Delta \frac{1}{n_x^2} \\ \Delta \frac{1}{n_y^2} \\ \Delta \frac{1}{n_z^2} \\ \Delta \frac{1}{n_{yz}} \\ \Delta \frac{1}{n_{xz}} \\ \Delta \frac{1}{n_{xy}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

MSLM では、この 1 次の電気光学効果による光変調を効率的に利用するために、最適な結晶の切り出し角度 (55° カット) を用いている¹⁹⁾。この 55° カット LiNbO₃ における屈折率楕円体は、次式のように示される。

$$\begin{bmatrix} \Delta \frac{1}{n_x^2} \\ \Delta \frac{1}{n_y^2} \\ \Delta \frac{1}{n_z^2} \\ \Delta \frac{1}{n_{yz}^2} \\ \Delta \frac{1}{n_{xz}^2} \\ \Delta \frac{1}{n_{xy}^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{42} & 0 \\ r_{42} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -E \sin 55^\circ \\ E \cos 55^\circ \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

このときの屈折率楕円体の式は、下記のようになる。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{n_0^2} + r_{22}E \sin 55^\circ + r_{13}E \cos 55^\circ \right) x^2 + \left(\frac{1}{n_0^2} - r_{22}E \sin 55^\circ + r_{13}E \cos 55^\circ \right) y^2 \\ & + \left(\frac{1}{n_e^2} + r_{33}E \cos 55^\circ \right) z^2 - 2r_{42}E \sin 55^\circ yz = 1 \end{aligned} \quad (2.8)$$

さらに、 55° カット光学結晶に対してその表面に垂直に入射された光の変調を考えた場合に、 $(x,y,z) \rightarrow (x,y',z')$ の座標変換及び $z'=0$ とおくと、光線のそれぞれの偏光方向(x 軸, y' 軸)に対する屈折率変化は下記のように示される。その時の屈折率楕円体を図 2-6 に模式的に示す。

$$n_x = n_0 - \frac{n_0^3}{2} \Delta \left(\frac{1}{n_x^2} \right) = n_0 - \Delta n_x \quad (2.9)$$

$$n_{y'} = n_e' - \frac{n_e'^3}{2} \Delta \left(\frac{1}{n_{y'}^2} \right) = n_e' - \Delta n_{y'} \quad (2.10)$$

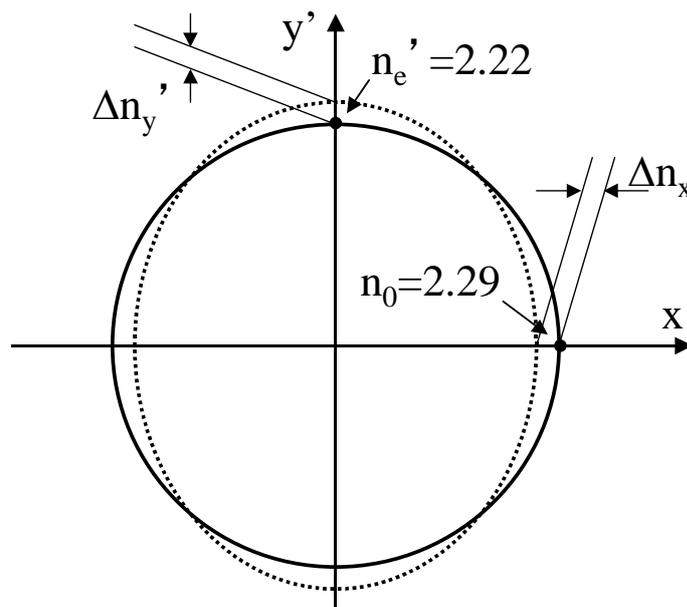


図 2-6 55° カット時の屈折率楕円体

図 2-6 において、実線が電圧無印加時の屈折率楕円体で、破線が電圧印加時の屈折率楕円体を示す。ここで、光線のそれぞれの偏光方向(x 軸,y'軸)に対する結晶中で受ける位相変化は、

$$\Delta\phi_x = \frac{\Delta n_x \omega}{C_0} 2d = \frac{2\pi n_0^3 V}{\lambda} (\gamma_{22} \sin 55^\circ + \gamma_{13} \cos 55^\circ) \quad (2.11)$$

$$\Delta\phi_y' = \frac{\Delta n_y' \omega}{C_0} 2d = \frac{2\pi n_e'^3 V}{\lambda} \begin{pmatrix} -\gamma_{22} \sin 55^\circ \cos^2 55^\circ + \gamma_{13} \cos^3 55^\circ \\ +\gamma_{33} \sin^2 55^\circ \cos 55^\circ - 2\gamma_{42} \sin^2 55^\circ \cos 55^\circ \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

となり、最終的に電界によって生じる位相のずれは次式により求められる。

$$\Gamma = \Delta\phi_x - \Delta\phi_y' \quad (2.13)$$

ここで、反射型強度変調素子を考えると、光が(x 軸,y'軸)に対して 45 度の角度で入射された場合に、次のような強度変調光が得られることになる。

$$I = \sin^2 \frac{\Gamma}{2} \quad (2.14)$$

2.2.3. MSLMの特性

図 2-7 に光電面の分光感度とミラーの分光反射率を併せて示す²⁰⁾。この特性から明らかなように、書き込み光と読み出し光に同じ波長の光を使うことができるので、特別な波長変換手段を使わなくても光システムにおいてフィードバックやカスケード接続を行うことが可能である²¹⁾。

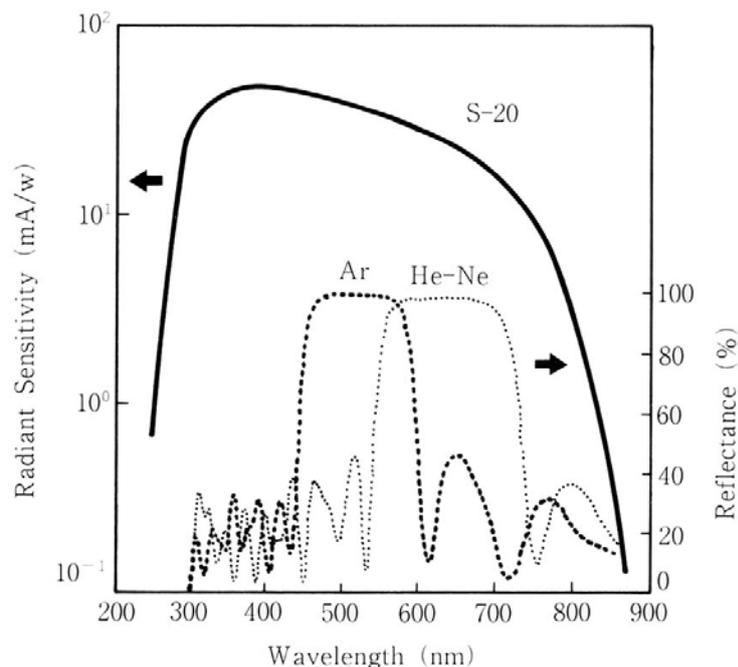


図 2-7 光電面の分光感度と誘電体ミラーの分光反射率

書き込み光エネルギー $L \cdot T$ と出力光強度 I との関係、図 2-8（読み出し光に Ar レーザーを用いた場合）と図 2-9（He-Ne レーザーの場合）について理論計算結果と併せて示す。いずれの場合も、コントラスト比は 1000 : 1 以上であり、 γ はおよそ 2 である。最大読み出し光強度は、結晶の光屈折率効果（photorefractive 効果）又は光損傷によって制限される。実際に、Ar レーザーの 0.15 W/cm^2 で連続読み出しを行うと、書き込まれた電荷像によって生じた外部電界が、photorefractive 効果によって相殺される現象が観察された。

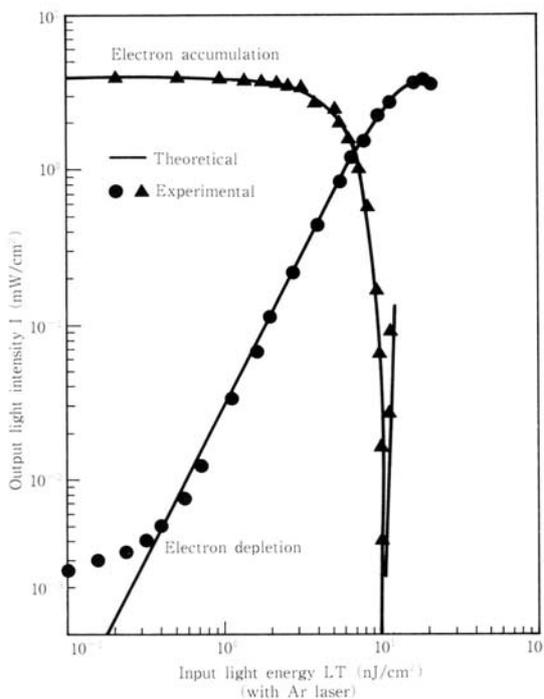


図 2-8 トランスファー特性 (Ar)

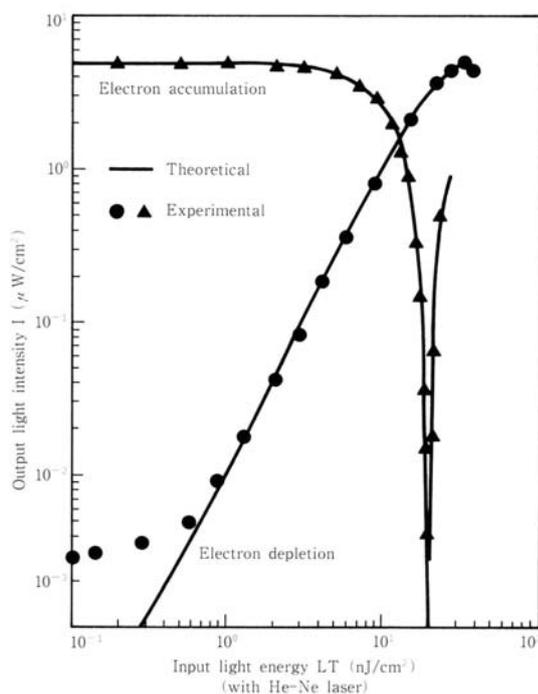


図 2-9 トランスファー特性 (He-Ne)

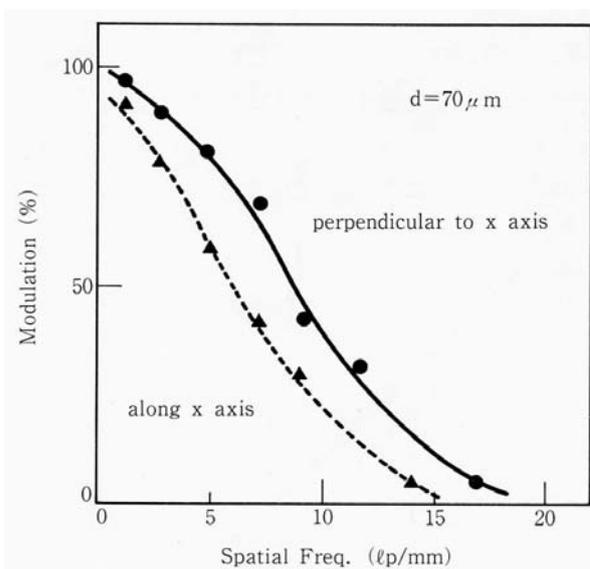


図 2-10 MSLM の空間解像度特性

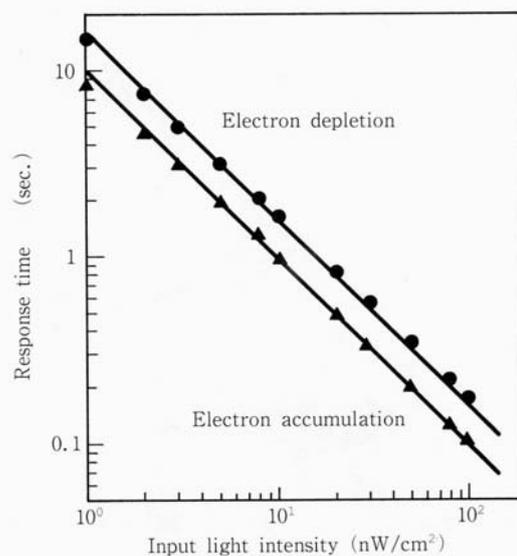


図 2-11 MSLM の露光特性

MCP とメッシュ電極間の距離を 0.25mm、メッシュ電極と結晶間の距離を 0.40mm とし、結晶の厚さが 70 μ m の場合の空間解像度特性を図 2-10 に示す。その結果、50%変調度での解像度は 9 lp/mm (結晶の x 軸に垂直方向)、6 lp/mm (結晶の x 軸方向) である²⁰⁾。

MSLM の露光特性 (書き込み光強度と応答時間の関係) を図 2-11 に示す²⁰⁾。書き込み光強度 100nW/cm² の時に電子蓄積モードで 100msec、2 次電子放出モードで 170msec の応答時間が得られた。これは、フレームレートでおよそ 4Hz となる。MCP の非線形飽和領域での動作であれば 10Hz 以上の動作も可能である²²⁾。

最後に、USAF テストターゲットを書き込み、He-Ne レーザーで読み出したコヒーレント像を図 2-12 に示す。書き込まれた画像は 1 日以上たっても変化は見られず良好にメモリーされた。

最後に MSLM の諸特性を表 2-1 にまとめる。MSLM は、電子管構造による高感度、閾値動作、内部演算機能 (加算・減算・エッジ強調・コントラスト反転・AND・OR・拡大・縮小・回転・偏向など) を有し、並列光情報処理研究の基本デバイスとして優れた特徴を持ち、様々な研究に使用されてきた。

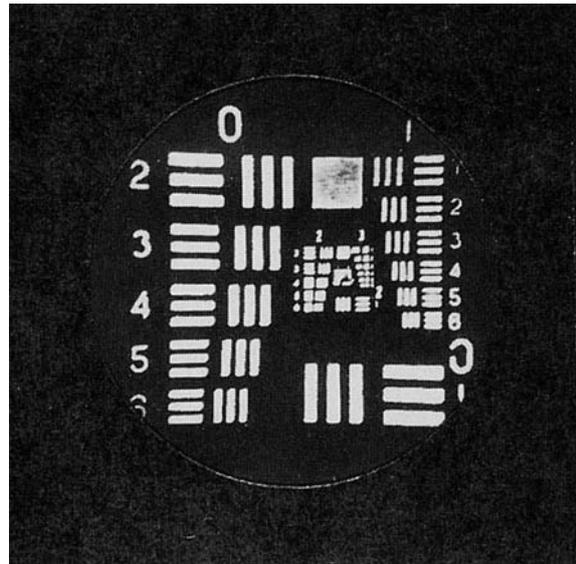


図 2-12 MSLM によるコヒーレント像

本研究においても、その特徴を生かした応用研究として、光ニューロコンピューティングや並列光情報処理の研究を行った。しかしながら、物理的に解像度と応答速度の相反する関係からこれ以上の高性能化が困難であり、動作に高電圧を必要とする点や、構造的に衝撃に弱く小型化が困難であることと併せて、特殊な用途を除き、実用化を考慮した応用研究には向かないと言わざるを得ない。

表 2-1 MSLM の諸特性

空間解像度 (50%変調時)	9 lp/mm (x 軸垂直) 6 lp/mm (x 軸水平)
空間解像度 (5%変調時)	17 lp/mm (x 軸垂直) 14 lp/mm (x 軸水平)
応答速度 (MCP 出力電流 10 μ A 時)	100 msec (電荷蓄積) 170 msec (電荷放出)
コントラスト比	1000 : 1 以上
γ 特性	約 2
入力感度	10 nJ/cm ² - 30 nJ/cm ²
最大読出し光量	0.1 W/cm ²
半波長電圧	2.0 kV (Ar レーザー) 2.4kV (He-Ne レーザー)
蓄積時間	1 日以上
像歪	3.5 %
シェーディング	6 %

2.3. 液晶空間光変調管：LC-MSLM

本研究では、高感度で豊富な演算機能を備え、これまでに様々な応用研究に利用されてきたMSLMにおける、光損傷及びフォトリフラクティブ効果による最大読み出し光量の制限打破、相反する動作速度と解像度克服を目指して、光変調材料に液晶を用いたLC-MSLMの開発を行った。ここでは、その詳細について述べる。

2.3.1. LC-MSLMの構造

LC-MSLM²³⁾の基本的な構造は、従来からのMSLMとほぼ同様であり、図2-13に示したように、光電面・加速・集束電子レンズ系及びMCPまでは、通常のイメージインテンシファイヤーと同じとした。光変調材料として非線形光学結晶(LiNbO₃)の代わりに液晶セルに置き換えた構造を持った真空管型のSLMである。液晶セルの詳細な構造を図2-14に示す。ガラス面板上に透明導電膜(ITO)を形成した後、液晶配向層としてポリイミドのラビング処理膜、もし

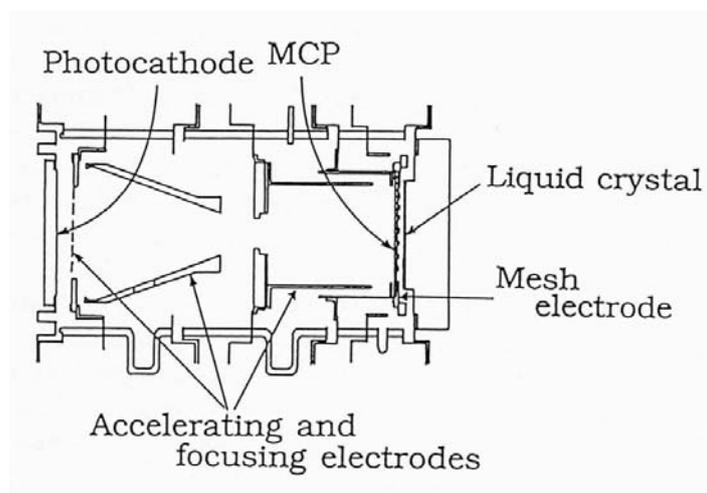


図 2-13 LC-MSLM の断面構造

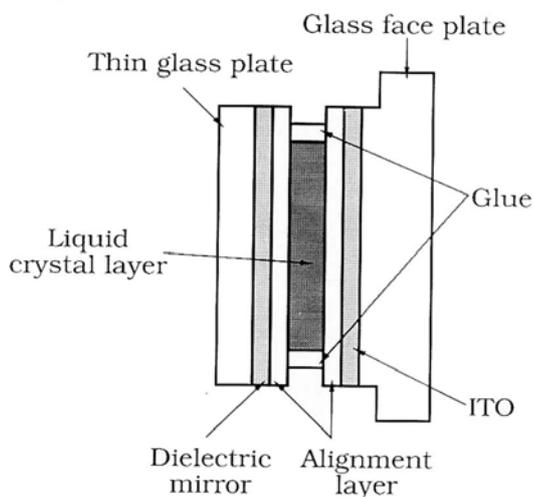


図 2-14 液晶セル部の詳細

くは SiO の斜め蒸着膜を形成したものの上に、直径 8 ミクロンのボールスパーサーを用い、誘電体多層膜ミラーを形成した厚さ 50 ミクロンの薄板ガラスを重ねて空セルとする。この液晶セル内に、真空中で毛細管現象を利用して液晶を注入し、真空をパージしてセル中に液晶を隅々まで充満させる。この後、従来の MSLM と同様の工程でチューブ内に組み込み、光電面を形成して試作管を製作した。

2.3.2. LC-MSLMの動作原理

MSLM においては、電荷を電荷蓄積面に蓄積させて、その電荷により生じる電界によって電気光学効果を起こさせる。つまり、DC 電圧による駆動が基本となる。しかしながら、液晶セルの電気抵抗 ($6.1 \times 10^{10} \Omega$) のほとんどは薄いガラス板の電気抵抗であり、DC 電圧を液晶セルに印加したとしても、その分圧比により液晶層に十分な DC 電圧を得ることができない。また、液晶のライフタイムを考慮すると DC 電圧駆動は好ましくないことから、2 次電子放出特性を利用することにより AC 駆動方式を実現した。液晶セルと液晶層の静電容量比が 10 対 1 程度であることから、AC 電圧を印加することにより液晶層に十分な AC 電圧変化を生じさせることができる。図 2-15 を用いて駆動電圧 AC15V について駆動方法を説明する。

- ① 液晶セルの共通背面電極（透明導電膜）にメッシュ電位 V_c を中心に $\pm v$ の矩形波 V_b を印加する。
- ② 液晶セルの電荷蓄積面側の表面電位 V_s は液晶セルが絶縁体のために V_b と同じ波形となる。ここで、MCP より十分な電荷が供給されると、表面電位 V_s は 2 次電子放出と 2 次電子捕集電極であるメッシュによって、メッシュ電位 V_c に近づこうとする。その結果、図 2-15 の②に示すような波形となる。
- ③ 液晶セルにかかる電位差 V_x は、 V_b と V_c の差で表されるので、図 2-15 の③に示すような波形となる。
- ④ 液晶セル内の液晶層にはその等価回路により、図 2-15 の④に示したような波形がかか

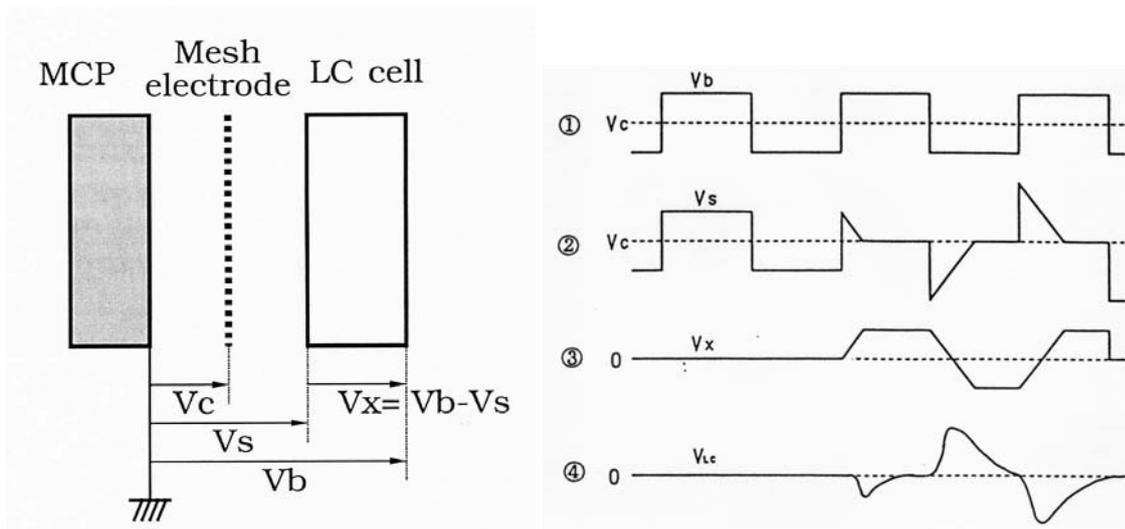


図 2-15 LC-MSLM における AC 駆動の動作原理

ると予想される。ただし、縦軸だけは適当に拡大して書いた。

実際には、2次電子捕集メッシュ電極の電位 V_c を 160V、液晶セル背面に印加する駆動電圧 V_b を $160-15=135V$ と $160+15=175V$ の矩形波として印加すると、液晶セルにかかる電圧 $V_x=V_b-V_s$ は-15V と+15V となり、15V の AC 駆動となる。この時、液晶層にはおよそ±2V 程度の電圧がかかった。

液晶セルは前節でも述べたとおり、 45° のツイストネマティック構造となっており、電界がかかっていない OFF 状態はツイストネマティック効果、ON 状態では複屈折効果を用いる、いわゆるハイブリッド電界効果モードで動作する。

2.3.3. LC-MSLMの特性

LC-MSLM の入出力特性について以下の通り評価を行った。まず、読み出し光量を液晶セルを駆動する MCP からの出力電流の関数として評価した結果を図 2-16(a)に示す。そのときの駆動条件は、液晶セルの駆動電圧が±15V の周波数 50,100,200,400Hz とした。次に、書き込み光量と MCP の出力電流の関係を通常の MCP と高ストリップ電流(低抵抗)MCP の場合について図 2-16(b)に示す。続いて、(a)と(b)の結果から、書き込み光量と読み出し光量の関係を求めた結果について、通常の MCP の場合を図 2-16(c)に、高ストリップ電流(低抵抗)MCP の場合を図 2-16(d)に示す。これらの特性を見ると、高ストリップ電流 MCP を使用した場合や、液晶セルの駆動周波数が低い場合の通常 MCP では、閾値動作に近い特性が得られることがわかる。これに対し、通常 MCP を高い駆動周波数で使用すると、線型に近い入出力特性が得られることがわかる。この特性は、図 2-17 に示した MCP のゲイン特性の違いによると思われる。図 2-17 における横軸は書き込み光量であり、線型な特性を持つ光電面の感度も含めた評価となる。これに対して、光電面の感度を考慮して MCP への入力電流として補正した軸を図 2-17 に追加した。高ストリップ電流 MCP は入力電流に対して線型な特性を維持するが、通常 MCP は入力

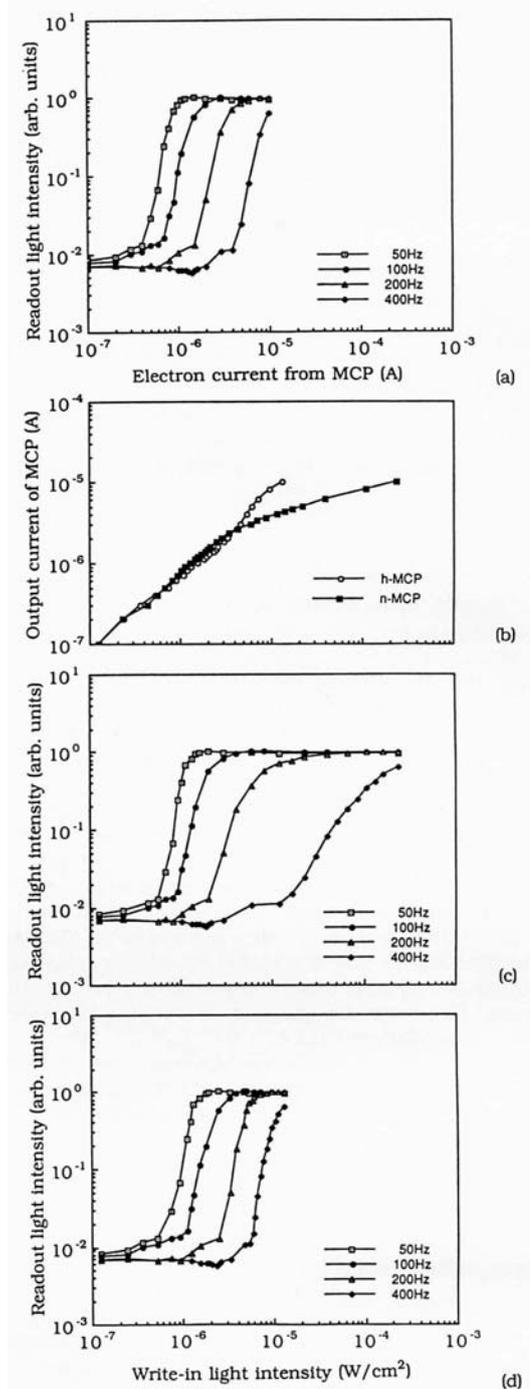


図 2-16 入出力特性の評価

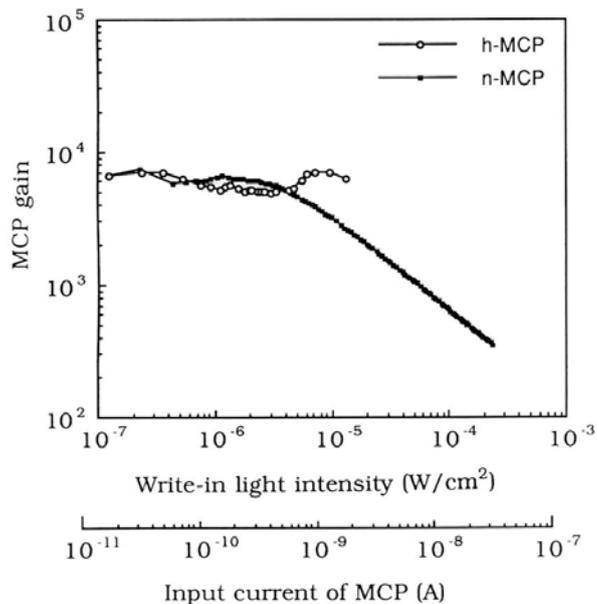


図 2-17 MCP ゲイン特性

電流が増加すると非線型な応答特性となっている。言い換えれば、高ストリップ電流 MCP は同じゲインを維持するが通常 MCP は入力電流の増加に伴いゲインが低下するといえる。その結果、高ストリップ電流 MCP の場合には、書き込み光量と読み出し光量の関係を示す図 2-16(c) は、MCP 入力電流と読み出し光量の関係を示す図 2-16(a) とほぼ同様の傾向を示すことになり、通常 MCP の場合にはゲインが低下する効果が液晶セルの特性を打ち消す形となり、線型に近い特性となる。しかしながら、感度が低下してしまうので、感度が問題にならない応用においてのみ 2 つの動作モードを利用することが可能となる。

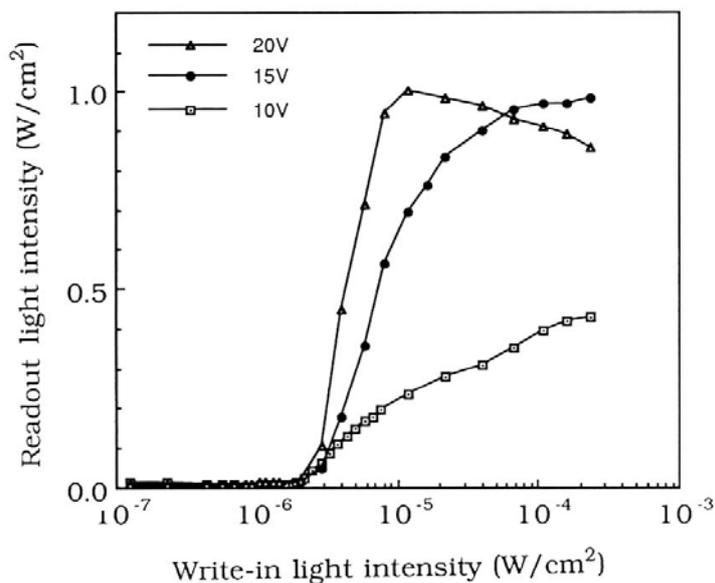


図 2-18 LC-MSLM のトランスファ特性



図 2-19 LC-MSLM の出力像

駆動周波数を 200Hz とし、AC 駆動電圧を 10・15・20V とした時のトランスファー特性（書き込み光強度と読み出し光強度との関係）を図 2-18 に示す。コントラスト比は 130 : 1 が得られた。

応答特性としては、オン状態（ツイストネマティック効果→複屈折効果）で 250msec、オフ状態（複屈折効果→ツイストネマティック効果）で 125msec の応答時間が得られた。

最後に、液晶配向層にポリイミドのラビング膜を使用した場合（左と中）と SiO 斜め蒸着膜を用いた場合（右）について、コヒーレント出力像を図 2-19 に示す。

2.3.4. LC-MSLMにおける課題

LC-MSLM を開発した当初の目的である、空間解像度及び応答速度について、本研究ではその目的を達成できていない。以下に、その原因及び対策についてまとめる。

空間解像度の改善に関しては、液晶セルに厚さ 50 μm の薄板ガラスを用いているが、ここでの電界の拡がりにより空間解像度が低下している。また、駆動時のメッシュ電圧がまだ低いため、MCP からの加速が十分ではないため、ここでの電荷の広がりも問題となっている。そこで、薄板ガラスでの電界の拡がりについては、電荷転送板（Charge Transfer Plate : CTP）を用いることにより、電界の拡がりをほぼなくすことができると考えられる。さらに、メッシュ電圧を通常の MSLM と同程度の 2kV 程度にあげることで MCP から液晶セルでの電荷の拡がりを小さく抑えることができ、空間解像度は限界で 30 lp/mm 程度が得られると予想される。

動作速度の改善に関しては、今回使用している液晶自体の特性としては現状の 2 倍程度の応答速度が期待できるはずであり、液晶セルのパラメータを最適化することにより改善できるものと考えられる。しかし、ネマティック液晶では、現在使用しているものよりも高速なものを選択したとしても数 10msec が限界である。そこで、ポリマー分散型液晶を用いれば数 msec、強誘電性液晶を用いれば数 10 μsec の応答速度が期待できる。

しかしながら、前節でも触れた通り電子管構造であるが故に、構造的に衝撃に弱く、動作に高電圧が必要であることから、今後、小型・低電圧動作が可能で構造上頑強である固体型のデバイスが有望であると考えられ、次節以降でこれらの開発について述べる。

2.4. 強誘電性液晶空間光変調器 : FLC-SLM

前節までで、電子管構造の空間光変調器について述べ、その構造上からくる問題点を指摘した。実際の応用を考えた場合には、小型・低電圧駆動が可能で、高解像度・高速応答性を有する空間光変調器が求められている。本研究ではこの状況を踏まえて、光変調材料に液晶を採用し、光アドレス材料に a-Si:H 光導電体を用いた、全固体型の空間光変調器の開発を行った。ここでは、液晶材料に強誘電性液晶を用いた FLC-SLM の、構造・動作原理・特性について述べる。

2.4.1. FLC-SLMの構造

FLC-SLM は、光アドレス材料に a-Si:H (水素化アモルファスシリコン) 光導電体を用い、光変調材料として高解像度・高コントラスト比・高速動作・メモリー機能といった特徴を備える表面安定化強誘電性液晶 (Surface Stabilized FLC) を採用した光書き込み型の SLM である²⁴⁾⁻²⁷⁾。図 2-20 に FLC-SLM の構造図を示す。図 2-19 右側の書き込み側のガラス基板上に透明電極を形成した後、光アドレス材料である a-Si:H を 3 μm 厚で形成し、読み出し光と書き込み光を分離させるための誘電体多層膜ミラーを形成する。図 2-20 左側の読み出し側のガラス基板上にも透明電極を形成する。両方のガラス基板上には液晶を配向させるための配向膜を形成した後、双方の基板を接着する接着層内に 1 μm のスペーサーを混ぜて、ガラス基板間の隙間が 1 μm のセルを形成し、カイラルスメクティック C 強誘電性液晶 (メルク : ZLI-4003) を封入し 1 μm 厚のセルとして作成する。

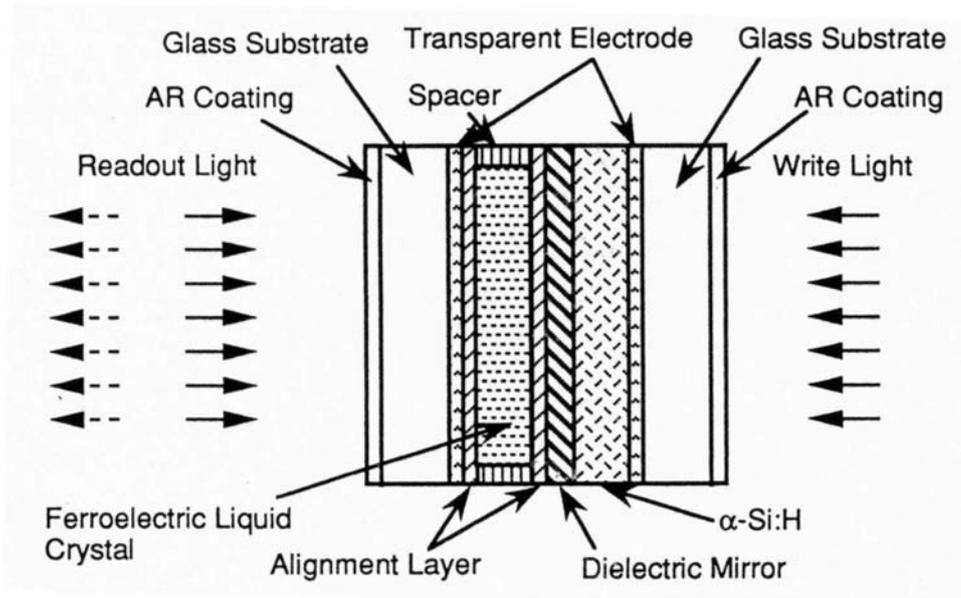


図 2-20 FLC-SLM の構造

2.4.2. FLC-SLMの動作原理

強誘電性とは、外部から電場が印加されないのに、永久電気双極子モーメントが同一方向かつ定まった向きにそろい、自発分極が存在している場合を指す。液晶においては DOBAMBC と呼ばれる Sc*相が Meyer らによって初めて発見された^{28),29)}。図 2-21 に Sc*相の層構造と分子配列をモデル的に示す³⁰⁾。層内で分子の重心位置は無秩序であり、分子長軸は層の法線に対して傾き角 θ だけ傾いて、どの層でも一定だが、傾く方位角 ϕ は層ごとにわずかずつ異なっており、分子配向にピッチ $1\ \mu\text{m}$ 程度の螺旋構造を生じている。Sc*相では各層で自発分極の向きが同一方向でかつ定まった向きにそろっているが、螺旋のピッチに渡って平均すると全体としては自発分極がゼロとなってしまう、このままでは強誘電性に特有な分極ドメインが発生しない。

そこで、N.A.Clark と S.T.Lagerwall は、基板に螺旋軸が並行で、層が垂直なセルにおいて、そのセル厚を $1\ \mu\text{m}$ 程度に薄くすることにより螺旋構造を消滅させて分極ドメインを発生させ

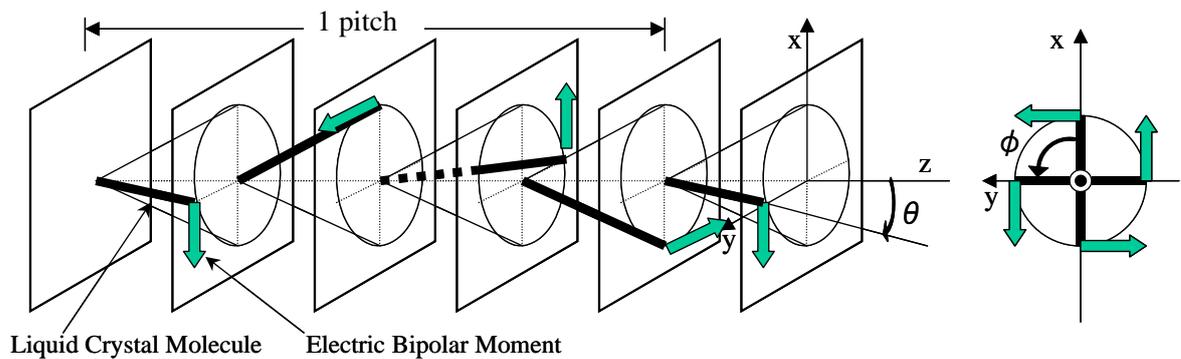


図 2-21 強誘電性液晶の螺旋構造

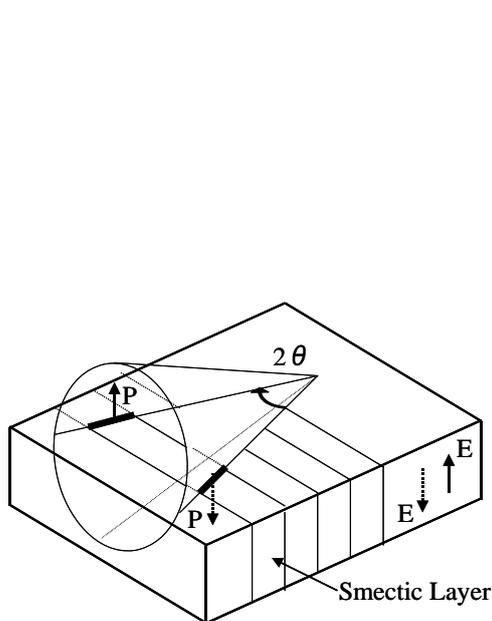


図 2-22 FLC の表面安定化状態

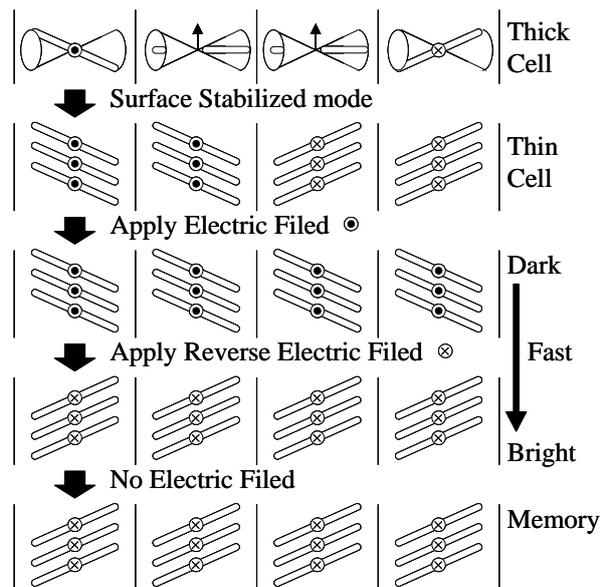


図 2-23 SSFLC の動作原理

る方法を発明した。表面安定化強誘電性液晶（Surface Stabilized FLC : SSFLC）セル²⁵⁾と呼ばれ、図 2-22 に示したような構造となる³⁰⁾。ここで、電場を上向きに印加すると全体が左側を向いた状態になり、電場を反転させて下向きにすると全体が右側を向く。この状況を図 2-23 に示した。SSFLC では、完全に対称な双安定性を有し、電場を切ってもその状態を維持するメモリー特性を持つ。また、自発分極と電場の大きな直接相互作用により動作し、ネマティック液晶と大差ない粘性定数の為高速応答が可能である²⁴⁾。

FLC-SLM は光変調層に 3 μm の a-Si:H を用いており、図 2-20 右側から光が入射すると、光導電効果によりそのインピーダンスが変化（低下）する。この a-Si:H のインピーダンス変化により液晶層にかかる電圧が変化し、液晶が駆動される。ここで、SSFLC では液晶層にかかる電界が直接液晶分子の自発分極に働き駆動されるため、その応答速度が速い。また、液晶にかかる電界の向きにより、液晶分子の向く方向が 2 つの安定状態のどちらかになり、電界を取り去った後もその安定状態を保つ事によりメモリーされる。このように、電界の向きにより 2 つの安定状態のどちらかに遷移させるのが基本動作となるため、光変調層である a-Si:H について正と負で光導電特性に差があると、遷移方向によって特性の差が出ることになり好ましくない。そこで、a-Si:H 製膜時の条件を工夫することにより、この特性の差が無くなるようにした。

2.4.3. FLC-SLMの特性

He-Ne レーザーで書き込みを行った時のポジ・ネガモード時のトランスファー特性を図 2-24 に示す³¹⁾。FLC-SLM におけるトランスファー特性は、ポジモード時では鋭く立上り、ネガモード時では鋭く立下がっており、中間調を制御しにくい特性である。これは、表面安定化 FLC の双安定性（2 値メモリー）によるもので、図 2-25 にポジメモリーとネガメモリー特性を示す³¹⁾。上が駆動電圧波形、下が読み出し光強度の時間変化を示す。図 2-25 左側のポジモードでは、バイポーラ（-+）消去電圧により読み出し光強度が 0 の暗状態にリセットされ、バイポーラ（+-）の書き込み電圧により読み出し光強度が大きい明状態となり、駆動電圧を 0 にした後もその状態を維持していることがわかる。図 2-23 左側のネガモードでは、ポジモードと逆の駆

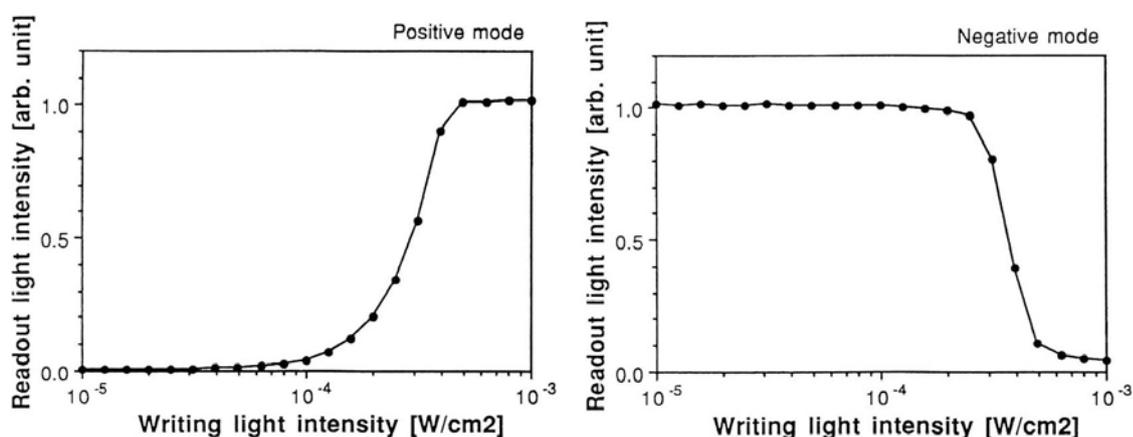


図 2-24 FLC-SLM のトランスファー特性

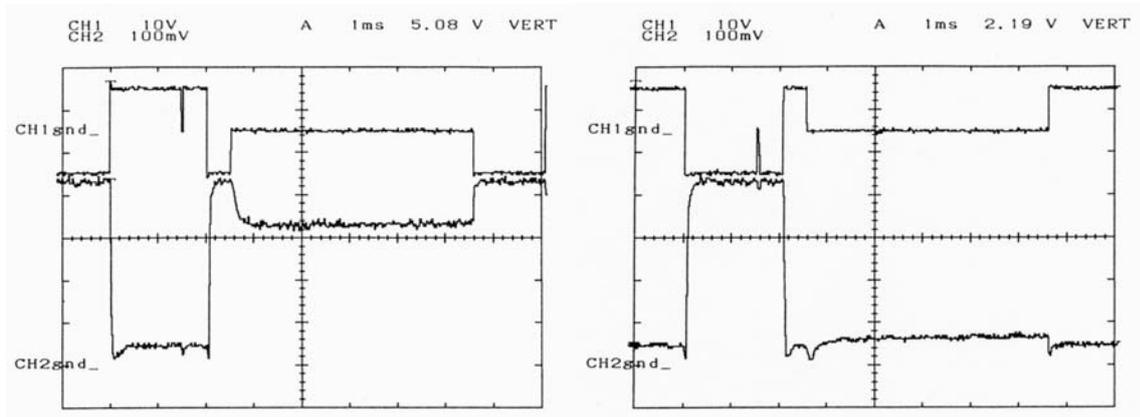


図 2-25 FLC-SLM のメモリー特性

動電圧を印加することにより、リセット時に明状態で書き込み時に暗状態となっている。

Mach-Zehnder 干渉系により空間周波数の異なる正弦分布の干渉縞を書き込みパターンとして回折効率を計測し、空間解像度を評価した。無変調時の 0 次光強度に対する、変調時の 1 次光強度の比を回折効率と定義し、正弦書き込みパターンの空間周波数を変えて実験した結果を図 2-26 に示す³¹⁾。空間解像度 16 lp/mm で回折効率は最大となり、最大値の半分になる所での空間解像度は 57 lp/mm、最大値の 5% となるところで 130 lp/mm であった。

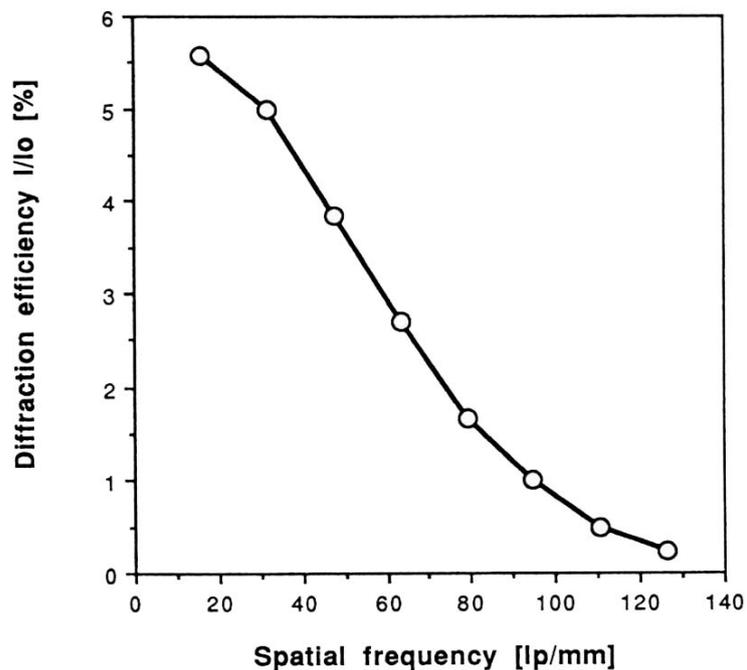


図 2-26 FLC-SLM の空間解像度特性

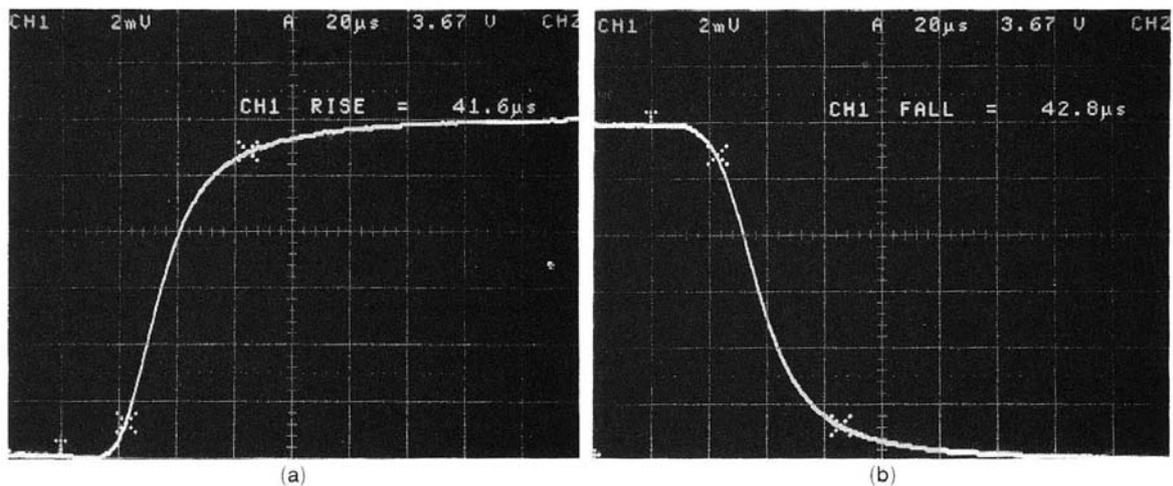


図 2-27 FLC-SLM の時間応答特性

図 2-27 にポジ・ネガ両モード時の応答速度を示す³¹⁾。ポジモード時で $42\mu\text{sec}$ 、ネガモード時で $43\mu\text{sec}$ と高速動作可能である事がわかる。

図 2-28 にポジモード及びネガモード時のリアルタイム画像 (a,b) とメモリー画像 (c,d) を示す³¹⁾。(c) に見られる円形のパターンは、a-Si:H 及び誘電体多層膜ミラーを透過した長波長

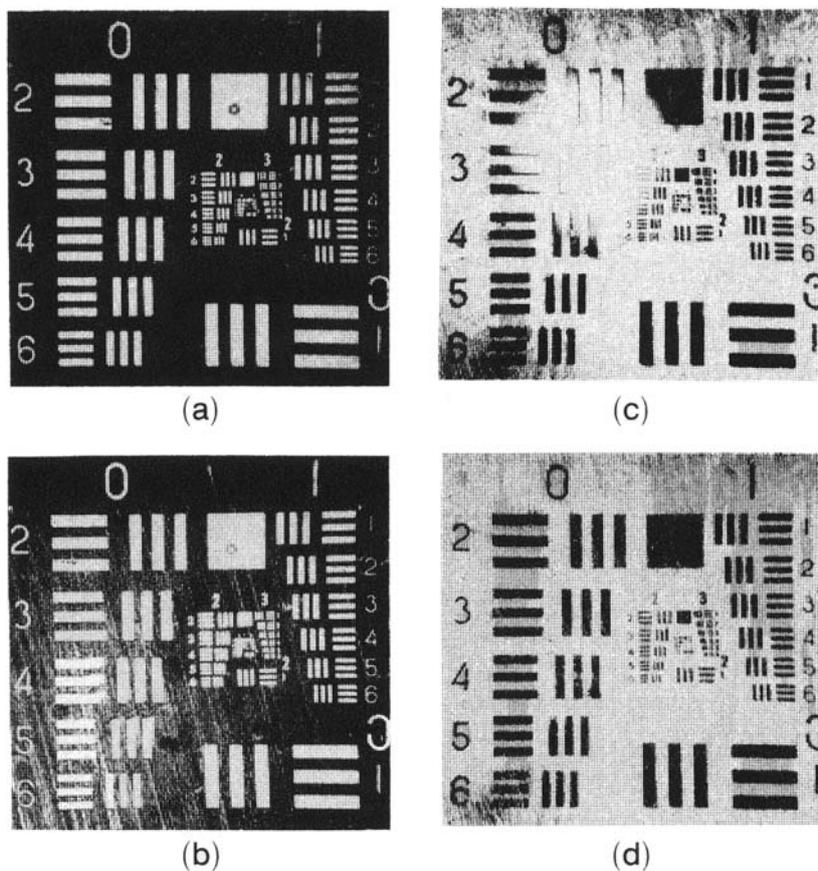


図 2-28 FLC-SLM の出力像

側の光である。同様のパターンが (a) でも観察されたが、撮影時の露光量の違いにより目立たなくなっている。(c) (d) に見られる平行の縞パターンは液晶の配向ムラによるノイズである。メモリー画像は 24 時間以上良好にメモリーされた。しかしながら、長時間メモリー状態で放置すると、消去時にメモリー画像が残像として残る現象も観察された。

本節では、前節までに指摘してきた電子管構造の空間光変調器における構造上の問題点を解決するために、電子管構造から全固体構造への移行を進めた。液晶の中でも、高速応答・2 値メモリー機能といった特徴を備えた強誘電性液晶 FLC を用いた FLC-SLM を開発しその特性を評価した。第 6 章では、本デバイスの特徴を生かした応用研究について述べる。しかしながら、FLC は優れた特徴を備えるものの、その特徴を安定して実現するのは非常に困難であることも明らかとなった。特に、SSFLC 構造を発現させるための配向条件が非常に厳しく、安定したメモリー特性及び高画質を得ることが困難であった。そこで次節では、各種表示デバイスに採用され、安定動作が期待できるネマティック液晶を変調材料とした液晶空間光変調器について述べる。

2.5. 並行配向ネマティック液晶空間光変調器：PAL-SLM

前節では、電子管構造から全固体型の空間光変調器に移行した FLC-SLM について述べたが、ここでも安定したデバイスの製造が困難であるといった実用上の問題点が明らかとなった。実際の応用を視野に入れた空間光変調器の開発を目指すために、ここでは、液晶材料にすでに表示デバイスで使用され安定動作が期待できるネマティック液晶を用いた PAL-SLM の、構造・動作原理・特性について述べる。

2.5.1. PAL-SLMの構造

PAL-SLM は、光アドレス材料に a-Si:H を用い、変調材料としてネマティック液晶を採用した光書き込み型の SLM である³²⁾⁻³⁴⁾。PAL-SLM の構造は図 2-29 に示すように、FLC-SLM の構造と同じであり、光変調材料を強誘電性液晶からネマティック液晶に置き換えたものである。液晶材料の特性の違いから、十分な位相変調を得るために、液晶層の厚さを FLC-SLM と比べて厚めの 8 μm とした。これに伴い、光アドレス材料の a-Si:H も液晶層とのインピーダンス比が大きくなるように 5 μm と厚く形成した。読み出し光と書き込み光を分離させるための誘電体ミラーは、SiO₂/TiO₂ の多層膜で、液晶配向膜は SiO の斜方蒸着膜でそれぞれ形成した。有効面サイズは 18mm 角である。

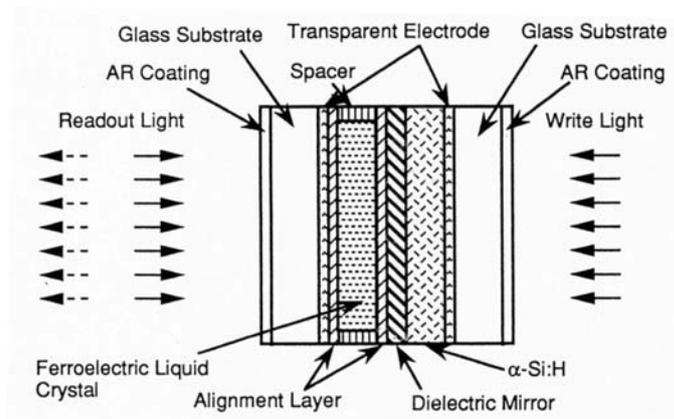


図 2-29 PAL-SLM の構造

2.5.2. PAL-SLMの動作原理

PAL-SLM の動作原理をヒューズの液晶ライトバルブでのツイストネマティックモードと比較して説明する。透過変調時の通常のツイストネマティックモードは図 2-30 に示すように³⁴⁾、

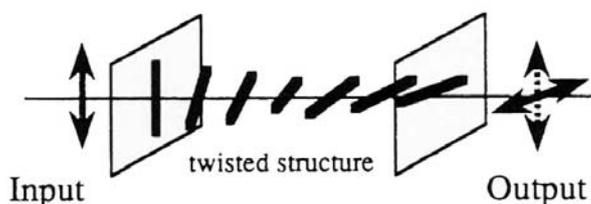


図 2-30 ツイストネマティックモードの動作原理

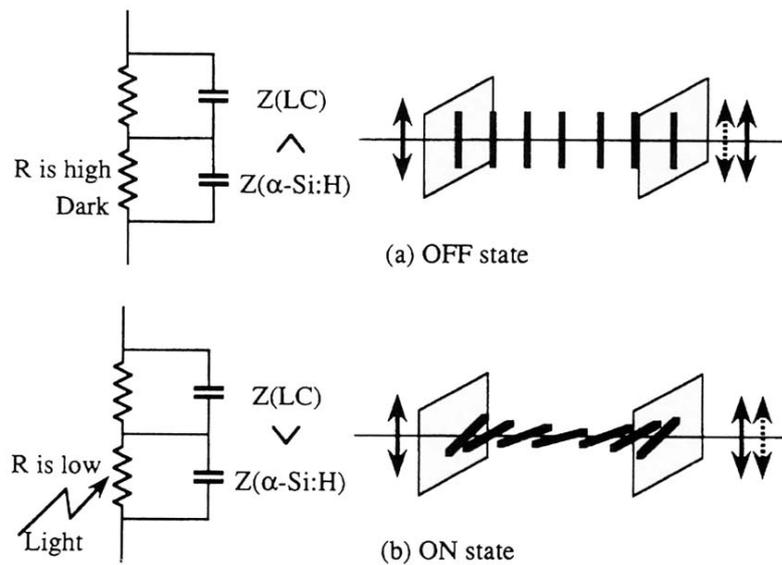


図 2-31 PAL-SLM の動作原理

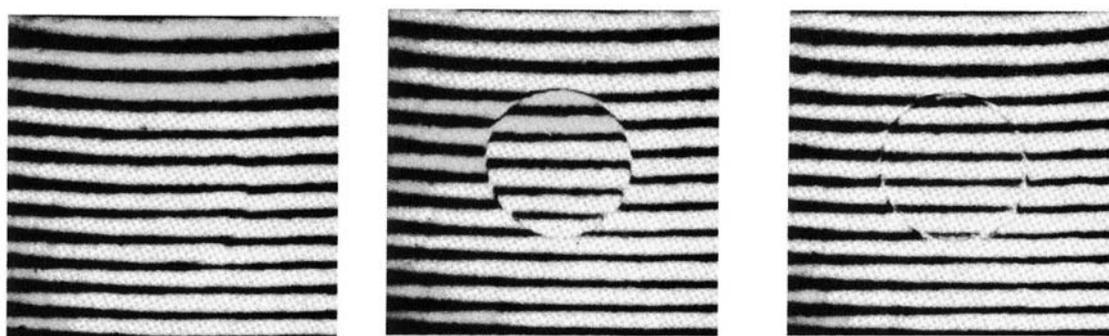
オフ状態（電圧無印加）では液晶分子は入力側から出力側に向かって 90 度捩れた配列となっている。左より入射した垂直偏波光は、waveguide 効果により偏波面が 90 度回転し出力側では水平偏波光となる。電圧を印加したオン状態では、電界により液晶分子の捩れが解かれ起き上がる。その結果、透過光の偏光状態や位相が変化することにより、光変調が実現できる。このように、ツイストネマティックモードでも位相変調を実現できるが、同時に偏光状態も変調されるため、光の干渉などを扱う応用などではデメリットとなる。

これに対し、図 2-31 に示すように³⁴⁾、液晶の配向を並行とすることにより光の強度や偏光状態の変化の無い純粋な位相変調を得ることが可能となる。オフ状態では、液晶は配向層により並行に配向され、その傾きは深さ方向でほぼ 0 度となる。オン状態では、電界により液晶分子の傾きが変化し、光軸上の実効的屈折率が液晶の誘電異方性により変化し、透過光の位相のみが変調される。具体的には、液晶にかかる電圧が大きくなるほど液晶の傾きが大きくなる事により液晶の屈折率が小さくなり、入射した垂直偏波光の位相遅れは小さくなる。PAL-SLM では、光アドレス材料である a-Si:H のインピーダンス変化により、液晶層にかかる電圧を変化させることにより 2 次元の光位相変調を実現する。

このように PAL-SLM では、入射光の偏波面と液晶の配向方向を平行にすると純粋な位相変調が得られる。また、入射光の偏波面と液晶の配向方向に角度をつけると、液晶の配向方向に平行な成分のみ変調を受けるため、直線偏光の入射光に対して変調光の偏波面は楕円偏光となり、偏光板を適当に配置することにより強度変調を得ることも可能である。

2.5.3. PAL-SLMの特性

PAL-SLM の位相変調特性を、Michelson 干渉系のミラーの片方に PAL-SLM を挿入することにより、PAL-SLM での位相変調を干渉縞として計測した。駆動電圧が 1KHz・3V の時に得られた干渉縞を図 2-32 に示す³⁴⁾。干渉縞がちょうど 1 本分ずれた時の位相変調が 2π となるが、



(a) 0 radians. ($0 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) (b) π radians. ($30 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) (c) 2π radians. ($200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$)

図 2-32 PAL-SLM の位相変調による干渉縞

その時の書き込み光量は $200\mu\text{W}/\text{cm}^2$ であった。

図 2-33 に駆動電圧 1.9V と 3V の時の書き込み光量に対する位相変調を示す³⁴⁾。1～ $1000\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の入力範囲において、入力光強度の対数に位相変調がおおむね比例した、入力光強度に対し対数的な位相変調特性を持つことがわかる。駆動電圧 3V の時の、液晶配向方向に対して垂直方向の位相変調も併せて示したが、理想通りに位相変調は認められなかった。

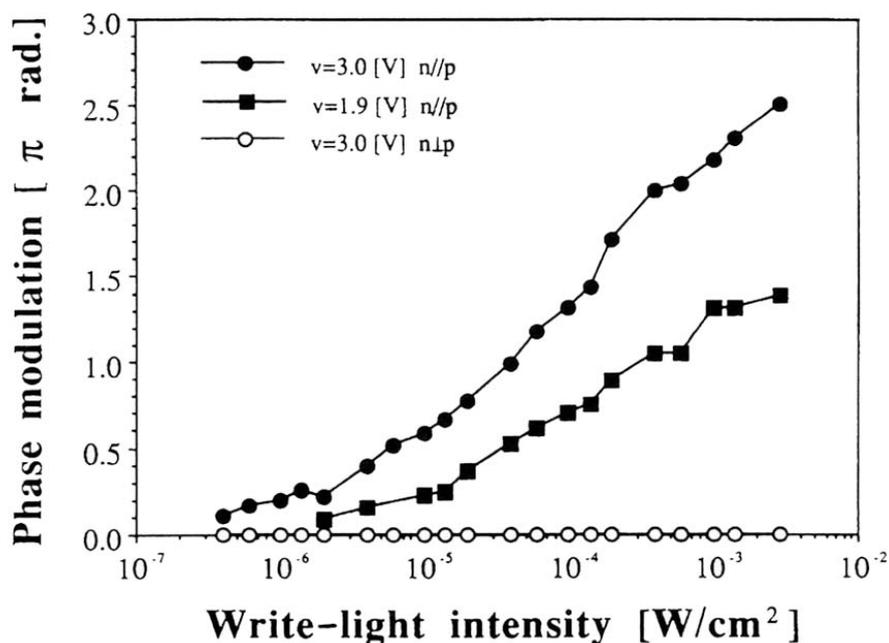


図 2-33 PAL-SLM の位相変調特性

FLC-SLM の時と同様に、Mach-Zehnder 干渉系により空間周波数の異なる正弦分布の干渉縞を書き込みパターンとして回折効率を計測し、空間解像度を評価した。無変調時の 0 次光強度に対する、変調時の 1 次光強度の比を回折効率と定義し、正弦書き込みパターンの空間周波数を変えて実験した結果を図 2-34 に示す³⁴⁾。入力光強度は干渉縞の空間周波数ごとに、最適値に調整し、駆動電圧を 3.0V として測定を行った。5 lp/mm において、理論限界(33.9%)に近い 31%が得られており、理想的な位相変調が行えていることがわかる。解像度は、MTF が 50%(回折効率が最大値の 50%)となる点がほぼ 20 lp/mm であり、100 lp/mm においても 0.1%程度の回折光強度が得られた。デバイスの解像度は、a-Si:H・ミラー・液晶層のそれぞれにおける電荷の拡がりによって決まるが、特に a-Si:H 層の厚さが顕著に影響を及ぼす。原理的には薄くするほど解像度が向上するが、変調度や感度が同時に変化するため、各層の整合性を考慮に入れた設計が重要となる。これまでの研究例では、ネマティック液晶を用いた SLM で、400 lp/mm において 0.3%の回折効率を得た例が報告されている。

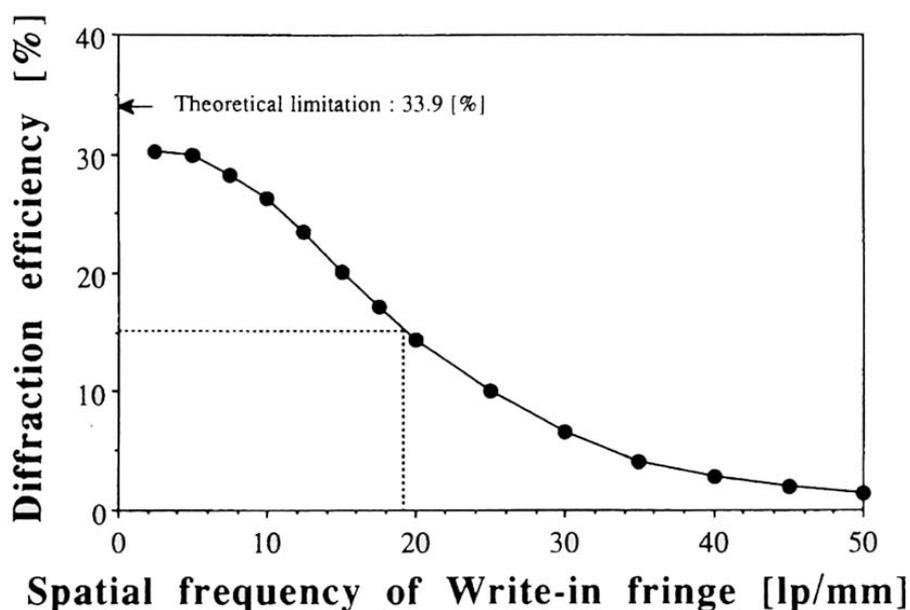


図 2-34 PAL-SLM の空間解像度特性

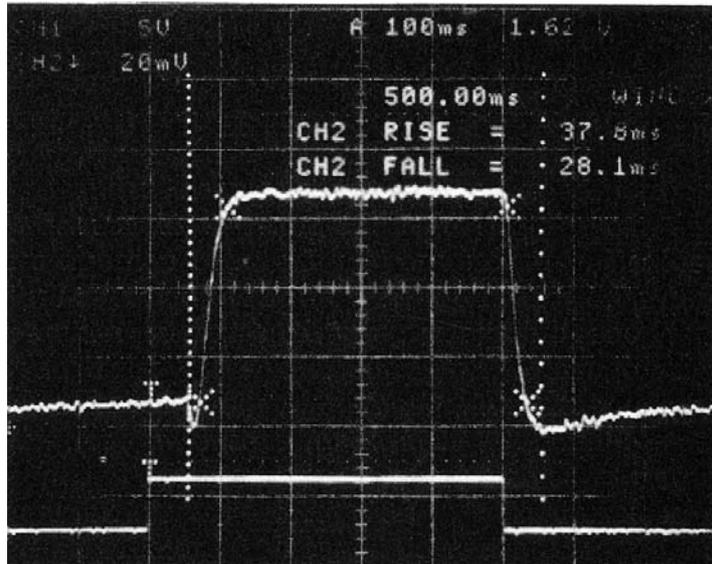


図 2-35 PAL-SLM の時間応答特性

3V,1KHz の駆動条件での位相変調 π の時の応答特性を図 2-35 に示す³⁴⁾。オフからオン状態の時に 38msec、オンからオフ状態の時に 28msec が得られた。デバイスの応答速度と感度は、駆動電圧により影響を受けた。測定は、PAL-SLM を強度変調素子として用い（読み出しレーザーの偏光方向を液晶分子軸の 45 度に設定）、 π 変調に必要な光量を入力した場合の読み出し光強度から応答速度（10-90%上昇時間）を計測した。図 2-36 に示すように、駆動電圧を上昇させると応答速度は向上し、感度は 2V 付近で最良値(π 変調に必要な光量は $20\mu\text{W}/\text{cm}^2$)を得た。一方、フレームレート(30msec)の応答速度を得るには 3V の駆動電圧が必要であった(同 $30\mu\text{W}/\text{cm}^2$)。さらに、4V に駆動電圧を上昇させると 10msec(同 $200\mu\text{W}/\text{cm}^2$)の応答速度を実現できるが、感度が一桁ほど劣化してしまうため、3V 程度での駆動が適正である。

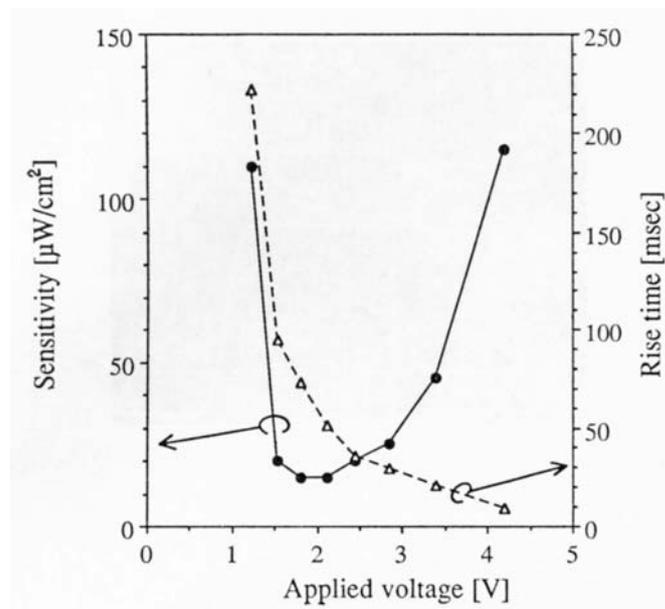


図 2-36 PAL-SLM の駆動電圧と応答速度

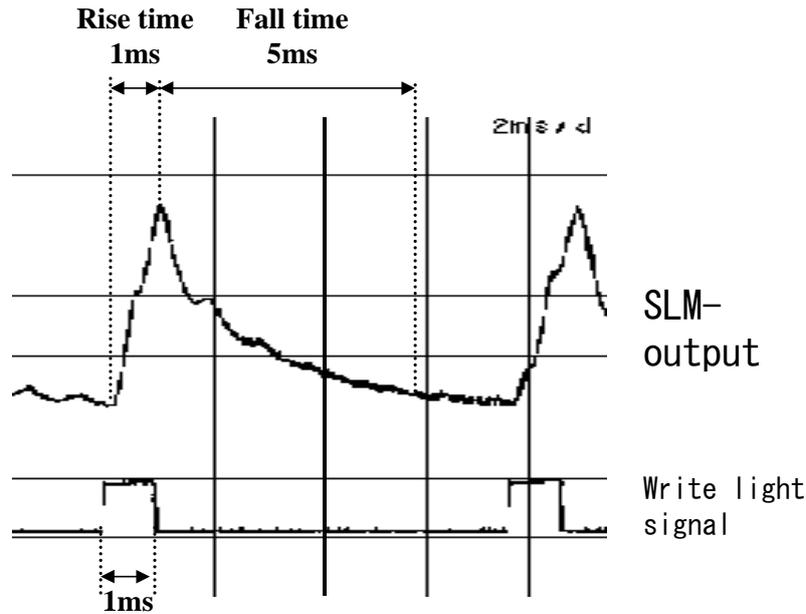


図 2-37 高速型 PAL-SLM の時間応答特性

前述の通り液晶 SLM の応答特性は、駆動電圧によって大きく影響を受ける。それ以外のパラメータとして、液晶の粘性・動作温度・構造などがあげられる。しかし、一般的に低粘性の液晶材料は高速動作に適するものの、 Δn (屈折率異方性)が小さいために変調量が小さくなるという問題点を持つ。さらに、動作温度を上げることによっても Δn が小さくなることから、高速化・変調度・解像度などの SLM の諸特性はトレードオフの関係を持つことが多い。我々は SLM の高速化を目標に、駆動電圧の高電圧化とともに、液晶材料の選定 (低粘性液晶による高速化) や SLM の構造 (a-Si 層、ミラー層、液晶層の厚さ) の最適化を行い、図 2-37 に示すように、ネマティック液晶を用いた SLM において上昇時間 1 msec、下降時間 5msec (π 変調) の高速化を実現した³⁵⁾。ネマティック液晶の場合、上昇時間は駆動電圧の高電圧化が有効となるが、下降時間は液晶の緩和時間に支配的であるため、小さくすることが難しい。しかし、相関器などの応用では、背景差分などの後処理との組み合わせによって、残像の影響はほとんど無視できるため、上昇時間の高速性は、そのまま演算能力の向上として利用できる。

本節では、実際の応用を視野に入れ、安定動作が期待できる空間光変調器として開発された PAL-SLM の、構造・動作原理・特性について述べた。PAL-SLM は並列光情報処理の中で有望な応用と考えられている光相関システムにおいて、重要な要素ある位相変調を行えるデバイスである。次章では、その位相変調特性に焦点を当てて詳細に評価を行い、応用研究サイドに向けた積極的なアピールを行う。

2.6. あとがき

これまでに、世界中の研究機関において様々な空間光変調器が開発されており、我々のグループにおいても、並列光情報処理においてキーデバイスとなる空間光変調器の研究開発に力を入れてきた。本章では我々のグループで開発された MSLM, LC-MSLM, FLC-SLM, PAL-SLM について、その構造・動作原理・基本特性について述べた。

その中で本研究では、浜松ホトニクス(株)の保有する真空管技術を最大限に利用して開発された MSLM における光変調材料であるニオブ酸リチウム (LiNbO_3) の photorefractive 効果や光損傷に起因する最大読み出し光量の限界打破、及び、相反する動作速度と解像度の問題を克服するために改良を行った。具体的には、MSLM における光変調材料を電気光学結晶から液晶に置き換えた LC-MSLM を開発し、その基本特性を評価した。

次章(第3章)において、近年、実応用を見据えた空間光変調器として注目されている液晶空間光変調器について、その実用化に向けたシステム開発の一助となる事を目指し、デバイスの特性についてより詳細な検討を行う。その後、以降の章において、各デバイスの特性を生かした応用事例について詳しく触れることとする。第4章では MSLM の並列光論理演算システム等への応用、及び第5章において光ニューラルネットワークシステムへの MSLM の応用について述べる。続く第6章では液晶空間光変調器 (FLC-SLM, PAL-SLM) の光相関システムへの応用について述べる。

2.7. 第 2 章の参考文献

- 1) T.Hara, N.Mukozaka and Y.Suzuki, "Optical Parallel Logic Operation with Microchannel Spatial Light Modulator", Proc.SPIE, Vol.625, pp.30-34 (1986).
- 2) F.T.S.Yu, Q.W.Song, Y.Suzuki and M.H.Wu, "Application of a microchannel spatial light modulator to real-time joint transform correlation", Proc.SPIE, Vol.963, pp.322-326 (1988).
- 3) F.T.S.Yu, Y.Suzuki and M.H.Wu, "Microchannel Spatial Light Modulator with White Light Processing", Opt. Commun., Vol.63, pp.371-374 (1988).
- 4) M.Hashimoto, K.Kitayama and N.Mukozaka, "Space-variant operations using an optical parallel processor based on polarization encoding", Opt. Lett., Vol.14, pp.384-386 (1989).
- 5) M.Hashimoto, K.Kitayama and N.Mukozaka, "Programmable optical parallel processor based on polarization modulation : Cascade operation", Appl. Opt., Vol.28, pp.4305-4312 (1989).
- 6) M.Hashimoto, K.Kitayama and N.Mukozaka, "Neighborhood operations of optical parallel processor", Jpn. J. Appl. Phys. Part 2, Vol.29, pp.L1256-L1258 (1990).
- 7) M.Ishikawa, N.Mukozaka, H.Toyoda and Y.Suzuki, "Optical associatron: A simple model for optical associative memory", Appl. Opt., Vol.28, pp.291-301 (1989).
- 8) M.Ishikawa, N.Mukozaka, Y.Toyoda and Y.Suzuki, "Experimental studies on learning capabilities of optical associative memory", Appl. Opt., Vol.29, pp.289-295 (1990).
- 9) H.Toyoda, N.Mukozaka, Y.Suzuki and M.Ishikawa, "Adaptive optical processing system with optical associative memory", Appl. Opt., Vol.32, pp.1354-1358 (1993).
- 10) Z.He, K.Hotate and N.Mukozaka, "Selective Image Extraction by Synthesis of the Coherence Function Using Two-Dimensional Optical Lock-in Amplifier with Microchannel Spatial Light Modulator", IEEE Photonic Technol Lett., Vol.9, pp.514-516 (1997).
- 11) Y.Kobayashi, T.Takemori, N.Mukozaka, N.Yoshida and S.Fukushima, "Real-time velocity measurement by the use of a speckle-pattern correlation system that incorporates a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator", Appl. Opt., Vol.33, pp.2785-2794 (1994).
- 12) N.Mukozaka, N.Yoshida, H.Toyoda, Y.Kobayashi and T.Hara, "Diffraction efficiency analysis of a parallel-aligned nematic-liquid spatial light modulator", Appl. Opt., Vol.33, pp.2804-2811 (1994).
- 13) Y.Igasaki, N.Yoshida, H.Toyoda, Y.Kobayashi, N.Mukozaka and T.Hara, "High Speed Parallel Aligned Liquid Crystal Spatial Light Modulator at 180Hz", Opt. Rev., Vol.4, pp.167-169 (1997).
- 14) F.Li, N.Mukozaka, N.Yoshida, Y.Igasaki, H.Toyoda, T.Inoue, T.Hara and Y.Kobayashi, "Phase Modulation Characteristics Analysis of Optically-Addressed Parallel-Aligned Nematic Liquid Crystal Phase-Only Spatial Light Modulator Combined with a Liquid Crystal Display", Opt. Rev., Vol.5, pp.174-178 (1998).
- 15) Y.Igasaki, N.Yoshida, H.Toyoda, T.Inoue, N.Mukozaka, Y.Kobayashi, T.Hara and F.Li, "High Efficiency Electrically-Addressable Phase-Only Spatial Light Modulator", Opt. Rev., Vol.6, pp.339-344 (1999).
- 16) T.Hara, Y.Ooi, T.Kato and Y.Suzuki, "Microchannel Spatial Light Modulator with Improved Resolution and Contrast Ratio", Proc. SPIE, Vol.613, pp.153-157 (1986).
- 17) T.Hara, M.Sugiyama and Y.Suzuki, "A Spatial Light Modulator", Adv. Electron. Electron Phys., Vol.64B, pp.637-647 (1985).
- 18) T.Hara, K.Shinoda, T.Kato, M.Sugiyama and Y.Suzuki, "Microchannel Spatial Light Modulator having the function of image zooming, shifting and rotating", Appl. Opt., Vol.25, pp.2306-2310

- (1986).
- 19) K.F.Hulme, "Oblique-Cut Longitudinal Modulators", IEEE J. Quantum Electron., Vol.QE-7, pp.236-239 (1971).
 - 20) T.Hara, Y.Ooi, Y.Suzuki and M.H.Wu, "Transfer Characteristics of the microchannel spatila light modulator", Appl. Opt., Vol.28, pp.4781-4786 (1989).
 - 21) Y.Suzuki, T.Hara, Y.Ooi and M.H.Wu, "Optical transfer characteristics of microchannel spatial light modulator", Proc.SPIE, Vol.881, pp.245-248.
 - 22) T.Hara, H.Toyoda, Y.Suzuki and M.H.Wu, "Response time consideration for Microchannel Spatial Light Modulator", Proc.SPIE, Vol.754, pp.202-206 (1987).
 - 23) N.Mukozaka, T.Hara and Y.Suzuki, "Microchannel spatial light modulator using liquid crystal for modulating material", Jpn. J. Appl. Phys. Part 2, Vol.29, pp.L1227-L1230 (1990).
 - 24) N.A.Clark and S.T.Lagerwall, "Submicrosecond Bistable Electro-Optic Switching in Liquid Crystals", Appl. Phys. Lett., Vol.36, pp.899-901 (1980).
 - 25) N.A.Clark, M.A.Handschy and S.T.Lagerwall, "Ferroelectric Liquid Crystal Electro-Optics Using Surface Stabilized Structure", Mol. Cryst. & Liq. Cryst., Vol.94, pp.213-233 (1983).
 - 26) G.Moddel. K.M.Johnson, W.Li, A.Rice, L.A.PaganoStauffer and M.A.Handschy, "High-speed binary optically addressed spatial light modulator", Appl. Phys. Lett., Vol.55, pp.537-539 (1989).
 - 27) S.Fukushima, T.Kurokawa, S.Matsuo and H.Kozawaguchi, "Bistable spatial light modulator using a ferroelectric liquid crystal", Opt. Lett., Vol.15, pp.285-287 (1990).
 - 28) R.B.Meyer, "Ferroelectric Liquid Crystals : A Review", Mol. Cryst. & Liq. Cryst., Vol.40, pp.33-48 (1977).
 - 29) R.B.Meyer, L.Liebert, L.Strzelecki and P.Keller, "Ferroelectric Liquid Crystals", J. Phys. (France), Vol.36, pp.L69-L71 (1975).
 - 30) 福田敦夫, 竹添秀男, "強誘電性液晶の構造と物性", コロナ社, pp.15-19 (1990).
 - 31) Y.Kobayashi, T.Takemori, N.Mukozaka, N.Yoshida and S.Fukushima, "Real-time velocity measurement by the use of a speckle-pattern correlation system that incorporates a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator", Appl. Opt., Vol.33, pp.2785-2794 (1994).
 - 32) U.Efron, S.T.Wu and T.D.Bates, "Nematic liquid crystals for spatial light modulators : recent studies", J. Opt. Soc. Am. B, Vol.3, pp.247-252 (1986).
 - 33) S.T.Wu, U.Efron and T.Y.Hsu, "Near-infrared-to-visible image conversion using Si liquid-crystal light valve", Op. Lett., Vol.13, pp.13-15 (1988).
 - 34) N.Mukozaka, N.Yoshida, H.Toyoda, Y.Kobayashi and T.Hara, "Diffraction efficiency analysis of a parallel-aligned nematic-liquid spatial light modulator", Appl. Opt., Vol.33, pp.2804-2811 (1994).
 - 35) Y.Igasaki, N.Yoshida, H.Toyoda, Y.Kobayashi, N.Mukozaka and T.Hara, "High Speed Parallel Aligned Liquid Crystal Spatial Light Modulator at 180Hz", Opt. Rev., Vol.4, pp.167-169 (1997).

第3章 液晶空間光変調器に関する詳細な検討

3.1. まえがき

前章では、他のグループで開発されてきた空間光変調器の問題点を解決すべく、我々のグループで開発された空間光変調器 (MSLM・LC-MSLM・FLC-SLM・PAL-SLM) について、その構造・動作原理・基本特性について述べた。その中でも液晶空間光変調器は、その入力感度 ($0.1-0.6 \mu\text{J}/\text{cm}^2$)・解像度 (50-100 lp/mm)・応答速度 (0.1-30 ms)・低電圧駆動等から、性能と使い易さにおいて並列光情報処理への応用に有望であると考えられる。

光変調にはいくつかの方式が考えられ、強度を変調する場合には必ずロスが発生するが、光の位相をうまく使うことによりそのロスを最小限に抑えることが可能となる¹⁾。そこで、光相関システム²⁾・CGHシステム³⁾・光インターコネクション⁴⁾・位相コントラスト法⁵⁾などの光の位相を積極的に利用しようとするシステムにおいては、高効率の位相変調素子が求められている。さらに、光学システム中の光の位相を補償することにより、その性能アップを図ろうとする位相補償の研究も盛んになっている^{6),7)}。このような状況の中で、PAL-SLMは光の位相のみを変調することができる有望なデバイスであると考えられる。そこで本章では、PAL-SLMの位相変調特性を評価すると共に、これらのシステムで重要な特性となる回折効率に関して理論的な解析も含めて議論する⁸⁾ことにより、今後の光の位相を利用した応用システムの開発における重要なデータを示すことを目指す。

また、実応用システムを構築する場合には、コンピュータシステムとの連携は避けて通れない点であり、電子システムとの整合性も重要な要素となることから、電気書き込み型の空間光変調器が望まれている。しかしながら、PAL-SLMは光アドレス型の空間光変調器であるために、電子システムとの親和性を考慮すると問題点が残る。一方、LCDパネルによって位相変調を行おうとする試みもなされているが^{3),9),10)}、位相変調量が 2π を超えるようなものは存在せず、光の位相を積極的に利用しようとする応用には向かないことが明らかである。そこで、コンピュータシステムからの制御により、任意の位相パターンを制御できる電気書き込み型の空間光変調器として、LCDパネルにより強度変調されたパターンによりPAL-SLMを制御する方法を検討し、その位相変調特性について議論する^{11),12)}。ここで、電気書き込み型とすることにより走査型の制御が介在することから、2次元的な変調特性への影響が危惧される。そこで、1KHzの高速フレームレートで撮像可能なCMOSイメージセンサを利用して、2次元的な時間応答特性を評価し¹³⁾、実応用に使える空間光変調器の開発を目指した。

3.2. PAL-SLMによる位相変調特性

3.2.1. はじめに

前書きで述べたとおり、光の位相を積極的に利用しようとする応用に向けて空間光位相変調器が求められている。本研究においてもその要求にこたえるべく PAL-SLM を開発した。さらに、第 6 章では実際に光相関システムに応用することにより、PAL-SLM の有効性を示す。ここでは PAL-SLM について、その主たる特性である位相変調特性について評価を行うと共に、回折効率に関する理論解析も含めて議論し、これらの応用に展開するための一助となることを目指す。

3.2.2. PAL-SLMの構造及び動作原理

PAL-SLM の構造及び動作原理については、既に、第 2 章において述べているのでそちらを参照されたい。

PAL-SLM は複数の層構造を持つため、a-Si:H・誘電体多層膜ミラー・液晶の 3 層を直列接続した構造と考られる。直列の等価回路に基づいて回路方程式を示すと下記のようになる。

$$V_{a-Si:H} = R_{a-Si:H} I_{r_{a-Si:H}} = \frac{1}{C_{a-Si:H}} \int I_{c_{a-Si:H}} dt \quad (3-1)$$

$$V_{DMi} = R_{DM} I_{r_{DM}} = \frac{1}{C_{DM}} \int I_{c_{DM}} dt \quad (3-2)$$

$$V_{LCi} = R_{LC} I_{r_{LC}} = \frac{1}{C_{LC}} \int I_{c_{LC}} dt \quad (3-3)$$

$$V = V_{a-Si:H} + V_{DMi} + V_{LC} \quad (3-3)$$

$$I_{r_{a-Si:H}} + I_{c_{a-Si:H}} = I_{r_{DM}} + I_{c_{DM}} = I_{r_{LC}} + I_{c_{LC}} \quad (3-4)$$

ここで、 $V_{a-Si:H}$ 、 V_{DM} 、 V_{LC} 、はそれぞれの層にかかる電圧値、 I_r 、 I_c はそれぞれの層の抵抗成分(r)および容量(c)に流れる電流を示す。上式のように、光入力による a-Si:H の抵抗率変化が、液晶層に印加される電圧を制御することで光アドレス型の光変調器が実現される。この変化率はそれぞれの層への電圧の分圧特性に影響を受けるため、印加する電圧周波数、各層の膜厚などにより、SLM の特性(解像度・速度・入出力特性)を最適設計することができる。

3.2.3. PAL-SLMの位相変調特性

図 3-1 に示す構成で、PAL-SLM の位相変調特性を計測した⁸⁾。PAL-SLM をマイケルソン干渉計のミラーの一つとして組み込み、得られる干渉縞を CCD カメラで撮像しコンピュータにより解析を行い位相変調量を求めた。PAL-SLM を駆動波形 1.9V 及び 3.0V の矩形波とし、液晶分子に平行に直線偏光を入射させた場合と、同じく 3.0V (1KHz) 駆動で入射光の偏光方向

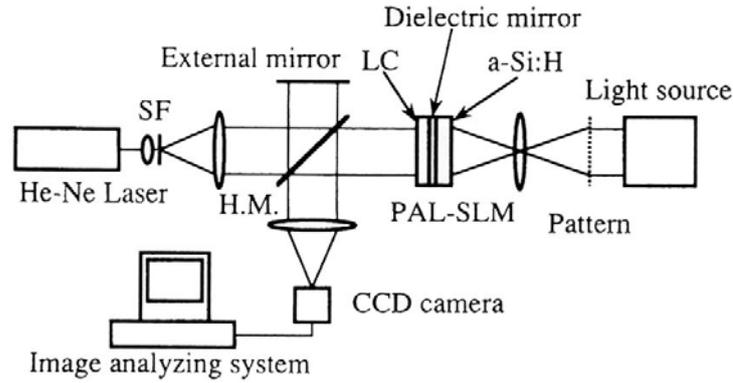


図 3-1 位相変調測定光学系

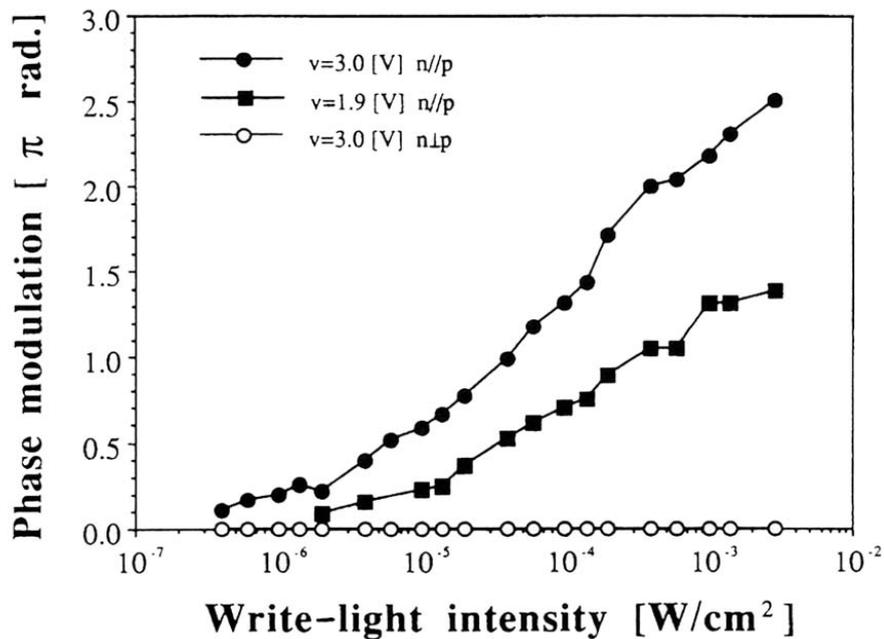


図 3-2 PAL-SLM の位相変調特性

が液晶分子に直交する場合について、書き込み光量を変化させて位相変調量を計測した結果を図 3-2 に示す⁸⁾。液晶の配向方向と入射光の偏光方向が直交する場合には、位相変調が行われていないことが確認された。液晶の配向方向と入射光の偏光方向が平行の場合に、駆動電圧を高くすると位相変調量が増加する。しかしながら、駆動電圧の上限が存在することが確認されている。これは、a-Si:H のダークインピーダンスが液晶に対して高くないことから、デバイスに印加する電圧を高くしていくと、書き込み光が無いダーク状態においても、液晶と a-Si:H のインピーダンス比により液晶に印加される電圧が、液晶の動作電圧を越えてしまうことによる。位相変調量と感度及び動作速度を全体的に考慮すると、3V 程度で駆動することが望ましい。

3.2.4. PAL-SLMの回折効率

干渉系により生成される様々な空間周波数の正弦強度分布を書き込みパターンとして、PAL-SLM の正弦回折格子における回折効率の評価を行った。図 3-3 に、その実験システムを示す⁸⁾。正弦強度分布は波長 632.8nm の He-Ne レーザー光による Mach-Zehnder 干渉系により生成され PAL-SLM に入力される。干渉系に入射するレーザー光の強度を ND (Neutral Density) フィルターにより可変して位相変調量を制御した。PAL-SLM の読み出し側にも He-Ne レーザーを用い、焦点距離 2000mm のレンズで、フランフォーハー回折パターンを得た。0 次・1 次・2 次・3 次の各回折光強度を光パワーメーターにより計測した。回折効率は、書き込み光強度がゼロの時の 0 次回折光強度に対する、各書き込み光強度における 1 次回折光強度比とした。

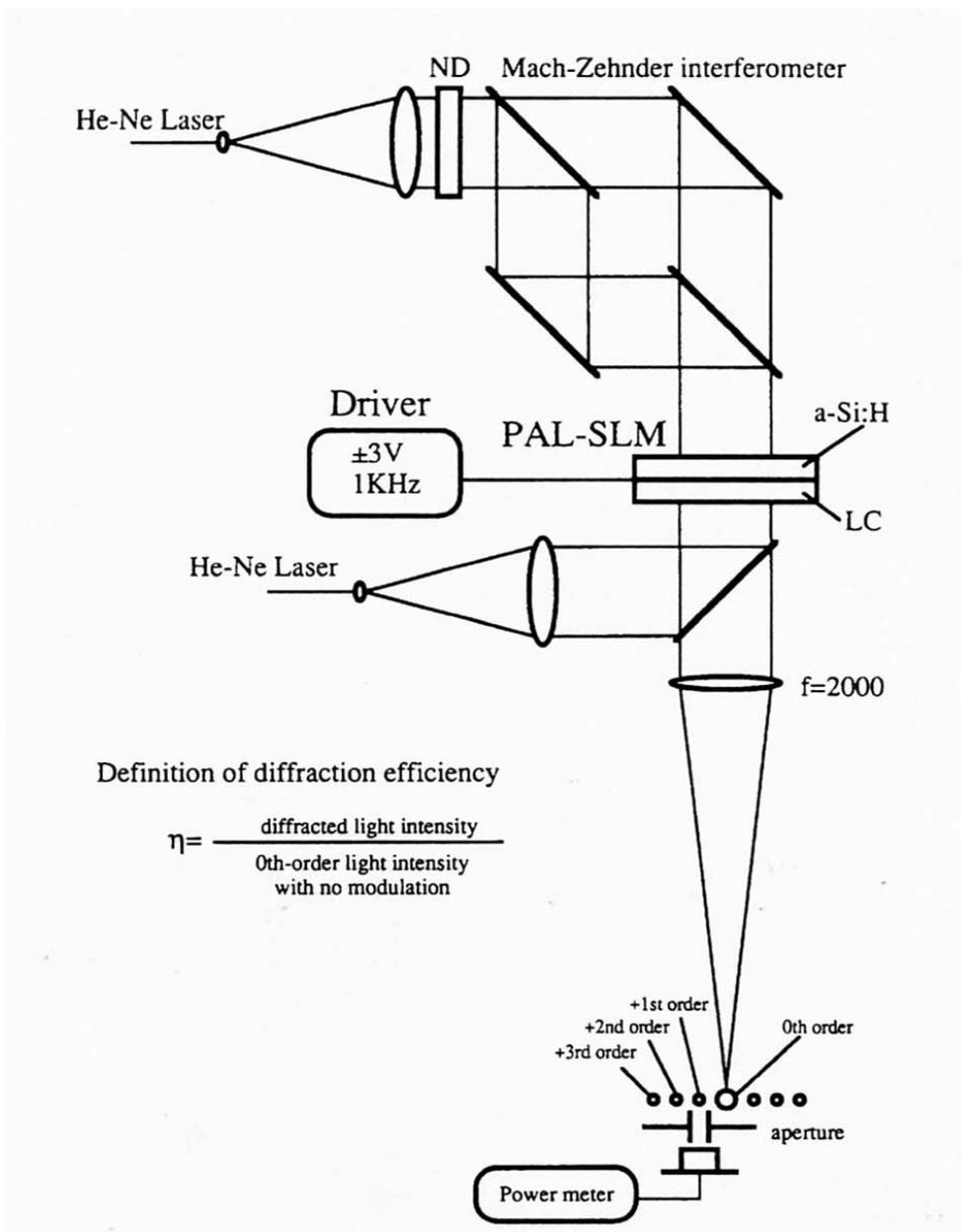


図 3-3 回折効率実験光学系

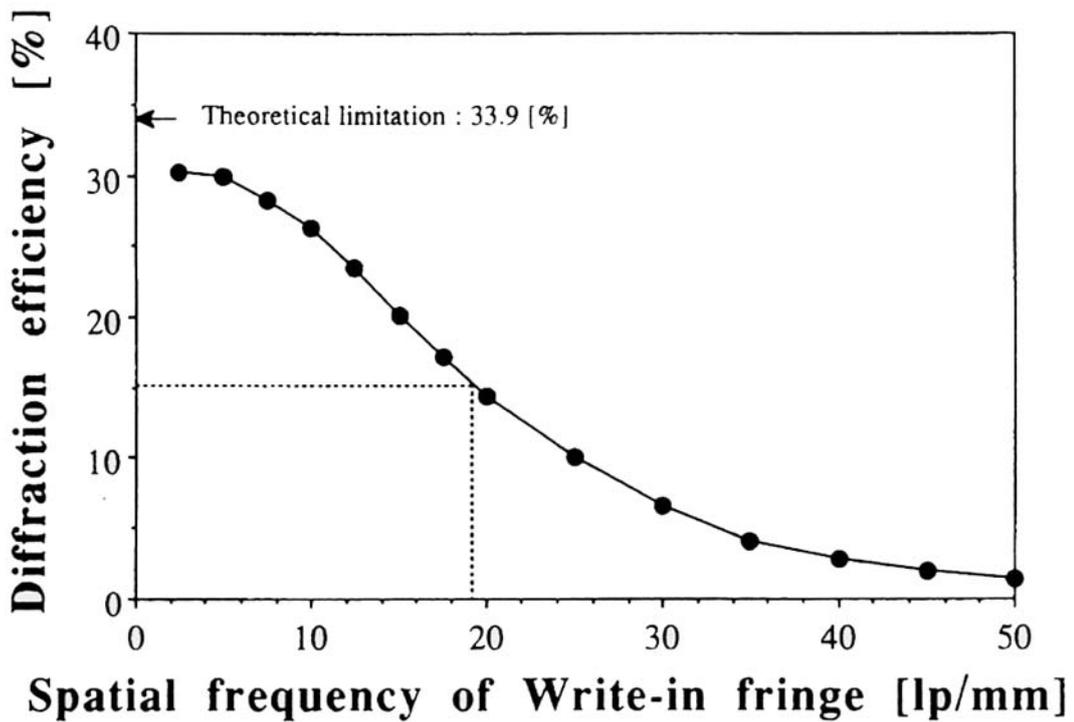


図 3-4 PAL-SLM の回折効率特性

駆動電圧 3.0V,1KHz において、正弦書き込みパターンの空間周波数を変化させ、各周波数において 1 次回折光強度が最大となるように書き込み光強度を調整して各周波数における最大回折効率を測定した結果を図 3-4 に示す⁸⁾。その結果、5 lp/mm 以下の空間周波数においては、回折理論限界の 33.9%に近い回折効率を得られた。最大回折効率の半分の回折効率を得られる周波数は 20 lp/mm であった。

液晶層に形成される正弦位相格子の位相強度に対する、0 次・1 次・2 次・3 次回折光強度を計測し、正弦位相格子の空間周波数を 5/10/20 lp/mm について回折効率を評価した結果を図 3-5 に示す⁸⁾。その結果、回折効率は空間周波数が高くなるほど低下し、最大回折効率の得られる位相変調量は空間周波数が高くなるほど大きくなった。

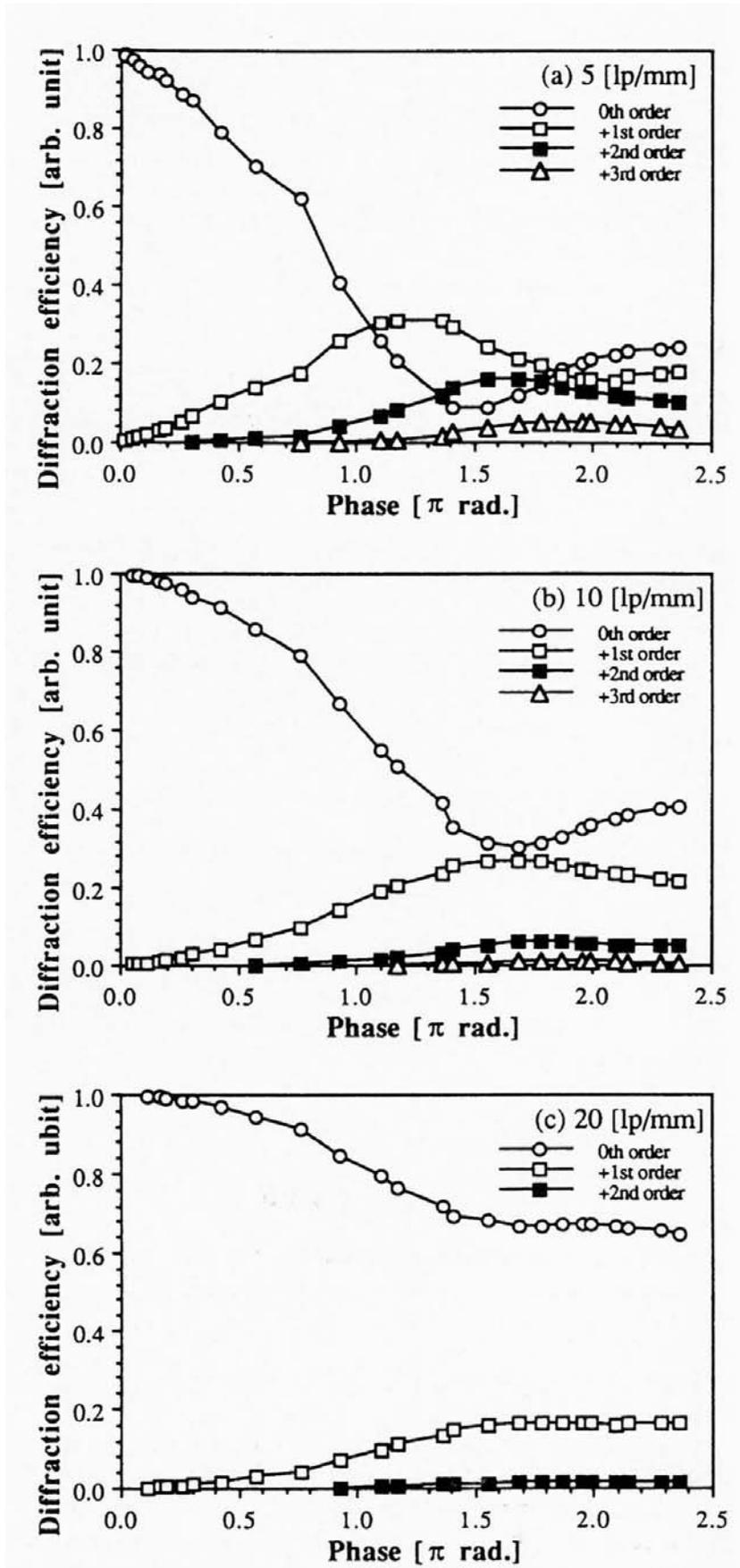


図 3-5 PAL-SLM の各空間周波数における回折効率

3.2.5. PAL-SLMにおける回折効率の解析

図 3-6 に示すような正弦状に屈折率が周期構造をなしている場合を考える⁴⁾。この時、この正弦周期構造から回折される光束 Φ_m は次式で表される¹⁴⁾。

$$\frac{d\Phi_m}{dz} + \kappa(\Phi_{m-1} - \Phi_{m+1}) = -j \frac{mQ}{2T} (m2a)\Phi_m \quad (3-5)$$

$$\kappa = \pi \frac{\Delta n}{\lambda_0}$$

$$Q = \frac{2\pi\lambda_0 T}{n_0 \Lambda^2}$$

$$a = \frac{-n_0 \kappa_0 \sin \theta}{K}$$

$$K = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

$$n(x) = n_0 + \Delta n \sin(Kx)$$

ただし、 λ は読み出し光の中心波長、 T は液晶層の厚さ、 Λ は周期構造の周期、 K は周期構造ベクトル、 θ は読み出し光の入射角度、 m は回折光の次数を表す。

ここで、 $\Lambda=50 \mu\text{m}$ (空間周波数 20 lp/mm に相当)、 $n_0=1.6$ (液晶の屈折率)、 $\lambda_0=0.6328 \mu\text{m}$ (He-Ne レーザ光の波長)、 $T=16 \mu\text{m}$ (反射型のため液晶層の厚さの 2 倍) として Q パラメータを計算すると、0.0159 となり、1 より十分に小さいためラマン・ナス条件を満たすことが確認された。よって、これから議論する回折現象はラマン・ナス回折として扱うことができる。そこで、式 (3-5) は次式のとおり簡単化できる。

$$\frac{d\Phi_m}{dz} + \kappa(\Phi_{m-1} - \Phi_{m+1}) = -j \frac{mQa\Phi_m}{T} \quad (3-6)$$

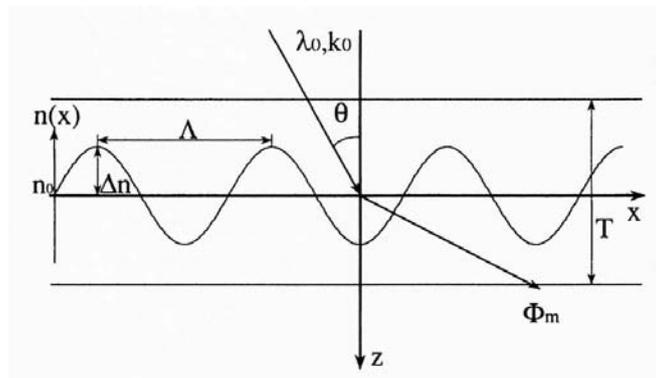


図 3-6 正弦周期構造のモデル図

さらに、 $z=0$ において、 $\Phi_0=1$ 、 m が0以外のときの $\Phi_m=0$ なる境界条件を用いて解くと、

$$\Phi_m(z) = \exp\left(-j\frac{mQaz}{2T}\right) j_m\left(\frac{4\kappa T}{Qa} \sin\frac{Qaz}{2T}\right) \quad (3-7)$$

となる。ここで、 J_m は m 次のベッセル関数を表す。ここで、 $z=T$ における m 次の回折光強度が回折効率となり、次式で表される。

$$\eta_m = |\Phi_m|^2 = J_m^2 2\kappa T \operatorname{sinc}\left(\frac{Qa}{2}\right) \quad (3-8)$$

ここで、読み出し光の入射角度が周期構造に対して垂直であれば $a=0$ となり、式(3-8)は次式となる。

$$\eta_m = J_m^2(2\kappa T) = J_m^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (3-9)$$

$$2\kappa T = \frac{2\pi\Delta n T}{\lambda_0} = \frac{\Delta\phi}{2}$$

ただし、 $\Delta\phi$ は周期構造を透過する時の位相変調量を表す。以上のように、正弦周期構造による m 次の回折効率 η_m は、 m 次のベッセル関数 J_m によ表されることがわかる。

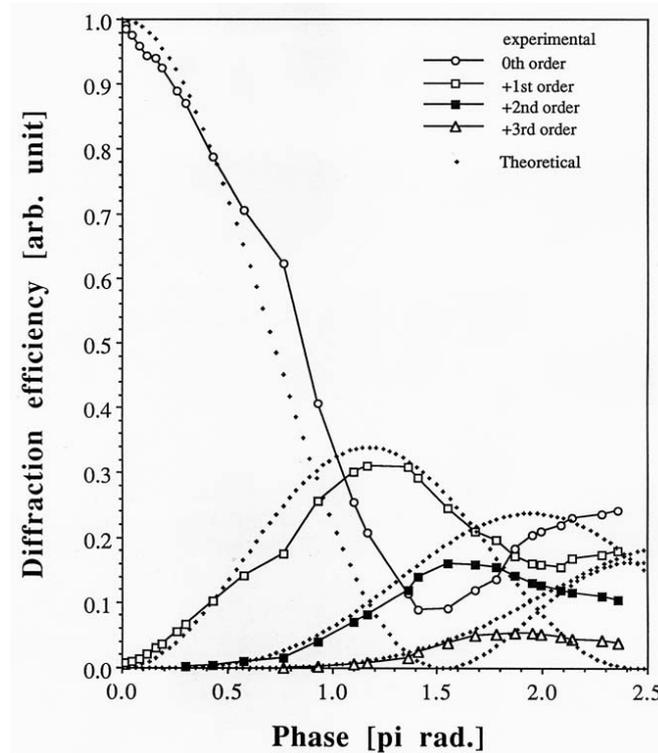


図 3-7 回折効率の実験結果と理論解析結果

空間周波数が 5 lp/mm ($\Lambda=200\ \mu\text{m}$) の場合について、式 (3-9) により計算された 0 次・1 次・2 次・3 次回折効率と、それに対応する実験結果を併せて図 3-7 に示す⁸⁾。その結果、位相変調量が少ない領域においては実験結果と理論解析結果はよく一致しているが、位相変調量が大きくなるに従って実験結果と理論解析結果に差が生じている。原因として考えられるのは、PAL-SLM の入出力特性が非線型であるために、正弦パターン入射光に対して、液晶層に生成されるべき正弦屈折率分布に歪が生じていると考えられる。さらに、PAL-SLM の MTF 特性により、高周波成分が減衰していることが影響しているとも考えられる。

そこで、MTF 特性について考察するため図 3-8 に、空間周波数 5・10・20 lp/mm 時の 1 次回折光の回折効率と理論曲線を示す。解像度が高くなるにつれてピーク位置が右にシフトしているのがわかる。横軸の位相変調量は、MTF=1.0 の場合について求めた値であるので、MTF 特性が位相変調量の減少する方向に働いていることを示す。また、ピーク値が減少していることは、位相変調量が多くなるほど非線型入出力特性による歪が大きくなっているためと考えられる。そこで、入力に正弦分布を与えた場合に、PAL-SLM の入出力特性から液晶層に生じるであろう屈折率分布を求め、FFT によるスペクトル解析を行った結果を図 3-9 に示す⁸⁾。この結果から、位相変調量が大きくなるほど 1 次成分以外の高次成分が大きくなり、正弦格子が歪んでいることが明らかである。この歪みによりピーク値が減少していると考えられる。

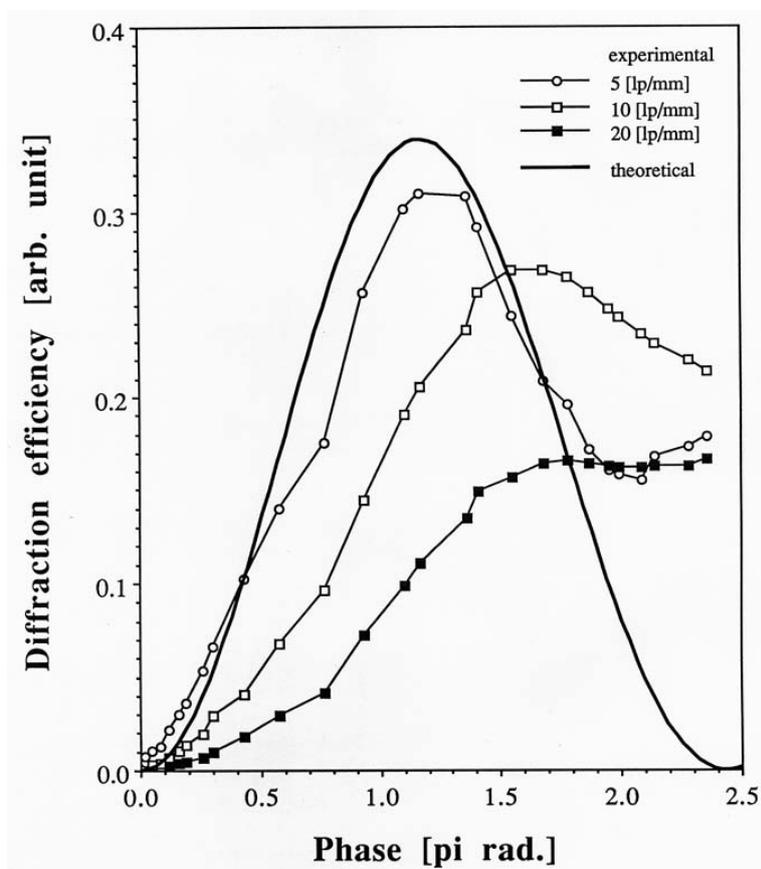


図 3-8 1 次回折効率の実験結果と理論解析結果

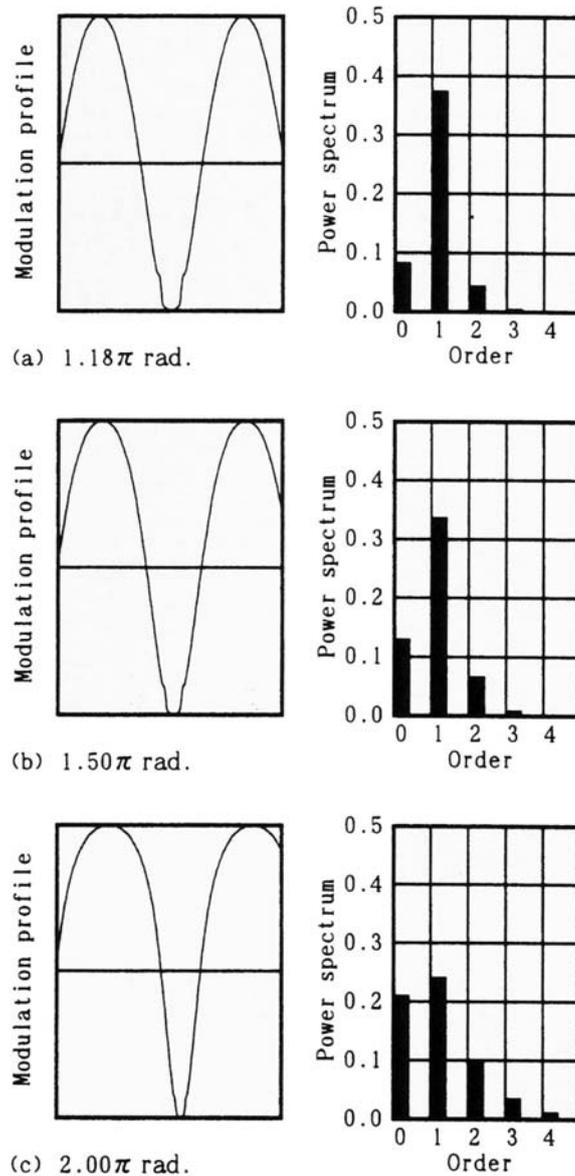


図 3-9 位相分布歪の FFT 解析結果

さらに、入出力特性の影響について考察するために、数値計算によるシミュレーションを行った。具体的には、スペクトル解析のときと同様に正弦分布を PAL-SLM に与えた場合に生じるであろう位相分布を求め、FFT によるフーリエ変換を行った。正弦分布の振幅を変化させることにより、各入射光量に相当する位相振幅を与え計算を繰り返し行った。5 lp/mm の時の結果を、図 3-10 に示す⁸⁾。また、MTF 特性が位相変調量を減少させる方向に働くものと考え、その分正弦分布の振幅を減らして計算を行った結果を図 3-11 に示す⁸⁾。ただし、そのときの MTF は回折効率の理論限界値 33.9% に対する、5 lp/mm 時の回折効率最大値 31.0% の比 $31.0/33.9=0.91$ とした。MTF 特性を考慮したシミュレーション結果と実験結果はよく一致し、仮定が正しいことが明らかとなった。しかしながら、位相変調量が 2π 付近からは、まだ理論値と実験値は離れており、今後の検討課題である。

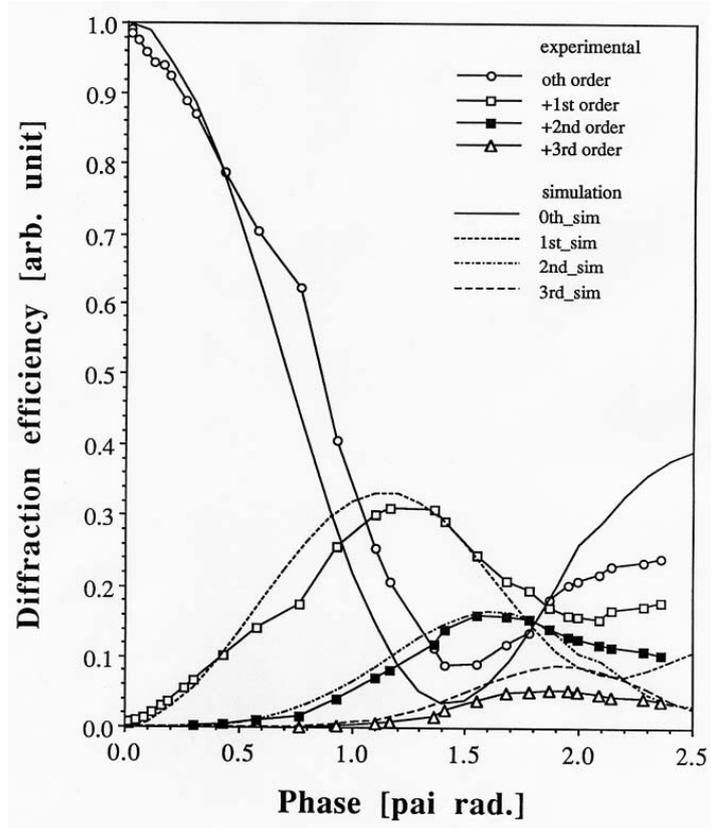


図 3-10 MTF=1.0 のシミュレーション結果

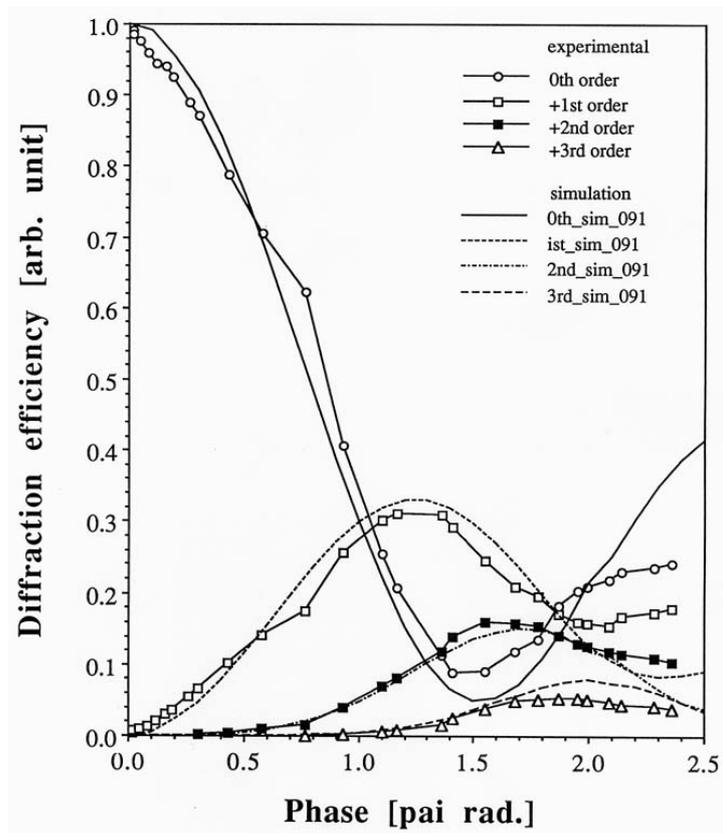


図 3-11 MTF=0.91 のシミュレーション結果

3.3. LCD結合型PAL-SLMによる位相変調特性

3.3.1. はじめに

光の位相を積極的に利用しようとするシステムにおいて、高効率の位相変調素子がキーデバイスとして求められている。本研究においてもその要求にこたえるべく PAL-SLM を開発し、その特性について詳細な評価を行ってきた⁸⁾。しかしながら、PAL-SLM は光アドレス型の空間光変調器であるために、電子システムとの親和性を考慮すると問題点が残る。一方、LCD パネルによって位相変調を行おうとする試みもなされているが、位相変調量不足や画素構造による回折ノイズといった問題点を抱えていた。そこで、LCD パネルと PAL-SLM を組み合わせることにより、それらの問題点を克服することを考えた。

本研究では、LCD と PAL-SLM を組み合わせた電気アドレス型の位相変調素子を開発すると共に位相変調特性の評価を行い、その有効性について議論する。

3.3.2. LCD結合型PAL-SLMの構成

図 3-12 の外観写真が示すように¹²⁾、LCD 結合型 PAL-SLM は電気アドレス型の液晶パネルと PAL-SLM をリレーレンズで結合した構造を持つ。液晶パネル (LCD) には 640×480 画素の VGA 液晶パネル (SONY 製 LCX012BL) を用いた。最大コントラスト比は 250 : 1、画素ピッチが縦横共に 41.4 μm 、画素の開口率が 69%、有効画素エリアの対角サイズが 1.3 インチである。

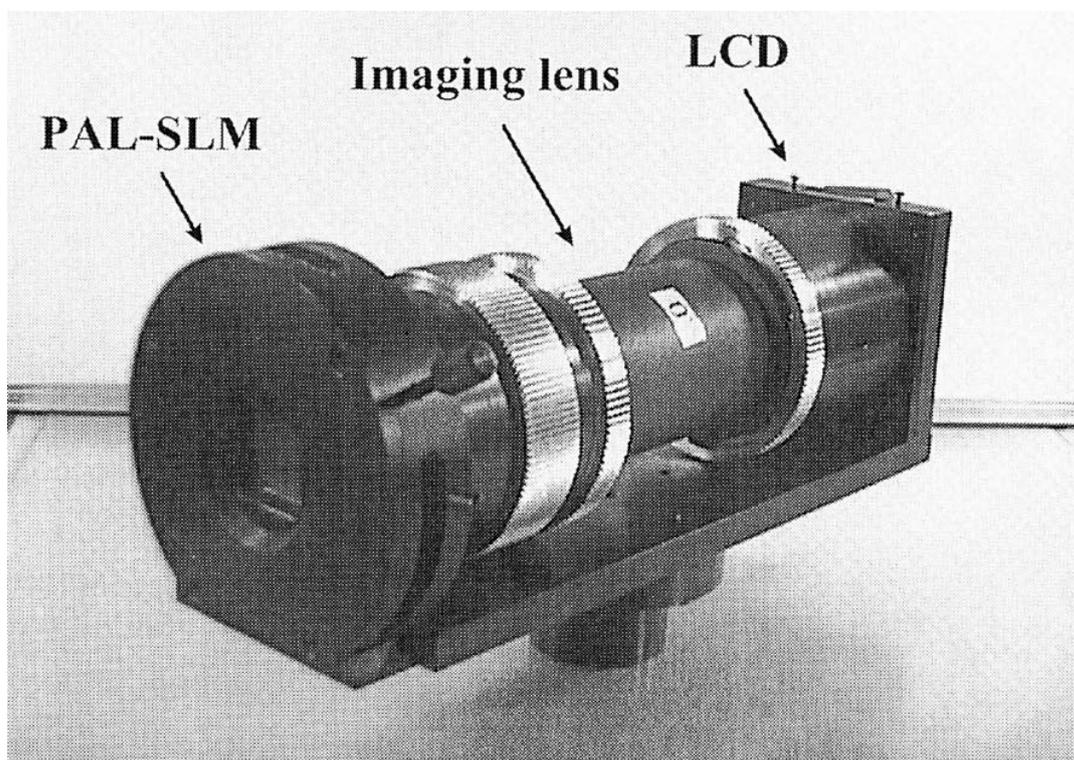


図 3-12 LCD 結合型 PAL-SLM の外観写真

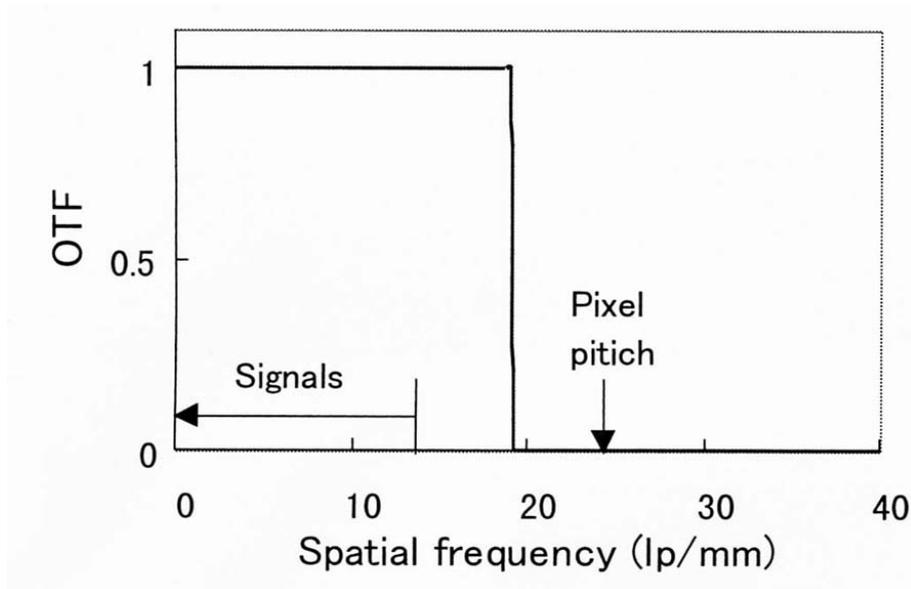


図 3-13 リレーレンズの光学伝達関数 (OTF)

LCD と PAL-SLM を結合するリレーレンズは 1 : 1 結像タイプで、LCD で表示される画像パターンを正確に伝達すると共に、LCD の画素周期構造からの回折ノイズを排除できるように特別に設計されたテレセントリック型で 8 枚構成のレンズである。波長 680nm のレーザーダイオードからの光を平行光にコリメートして、レンズに平行に入射させた場合の光学伝達関数 (OTF) を図 3-13 に示す¹²⁾。LCD パネルの画素ピッチは 24 lp/mm に相当するが、その周波数領域の OTF は 0 となっており伝達されない。対して、LCD パネルで表示できる画像パターンの最高周波数は 12 lp/mm であり、その領域での OTF は 1 なので効率よく書き込み画像が伝達される。

3.3.3. LCD結合型PAL-SLMの位相変調特性

図 3-14 に LCD 結合型 PAL-SLM の実験光学系を示す¹²⁾。書き込みには波長 680nm のレーザーダイオードを使用し、読み出し光には He-Ne レーザーを用いた。PAL-SLM の駆動条件は全ての実験において、駆動電圧 2.5V、駆動周波数 1KHz で行った。PAL-SLM の書き込み光強度に対する位相変調特性を評価するために、強度変調モードにより書き込み光強度と読み出し光強度の関係を測定した。このように測定された読み出し光強度 I と位相変調量 ϕ の関係は次式で表される。

$$I = (I_{\max} - I_{\min}) \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right) + I_{\min} \quad (3-10)$$

ただし、 I_{\max} と I_{\min} は測定された読み出し光強度の最小値と最大値を表す。この関係式から、書き込み光強度と位相変調量の関係を求めた結果を図 3-15(a)に示す¹²⁾。

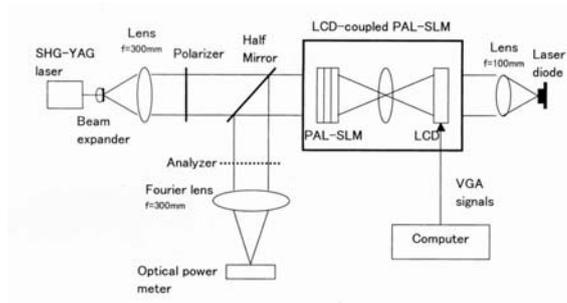


図 3-14 LCD 結合 PAL-SLM 実験系

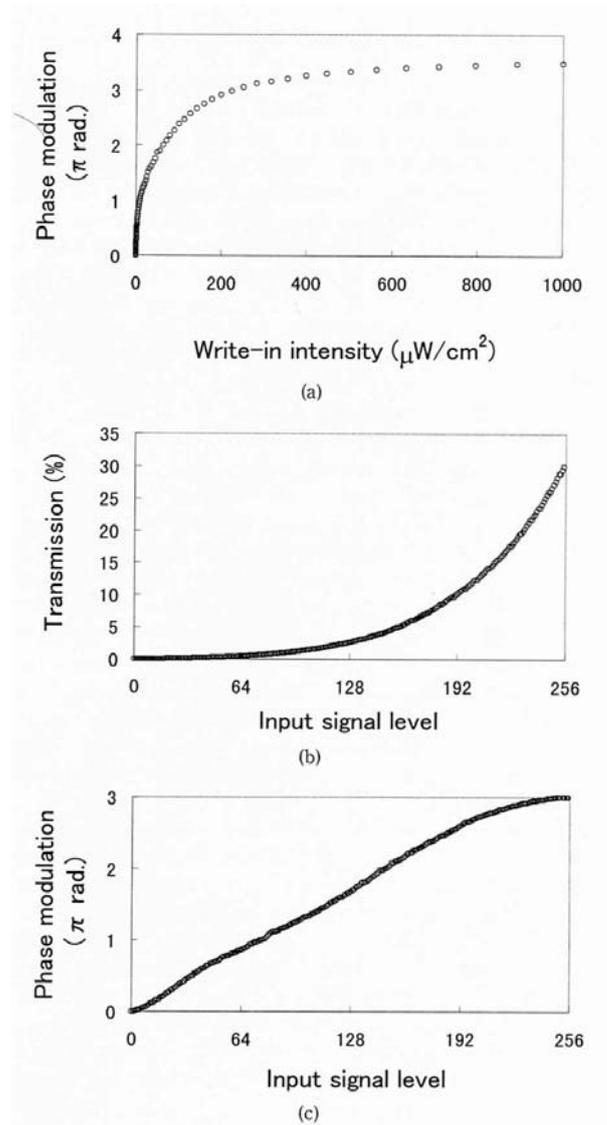


図 3-15 LCD 結合型 PAL-SLM の位相変調特性

LCD の強度変調特性を評価するためにコンピュータ上で指定する書き込みレベル 0 から 255 に対する LCD の透過率を図 3-15(b)に示す¹²⁾。LCD と PAL-SLM を結合した場合の位相変調特性を図 3-15(c)に示す¹²⁾。横軸がコンピュータ上で指定する LCD への書き込みレベル 0 から 255 を示し、縦軸は PAL-SLM により変調された位相変化量を示す。

図 3-15 から明らかなように、PAL-SLM・LCD とともに非線型な特性を持っているが、それらを組み合わせることにより、それぞれの非線型性を打ち消しあって線型に近い位相変調特性が得られていることがわかる。LCD 結合型 PAL-SLM において、532nm の波長においては 3π 以上の位相変調が得られ、可視域全般でも 2π 以上の位相変調が得られることを確認した。

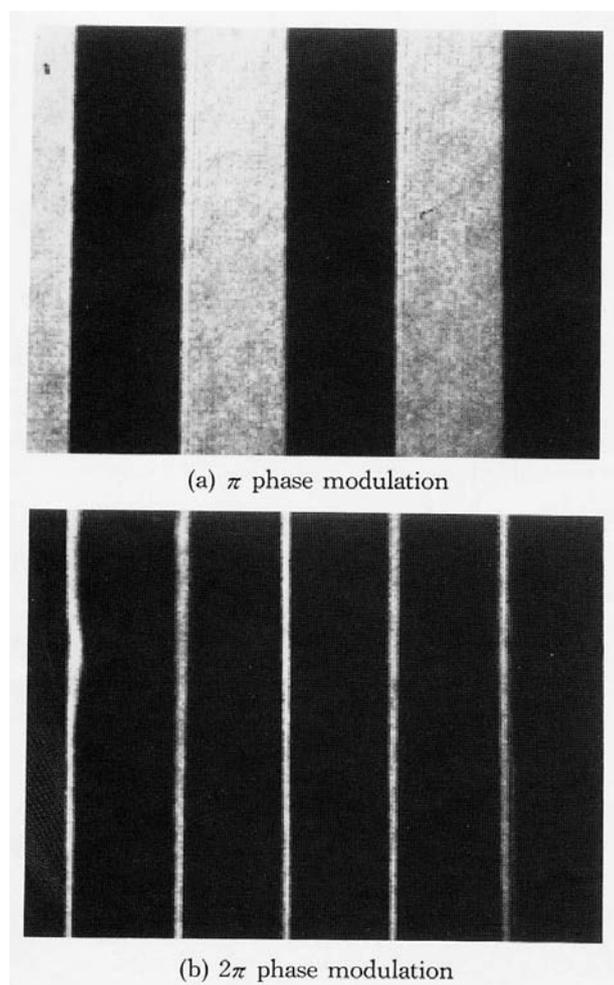


図 3-16 LCD 結合型 PAL-SLM における 2 値位相格子の強度読み出し画像

3.3.4. 2 値位相回折格子による回折効率の解析

2π の位相変調を直接確認するために、PAL-SLM を強度変調モードで動作させ、0.75 lp/mm の 2 値格子を LCD に表示し、PAL-SLM の読み出し画像を CCD カメラで観察した。LCD に何も書き込まないダーク状態で読み出し光強度が 0 になるように駆動電圧 3.0V 近辺で調整する。その後、LCD に表示するレベルを変える事により書き込みレベルを上げていくと、読み出し光強度がピークに達する。このときが π 変調であり、そのときの読み出し画像を図 3-16(a) に示す¹¹⁾。さらに書き込みレベルを上げていくと全体がダーク状態になり、 2π 変調を確認する。このときの読み出し画像を図 3-16(b) に示す¹¹⁾。図 3-16(b) で観察される細い線は 2 値回折格子が不完全であるためである。その原因については後ほど議論する。

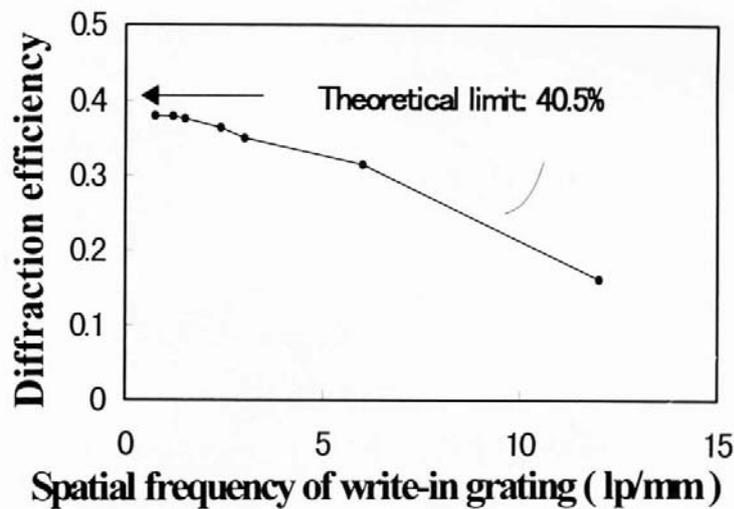


図 3-17 LCD 結合型 PAL-SLM の空間解像度特性

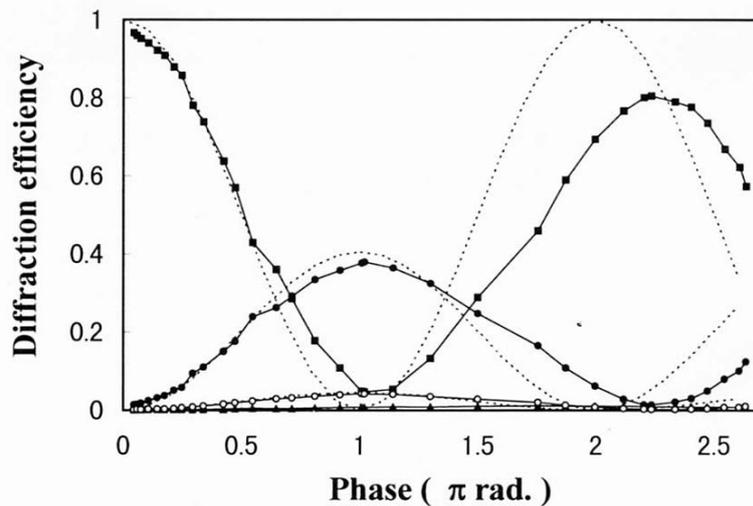


図 3-18 LCD 結合型 PAL-SLM の回折効率特性

LCD に表示する 2 値回折格子の空間周波数を変えながら回折効率を測定した。回折効率は PAL-SLM の時と同様に、非変調時の 0 次回折光強度に対する、変調時の 1 次回折光強度の比とした。図 3-17 に 2 値回折格子の空間周波数に対する 1 次回折光の回折効率を示す¹¹⁾。0.75 lp/mm における回折効率が最も高く 38%で、2 値回折格子における理論回折効率 40.5%に近い値が得られた。回折効率は空間周波数が高くなるほど減少し 12 lp/mm において 16%であった。

LCD に表示する 2 値回折格子の空間周波数を 0.75 lp/mm に固定し、位相変調量を変えながら 0 次・1 次・2 次・3 次回折効率を測定した結果を図 3-18 に示す¹¹⁾。デューティ比が 50%の 2 値回折格子による位相変調透過率は次式で与えられる。

$$t(x) = \exp \left[j\phi \text{rect} \left(\frac{2x}{d} \right) \otimes \text{comb} \left(\frac{x}{d} \right) / d \right] \quad (3-11)$$

ここで、 d は 2 値回折格子の周期、 ϕ は位相変調量、 \otimes コンボリューション演算を表す。式 (3-11) で表現される位相分布に対する回折現象はフーリエ変換により求められ、その結果を図 3-18 の実験結果に併せて示した¹¹⁾。その結果、位相変調量が π を超えるあたりから実験値と理論値の差が大きくなっている。

そこで、図 3-19 に示した構成でシミュレーションを行った¹¹⁾。シミュレーションでは、LCD のコントラスト比、リレーレンズの MTF、PAL-SLM の MTF・非線型性・不均一性を考慮した。シミュレーション結果と実験結果を併せて図 3-20 に示す¹¹⁾。図から明らかなように、LCD 結合型 PAL-SLM を構成する各部分の影響を考慮した結果、理論解析結果と実験結果がよく一致した。

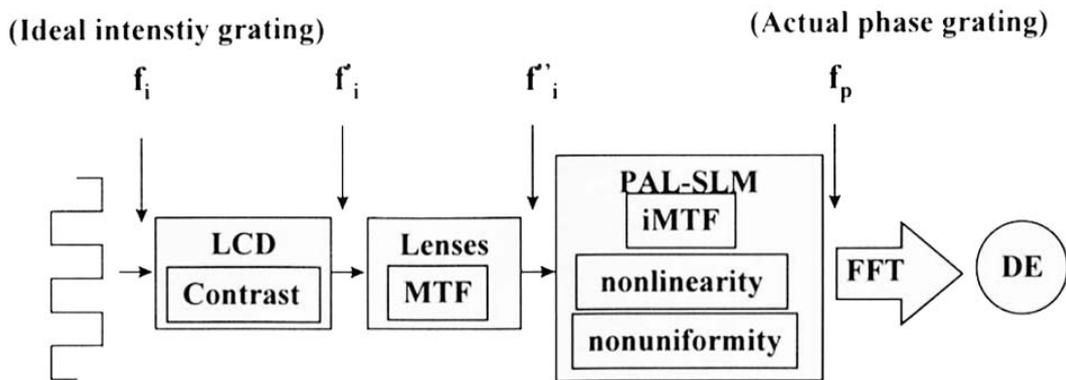


図 3-19 シミュレーション概念図

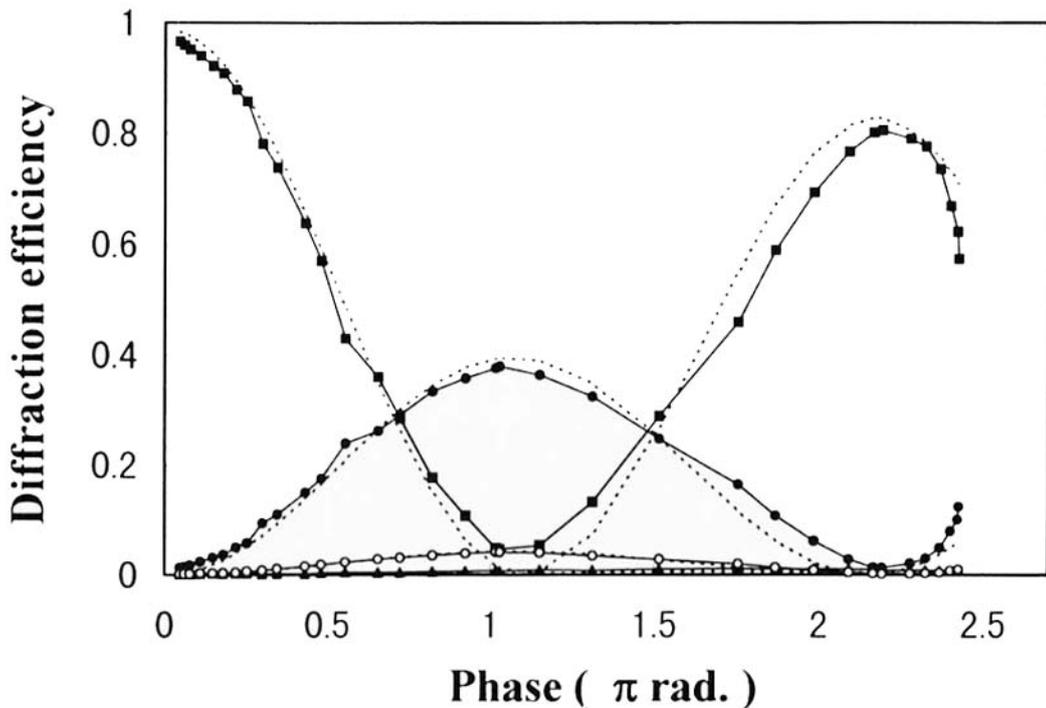


図 3-20 シミュレーション結果と実験結果

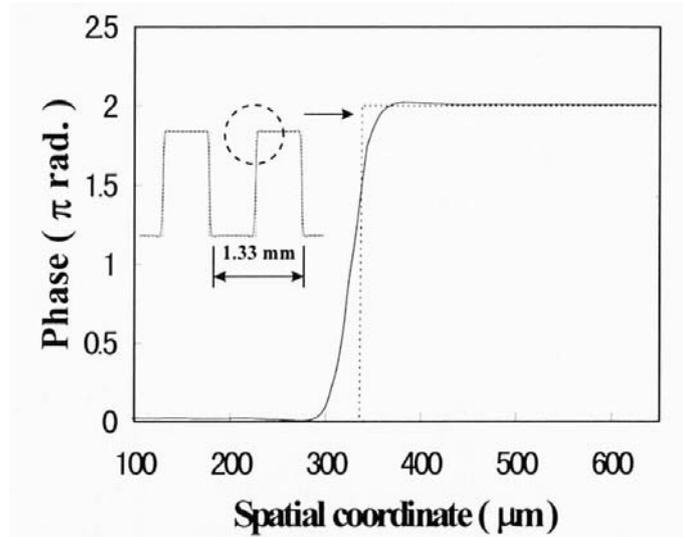


図 3-21 シミュレーションによる 2 値位相格子の位相分布

さらに、図 3-21 に位相変調量を 2π とした時の本シミュレーションで得られた位相回折格子の位相分布を示す¹¹⁾。ここで示された位相歪により、図 3-16(b)に現れた位相変調量 0π と 2π の間の細かい線が発生していると考えられる。

3.3.5. 多値位相回折格子による回折効率の解析

前項では、2 値の回折格子について評価を行ったが、多値回折格子のほうが高い回折効率を得られる。そこで、LCD 結合型 PAL-SLM における多値回折格子の回折効率についても評価を行った。LCD 上に多値の回折格子を表示することにより、PAL-SLM 上に多値の位相格子を形成させる。ここで、PAL-SLM 上に正確に位相格子を形成させるために、LCD 結合型 PAL-SLM のトランスファー特性に合わせて、LCD 上に表示する強度レベルを補正した。多値の回折格子として、0 から 2π を 4 段階及び 8 段階の多値レベルで表現したブレード型回折格子を用いた。図 3-22 に、2 値・4 値・8 値の場合について、その回折パターンを示す¹²⁾。図 3-22 において、(a)は無変調時、(b)は 2 値回折格子の場合、(c)は 4 値回折格子の場合、(d)は 8 値回折格子の場合を示す。回折格子の空間周波数は LCD の 8 画素の幅で 3.1 lp/mm とした。図 3-22 より、回折格子を表現するレベルが増えるほど高次回折光が減少し、1 次回折光に効率よく集中していることがわかる。図 3-23 に、LCD 上に表示したブレード型回折格子の形状、測定結果より求めた 1 次回折光の回折効率、その理論値を示す¹²⁾。図 3-22 と図 3-23 から明らかなように、回折格子を表現する多値レベルのステップ数が大きくなるほど回折効率が向上しているとともに、実験値と理論値がよく一致した。

以上のように、LCD 結合型 PAL-SLM においても PAL-SLM の場合と同様に、理論限界に近い高い回折効率を得られることが明らかとなり、実際の応用への適応性を示すことができた。

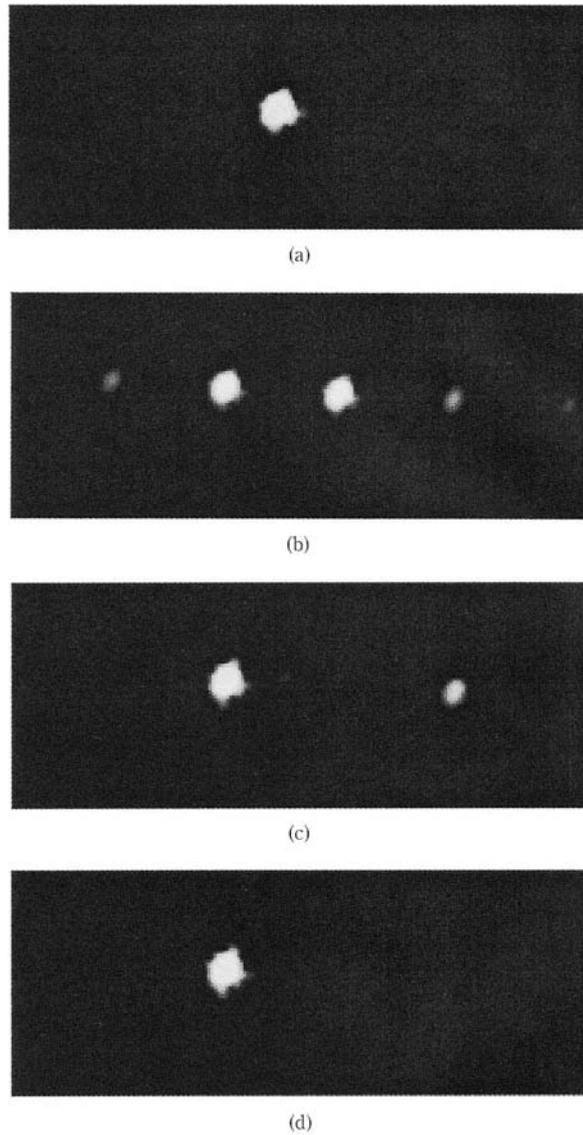


図 3-22 2 値・4 値・8 値回折格子による回折パターン

Number of levels	Phase grating	1st order diffraction efficiency (%)	
		Simulation	Experiment
2		40.5	40
4		81.1	76
8		95.0	90

図 3-23 回折格子の形状と回折効率の比較

3.4. 液晶空間光変調器の2次元時間応答特性の評価

3.4.1. はじめに

前節では、電子システムとの親和性を考慮して LCD パネルと PAL-SLM を組み合わせることによりそれぞれの問題点を克服することを考え、LCD 結合型 PAL-SLM を開発し、その特性を詳細に評価した。しかしながら、LCD パネルはラインスキャン型の表示素子であるため、提示パターンが変化した時に、そのスキャン制御のために画面内の不均一性が発生する可能性がある。近年盛んに研究されている位相補償技術^{15),16)}や波形整形技術¹⁷⁾などにおいては、その面内不均一性が悪影響を及ぼすことも考えられる。

そこで本研究では、LCD 結合型 PAL-SLM の2次元時間応答特性を評価し¹³⁾、本デバイスがこれらの応用に適しているかの検討を行う。

3.4.2. 2次元時間応答測定システム

LCD 結合型 PAL-SLM の2次元時間応答特性を評価するにあたっては、本デバイスの応答速度よりも十分に早い撮像システムが不可欠である。本研究では、浜松ホトニクス(株)固体事業部により開発された高速 CMOS イメージセンサ¹⁸⁾を用いた、スマートカメラモジュール¹⁹⁾⁻²¹⁾を利用することとした。

スマートカメラモジュールは CMOS イメージセンサと制御用の FPGA で構成される。表 3-1 に CMOS イメージセンサの諸特性を示す。本センサは 256×256 のホトダイオードアレイ (PD) を持ち、列並列に 128 チャンネルの AD 変換器を内蔵している。図 3-24 にセンサチップの外観写真及び撮像例を示す。PD は 2×2 をまとめて読み出すことにより 128×128 のイメージセンサとしても使用可能である。PD で蓄積された電荷は AD 変換器により 8 ビットのデジタルデータに変換された後、制御用 FPGA に送られる。制御用 FPGA では、CMOS イメージセンサへの駆動信号を生成すると共に、撮像結果に対して簡単な画像処理などを行うことも可能な構成となっている。例えば、1次元あるいは2次元の重心演算・3×3 あるいは 5×5 の空間フィルタリング演算等が可能である。これらの演算結果又は取得画像データは、LVDS インターフェースにより出力され、市販の一般的なデジタル画像ボードで PC に取り込み可能な構成となっ

	Specification
Pixel Pitch	20 μm
Pixel Number	256×256 (128×128)
Frame rate	250Hz (1KHz)
Signal output	128ch parallel ADC output
Output levels	8 bits
Power supply	+5V
Power consumption	400mW
ADC speed	1 Mbps
Noise	< 1000 Electrons
Chip size	7mm×11mm

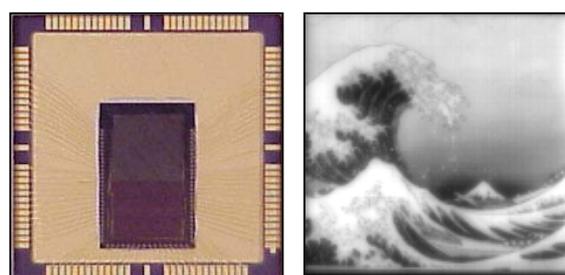


図 3-24 センサチップ外観写真と撮像例

表 3-1 CMOS イメージセンサの諸特性



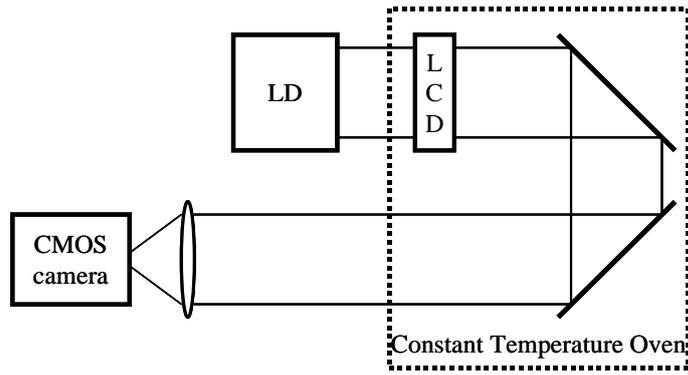
図 3-25 スマートカメラモジュール及び画像ボード

ている。図 3-25 にスマートカメラモジュール及び画像ボードの写真を示す。ここでは、アパールデータ社のデジタル入力フレームグラバーを用いた。

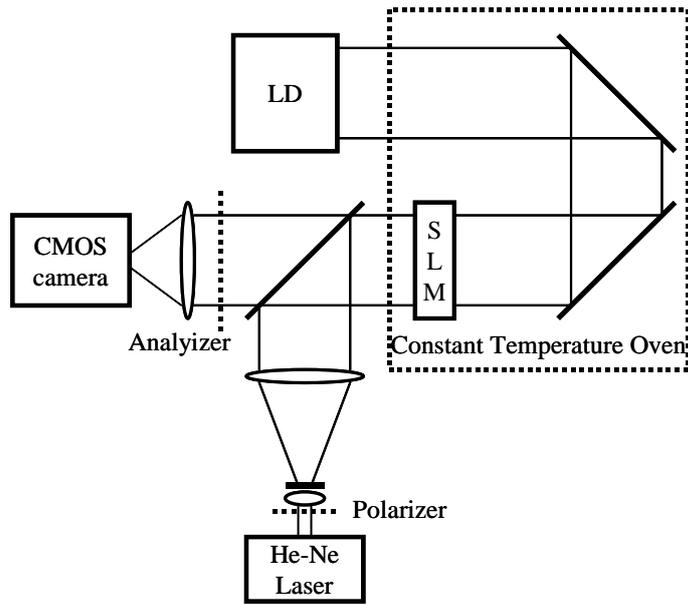
本スマートカメラモジュールを 128×128 画素モードで動作させた場合には、フレームレート 1KHz が可能となり、対象物を 1 ミリ秒毎に撮像できることになる。ここで、液晶素子の一般的な動作応答速度は 10 ミリ秒から数百ミリ秒であるので、本 CMOS イメージセンサを使用して LCD 結合型 PAL-SLM の 2 次元時間応答特性を評価する事が可能である。

本研究で使用する実験系を図 3-26 に示す。波長 680nm のレーザーダイオード (LD) を PAL-SLM の書きこみ光源として用いた。読み出し光源には、波長 632.8nm の He-Ne レーザーを対物レンズ・ピンホール・レンズ ($f=500\text{mm}$) によりビームを拡大後にコリメートして用いた。液晶デバイスは動作温度により応答特性が大きく変化するため、測定対象となる LCD・PAL-SLM・LCD 結合型 PAL-SLM を恒温槽に入れ、 $10 \cdot 20 \cdot 30 \cdot 40^\circ\text{C}$ における特性を計測した。対象デバイス以外の書き込み・読み出し光源及びスマートカメラモジュールは温度パラメータの変化による影響を受けないように恒温槽の外に配置し室温に保った。なお、PAL-SLM の動作条件は全ての実験において、1KHz の 3V 矩形波駆動で行った。また、PAL-SLM は読み出し光源の偏波面と液晶配向方向を 45° とすることにより、強度変調モードで測定を行った。

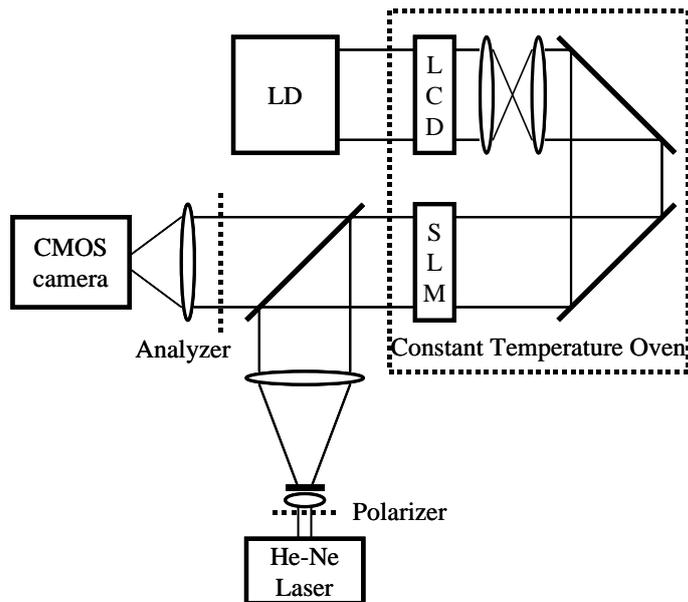
以上の実験光学系において、スマートカメラモジュールにより約 2 秒間の画像データ (1 ミリ秒毎に約 2000 枚) を取得し、2 次元時間応答特性の評価を行う。



(a) LCD 測定光学系



(b) PAL-SLM 測定光学系



(c) LCD 結合型 PAL-SLM 測定光学系

図 3-26 2次元時間応答特性実験光学系

3.4.3. LCDにおける2次元時間応答特性の評価

LCDを全面黒及び全面白の変調を約330ミリ秒ごとに交互に行った場合の変調画像を、スマートカメラモジュールにより128×128画素の2秒間2000枚の画像として取得した。取得した画像データにおいて、16×16のブロック内の輝度値平均を求めその過渡特性を評価した結果を図3-27に示す。また、最大変調の10%から90%にかかった時間を応答速度と定義し、その結果を図3-28に示す。LCDはツイストネマティック液晶のノーマリーホワイトモードで動作しており、立下り（明から暗）時には、液晶分子は外部電界によりツイスト構造が解かれチルトする。つまり、立下り時には外部電界と液晶の粘性が応答速度に影響する。一方、立上り（暗から明）時には、外部電界が無くなり液晶配向層の規制力によって元のツイスト構造に戻る。よって、立上り時には配向層の規制力と液晶の粘性が応答速度に影響する。ここで、配向層の規制力の方が外部電界による液晶分子の動きよりも小さいため、温度が高くなって液晶の粘性が低下した場合の応答速度の変化は大きかった。また、立下り時間よりも立上り時間のほうが大きかった。

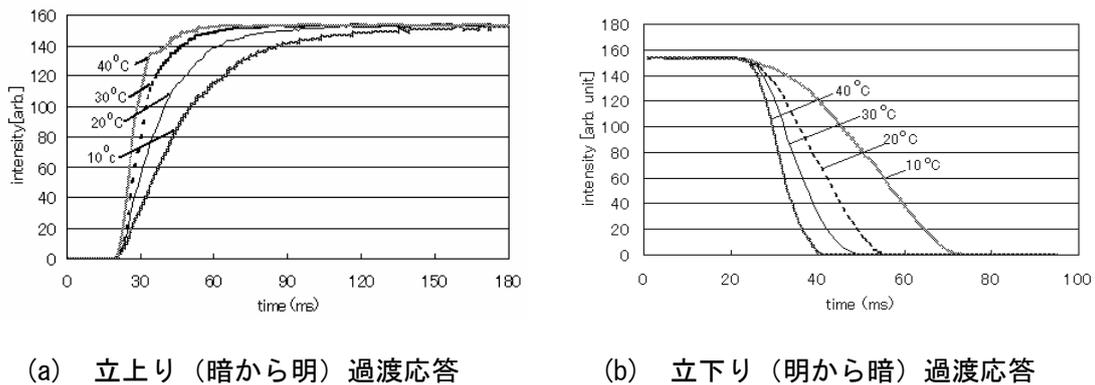


図3-27 LCDの過渡応答特性

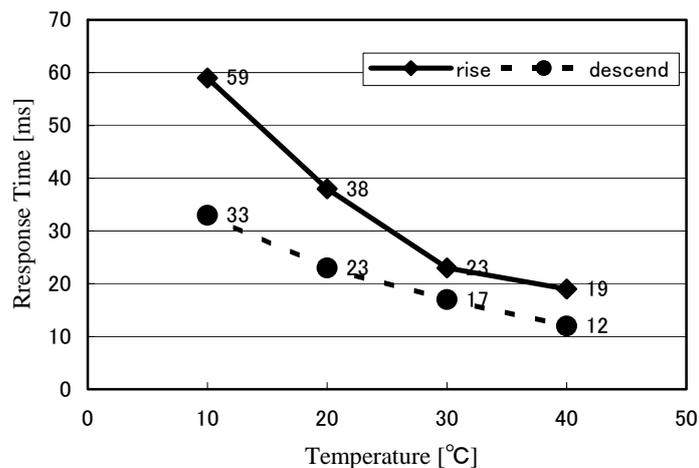


図3-28 LCDの応答時間

取得した画像を評価したところ、LCD のスキャニング型のアドレッシング方式に起因する、表示画像変化（明から暗・暗から明）時の画面内の不均一性が確認された。取得された画像列のフレーム間差分を取り、その変化量から変調開始を検知し、スキャン中のアドレスラインが概略画面中央の時の画像を温度毎に図 3-29 に示した。動作温度が高くなるほど、縞画像のコントラストがはっきりとしており、スキャンラインによる変調画像の区切れがはっきりと観測されている。温度が低い場合には液晶の応答速度が遅いため、1 回のスキャニングでは変調が完全に行われず、画像のコントラストが低く撮像されているものと推測される。ここでは、格子縞パターンの結果を示したが、全面均一画像の場合には、左右で明暗がはっきりと観測されるものと予想される。

LCD のオン・オフ時の透過率を測定した結果を図 3-30 に示す。暗（オン）状態の透過率は温度が上がるにつれ上昇している。これは、温度が高いほどオフセットが重畳されることを意味し、PAL-SLM の書き込みに使用した場合には、初期位相が増加することにつながる。また、明（オフ）状態の透過率は温度上昇と共に低下しており、PAL-SLM と組み合わせた場合には、最大変調量が制限されることを意味する。これらの結果から、動作温度が高くなるほど、PAL-SLM と組み合わせた場合に得られる位相変調量が減少するであろう事は明らかである。

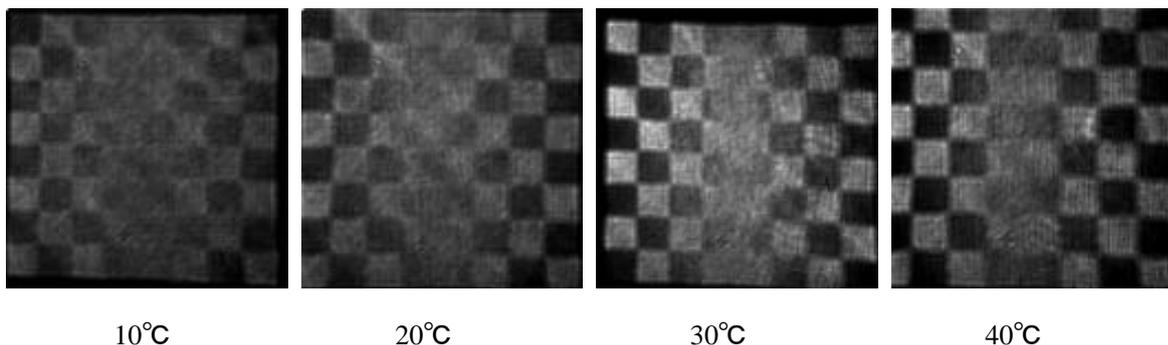


図 3-29 LCD 変調画像における画面内不均一性

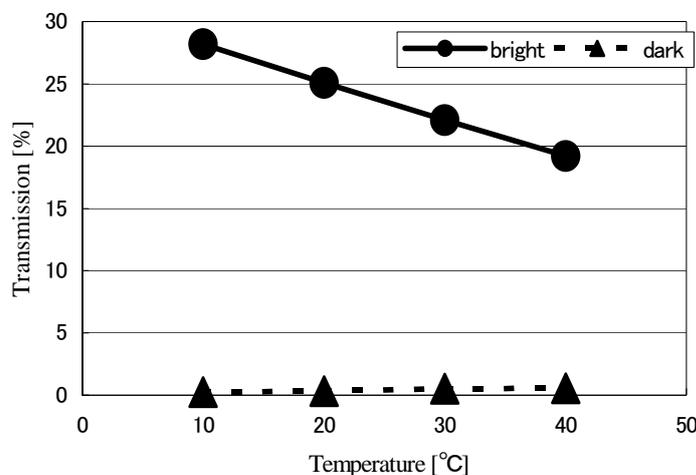


図 3-30 LCD の変調時の透過率特性

3.4.4. PAL-SLMにおける2次元時間応答特性の評価

PAL-SLM にコリメートした LD 光を書き込み光とし、LD 光をオン・オフ制御しながら PAL-SLM の過渡応答特性をスマートカメラモジュールにより観測した。LCD の場合と同様に、 128×128 画素の 2 秒間 2000 枚の画像として取得し、 16×16 のブロック内の輝度値平均を求め強度変調時の過渡特性を求め、その結果を位相変調量に変換した結果を図 3-31 に示す。さらに、最大位相変調の 10% から 90% にかかった時間を応答速度と定義し、その結果を図 3-32 に示す。PAL-SLM は平行配向ネマティック液晶モードで動作しており、立下り時には、液晶分子は外部電界により平行配向状態からチルトし、外部電界と液晶の粘性が応答速度に影響する。また、立上り時には、外部電界が無くなり液晶配向層の規制力によってチルト状態から元の平行配向状態に戻るため、配向層の規制力と液晶の粘性が応答速度に影響する。よって、LCD の場合とは逆に、立上り時間よりも立下り時間のほうが大きかった。

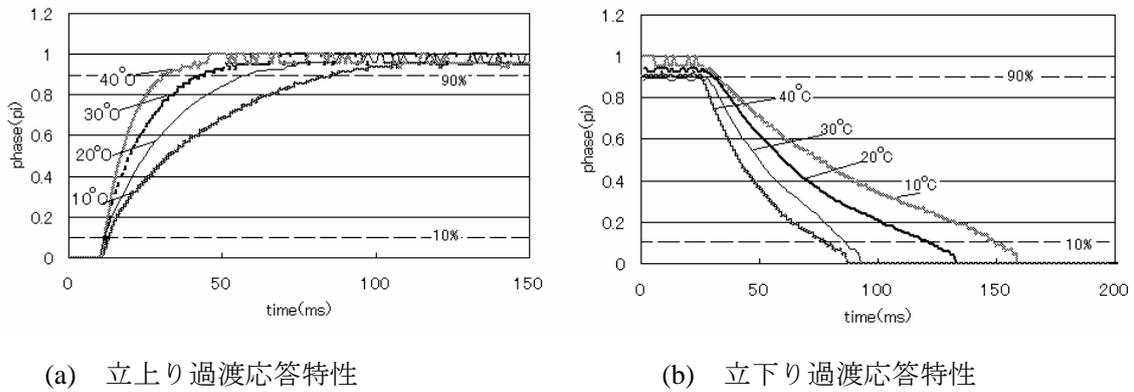


図 3-31 PAL-SLM の π 位相変調過渡応答特性

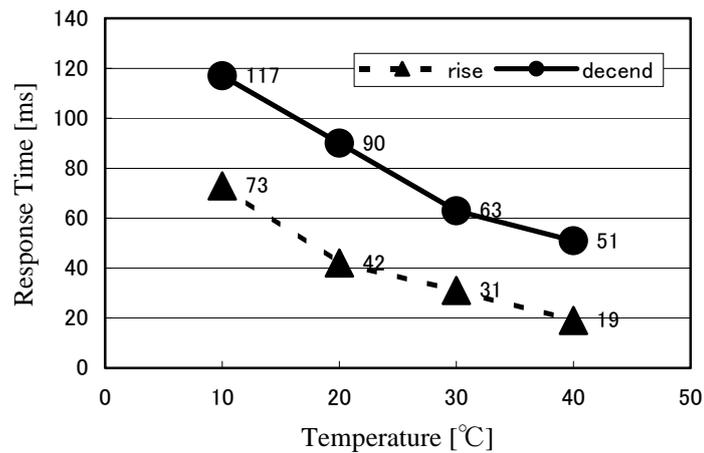
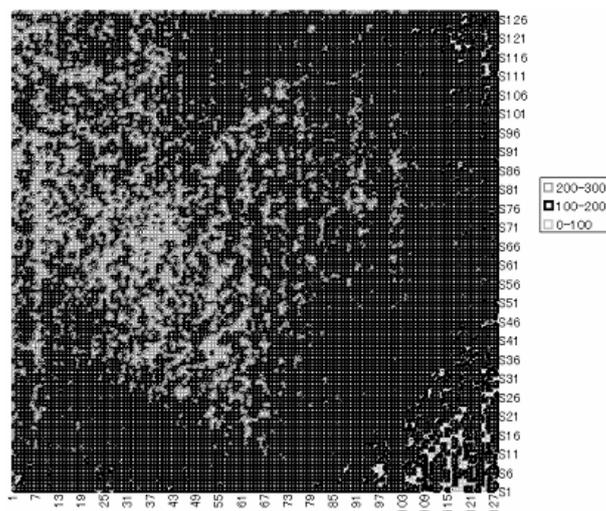


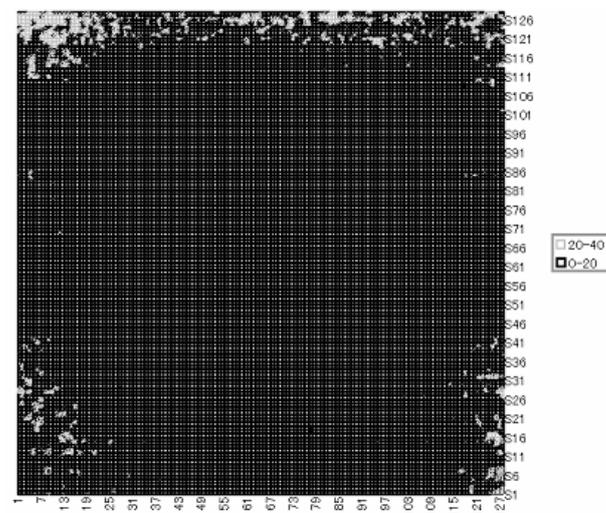
図 3-32 PAL-SLM の π 位相変調応答時間

PAL-SLM は面内で均一な構造を持つため、面内における応答特性も均一のはずであるが、それを確認するために応答速度及び応答遅延時間の面内均一性を評価した。ここで応答遅延時間とは、PAL-SLM の入力面側の変化に対して、出力面側の応答遅延のことを指す。取得した画像列において、連続した画像間の差分から応答遅延及び応答時間を 2 次的に求めた結果を図 3-33 に示す。応答速度分布は PAL-SLM の液晶層の厚さ不均一性に起因する変調特性の不均一性と思われる分布を示し、概略面内で均一な応答速度分布を持っていると思われる。過渡応答特性についても、面内で均一であることが確認できる。よって、PAL-SLM においては、面内の 2 次的応答特性については均一であると言える。

PAL-SLM の位相変調安定性については、 π 変調時の位相変調揺らぎを各動作温度条件で測定した結果、CMOS イメージセンサの階調 (8bit) によって規定される精度程度である 0.08π から 0.11π であった。



(a) π 位相変調応答特性の 2 次元分布



(b) 応答遅延時間の 2 次元分布

図 3-33 PAL-SLM の 2 次元時間応答特性の分布

3.4.5. LCD結合型PAL-SLMにおける2次元時間応答特性の評価

コリメートしたLD光をLCDに入射し、LCDにより変調された書き込み光を1対1のレンズ結像にてPAL-SLMに入射させ、同じくコリメートされたHe-Neレーザー光でPAL-SLMを読み出し、LCD結合型PAL-SLMの過渡応答特性をスマートカメラモジュールにより観測した。LCDの場合と同様に、128×128画素の2秒間2000枚の画像として取得し、16×16のブロック内の輝度値平均を求め強度変調時の過渡特性を求め、その結果を位相変調量に変換した後、最大位相変調の10%から90%にかかった時間を応答速度と定義し、その結果を図3-34に示す。立上り・立下り時間ともに、動作温度が高いほど減少した。これは、各構成デバイスであるLCD・PAL-SLMの動作速度が温度上昇と共に早くなることから当然の結果と言える。この結果からは、LCD結合型PAL-SLMを使用するにあたり、動作速度の速い高い温度領域で使うことが良いと考えられる。しかしながら、LCDの変調特性が温度上昇と共に劣化することが明らかとなっている。さらに、PAL-SLMの感度特性についても、図3-35に示すように、温度上昇と共に感度の低下が認められる。よって、LCDとPAL-SLMを組み合わせたLCD結合型PAL-SLMでもその影響を受けるものと思われ、動作温度における最適化が必要である。

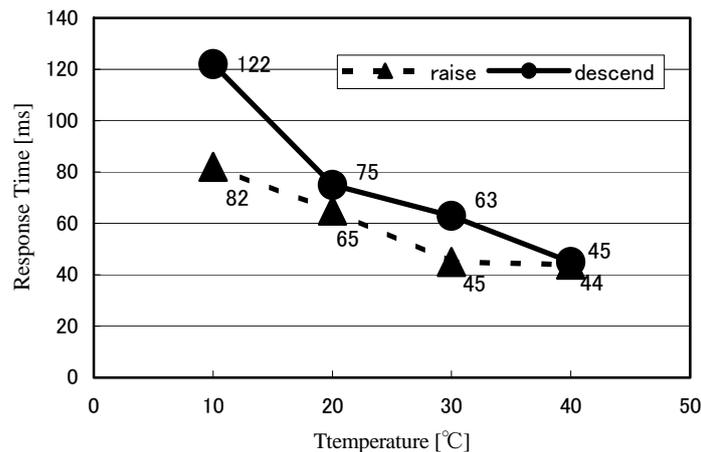


図 3-34 LCD 結合型 PAL-SLM の π 位相変調応答時間

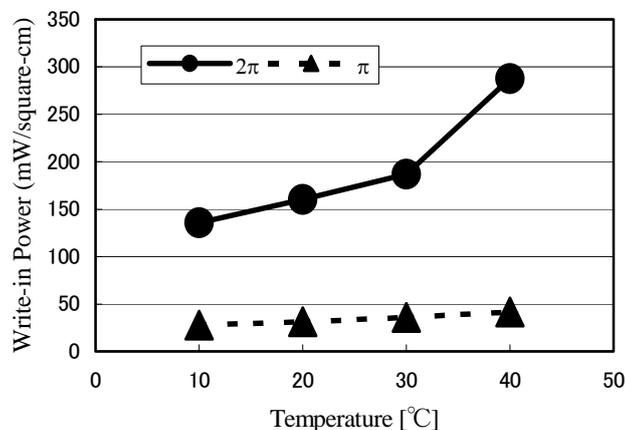
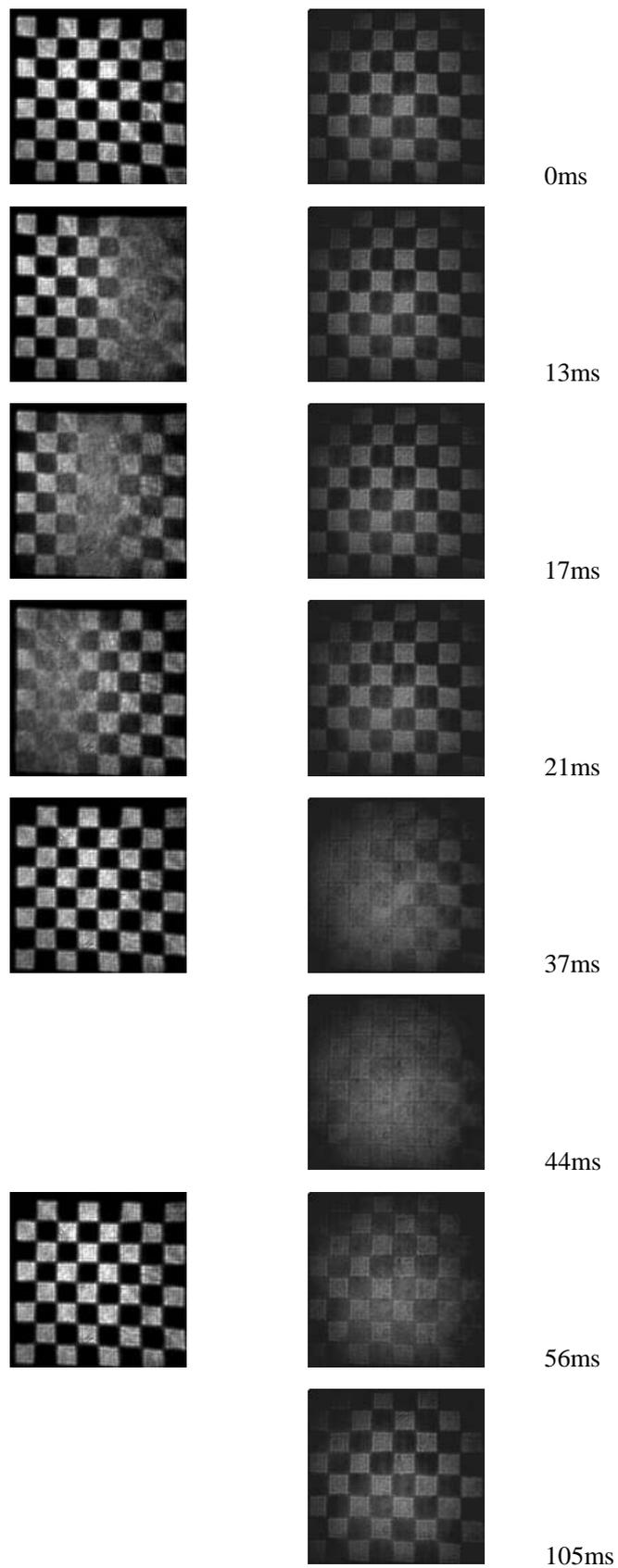


図 3-35 LCD 結合型 PAL-SLM の感度特性

LCD 結合型 PAL-SLM について、 π 変調時の各動作温度における位相変調安定度を評価した所、 0.08π から 0.11π の間に分布しており、LCD の時と同様に計測精度を考慮すると十分に安定であると判断できる。

LCD 結合型 PAL-SLM においては、液晶デバイスの持つ温度依存性により、動作速度については温度が高いほどメリットがあり、位相変調量の点では動作温度が 30°C を超えると問題が起こる可能性が高い。特に、 2π 変調を必要とする用途においては、動作温度は 30°C 以下である必要があると思われる。以上の結果より、 π 変調の応用においては動作速度のメリットから 30°C 近辺での使用が好ましく、 2π 変調の応用においては 20°C から 30°C の間での使用が良いと考えられる。位相変調量がさらに少なくても良いが、とにかく動作速度を早くしたい場合のみ 30°C を超えて 40°C 程度の使用も考えられる。

これまでの結果から、LCD 結合型 PAL-SLM の動作温度については 30°C 近辺が最適と考えられるので、 30°C における 2 次元過渡応答特性について解析を行った。図 3-36 に、LCD 結合型 PAL-SLM の 2 次元過渡応答状況を示す画像列を LCD のそれと併せて示す。(a)に示した LCD の過渡応答を見ると、既に議論した通り、スキヤニングによる画面内の不均一応答特性が見取れる。これに対して、(b)に示した PAL-SLM と組み合わせた場合の同様の結果を見ると、LCD のみの場合に見られたような不均一な応答特性は確認できない。つまり、LCD と PAL-SLM を組み合わせることにより、LCD の持つ不均一過渡応答特性を吸収しつつ、PAL-SLM の持つ最大 2π 変調の画素構造の無い、時間的にも空間的にも均質で、良好な位相変調特性を電気アドレス型の位相変調器として得られることが明らかとなった。



(a) LCD のみ

(b) LCD 結合型 PAL-SLM

図 3-36 LCD 結合型 PAL-SLM の 2 次元過渡応答特性

3.5. あとがき

本章では、光相関システムや位相補償等への応用に有望であると考えられる PAL-SLM の位相変調特性を評価すると共に、実際の応用システムにおいて重要な評価基準となる回折効率に関して理論的な解析も含めて詳細な議論を行った。さらに、応用システムの実用化を目指した場合には、コンピュータシステムとの連携は必要不可欠であることから、コンピュータシステムからの制御による電気書き込み型の空間光変調器として、LCD パネルにより強度変調されたパターンにより PAL-SLM を制御する方法を検討し、その位相変調特性について議論した。また、電気書き込み型とすることにより避けられない走査型制御の及ぼす影響についても評価した。

PAL-SLM における位相変調は、液晶の配向方向と入射光の偏光方向を一致させることにより、理想通りの位相変調のみが行われることが確認された。また、最大位相変調量として 2π 以上が得られ、一般的な位相変調応用には十分な性能であることも確認された。位相変調時の回折効率について詳細な解析を行った結果、実験値と理論値は良く一致し、システム設計時にその結果を生かせる見通しを得た。

電気書き込み型の空間光変調器を構成する方法として、PAL-SLM と LCD パネルを組み合わせたシステムを検討し評価を行った結果、電気書き込み時においても最大位相変調量として 2π を確保できることが確認された。また、2 値及び多値の場合の位相回折格子における回折効率の解析を行った結果、実験値と理論値は良く一致し、システム設計時にその結果を生かせる見通しを得た。さらに、走査型制御が存在していても 2 次元的な時間応答特性の均一性が確保されているかの評価を行ったところ、PAL-SLM 読み出し側においてその影響が無いことが確認された。

以上の結果から、PAL-SLM 及び LCD 書き込み型 PAL-SLM 共に、光相関システムや位相補償システムへの応用に適応可能であることが明らかとなった。さらに、本研究における理論解析結果は、システム設計時において有効に利用可能であるものとする。

3.6. 第3章の参考文献

- 1) T.H.Barnes, K.Matsuda, T.Eiju, K.Matsumoto and F.Johnson, "Joint transform correlator using a phase only spatial light modulator", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.29, pp.L1293-L1296 (1990).
- 2) 藤森康朝, 高岡隆, "アダプティブ・オプティクス (補償光学)", *光学*, Vol.8, pp.2-9 (1979).
- 3) A.D.Fisher and C.Warde, "Simple closed-loop system for real-time optical phase measurement", *Opt. Lett.*, Vol.4, pp.131-133 (1979).
- 4) N.Mukozaka, N.Yoshida, H.Toyoda, Y.Kobayashi and T.Hara, "Diffraction efficiency analysis of a parallel-aligned nematic-liquid spatial light modulator", *Appl. Opt.*, Vol.33, pp.2804-2811 (1994).
- 5) F.Li, N.Mukozaka, N.Yoshida, Y.Igasaki, H.Toyoda, T.Inoue, T.Hara and Y.Kobayashi, "Phase Modulation Characteristics Analysis of Optically-Addressed Parallel-Aligned Mematic Liquid Crystal Phase-Only Spatial Light Modulator Combined with a Liquid Crystal Display", *Opt. Rev.*, Vol.5, pp.174-178 (1998).
- 6) Y.Igasaki, N.Yoshida, H.Toyoda, T.Inoue, N.Mukozaka, Y.Kobayashi, T.Hara and F.Li, "High Efficiency Electrically-Addressable Phase-Only Spatial Light Modulator", *Opt. Rev.*, Vol.6, pp.339-344 (1999).
- 7) N.Mukozaka, B.Ye and N.Yoshida, "Spatial Temporal Analysis of Electrically-Addressable Phase-Only Spatial Light Modulator", *Opt. Rev.*, Vol.10, pp.361-365 (2003).
- 8) W.R.Klein and B.D.Cook, "Unified approach to ultrasonic light diffraction", *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, Vol.SU-14, pp.123-134 (1967).
- 9) Y.Kobayashi, H.Toyoda, N.Mukozaka, N.Yoshida and T.Hara, "Fingerprint Identification by an Optical Joint Transform Correlation System", *Opt. Rev.*, Vol.3, pp.403-405 (1996).
- 10) T.H.Barnes, T.Eiju, K.Matsuda and N.Ooyama, "Phase-only modulation using a twisted nematic liquid crystal television", *Appl.Opt.*, Vol.28, pp.4845-4852 (1989).
- 11) A.Kirk, T.Tabata and M.Ishikawa, "Reconfigurable computer generated holograms", *Opt. Commun.*, Vol.105, pp.302-308 (1994).
- 12) J. Glückstad, L.Lading, H.Toyoda and T.Hara, "Lossless light projection", *Opt. Lett.*, Vol.22, pp.1373-1375 (1997).
- 13) N.Konforti, E.Marion and S.T.Wu, "Phase-only modulation with twisted nematic liquid-crystal spatial light modulators", *Opt. Lett.*, Vol.13, pp.251-253 (1988).
- 14) H.Ichikawa, "Phase-Only Modulation with a Twisted Nematic Liquid Crystal Panel for a Reconfigurable Grating", *Opt. Rev.*, Vol.4, pp.395-401 (1997).
- 15) Gordon D. Live, "Wave-front correction and production of Zernike modes with a liquid-crystal spatial light modulator", *Appl. Opt.*, Vol.36, pp.1517-1524 (1997).
- 16) Philip M. Birth, James Fourlay, Gordon D. Live and Alan Purvis, "Real time optical aberration correction with a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator", *Appl. Opt.*, Vol.37 pp.2164-2169 (1998).
- 17) 福知昇央, 伊ヶ崎泰則, 吉田成浩, 小林祐二, 原勉 "電気アドレス型空間光変調装置" *Optics Japan*, pp.198-199 (2002).
- 18) S.Mizuno, K.Fujita, H.Yamamoto, N.Mukozaka and H.Toyoda, "A 256X256 compact CMOS Image Sensor With On-chip Motion Detection Function", *Journal of Solid-State Circuits*, Vol.38, pp.1072-1075 (2003).
- 19) 宅見宗則, 豊田晴義, 向坂直久, 水野誠一郎, "1KHz画像処理機能付きカメラシステム",

画像センシングシンポジウム講演論文集, Vol.8th, pp.569-572 (2002).

- 20) 松井克宜, 豊田晴義, 向坂直久, 宅見宗則, 水野誠一郎, “超小型 1KHzスマートカメラモジュール”, 信学技法, Vol.ICD2002-91, pp.65-68 (2002).
- 21) M.Takumi, H.Toyoda and N.Mukozaka, “1KHz smart camera with image processing feature”, Proc. MVA2002, pp.384-387 (2002).

第4章 MSLMの並列光情報処理システムへの応用

4.1. まえがき

MSLM はイメージインテンシファイヤーと同じ構造を持ち、MCP により光電子を増倍できるので入力感度が高い。また、光電面と誘電体多層膜ミラーの選択により同じ波長での書き込み及び読み出しが可能となり、カスケード接続・光フィードバックなどが実現できる。さらに、2 次電子放出特性を利用して電気光学結晶上の電荷を制御することにより様々な内部演算を行うことができるという特徴を持っている。以上のような点から、早い時期から並列光情報処理の研究にキーデバイスとして利用されてきた¹⁾⁻¹⁵⁾。

並列光情報処理には、大きく分けて光デジタル演算¹⁶⁾と光アナログ演算¹⁷⁾がある。光デジタル演算では、光の持つ並列性・非干渉性・広帯域といった特徴を有効に活用し、2 値デジタルコンピューティングを行うものであり、アナログ処理と比較して汎用な処理を行えるといった大きなフレキシビリティを持ち、幅広い研究が進められてきた。代表的な研究としては、光ロジック演算、光インターコネクションなどが報告されている¹⁾⁻⁷⁾。他方、光アナログ演算はレンズによる 2 次元のフーリエ変換作用やホログラムに代表されるように、光の本質的な特性を利用するもので、複雑な処理を効率的に実現することが可能なものとして期待されている。光アナログ演算の代表的な研究としては、光相関演算、光フィルタリング演算、ホログラム、光ニューラルネットワークなどがある⁸⁾⁻¹⁵⁾。

本研究においても、光デジタル演算及び光アナログ演算に MSLM を積極的に活用して並列光情報処理の応用研究を行いその可能性を追求した。本章では、光デジタル演算に MSLM を応用した並列光論理演算システムについて述べた後、MSLM の光アナログ演算の特徴的な応用である 2 次元光ロックインアンプへの応用について述べる。

4.2. 偏光符号化法を用いた並列光論理演算

4.2.1. はじめに

近年、コンピュータアーキテクチャに関して、光学的な実現に適したものが活発に研究されている^{16), 18) -21)}。また、2次元ロジックゲートアレイ素子（空間光変調器）とその材料の研究も盛んである^{22), 23)}。しかしながら、電子回路におけるトランジスタと等価な光素子が無いことが、デジタル光プロセッサの発展を阻んでいる。一方、光プロセッサを現状レベルの空間光変調器を利用して構築し、それに適したアーキテクチャ及びアルゴリズムと共に構成していく手法も考えられる²²⁾。本研究では、偏光状態による2値論理の符号化と符号化光の空間分離を用いた方法を検討した。偏光状態を用いた2値符号化法は既にいろいろ研究されている^{24) -26)}が、プログラマブルな多段論理演算はいまだ実現されていない。ここでは、偏光符号化法を用いた多段でかつプログラマブルな論理演算を並列に行う光デジタルプロセッサを提案する^{27) -30)}。

4.2.2. 偏光符号化法の原理

2値論理1と0を互いに直交する偏光状態で表す偏光符号化法^{24) -26)}はON/OFF論理と比較してエネルギー損失が無いために多段接続に適した利点を持つ。偏光符号化と空間分離の過程を図4-1に示す。最初の複屈折板（B.P.1）の主軸と入射光の偏光方向が45°傾いていると、複屈折板を通過後に常光と異常光は異なった光路を通る。B.P.2の主軸はB.P.1の主軸と直交している。最初に、直線偏光を入射すると入力Aのピクセルaの2値に応じて、SLM1により各ピクセル毎に偏光変調された光はB.P.1により、その偏光に応じ2光路のうち1つの光路に分離される。直進する光路が水平偏光に、右にシフトする光路が垂直偏光に対応する。このように分離された光は、SLM2によって入力Bのピクセルbの値により変調され、B.P.2により4光路の

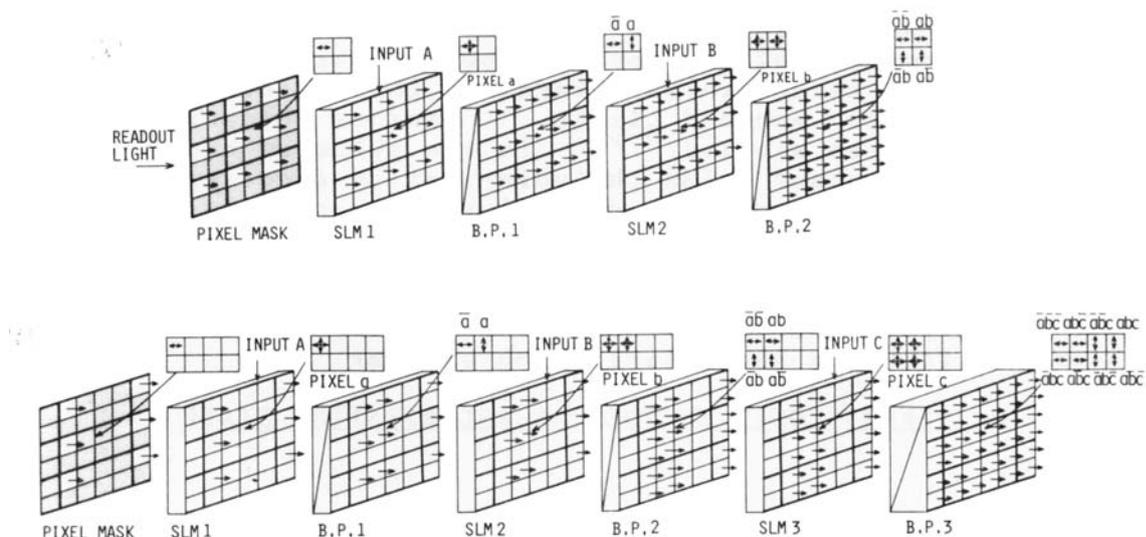


図 4-1 偏光符号化と空間分離の過程

OPERATION	TRUTH TABLE	KERNEL □ OPEN ■ SHUT	OUTPUT	OPERATION	TRUTH TABLE	KERNEL	OUTPUT
		ONE PIXEL					
A	$\begin{array}{c cc} A & 0 & 1 \\ \hline B & 0 & 1 \\ & 1 & 0 & 1 \end{array}$			\bar{A}	$\begin{array}{c cc} A & 0 & 1 \\ \hline B & 0 & 1 \\ & 1 & 1 & 0 \end{array}$		
B	$\begin{array}{c cc} A & 0 & 1 \\ \hline B & 0 & 0 \\ & 1 & 1 & 1 \end{array}$			\bar{B}	$\begin{array}{c cc} A & 0 & 1 \\ \hline B & 0 & 1 \\ & 1 & 0 & 0 \end{array}$		
A OR B	$\begin{array}{c cc} A & 0 & 1 \\ \hline B & 0 & 1 \\ & 1 & 1 & 1 \end{array}$			A NOR B	$\begin{array}{c cc} A & 0 & 1 \\ \hline B & 0 & 1 \\ & 1 & 0 & 0 \end{array}$		
A AND B	$\begin{array}{c cc} A & 0 & 1 \\ \hline B & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & 1 \end{array}$			A NAND B	$\begin{array}{c cc} A & 0 & 1 \\ \hline B & 0 & 1 \\ & 1 & 1 & 0 \end{array}$		
A EQV B	$\begin{array}{c cc} A & 0 & 1 \\ \hline B & 0 & 1 \\ & 1 & 0 & 1 \end{array}$			A XOR B	$\begin{array}{c cc} A & 0 & 1 \\ \hline B & 0 & 1 \\ & 1 & 1 & 0 \end{array}$		
\bar{A} OR B	$\begin{array}{c cc} A & 0 & 1 \\ \hline B & 0 & 1 \\ & 1 & 1 & 1 \end{array}$			A AND \bar{B}	$\begin{array}{c cc} A & 0 & 1 \\ \hline B & 0 & 1 \\ & 1 & 0 & 0 \end{array}$		
A OR \bar{B}	$\begin{array}{c cc} A & 0 & 1 \\ \hline B & 0 & 1 \\ & 1 & 0 & 1 \end{array}$			\bar{A} AND B	$\begin{array}{c cc} A & 0 & 1 \\ \hline B & 0 & 0 \\ & 1 & 1 & 0 \end{array}$		
1	$\begin{array}{c cc} A & 0 & 1 \\ \hline B & 0 & 1 \\ & 1 & 1 & 1 \end{array}$			0	$\begin{array}{c cc} A & 0 & 1 \\ \hline B & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & 0 \end{array}$		

図 4-2 16 種のブール論理演算カーネル

うち 1 つの光路に分離され、全ての論理組み合わせ(a,b)=(1,1),(0,0),(1,0),(0,1)はそれぞれ異なった光路を通ることになる。このように 2 パターン間の論理演算の時には 2×2 のセルが 1 画素を構成し、この符号化の過程は各画素毎に独立に行われる。3 パターンへの拡張も容易である。この場合、B.P.3 は垂直偏光を、B.P.1 の 2 倍の量シフトするように設定することにより、全ての論理組合せの場合で異なった光路を通るようにする。

全てのブール論理演算を実行する論理関数アレイを偏光符号化に基づく演算カーネルと共に構築する。本プログラマブル光並列プロセッサにおいて空間フィルタリングとして動作するプログラマブル演算カーネルは、論理演算命令に応じてセルの窓を開けて、符号化された光を通過させる。プログラマビリティは単に演算カーネル内の窓の位置を変化させることで得られる。16 種類のブール論理演算に対する演算カーネルを真理値表及び入力パターン例に対する演算出力と共に図 4-2 に示す^{27), 28)}。

4.2.3. システム構成

3 入力に対して多段の論理演算を行う実験系を図 4-3 に示す^{27), 28)}。MSLM を用いて入力パターン A,B,C を光学的に書き込んだ。MSLM は他の SLM と比較して非常に高い入力感度を有しており、多段に演算を行う際のカスケード接続性に優れている。He-Ne レーザーからの直線偏

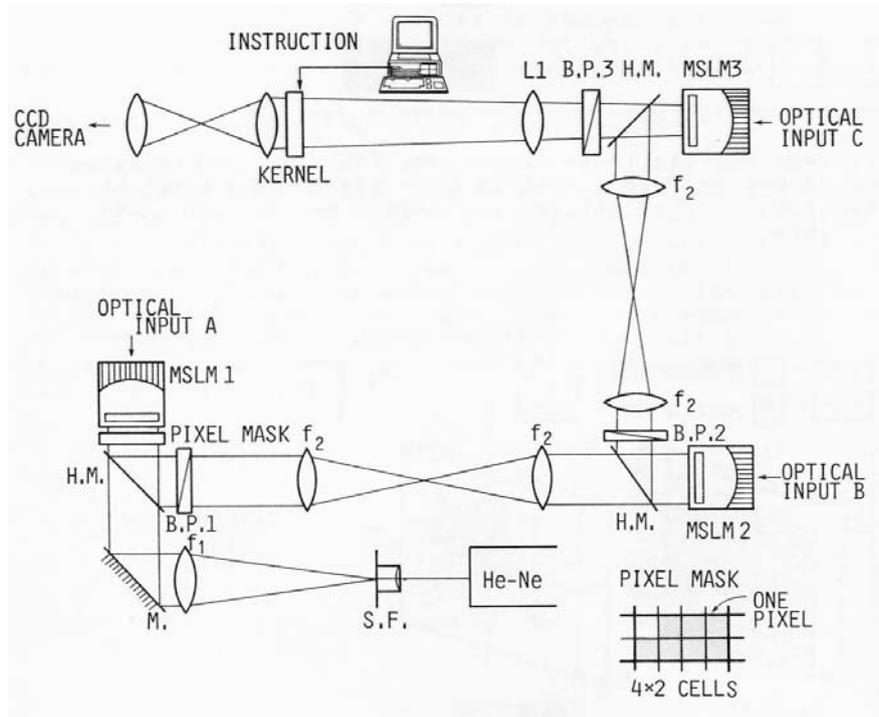


図 4-3 3 段演算の実験光学系

光の読み出し光を、MSLM の結晶軸と 45° 傾いた偏光方向で入射させる。入射光が 2 回結晶を通過すると論理値 1 であれば 90° 偏波面が回転し、論理値 0 であれば偏波面は変化しない。MSLM1 からの反射光はピクセルマスクを通過し個々の光学的なチャンネルに分離される。ここでは 3 入力の論理演算を行うために、 4×2 の 8 個のセルにより構成される。3 個の複屈折板 (B.P.1-3) は、偏光変調された光を空間的に分離するために用いられ、厚さはそれぞれ 1,1,2mm となっており、異常光に対してそれぞれおよそ $100, 100, 200 \mu\text{m}$ の光路シフトを生じさせる。シフト方向は B.P.1 と B.P.3 が水平方向、B.P.2 が垂直方向となっている。実際の符号化による空間分離の結果を図 4-4 に示す^{27), 28)}。プログラマブルな演算カーネルには画素サイズ $330 \times 330 \mu\text{m}^2$ の液晶パネル (LC-SLM) を用い、セルサイズ $100 \mu\text{m}$ とは光学系の倍率で調整した。

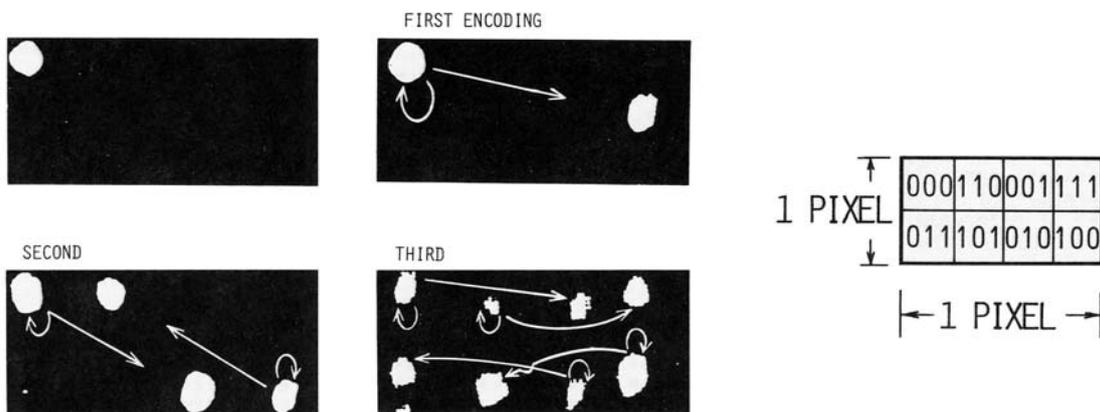


図 4-4 ピクセルの偏光符号化と空間分離

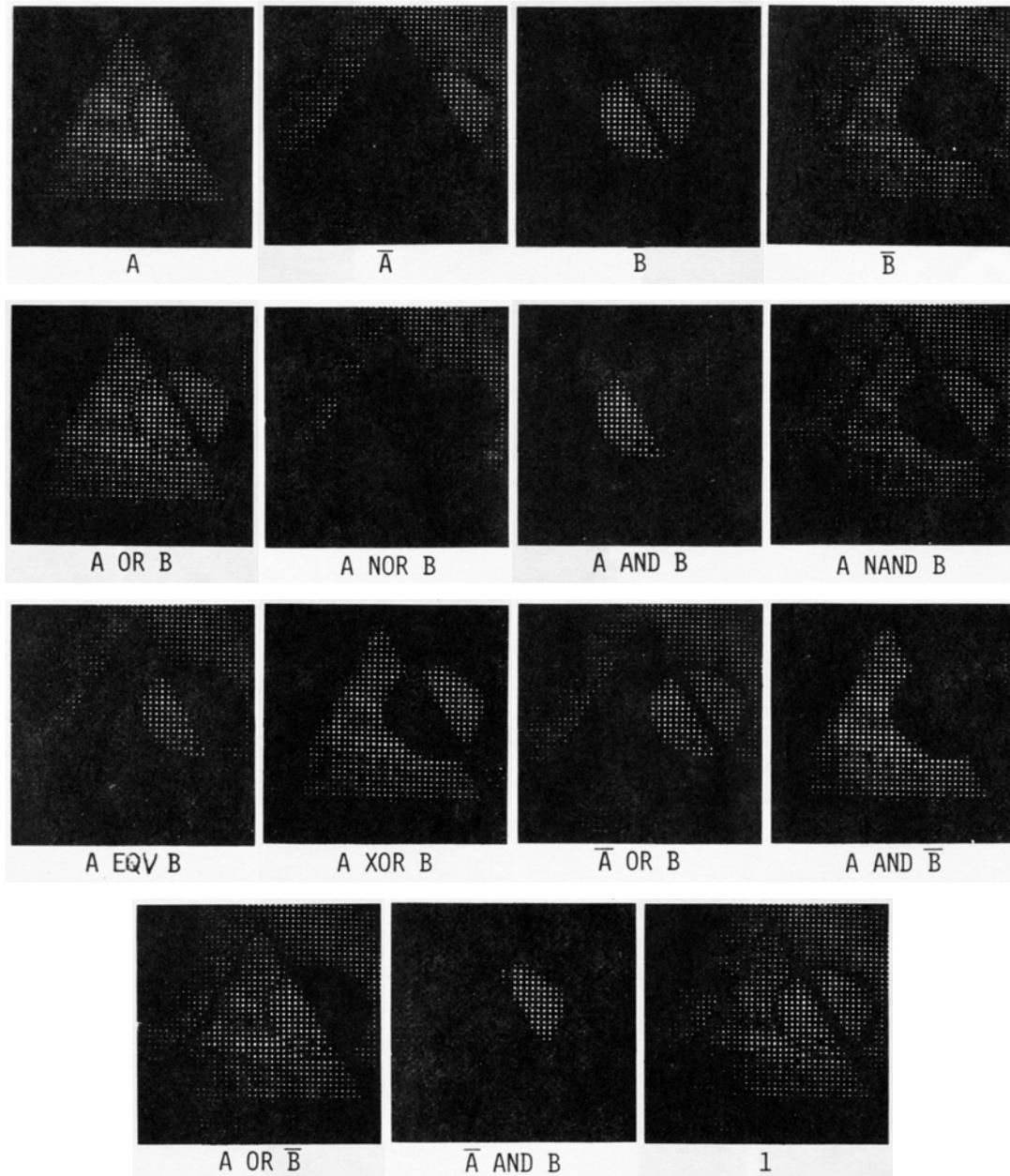


図 4-5 FALSE を除くブール論理演算の実験結果

4.2.4. 実験結果及び考察

16 種類のブール論理演算結果 (FALSE を除く) を図 4-5 に示す^{27), 28)}。演算は PC によりプログラムされた演算命令に応じ、実時間で LC-SLM に対応した演算カーネルが表示される。処理対象の画像内には約 50×50 の画素がある。実験結果から LC-SLM が実時間のプログラマブルカーネルとして十分機能していることがわかった。

3 パターン間の多段論理演算の実験結果を図 4-6 に示す^{27), 28)}。演算カーネルは 1 画素に付き AND に対しては 1 つ、OR に対しては 7 つの窓がある。2 段から 3 段にする際には、8 セルに 1 つの窓のあるピクセルマスクを使用する。MSLM3 の読み出し時のハーフミラー 2 回透過により損失が 6dB 増加する。

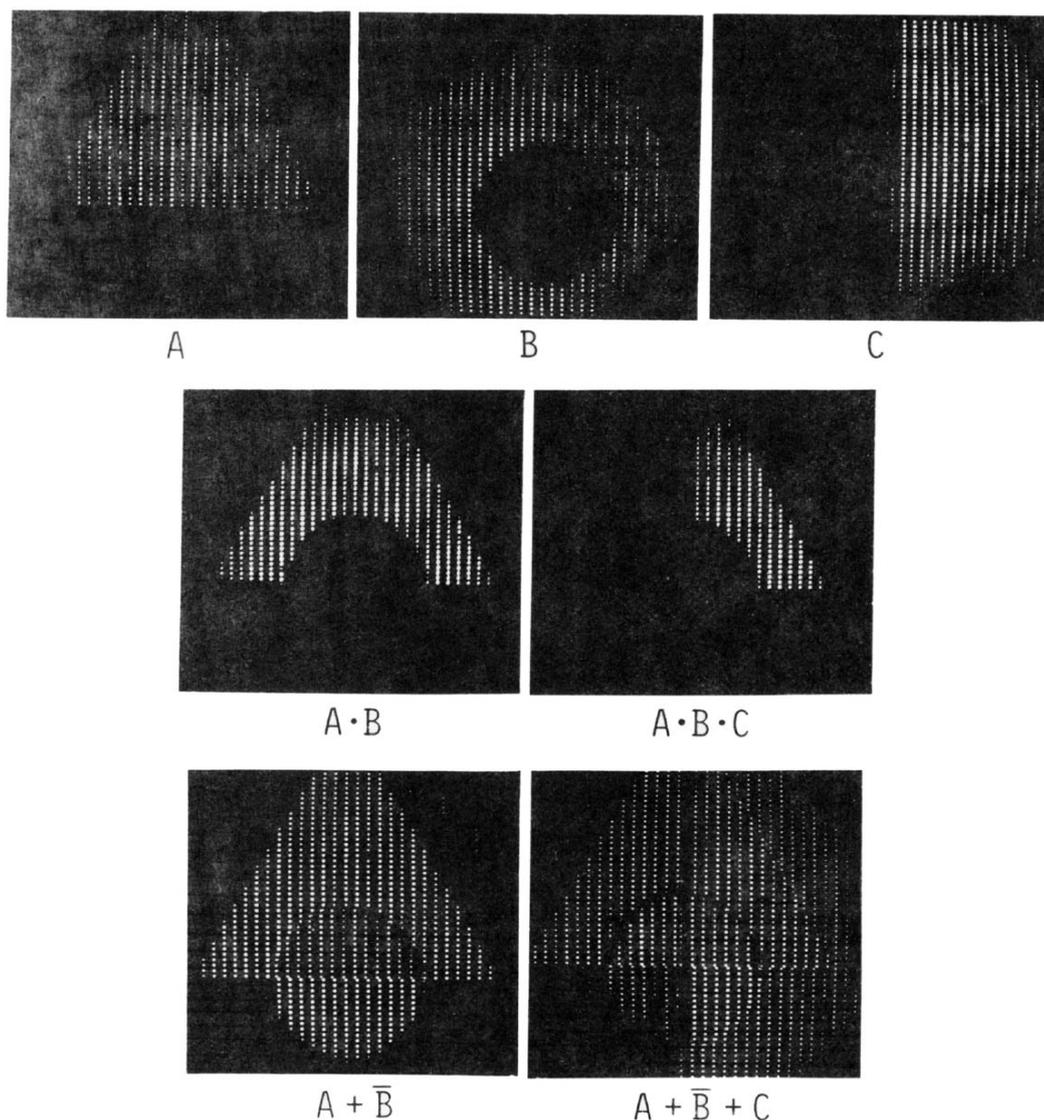


図 4-6 3 段の論理演算の実験結果

今後の処理段数の増加可能性に関しては、光学的インターコネクションに影響されず、MSLM の読み出し過程での損失増加により制限される。MSLM の感度が $30\text{nJ}/\text{cm}^2$ で、読み出し時の損失が 6dB であるから、 $1\text{mW}/\text{cm}^2$ のレーザーを用い、MSLM の書き込み時間を 150msec とすると、約 5 段の多段演算ができると考えられる。また、MSLM の分解能の限界 $10\text{lp}/\text{mm}$ で用いると、 50×100 まで画素数を増やせるものと考えられる。

一般的には光の並列性を生かすフリースペース光学系が有効であるとされるが、実際に光学系を構築する際には、各光学系により発生する歪や各光学素子間のアライメントの問題を考慮する必要がある。現実的には、MSLM の分解能の限界をクリアさせるのも困難な状況と考えられる。実用化に際しては光学系の小型化も必須であり、デバイスの開発もさることながら、小型・高精度光学システムの構築方法についても更なる研究が必要と考えられる。

4.3. MSLMにおける2次元ロックイン機能の応用

4.3.1. はじめに

近年、光断層写真法に関する研究が注目を浴びている^{31) -37)}。特に、リフレクトメトリの原理に基づいたシステムが盛んに研究されている^{33) -37)}。これまでに提案されているリフレクトメトリの方式は大きく分けて OTDR (Optical Time Domain Reflectometer)³³⁾、OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometer)^{34), 35)}、OCDR (Optical Coherence Domain Reflectometer)^{36), 37)} が挙げられる。3次元物体の断層像を抽出するためには、OTDR では超高速単パルスレーザー光を必要とし、OFDR では大量のデジタル演算を必要とし、OCDR では機械的なスキャン機構を必要とする。これらに対して、光波コヒーレンス関数の合成^{38) -43)}を利用することにより、任意の距離における断層像を、機械的なスキャンやデジタル処理を必要としない、シンプルな構成のシステムとして構築できる。しかしながら、断層像を選択する手段としてホログラフィ技術を利用していたため^{40) -42)}奥行き方向の分解能に制限を与えるという問題点があった。そこで本研究では、ホログラフィ技術の代わりに、MSLM を用いた2次元の光ロックインアンプを導入することにより問題点を解決することを目指した。

4.3.2. 光波コヒーレンス関数の合成による光情報処理

図 4-7 に光源に CW シングルモード LD を用いたマイケルソン干渉系を示す。スクリーン上に得られる出力光の強度は、

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1}\sqrt{I_2} \cdot |\gamma| \cdot \cos\phi \quad (4-1)$$

と表される。ただし、 I_1 は物体光の強度、 I_2 は参照光の強度、 ϕ は物体光と参照光の位相差、 γ はコヒーレンス関数である。コヒーレンス関数は光源のパワースペクトラムのフーリエ変換として与えられ、光源のパワースペクトラムは光周波数(波長)変調を時間積分することによって合成される。光源の周波数変調は、高コヒーレントシングルモード LD への注入電流を直

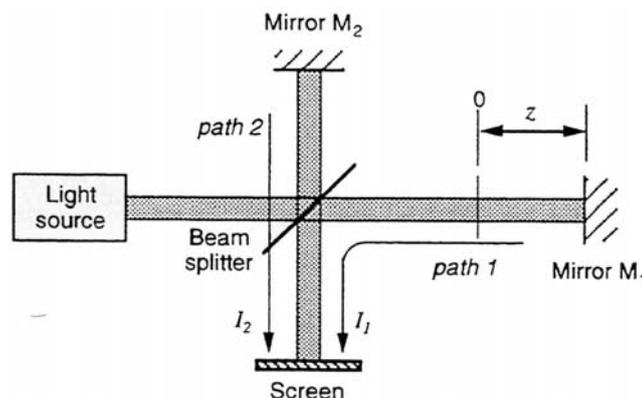


図 4-7 マイケルソン干渉系

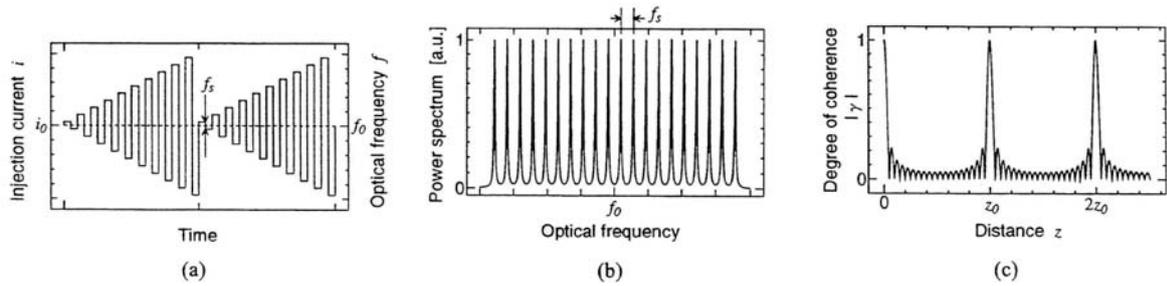


図 4-8 コヒーレンス関数の合成

接変調することにより実現できる。図 4-8(a)で示したように LD への注入電流を直接変調すると、図 4-8(b)に示したような多くの周波数対を有するパワースペクトラムが得られ、時間積分されることにより図 4-8(c)に示すような合成されたコヒーレンス関数を実現される。合成されたコヒーレンス関数は、十分多くの周波数対が存在する場合には、周期的なデルタ関数的形状を持つ。これは、光路差 z が特定の値 mz_0 ($m=0,1,2,\dots$) と等しい時にのみ干渉が起こることを意味する。なお、 z_0 は変調強度により制御することができる^{38)~40)}。

このことから、変調パラメータを適当に設定することにより、測定対象物体の範囲内で 1 つのみピークが立つようにコヒーレンス関数を合成することにより、対象物体のある奥行き位置でのみ干渉を発生させることにより断層像を取得できることがわかる。

ここで、干渉成分を検出するためにこれまでは図 4-9 に示すようなホログラフィ技術を利用して、ホログラムを形成するには物体光と参照光間にある傾き角を設定する必要があるが、この傾きが奥行き方向の分解能を制限する要因となっていた。

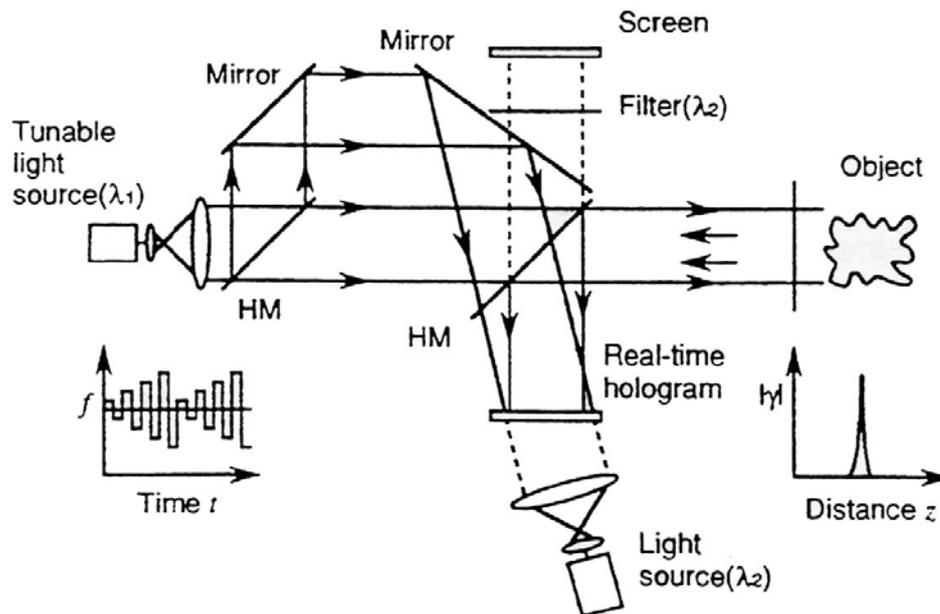


図 4-9 ホログラフィを用いたシステム

4.3.3. MSLMによる2次元ロックイン動作の応用

前述の問題点を克服するために、物体光と参照光が完全に並行である場合に、(4-1)式における干渉成分を検出する手段として同期検出を行う方法を検討した。(4-1)式における ϕ （物体光と参照光の位相差）に、 0 と π の位相変調を与えると、干渉成分は正と負の繰り返しとなる。この2次元の正と負の繰り返しパターンを検出するために、MSLMにおける2次元ロックイン動作を応用することとした。

MSLMでは、2次電子放出特性を利用することにより電荷の蓄積（加算）・放出（減算）を行うことができる⁴⁴⁾。そこで、 0 と π の位相変調と蓄積・放出のモードを同期させ、干渉成分が正の時に加算、負の時に減算動作とすることにより干渉成分のみの積算を実現でき、非干渉成分である I_1+I_2 は時間積分によりキャンセルされる。その結果、最終的な出力は干渉成分のみに比例し、機械的なスキャンやデジタル処理を一切用いずに断層像を得ることができる。

4.3.4. 実験結果及び考察

図4-10に、MSLMによる2次元ロックインアップを利用した実験システムを示す。上半分はマイケルソン干渉計の構成となっており、対称物として2枚のミラーを $z=40\text{cm}$ と $z=45\text{cm}$ として距離を変えて設置している。下半分がMSLMによる2次元ロックインアップ部である。光源には波長 670nm のMQWレーザダイオードを使用し、任意波形発生器により注入電流を直接変調する。 $z=40\text{cm}$ と $z=45\text{cm}$ に干渉ピークを発生させるために、周波数ペアを5つとし、周波数間隔 f_s を調整し、繰り返し周期 10ms のLD駆動波形とした。参照光は液晶位相変調器PM

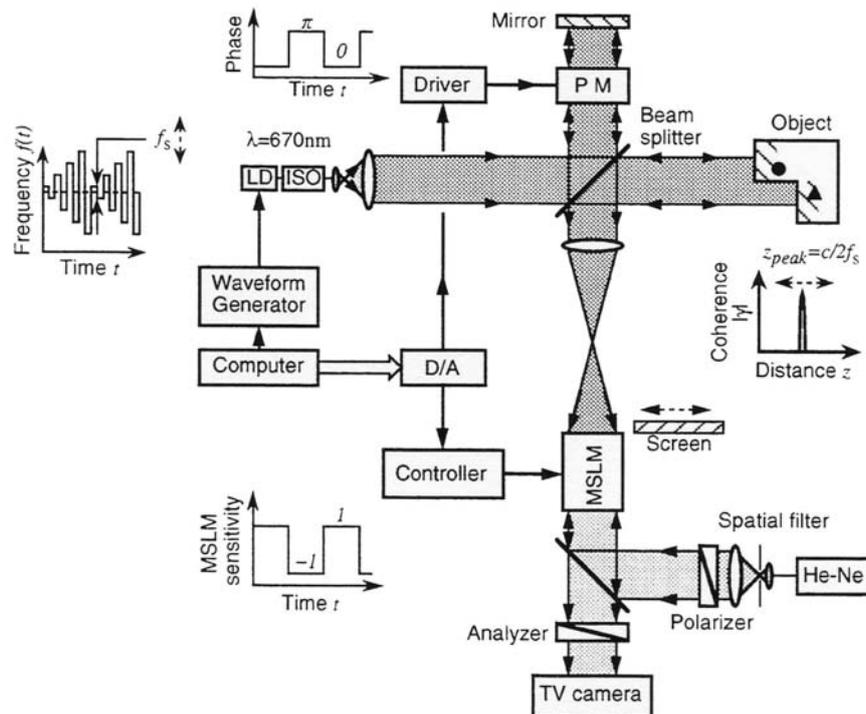


図4-10 MSLMを用いた実験システム

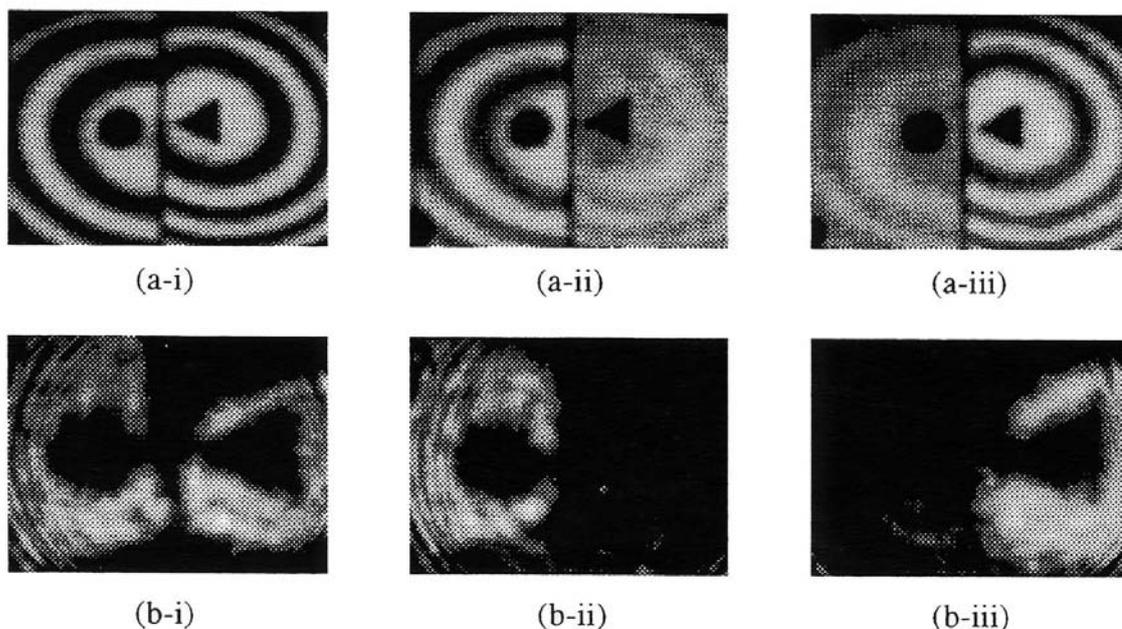


図 4-11 MSLM を用いた実験結果

により、物体光と参照光の位相差が 0 と π で、周期 200ms となるように制御した。次に、MSLM の駆動条件を調整し、一様光の場合に出力が現れないようにした。

まず、MSLM の入射面上に現れる光波コヒーレンス関数の合成により生じる干渉像を観察した結果を図 4-11(a)に示す。(a-i)は光波コヒーレンス関数の合成を行わない場合の出力像で 2 枚のミラーのどちらに対しても干渉縞が形成されているのがわかる。(a-ii)と(a-iii)は、光波コヒーレンス関数合成により片方のミラーのみを選択した場合の出力像である。それぞれ、選択されたミラーに対してのみ干渉縞が形成されている。次に、MSLM を 2 次元同期検出モードで動作させることにより得られた同期検出結果を図 4-11(b)に示す。それぞれ、(a)において干渉縞が形成されていた部分のみ抽出されていることがわかる。

本実験では、奥行き方向の距離分解能はおおよそ 3cm であった。計測時間に相当する MSLM での同期検出時間は、MSLM への入射光強度が $10 \mu \text{W}/\text{cm}^2$ で干渉縞のビジビリティが 50% の時に 2 から 4 秒であった。得られた画像はまだ十分なものではなかった。これは、MSLM 内部におけるフォーカス条件や読み出し光学系における干渉ノイズの影響と思われる、MSLM の改良及び低コヒーレントな読み出し光源を用いることで解決できるものと考えられる。また、位相差 ϕ が空間的に異なるために、検出されたトモグラムは均一ではなかった。今回の実験では、2つの対象の中心で位相差がなくなるように位置を調整し、その部分に同期するように MSLM を駆動したため、中心部分しか検出不可能であった。さらに、位相差 ϕ は周囲の環境によりランダムに揺らぐことが予想される。よって、実応用に際しては、これらの位相揺らぎを考慮した同期検出を行う必要がある。

以上のように、デバイス側とシステム側の両面における課題が明らかとなった。デバイス側

では、更なる高解像度化及び高速化の必要性が示唆される。システム側では、干渉ノイズを低減させる方式や新たな同期検出法の検討が必要であることが示された。現状で利用可能なデバイスを積極的に利用し、このようなユニークな研究を行うことができたが、そこで得られた結果から、更なるデバイス及びシステムの改良が必要であることも示された。

4.4. あとがき

本章では、入力感度が高く、カスケード接続・光フィードバックが可能で、様々な内部演算を行うことができるという特徴を持った MSLM の応用として、光デジタル演算と光アナログ演算の両面からアプローチを行った。

光デジタル演算としては、MSLM の高感度特性を利用しカスケード接続による光論理演算システムを構築し、その有効性を示した。光アナログ演算では、光の干渉を利用した光波コヒーレンス関数合成による光断層像取得システムにおいて、MSLM における 2 次元光ロックインアンプ動作を適用することにより、これまでの問題点であった奥行き方向の分解能向上を目指し検討を行った。その結果、2 次元の光ロックインアンプ機能が有効に働き、機械的スキャンング不要で大量のデジタル演算も必要とせず、光断層像を取得することに成功した。

以上のように本研究では、MSLM の特徴を積極的に活用した並列光情報処理への応用を検討し、実際にシステムを構築することにより MSLM の並列光情報処理への適用性を示す事ができ、電子産業と比較してまだまだ未熟なデバイスしか存在しないが、光の本質的に持つメリットを生かす応用研究は十分可能であることが示された。一方で、デバイス側・システム側のどちらにも改良の余地があることも明らかとなり、両面からの積極的な研究が必要であると考えられる。そのためには、双方が共に情報を共有して効率的な研究を行うことが今後の光産業への貢献につながると考える。

4.5. 第4章の参考文献

- 1) T.Hara, N.Mukozaka and Y.Suzuki, "Optical Parallel Logic Operation with Microchannel Spatial Light Modulator", Proc.SPIE, Vol.625, pp.30-34 (1986).
- 2) M.Hashimoto, K.Kitayama and N.Mukozaka, "Space-variant operations using an optical parallel processor based on polarization encoding", Opt. Lett., Vol.14, pp.384-386 (1989).
- 3) M.Hashimoto, K.Kitayama and N.Mukozaka, "Programmable optical parallel processor based on polarization modulation: Cascade operation", Appl. Opt., Vol.28, pp.4305-4312 (1989).
- 4) M.Hashimoto, K.Kitayama and N.Mukozaka, "Neighborhood operations of optical parallel processor", Jpn. J. Appl. Phys. Part 2, Vol.29, pp.L1256-L1258 (1990).
- 5) T.Kurokawa, S.Fukushima and H.Suzuki, "Dynamic Optical Processing for Parallel Digital Addition and Subtraction", Opt. Comp. Technical Digest, Vol.9, pp.356-359 (1989).
- 6) Ph.Demaleprade, P.Chavel, K.Hibino, H.Yajima and T.Yatagai, "Use of a micro-channel spatial light modulator in a sequential logic optical adder", Proc. SPIE, Vol.963, pp.601-606 (1988).
- 7) H.Suzuki, A.Nagatsu and Y.Hayashi, "Programmable Symbolic Substitution Systems", Conference Record of 1990 International Topical Meeting on OPTICAL COMPUTING, pp.81-82 (1990).
- 8) A.D.Fisher, W.L.Lippincott and J.N.Lee, "Optical Implementation of Associative Networks with Versatile Adaptive Learning Capabilities", Appl. Opt., Vol.26, pp.5039-5054 (1987).
- 9) S.Isobe, J.Otsubo, T.Takemori and K.Fujita, "Application of Microchannel Spatial Light Modulator to Speckle Observations", ESO Cont. Workshop Proc., Vol.29, pp.401-405 (1988).
- 10) F.T.S.Yu, Q.W.Song, Y.Suzuki and M.H.Wu "Application of a microchannel spatial light modulator to real-time joint transform correlation", Proc.SPIE, Vol.963, pp.322-326 (1988).
- 11) F.T.S.Yu, Y.Suzuki and M.H.Wu "Microchannel Spatial Light Modulator with White Light Processing", Opt. Commun., Vol.63, pp.371-374 (1988).
- 12) M.Ishikawa, N.Mukozaka, H.Toyoda and Y.Suzuki, "Optical associatron: A simple model for optical associative memory", Appl. Opt., Vol.28, pp.291-301 (1989).
- 13) M.Ishikawa, N.Mukozaka, Y.Toyoda and Y.Suzuki, "Experimental studies on learning capabilities of optical associative memory", Appl. Opt., Vol.29, pp.289-295 (1990).
- 14) H.Toyoda, N.Mukozaka, Y.Suzuki and M.Ishikawa, "Adaptive optical processing system with optical associative memory", Appl. Opt., Vol.32, pp.1354-1358 (1993).
- 15) Z.He, K.Hotate and N.Mukozaka, "Selective Image Extraction by Synthesis of the Coherence Function Using Two-Dimensional Optical Lock-in Amplifier with Microchannel Spatial Light Modulator", IEEE Photonic Technol Lett, Vol.9, pp.514-516 (1997).
- 16) A.A.Sawchuk and T.C.Strand, "Digital optical computing", Proc. IEEE, Vol.72, pp.758-779 (1984).
- 17) 原勉, "空間光変調器と光アナログ演算", OplusE, Vol.184, pp.101-108 (1995).
- 18) J.Tanida and Y.Ichioka, "Optical logic array processor using shadowgrams", J. Opt. Doc. Am., Vol.73, pp.800-809 (1983).
- 19) A.Huang, "Architectural considerations involved in the design of an optical digital computer", Proc. SPIE, Vol.72, pp.780-786 (1984).
- 20) B.K.Jenkins, P.Chavel, R.Forchheim, A.A.Sawchuk and T.C.Strand, "Architectural implications of a digital optical processor", Appl. Opt., Vol.23, pp.3465-3473 (1984).

- 21) P.S.Guilfoyle and W.J.Wiley”, “Combinational logoc based digital optical computing architectures”, Appl. Opt., Vol.27, pp.1661-1673 (1988).
- 22) T.E.Bell, “Optical computing: A field of flux”, IEEE SPECTRUM, the Aug. issue, pp.34-57 (1986).
- 23) G.Livescu, D.A.B.Miller, J.E.Henry, A.C.Gossard and J.H.English, “Spatial light modulator and optical dynamic memory using a 6x6 array of self-optic-effect devices”, Opt. Lett., Vol.13, pp.297-299 (1988).
- 24) K-H.Brenner, ”New implementation of symbolic substitution logic”, Appl. Opt., Vol.25, pp.3061-3020 (1986).
- 25) A.W.Lohmann and J.Weigelt, “Spatial filtering logic based on polalization”, Appl. Opt., Vol.26, pp.131-135 (1987).
- 26) J.Tanida, J.Nakagawa and Y.Ichioka, “Birefringent encoding and multi-channel reflected correlator for optical array logic”, Appl. Opt., Vol.27, pp.3819-3823 (1988).
- 27) 橋本仁, 北山研一, 向坂直久, “偏光符号化法を用いた光並列演算プロッセサ”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol88, pp.39-44 (1988).
- 28) K.Kityama, M.Hashimoto and N.Mukozaka, “Programmable Optical Parallel Processor by Polalization Encoding: Cascade Operation”, Proc. SPIE, Vol.963, pp.611-618 (1988).
- 29) M.Hashimoto, K.Kitayama and N.Mukozaka, “Space-variant operations using an optical parallel processor based on polalization encoding”, Opt. Lett., Vol.14, pp.384-386 (1989).
- 30) M.Hashimoto, K.Kitayama and N.Mukozaka, “Neighborhood Operations of Optical Parallel Processor”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.29, pp.L1256-L1258 (1990).
- 31) H.Chen, Y.Chen, D.Dilworth, E.Leith, J.Lopez and J.Valdmanis, “Two-dimensional imaging through diffusing media using 150-fs gated electronic holograohy techniques”, Opt. Lett., Vol.16, pp.487-489 (1991).
- 32) M.R.Hee, J.A.Izatt, E.A.Swanson and J.G.Fujimoto, “Femto-second transillumination tomograohy in thick tissues”, Opt. Lett., Vol.18, pp.1107-1109 (1993).
- 33) J.A.Moon, R.Mahon, M.D.Dumcan and J.Reintjes, “Three-dimensional reflective image reconstruction through a scattering medium based on time-gated Raman amplification”, Opt. Lett., Vol.19, pp.1234-1236 (1994).
- 34) M.Takeda and H.Yamamoto, “Fourier-transform speckle profilometry: 3-D shape measurements of diffuse objects with large height steps and/or spatially isolated surfaces”, Appl. Opt., Vol.33, pp.7829-7837 (1994).
- 35) U.Haberland, W.Rutten, V.Blazek and H.J.Schmitt, “Investigation of highly scattering media using near-infrared continuous wave tunable semiconductor laser”, Proc. SPIE, Vol.2389, pp.503-512 (1995).
- 36) D.Huang, E.A.Swanson, C.P.Lin, J.S.Schuman, W.G.Stinson W.Chang, M.R.Hee, T.Flotte, K.Gregory, C.A.Puliafito and J.G.Fujimoto, “Optical coherence tomograohy”, Science, Vol.254, pp.1178-1181 (1991).
- 37) J.A.Izatt, M.R.Hee, G.M.Owen, E.A.Swanson and J.G.Fujimoto, “Optical coherence microscopy in scattering media”, Opt. Lett., Vol.19, pp.590-592 (1994).
- 38) K.Hotate and O.Kamatani, “Optical coherence domain reflectometry by synthesis of coherence function”, J. Lightwave Technol., Vol.11, pp.1701-1710 (1993).
- 39) O.Kamatani and K.Hotate, “Optical coherence domain reflectometry by synthesis of coherence

- function with nonlinearity compensation in frequency modulation of a laser diode”, J. Lightwave Technol., Vol.11, pp.1854-1862 (1993).
- 40) K.Hotate and T.Okugawa, “Optical information processing by synthesis of the coherence function”, J. Lightwave Technol., Vol.12, pp.1247-1255 (1994).
 - 41) K.Hotate and T.Okugawa, “Selective extraction of a two-dimensional optical image by synthesis of the coherence function”, Opt. Lett., Vol.17, pp.1529-1531 (1992).
 - 42) T.Okugawa and K.Hotate, “Real-time optical image processing by synthesis of the coherence function using real-time holography”, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.8, pp.257-259 (1996).
 - 43) T.Saida and K.Hotate, “Methods to improve dynamic range and sensitivity in phase-modulating optical coherence domain reflectometry”, in Proc. OFD-11, pp.398-401 (1996).
 - 44) T.Hara, Y.Ooi, Y.Suzuki and M.H.Wu, “Transfer Characteristics of the microchannel spatial light modulator”, Appl. Opt., Vol.28, pp.4781-4786 (1989).

第5章 MSLMを用いた光ニューロコンピューティング

5.1. まえがき

光は原理的に高い並列性を有し、その特徴を生かして並列処理を高速に行おうとする光コンピューティングの研究が盛んに行われている。特に、従来の逐次型コンピュータの延長線上の技術では困難とされる空間的に高密度な並列処理機構の実現可能性に期待が集まっている。

一方で、生体の優れた情報処理機能を模倣して、新しい演算処理機構を構築しようとする研究が以前から行われている¹⁾⁻⁹⁾。このような考え方に基づく演算処理手法はニューロコンピューティングと呼ばれ、従来のコンピュータ技術が不得意としていた処理を中心として、並列処理を基本とする学習型情報処理機構を構築しようとするものである。

ところが、これを実現するためのハードウェアとして、脳における膨大な数の神経細胞に示されるような大規模並列処理をどうやって工学的に実現するかが問題となっていた。そこで、光の並列性に着目した光コンピューティング技術を導入することにより、ニューロコンピューティングにおける大規模並列性を実現しようとする研究が注目されている¹⁰⁾⁻¹⁴⁾。

本研究では、このようなアプローチに対してシステムを構成するデバイス面からの検討を行う。さらに、その結果を元に実際に光連想記憶システムを構築してその有効性を示す。次節では光コンピューティング技術で実現しようとしているニューロコンピューティングのひとつである連想記憶について概説し、その光学的実現方法である光アソシアトロンについて述べる。続いて光アソシアトロンの工学的実現方法について、空間光変調器（ここではMSLM）及びその他の光学素子の特性評価も含めて議論する。さらに、実際に構築された光連想記憶システムにおける実験結果を示しながら、システムの有効性を議論する。

5.2. 連想記憶モデル

5.2.1. 基本モデル

ニューラルネットワークモデルの中でも、とりわけ連想記憶モデルは演算構造が均質な並列性を持つことから、光演算の特徴を生かして高密度の演算構造を実現できる可能性がある。連想記憶モデルについては、古くから多くの提案がなされ活発な議論がなされてきた。その中で、中野はアソシアトロンと呼ぶ自己想起型連想記憶モデルを提案し、並列電子回路により工学的に実現した¹⁾。このアソシアトロンのような自己想起型連想記憶モデルは、各種のモデルの中でも特に単純な演算構造を持つため光演算による実現に適している。そこで、本研究では光アソシアトロンと呼ぶ学習機能を導入した光連想記憶システムを提案する¹⁵⁾。

光アソシアトロンでは、自己想起型の連想モデルを用いているため、全ての入出力パターンは、 r 次のベクトル

$$x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_r)^T \quad (5-1)$$

で表現される。ただし、 x^T はベクトル x の転置ベクトルを表す。光アソシアトロンでは、情報伝達媒体として光強度を用いているので、負の情報を表現することが困難である。つまり、(5-1)式における入出力ベクトルの要素は物理的な制限

$$x_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, r) \quad (5-2)$$

を受けることになる。

想起過程は、 $r \times r$ 次の記憶行列 M と入力ベクトル x との積に依存する想起出力 y (r 次のベクトル)を得る過程、

$$y = \phi_{out}(M \cdot x) \quad (5-3)$$

である。ただし、 ϕ_{out} は出力関数で、各要素の出力関数 $\bar{\phi}_{out}$ に分解することができ、(5-2)の各要素に対して、

$$y_i = \bar{\phi}_{out} \left(\sum_{j=1}^r m_{ij} \cdot x_j \right) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, r) \quad (5-4)$$

と表現できる。(5-3)式の演算は、乗算・加算・出力関数の3つの演算から構成されている。ここで、 m_{ij} は M の要素をあらわし、 x の要素と同様の理由により、 M の要素に対しても物理的制限

$$m_{ij} \geq 0 \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, r) \quad (5-5)$$

を受ける。 $\bar{\phi}_{out}$ は出力処理に相当し、一般に閾値処理などが用いられ、この出力処理もまた、

x に対する物理制限を受ける。

5.2.2. アソシアトロンの演算構造と相関学習

アソシアトロンでは、入出力ベクトルの要素を $[-1,0,+1]$ の 3 値で、 $\bar{\phi}_{out}$ もそれに応じて定義されている。さらに、記憶行列 M は、自己相関行列を k 個の入力パターンベクトル x_i ($i=1,2,\dots,k$) に対して、次式の演算を行う。

$$M = x_1 \cdot x_1^T + x_2 \cdot x_2^T + \dots + x_k \cdot x_k^T \quad (5-6)$$

ここでは、 x_k の各要素が上述したように 3 値であるため、この計算は論理演算（符号操作）と加算のみで実現でき、電子回路で実行するのに向いた簡単なアーキテクチャを実現している。しかし、 x_k の要素の平均が 0 に近い時に最適となるため、+1 である要素の数と -1 である要素の数をほぼ同じにしなければならない。

5.2.3. 光アソシアトロンの演算構造と直交学習

前述したように、光の強度を情報の媒体とする光アソシアトロンでは、正負の情報を同時に表現できず、正と負で別々の光演算回路を用いるか、正のみを用いて性能を落とすかの二者択一を迫られる。光アソシアトロンではこの点を克服するために、学習方法として、Kohonen が示した直交学習法^{7), 8)}を導入した。この方法は、フィードバック型の学習方法で、学習途中の想起結果と入力の違いを参照しながら記憶行列を収束させる方法である。このため、直交性の低いパターンに対する連想記憶を行う場合や、負の値を表現できない場合においても効果的な学習が実現できる。

具体的な方法としては、学習の途中にある記憶行列 M_t に対する想起結果 y と学習しようとする入力ベクトル x から、 x の自己相関行列に対応した修正行列 $(x - y) \cdot x^T$ を作り、学習ゲイン α を掛けた上で M_t を修正するものである。すなわち、

$$M_{t+1} = M_t + \alpha(x - y) \cdot x^T \quad (t = 1, 2, 3, \dots) \quad (5-7)$$

$$y = \phi_{out}(M \cdot x) \quad (5-8)$$

と書ける。この方法の概念図を図 5-1 に示す¹⁶⁾。

一般には、学習ゲイン α が $0 < \alpha < (2/\lambda)$ のとき（ここで λ は正の値を持つ行列 $x \cdot x^T$ のフロベニウス根）、記憶行列 M_t は収束し、 $0 < \alpha < (1/\lambda)$ の場合には、記憶行列 M_t がオーバーシュートすることなく収束する。

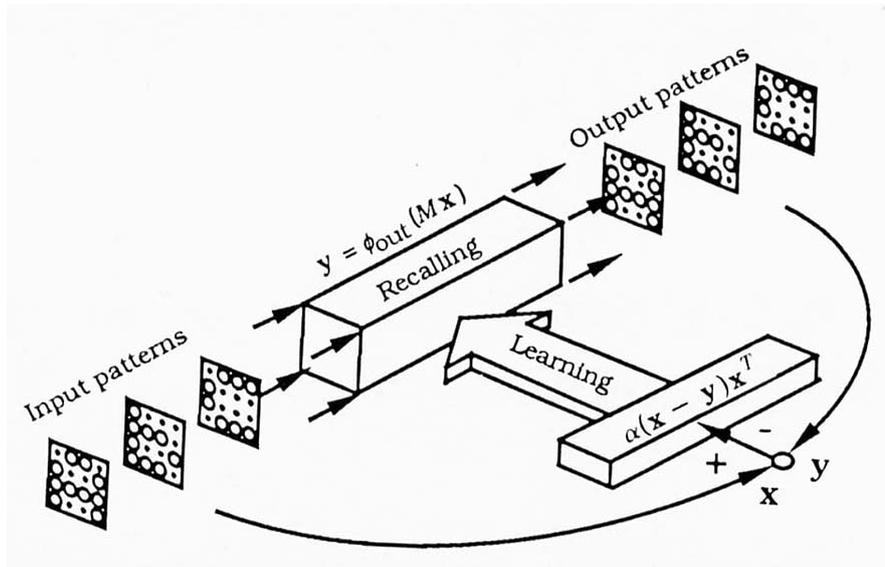


図 5-1 学習過程の概念図

(5-7)式における演算については、線形化した際の等価的な学習ゲインが上述した条件を満たしていれば、乗算は正確な掛け算でなくとも掛算の要素を含む狭義の単調増加関数でよく、同様に $\bar{\phi}_{out}$ は単調増加関数であれば学習は成立する。このように学習の導入により、演算の条件を緩和することができ、従って絶対精度の悪い演算でも連想記憶を実現できる可能性が拡がることになる。

5.3. 光アソシアトロンのシステムアーキテクチャ

光アソシアトロンでは並列光演算を用いるため、空間光変調器がキーデバイスとなる。連想記憶システムであるのでメモリー機能は必須であり、フィードバック型の直交学習法を導入するために、メモリー内容に対する加算・減算機能も必要となる。そこで、これらの条件に合致するデバイスとして、MSLMの適応性について検討した。

システム側では、原則として入出力をベクトル表現で扱う連想記憶モデルに対して、光の並列性を生かすために1次元の情報を2次元の情報として取り扱う手法を検討した。

5.3.1. 空間光変調管 (MSLM)

第2章で述べたとおり、MSLMは光電子増倍機能を利用しているため入力感度が $17\text{nJ}/\text{cm}^2$ と高く、結晶のダメージに依存する最大読み出し光強度も Ar レーザー光 (514.5nm) において $0.1\text{W}/\text{cm}^2$ と強い光での読み出しが可能であり、大きなファンイン・ファンアウトをとれる。また、書き込み光と読み出し光に同じ波長を利用できるので、カスケード接続やフィードバック接続が可能である。また、MSLMのトランスファー特性は、入力光エネルギー LT (L は照度、 T は照射時間) に対する出力光強度 I で定義され、次式で与えられる。

$$I = k \sin^2 \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{V + V_0}{V_\pi} \right] \quad (5-9)$$

$$V = a \cdot LT \quad (5-10)$$

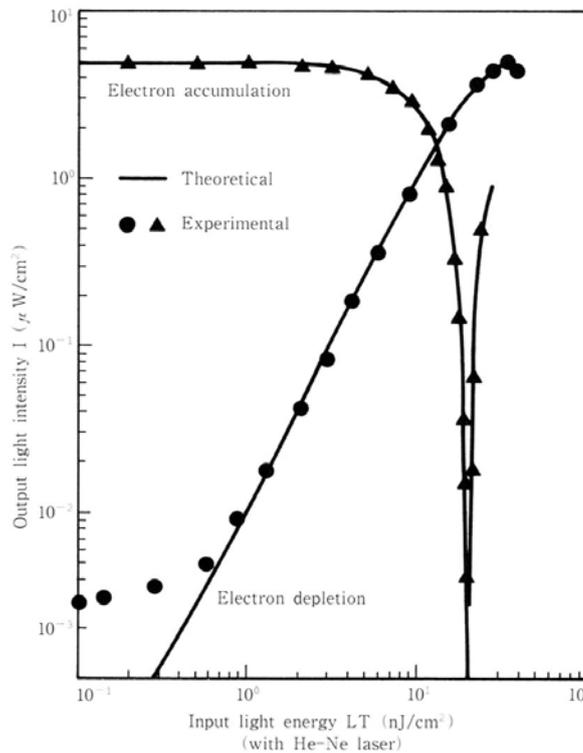


図 5-2 MSLM のトランスファー特性

ここで、 k 及び a は定数、 V_0 は自然複屈折の補正成分、 V_π は半波長電圧を表す。He-Ne レーザを用いた場合について実測した結果を理論値と合わせて図 5-2 に示す。図から明らかなように、MSLM において式(5-9),(5-10)によって示される入出力特性でアナログ量を取り扱うことが可能である。しかしながら、その γ 特性が 2 程度と立っているため、アナログ量を扱う場合の階調の制御が困難である。

そこで、フィードバック制御を前提としたアナログメモリーとしての MSLM の評価を図 5-3 に示すような実験系で行った¹⁷⁾。本実験系では、MSLM の書き込み量を発光ダイオード (LED) の発光時間で制御する積分型の操作を行った。ホトトランジスタ (PTR) の出力電圧 (V_{out}) が設定電圧 (V_{set}) に等しくなるまで LED を点灯させるという方法を用い、その時の出力電圧を測定した。その結果、図 5-4 に示すような特性が得られた。出力の安定性は測定系及び制御系のノイズレベルに等しく、MSLM による影響は認められなかった。よって、MSLM がアナログ記憶デバイスとして十分な特性を持つことが示された。この実験系においては、出力の安定性は背景光や不要な反射光の影響を受けやすいことも確認されており、実際の応用に際してはこれらの影響に対する配慮が必要である。

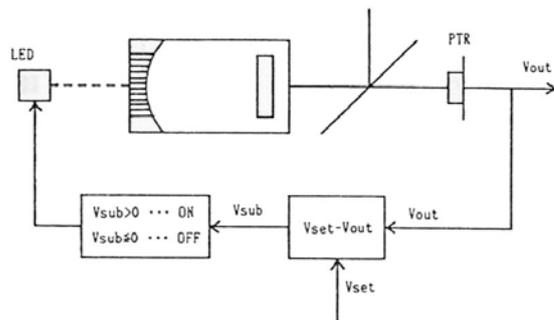


図 5-3 アナログ特性評価実験系

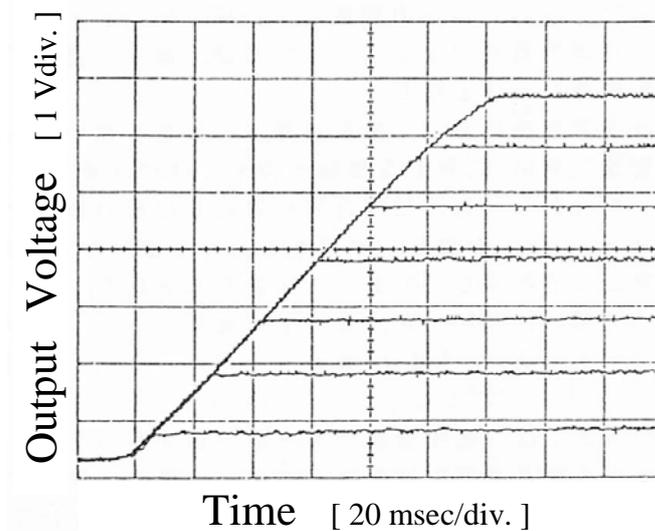


図 5-4 MSLM のアナログメモリー特性

MSLM の光変調媒体である電気光学結晶及び誘電体ミラーは絶縁体であるため、形成された電荷像は保存されるので、2次元の光メモリーとして機能する。さらに、2次電子放出特性を利用すると、電気光学結晶上の電荷の蓄積・放出を制御することにより電荷像の加算及び減算が実行できる。ただし、MSLM には表現できる量の上限及び加減が存在するので、演算はこの範囲内でのみ実現される。また、MSLM のダイナミックレンジは 1000:1 以上であり、十分なアナログ量を取り扱うことが可能である。

5.3.2. 空間コーディング法

前節で述べたように、連想記憶モデルでは、原則として入出力パターンをベクトル表現で扱う。しかし、光演算は2次元での高速並列演算に高い能力を持つので、ベクトル表現をそのまま物理的な1次元の情報に置き換えるよりも2次元の情報として扱う方が効果的である。そこで光アソシアトロンでは、データの配置を工夫することにより、全ての演算構造を2次元のまま扱う。このデータ配置方法を空間コーディング法^{15),17)-19)}と呼び、以下にその概要を述べる。

光アソシアトロンにおける行列演算は、全て(5-7)及び(5-8)式に帰着される。さらに(5-7)式の演算は、自己相関行列 xx^T に帰着される。従って、空間コーディング法が関与する演算は、基本的に xx^T の演算と Mx の2つに集約される。空間コーディング法は、この2つの演算と記憶行列 M の配置に整合性を持たせるものである。今回実現したシステムに合わせて、入出力ベクトルの次元が16の場合について述べる。図5-5にAのパターンを例にその様子を示す。

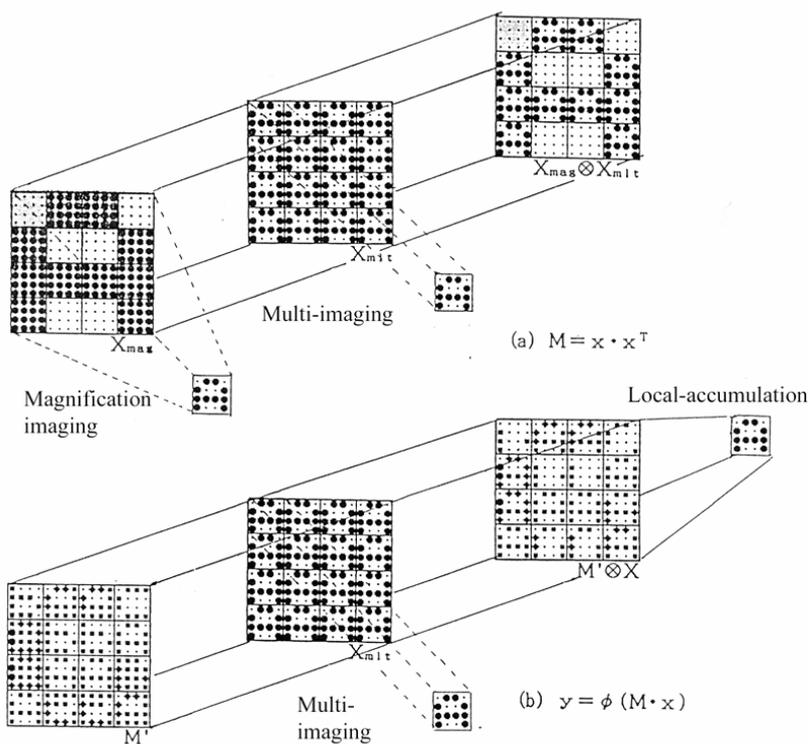


図 5-5 空間コーディング法

n 次元の入出力ベクトル x は、2次元の配置をもつものとし、その配置に対応して、次式で表される行列で表現する。

$$x = (x_{11}, x_{12}, \mathbf{K}, x_{1n}, x_{21}, x_{22}, \mathbf{K}, x_{2n}, \mathbf{K}, \mathbf{K}, \mathbf{K}, x_{n1}, \mathbf{K}, x_{nn})^T \quad (5-11)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_{11}, & x_{12}, & \Lambda & \Lambda & x_{1n} \\ x_{21}, & x_{22}, & & & M \\ M & & O & & M \\ M & & & O & M \\ x_{n1}, & \Lambda & \Lambda & \Lambda & x_{nn} \end{bmatrix} \quad (5-12)$$

自己相関行列 xx^T の演算は、この x を拡大化（この光学系を拡大結像系と呼ぶ）した行列 X_{mag} と、同様に x を多重化（この光学系を多重結像系と呼ぶ）した行列 X_{mlt} とのアダマール積 \otimes で表現される。アダマール積はマトリックスの各要素毎の掛け算であり、光学系では、画像（空間光変調器に形成された強度変調画像）の重ね合わせとして実行される。この表現に対応して記憶行列の配置も変える。この目的で配置を変えた記憶行列を M' と置く。以下の式が導出される。

$$M' = X_{mag} \otimes X_{mlt} \quad (5-13)$$

$$X_{mag} = \begin{bmatrix} X_{11}, & X_{12}, & \Lambda & \Lambda & X_{1n} \\ X_{21}, & X_{22}, & & & M \\ M & & O & & M \\ M & & & O & M \\ X_{n1}, & \Lambda & \Lambda & \Lambda & X_{nn} \end{bmatrix} \quad (5-14)$$

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{ij}, & x_{ij}, & \Lambda & \Lambda & x_{ij} \\ x_{ij}, & x_{ij}, & & & M \\ M & & O & & M \\ M & & & O & M \\ x_{ij}, & \Lambda & \Lambda & \Lambda & x_{ij} \end{bmatrix} \quad (5-15)$$

$$X_{mlt} = \begin{bmatrix} X, & X, & \Lambda & \Lambda & X \\ X, & X, & & & M \\ M & & O & & M \\ M & & & O & M \\ X, & \Lambda & \Lambda & \Lambda & X \end{bmatrix} \quad (5-16)$$

一方、想起演算は、記憶行列 M と入力ベクトル x のベクトル-マトリックス演算を行えば良いので、自己相関行列と同様に2次元配置においては、記憶行列 M と X_{mlt} のアダマール積を実行し、ブロック毎の局所和（この光学系を局所結像系と呼ぶ）を行えば良い。実際の最終出力 y は次式で示される。

$$y' = \phi_{out} \left[\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n (M' \otimes X'_{mlt}) \right]$$

$$= \begin{bmatrix} \phi_{out} \left[\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n (M' \otimes X'_{mlt}) \right], & \Lambda & \Lambda & \Lambda & , \phi_{out} \left[\sum_{k=1}^n \sum_{l=(n-1)n+1}^{n \times n} (M' \otimes X'_{mlt}) \right] \\ \phi_{out} \left[\sum_{k=n+1}^{2n} \sum_{l=1}^n (M' \otimes X'_{mlt}) \right], & O & & & M \\ M & & O & & M \\ M & & & O & M \\ \phi_{out} \left[\sum_{k=(n-1)n+1}^{n \times n} \sum_{l=1}^n (M' \otimes X'_{mlt}) \right] & \Lambda & \Lambda & \Lambda & , \phi_{out} \left[\sum_{k=(n-1)n+1}^{n \times n} \sum_{l=(n-1)n+1}^{n \times n} (M' \otimes X'_{mlt}) \right] \end{bmatrix} \quad (5-17)$$

以上のように、光アソシアトロン演算は3つの結像系（拡大結像系・多重結像系・局所結像系）とアダマール積の操作に分解でき、これらの操作を光並列演算で実現すれば良い。

5.3.3. MSLMと光学系のみによる構成

これらの演算を全てMSLM及び光学系で実現する光アソシアトロンを示す^{15),17)-19)}。前項で示したように、光アソシアトロン演算は3つの結像系とアダマール積で実現できる。つまり、(5-7)式は次のように書き替える事ができ、その演算を実現すれば良い。

$$M'_{t+1} = M'_t + \alpha X_{mag} \otimes X_{mlt} - \alpha Y_{mag} \otimes X_{mlt}$$

$$= M'_t + \alpha X_{mag} \otimes X_{mlt} - \alpha S_{mag} \{ \phi_{out} \left[\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n (M'_t \otimes X_{mlt}) \right] \} \otimes X_{mlt}$$

$$S_{mag}(X) = X_{mag} \quad (5-19)$$

3つの結像系については、拡大結像系は通常のレンズの機能であるので実現は容易と考えられる。多重結像系や局所結像系は、マルチレンズアレイや回折格子を用いる必要がある。また、アダマール積は2つのMSLMに記憶されている情報を連続に読み出すことにより、対応する2つの要素が並列に強度変調されることを利用すれば良い。このような方法に基づいて、全ての機能をMSLMと光学系で実現する光アソシアトロン例を図5-6に示す。

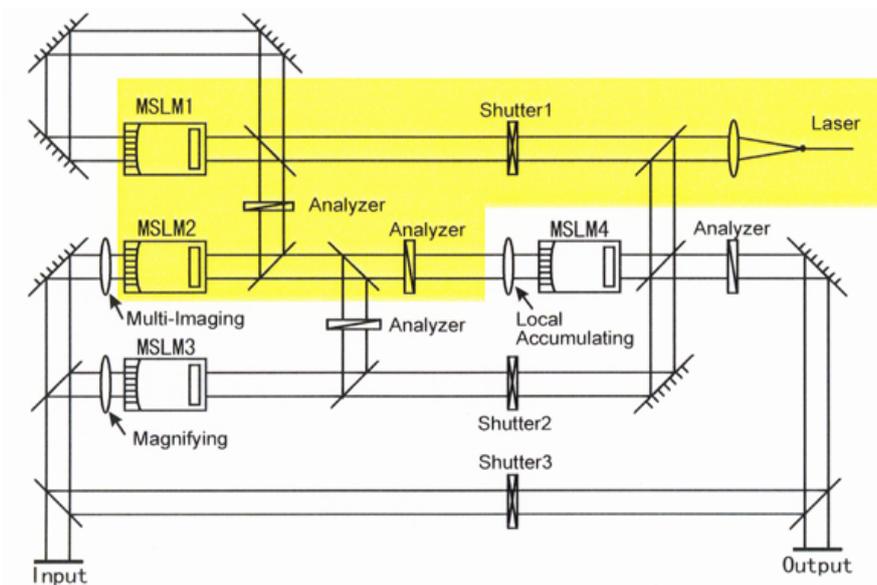


図5-6 MSLMと光学系による光アソシアトロン

図 5-6 の光学系において、(5-18)式の学習演算は、MSLM のデバイス内加減算機能を用いて、加算(第2項)および減算(第3項)の2回のプロセスに分けて行う。第1プロセスの加算では、MSLM2に入力画像 X の多重結像画像 X_{mlt} 、MSLM3に拡大結像画像 X_{mag} を表示し、連続して読み出すことで得られるアダマール積画像を、MSLM1を加算モードに電圧設定して加算する。第2プロセスの減算は、MSLM4に保持されている前回の出力画像 y を拡大結像してMSLM3に Y_{mag} を書き込む。第1プロセスと同様に、読み出しレーザーによってMSLM3とMSLM2を連続で読み出した画像を、MSLM1を減算モードに電圧設定して減算する。この動作を、学習が収束するまで繰り返すことで、記憶行列 M が形成される。また、上記の光演算では、迷光の影響を除去するために、図中に記載されているシャッターを適宜開閉する。

次に(5-17)式で示される想起演算について説明する。MSLM1には学習を行った記憶行列 M が保持されており、入力画像 X をMSLM2に多重結像して X_{mlt} を表示し、これらを連続して読出し、アダマール積 $M \otimes X_{mlt}$ を得る。この結果を局所結像光学系で、 $n \times n$ 画素毎に総和をとり、この総和をMSLM4に入力する。MSLM4の持つデバイス内での閾値関数機能を出力関数 ϕ_{out} として用いて、出力 Y が得られる。局所結像光学系としては、 $n \times n$ 領域のボケ関数を持ったフィルタなどを用いることで実現できる。

5.3.4. 実験システム

前項で提案した全光光学系では、全ての演算が光の特性を利用した並列演算であるため、ネットワークの規模によらない高速な演算能力を持つことになる。しかし、全ての演算を光学系で実現することはアライメントの問題なども含め困難である。そこで実際の実験系では、学習プロセスの光演算による

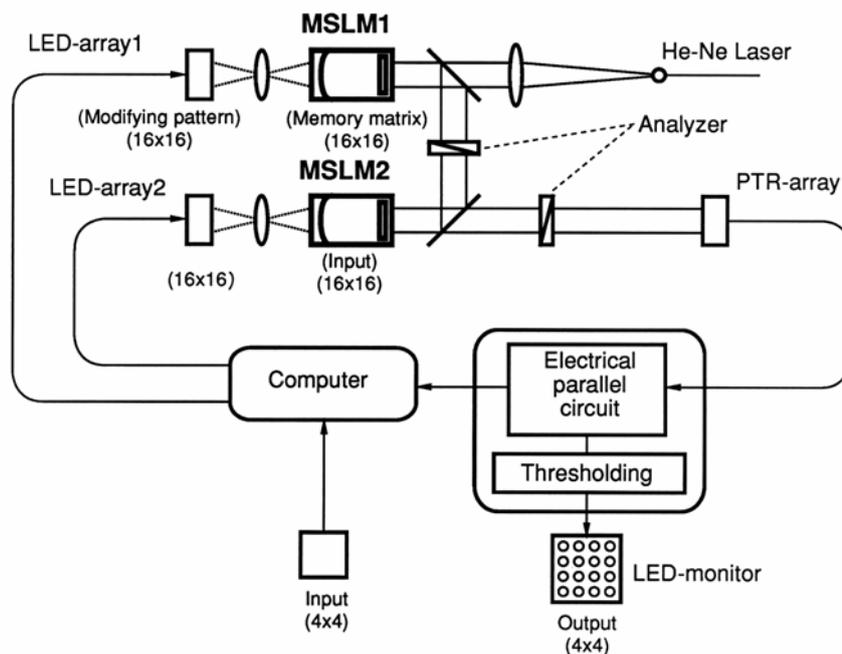


図 5-7 光アソシアトロン実験システム

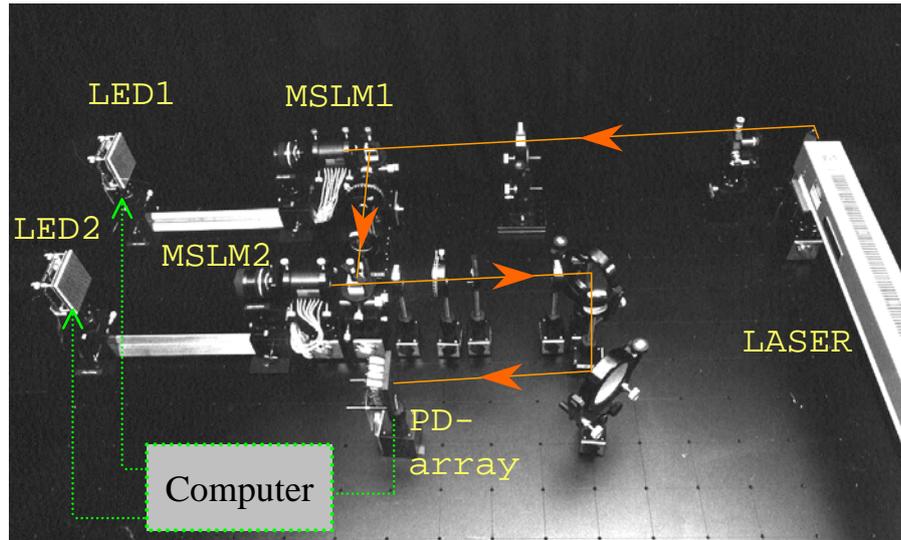


図 5-8 光アソシアトロン実験システムの外観写真

実証に焦点を当て、図 5-7 に示したような光-電子ハイブリット型の実験システムとした¹⁵⁾⁻¹⁹⁾。併せて図 5-8 に実験システムの写真を示す。これは、図 5-6 においてハッチで示された部分を光学系で実現したものであり、それ以外の補助部分はコンピュータを中心としたシステムで行った。実験光学系は2つのMSLM(MSLM1,MSLM2)、MSLMの書き込み用光源(LED1,LED2)、光検出器(PD)アレイで構成される。MSLM1は記憶行列 M の保持、MSLM2は入力画像の多重結像画像 X_{mt} の提示用とした。本実験システムは、入出力画像は 4×4 画素、記憶行列は 16×16 画素で構成されている。LED1およびLED2は 16×16 画素の2値表示機能を持ち、表示時間の制御でアナログ量を表現した。LED1はMSLM1の入力面に、LED2はMSLM2の入力面に結像される。MSLM1の出力面、MSLM2の出力面、PDアレイはレンズにより結像関係に配置され、MSLM1とMSLM2を連続して読み出された結果は、 16×16 画素のPDアレイで光電変換され、 4×4 画素毎に電流和をとった後に閾値演算ハードウェアで2値出力 Y が得られる。この出力結果 Y は、コンピュータ(HP-1000)にA/Dコンバータを介して取り込まれる。コンピュータでは、LED1への信号制御(出力 Y と入力 X から学習信号を生成表示)、LED2への信号制御(入力画像の多重結像画像 X_{mt} の提示)、MSLM1、MSLM2への演算モード指令を行う。学習プロセスでは、LED1に前述したように、正の学習信号と負の学習信号をMSLM1のモード(加算/減算)を切り替え順次表示して、MSLMの記憶行列に加減算を行う。想起プロセスでは、既に学習を終えた記憶行列 M に対して、入力画像 X の多重結像画像 X_{mt} をMSLM2に提示することで、MSLM1とMSLM2を連続して読み出した画像がPDアレイに入力され、出力結果 Y が得られる。

実際の光学系構築に際しては、使用する光学素子の歪や不均一性が存在し、光学系のアライメントと相まって高精度なシステムを実現するには困難が予想される。光の並列性を最大限に利用しようとする freespace の光学系においては、今後この問題点及をいかに解決していくかが大きな課題と思われる。また、光学系の小型化についても今後の研究課題であると考えられる。

5.4. 実験結果及び考察

5.4.1. 基礎実験結果

これまでに提案されている光演算を用いた連想記憶システムでは、モデルの提案に焦点が置かれ、詳細な実験データが報告されていない。そこで、光アソシアトロンに関する基礎的な実験を行った¹⁵⁾。パターン計測は、計測用 TV カメラと画像解析装置を用いて行った。

既に行った MSLM におけるアナログメモリーとしての評価において、MSLM は中間調による演算を実行できるが、シェーディング（不均一性）を持つことがわかっている。さらに、光学システムではそれ以外にも、レーザー光の分布や測定精度もシステム全体の安定性に影響を及ぼす。そこで、MSLM の持つシェーディングを、実際に光アソシアトロンを実行するシステム上の配置に合わせた図 5-9 の画素配列において、それぞれの読み出し光量分布を測定した結果を図 5-10 に示す。本結果は、実際に記憶行列を扱う図 5-7 における MSLM1 において、一様光を照射した時の書きこみ結果を読み出したものである。図 5-10 から明らかなように、MSLM1 では、右よりのブロックにおいて読み出し光量が著しく低いことが見て取れる。この不均一性を考慮するとオープンループ型システムやモニタ機構を持たないシステムでは正確なアナログ処理の実現が困難である。

次に、MSLM の書き込み時の過渡応答特性を評価した。書き込み時間が長すぎた場合には、電荷が過剰に供給されるため、隣接ブロックにまでじみ出る可能性があり、その場合には記憶行列の情報のオーバーラップとなりシステムの安定性に大きな影響を及ぼすと予想される。そこで、書き込み時のパラメータにより鮮明な書き込み条件を得るために、書き込み光強度と書き込み時間により書き込まれた LED パターンの反値幅とピークがどのように変化するかを測定した。LED アレイ上の特定の 2 点について、半値幅の結果を図 5-11(a)に、ピークの結果を図 5-11(b)に示す。

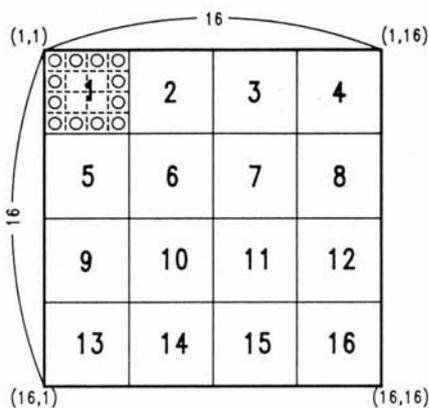


図 5-9 記憶行列の空間的配置

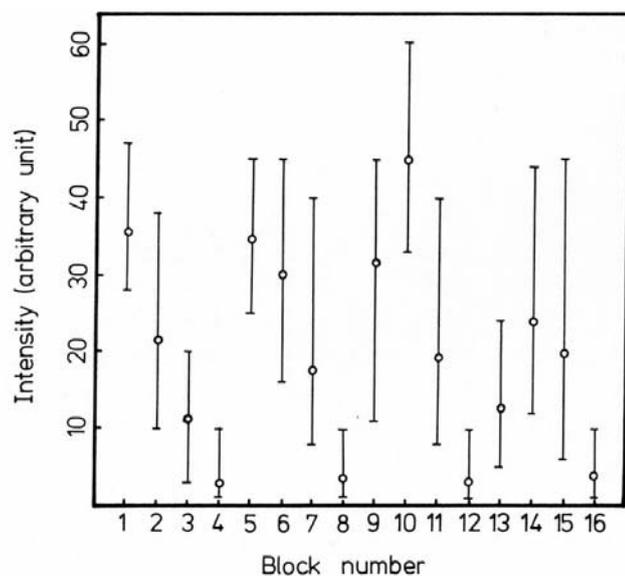


図 5-10 MSLM の不均一性評価結果

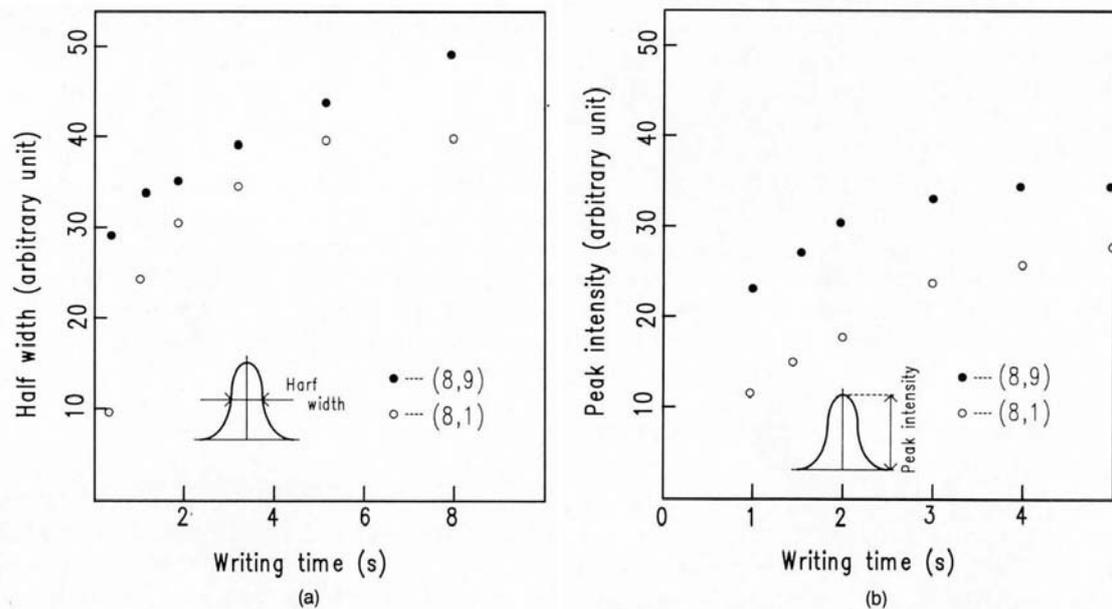


図 5-11 MSLM の書き込み特性

続いて、書き込みパターン提示用の LED アレイの光量不均一性を評価した所、LED の発光強度にも大きなバラツキがあることがわかった。これは、LED の発光効率の違いと光軸のズレに起因するもので、発光強度の平均に対して最大±50%程度のバラツキが見られた。同様のことは受光素子であるホトトランジスタ (PTR) においても問題となる。そこで、PTR については、なるべくバラツキを少なく押さえることを目的として、1つ1つ変換効率を測定してスクリーニングを行った。しかしながら、それでも出力平均に対して±60%程度のバラツキが見られた。このような光デバイスの不均一性は、特に光アナログ処理システムにおいては避けられない問題であり、何らかの方法でこの不均一性を補正することが必要である。

最後に、本システム全体の安定性を評価した。PTR のノイズレベルはおよそ 60mV で、アナログ電子回路のオフセット電圧がおよそ 40mV であるから、予想される最大ノイズレベルは、 $40+60=100\text{mV}$ 程度であり、200mV の安全を見ておけば良さそうである。この状況の元で、MSLM の読み出し光量レベルは十分安定していた。また、LED および PTR で構成されるフィードバックシステムにおいても、その出力は十分制御範囲内であった。本システムにおける PTR の出力は最大 10V であり、ノイズマージンを 200mV とすれば、 $10/0.2=50$ レベルの階調レベル分解能が得られる。MSLM における階調分解能はさらに高いので、これらアナログ電子回路部分の性能アップにより、さらなるシステムの性能向上が見込まれる。

5.4.2. 想起実験結果

本光アソシアトロン実験システムにおいて、光演算が確実に機能しているかを確認するために、コンピュータシミュレーションにより学習させた記憶行列を直接システムにセットして想起実験を行った¹⁵⁾。まず、直交性の良い3つのパターンについて、計算の条件を入出力面は4

×4、記憶行列は 16×16 の分解能でシミュレーション上で学習させた。また、(5-18)式における学習ゲイン α を 0.25、閾値レベルを 0.4 とし、入出力は 2 値で行った。図 5-12 に、コンピュータシミュレーションにより得られた記憶行列を、学習パターンと共に示す。書き込みに際しては、常時読み出し光レベルをモニタすることにより適応的に記憶行列を書き込んだところ、ほぼシミュレーションどおりの記憶行列を MSLM1 に形成することができた。図 5-13 に、形成された記憶行列を読み出した結果を示す。○がレベル 1、△がレベル 2 を示すが、ブロック 16 はシステムの不均一性が大きく十分な SNR が確保できなかったため、レベル 1 と 2 がうまく分離できない結果となった。

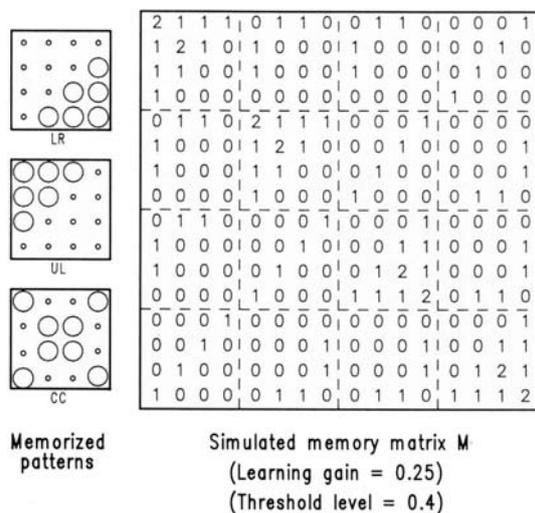


図 5-12 学習パターンと記憶行列

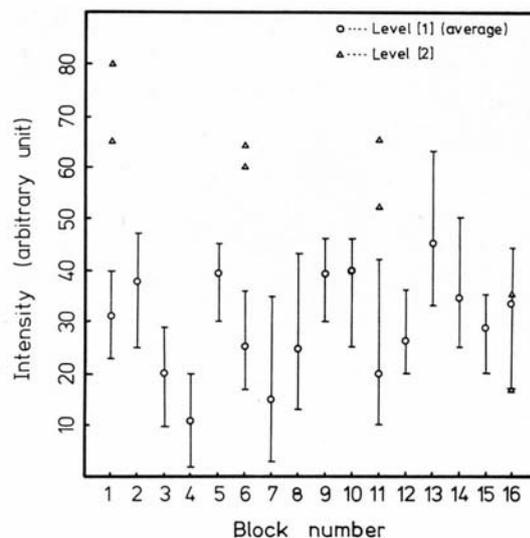


図 5-13 記憶行列読み出し結果

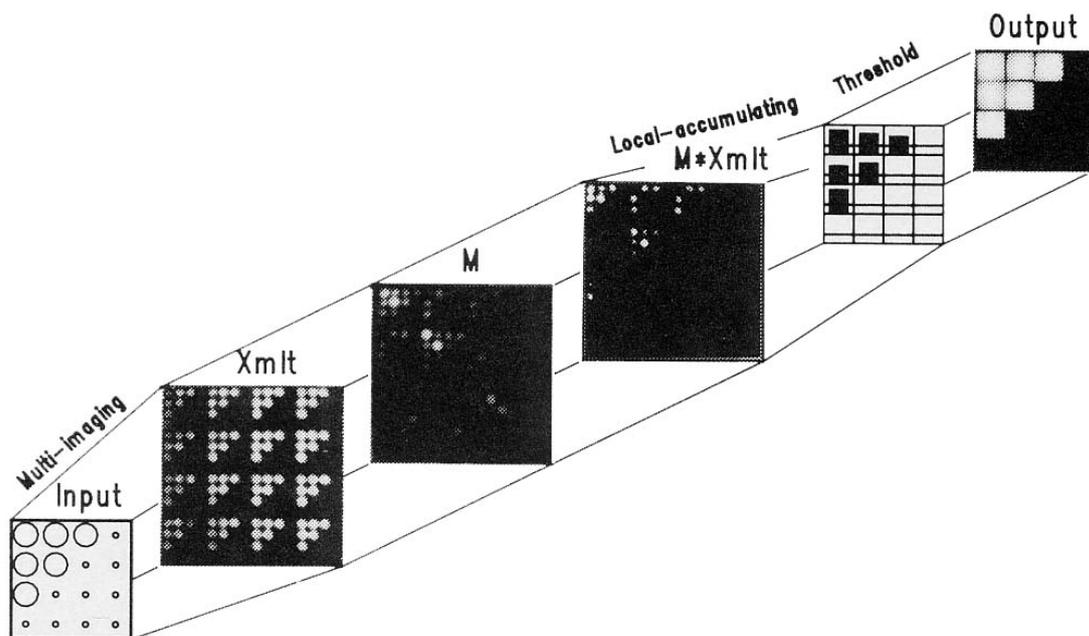


図 5-14 想起過程の模式図

想起実験は、想起用の入力パターンの多重結像パターンを LED2 で提示し MSLM2 に書き込む。MSLM2 を読み出した後、続けて記憶行列の書き込まれた MSLM1 を読み出すことにより、入力パターンの多重結像パターンと記憶行列とのアダマール積を実行させる。その結果を PTR で受光した後、ブロック毎に電流値加算を行った後、閾値処理をして想起結果を得る。以上の過程を図 5-14 に模式的に示す。さらに、学習パターンに対してノイズや欠けを加えたパターンについて想起実験を行った結果を図 5-15 に示す。その結果、学習パターンに対するノイズや欠けを加えたものに対しても、シミュレーションの結果どおり、学習パターンを想起しており、光連想記憶がうまく機能していることが確認された。

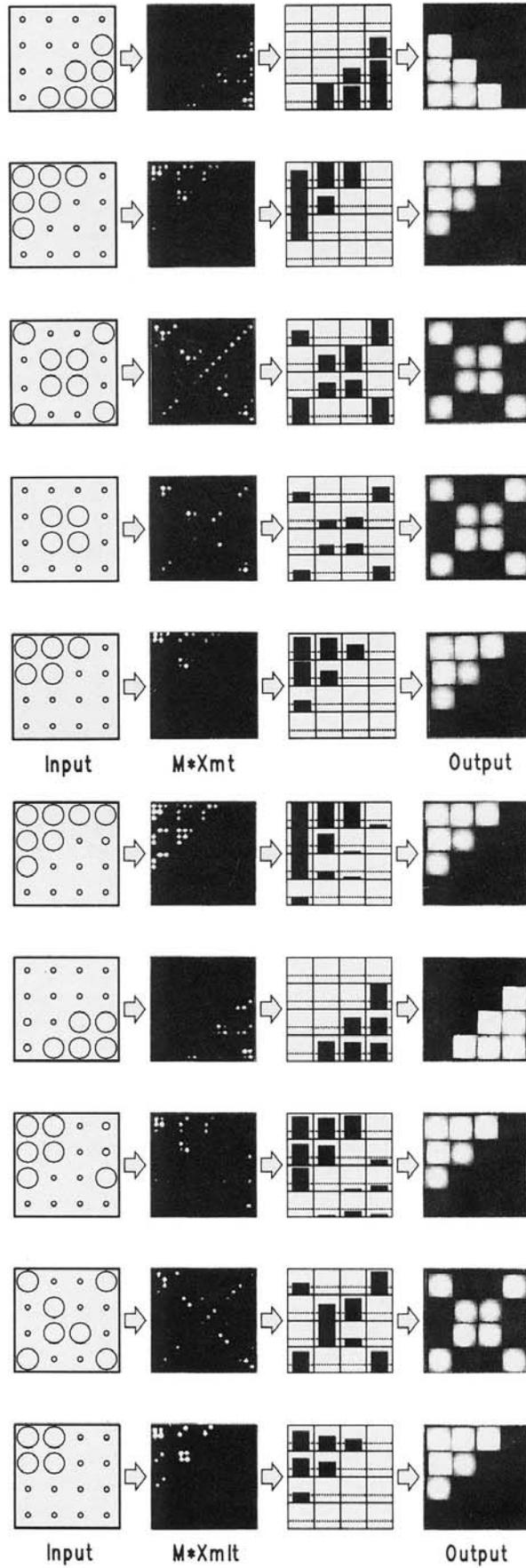


図 5-15 学習パターンにノイズや欠けのあるパターンを入力パターンとした想起実験結果

5.4.3. 学習過程における記憶行列の収束結果

学習実験を行うに当たり、システムの一部について新たに2つの改良を行った。まず、従来のシステムでは PTR への入射光強度がかなり小さいために、微弱光計測となって出力電流が非常に小さく温度ドリフトが避けられず、その結果、長時間かかる学習の実験が行えなかった。そこで、検出回路に温度補償回路を付加し安定化を図り、学習実験に必要な時間程度は安定な測定ができるように改良した。また、出力処理も従来は電子回路による閾値処理だけであったが、アナログ入力により計算機内部で実行できるように改良した。その結果、閾値処理ばかりでなく、アナログ出力や Sigmoid 関数出力なども扱うことが可能となった。これらの改良により、(5-7)、(5-8)式における α 及び ϕ_{out} が広範囲にわたって変更可能となった。そこで新たに、学習時の系の振る舞いについて、基礎的な実験を行った¹⁶⁾。この実験の目的は、学習時の記憶行列ならびに出力の変化を測定することにある。出力関数 ϕ_{out} として、

$$\phi_{out}(V_{out}) = \frac{(V_{out} - V_{min})}{(V_{max} - V_{min})} \quad (5-20)$$

と表される。ここで V_{out} は、動作時の PTR の出力電圧であり、 V_{max} ならびに V_{min} は事前に設定する定数である。このうち、 V_{max} は入力ならびに記憶行列を全て最大値にしたときの PTR の出力であるが、通常の実験では最大値に近い値は使わないので動作範囲を限定する係数（今回の実験では 0.5）を掛けている。また、 V_{min} は入力ならびに記憶行列を全て最小値にしたときの PTR の出力電圧である。つまり、 ϕ_{out} は実験上の動作範囲で正規化した線形関数である。したがって、入出力ならびに記憶行列は全てアナログ量である。また、実験において学習ゲイン α は(5-18)式に基づいて設定された α に比例して MSLM の書き込み時間を制御している。

パターン学習過程の実験結果を図 5-16 に示す。この図では、入力パターンとして {A,b,c} の3つのパターン（on が 0.8、off が 0.0）を学習させている。学習ゲインは 0.1 である。また学習の順序は {A,b,c} の順で行い、図ではこの3つのパターンの学習させることで1回の学習としている。したがって、1回の学習で記憶行列を3回書き替えている。また、出力パターンのアナログ量の表現がわかりにくいので、想起結果の出力表現（システムはアナログで働いているが）には閾値（0.5）処理を行ったパターンを示している。

図 5-16(a)は、学習の最初のサイクルを示す。初期状態では他ににも学習されておらず記憶行列に何も情報が無いので、入力パターン {A} の自己相関行列そのものが、空間コーディング法にしたがった配置で記憶行列に書き込まれている。続いて、{b}、{c} の学習が行われ、{A,b,c} に関する記憶行列が順に形成される。1回目の学習は自己相関行列をそのまま加算したものにほぼ等しくなる。よって、相関学習で得られる記憶行列に近く、想起結果を見ると性能が良くないことがわかる。

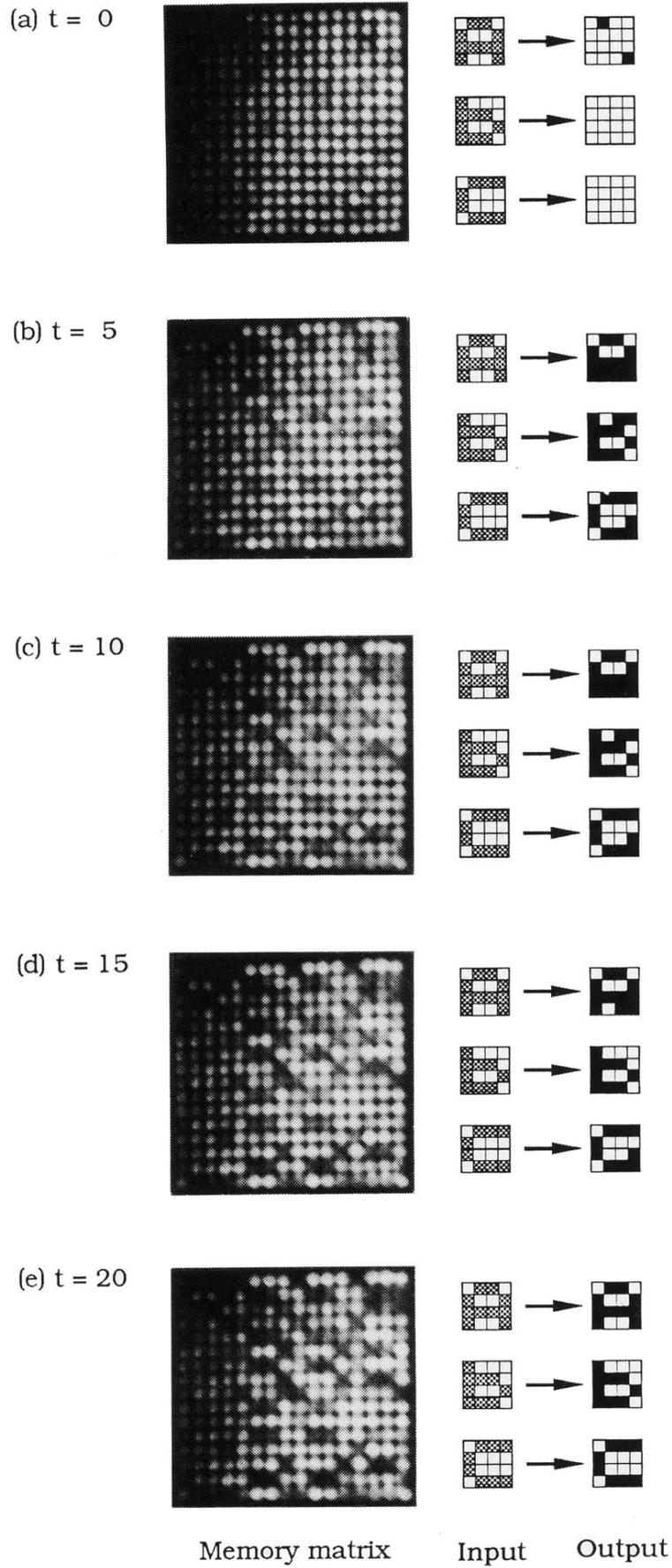


図 5-16 学習過程の実験結果

このように、この時点での想起結果はシステム内の不均一性やパターン間の干渉のためにまだ良くない。学習はその部分を補償するように進む。図 5-16(b)-(d)にその様子を示す。図では学習回数が 20 回までを示しているが、この先も条件が良ければ安定して学習が進む。また、ここで得られた記憶行列は、本システムの不均一性やパターン間の干渉を補償する形で形成されたものであり、シミュレーションの結果とは異なっている。つまり、実際の装置上で学習を行うことにより直交性の低いパターンの干渉を除去するのみならず、システムで用いている MSLM、LED アレイ、PTR アレイなどの不均一性をも補償することができることが示された。

5.4.4. 学習過程の振る舞い

次に、学習の収束の様子を学習ゲインの違いに応じて測定した結果のうち、左上から右に 2 番目、下に 2 番目の特定の画素について図 5-17 に示す¹⁶⁾。この画素においては、学習させたパターンより {A,c} では off、{b} では on となるはずである。図 5-17 において、縦軸は各学習サイクルにおけるアナログ出力レベルを示し、学習ゲインを 0.1、0.3、0.5 の場合について 20 回の学習サイクルまでの結果を示した。右側のグラフは、20 回の学習後に、学習パターンに対してハミング距離 1 のパターンの想起実験を行った結果を示した。学習ゲインを 0.1 にした場合には学習速度は遅いものの想起能力は高く、0.5 にした場合には安定した学習が行われなかった。学習パターン {A} の場合について、学習ゲインを 0.1 とした時の、全ての画素における学習状況を図 5-18 に示す。このパターンでは、10 画素が on で、6 画素が off となるはずであるが、実験結果はその通りであった。以上のように、学習の様子は学習パターンやシス

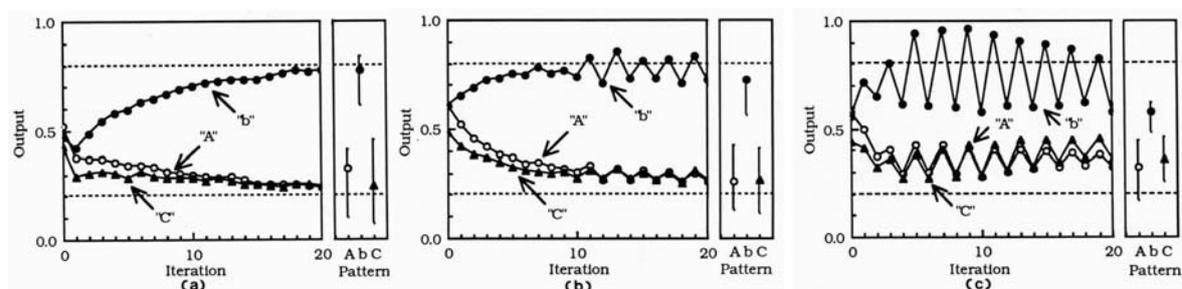


図 5-17 学習過程における記憶行列の収束結果

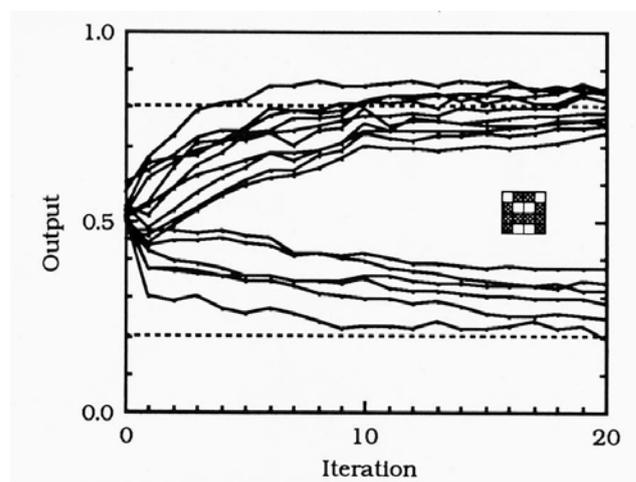


図 5-18 {A} パターンにおける各点の学習過程

テムの不均一性などにより異なった結果となり、システムの安定性や学習後の想起能力の議論については、学習ゲインの適切な設定も含めてシステムの不均一性を考慮してなされるべきである。

5.4.5. 学習後の想起結果

学習ゲインを 0.3 として学習を 20 回行った記憶行列において、学習パターン {A} に対してハミング距離が 1 であるパターン全てに対して想起実験を行った結果を図 5-19 に示す¹⁶⁾。パターン {A} そのもの想起結果を×、ハミング距離 1 のパターンに対する結果を○で示した。ここで、想起時の閾値を 0.5 とすればいくつかのケースを除いて正確な想起結果が得られることがわかる。その他の学習パターン {b,c} についても同様の結果が得られた。

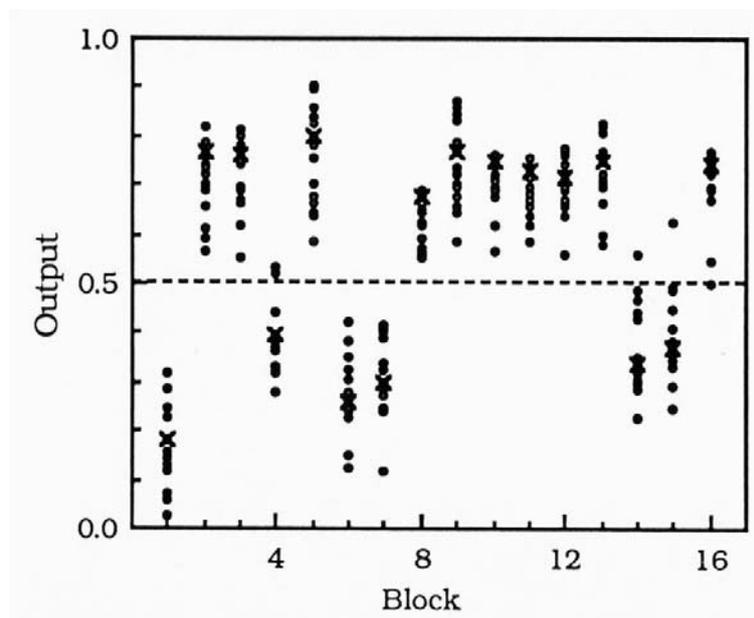


図 5-19 学習後の想起結果

5.4.6. 出力関数の振る舞い

一般的に出力関数は様々な線形もしくは非線形の関数を利用する。ここでは、部分線形関数 ϕ_{out} について次式のように定義し、学習への影響について評価を行った¹⁶⁾。

$$\phi_{out} = \begin{cases} 1 \dots\dots\dots \left(0.5 + \frac{k}{2} \leq V_{out} \right) \\ \frac{V_{out} - 0.5}{k} \dots\dots\dots \left(0.5 - \frac{k}{2} < V_{out} \leq 0.5 + \frac{k}{2} \right) \\ 0 \dots\dots\dots \left(V_{out} < 0.5 - \frac{k}{2} \right) \end{cases} \quad (5-21)$$

ここで、 k は出力関数を決める定数で、 k を変化させた場合の学習速度と想起能力について評

価した。学習速度は予想される記憶行列に対して±10%の範囲に収まるまでの学習回数で評価した。想起能力については、次式で示す誤差率を全ての学習パターンとハミング距離1のパターンについてで評価した。

$$error = \sum_{pattern} \left[\sqrt{\sum_{i=1}^{16} (y_i - x_i)^2} \right] \quad (5-22)$$

(5-21)式において $k = \{0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4\}$ の場合について、学習速度と想起能力を評価した結果を図 5-20 に示す。出力関数としてステップ関数に近いものを選択した場合には、学習速度は速いものの想起能力は低く、値を大きくすると学習速度は遅くなるが想起能力は高かった。

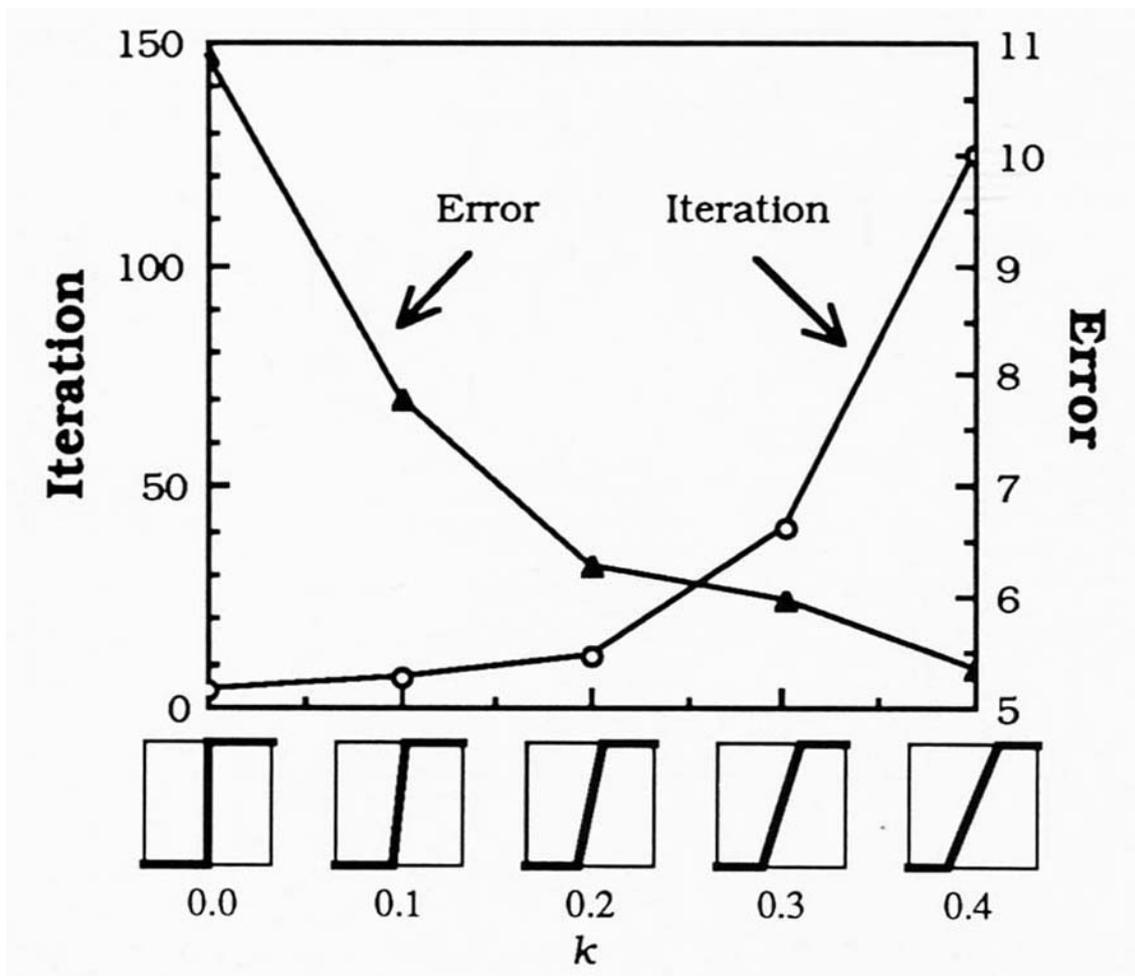


図 5-20 出力関数の違いによる学習回数と想起能力

5.4.7. 学習ゲイン可変の学習方式

これまでの実験結果を考慮して、学習ゲインを学習回数に応じて適応的に変化させることにより、学習速度をなるべく早くしながら想起能力を高めることを目指した¹⁶⁾。学習ゲイン α' を次式のように変化させることとする。

$$\alpha' = c \cdot \log(\gamma + 1)^{-1} \quad (5-23)$$

ここで、 γ は学習過程における学習回数で、 c は定数である。図 5-21(a)に(5-23)式により学習ゲインを変化させた例を示し、その時の学習経過を(b)に示す。学習ゲインを適応的に変化させることにより、学習速度を速くしながらも高い想起能力を得ることができた。

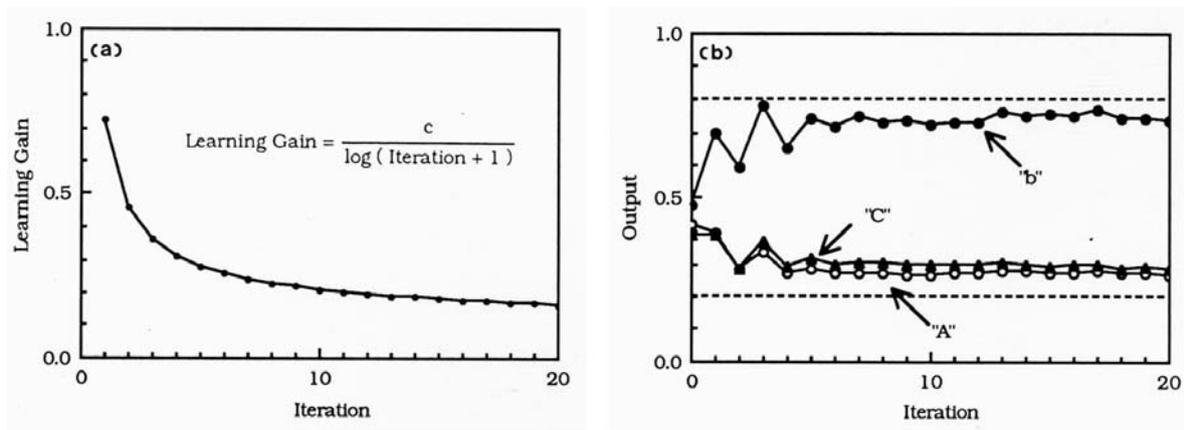


図 5-21 学習ゲイン可変の学習方式

5.5. あとがき

本章では、空間的に高密度な並列処理機構を光の持つ高い並列性により実現する試みの一つとして、大規模並列処理を基本とする学習型情報処理機構であるニューロコンピューティングへの MSLM の応用を検討し、光連想記憶システムである光アソシアトロンを提案した。さらに、連想記憶システムを光学システムに実装する上で重要となる空間コーディング法を考案し、アナログ処理及びフィードバック型の学習機能が重要な役割である事を議論した。

光学システムを構築するにあたり、キーデバイスである MSLM のアナログ特性について評価を行うとともに、本システムを構成するその他の光デバイスについても検討を行った。その結果、各光デバイスには大きな不均一性があることが明らかとなったが、フィードバック型の学習機能を利用することにより、それらの影響を抑えることができることを示した。

実際に構築された光アソシアトロンシステムにおいて、学習及び想起に関する様々な実験を行い、本システムが有効に機能していることを確認した。これは、アナログ処理が基本となる光連想記憶システムにおいて、MSLM の持つアナログ処理能力が十分に発揮された結果と考えられる。

以上のように、本研究では、大規模並列光アナログ演算システムである光連想記憶システムを MSLM を用いて構築し、MSLM の持つアナログ特性が本システム上で有効に機能したことを示した。また、このような光学システムには様々な不均一性が存在することを明らかにし、フィードバック型の学習機能によりそれらの不均一性を補償することができることを示した。

本研究を実施した時期には、アナログメモリ機能・内部演算機能を持ち合わせたデバイスが他には無かった。前述の通り、MSLM の持つ機能を最大限に利用することにより、光学システムが持つ欠点を学習機能によって補完できることを示したが、逆に光学システムの持つ問題点も明らかになったわけであり、光学システム構築におけるこれらの問題点の根本的な解決も今後の課題と考えられる。また、MSLM に代わる高性能な空間光変調器の必要性も明らかである。本研究でも取り扱った FLC-SLM は 2 値メモリ特性を有し、高速応答・高解像度といった特性をもつため、2 値メモリではあるものの、システムアーキテクチャの改良により、本研究の延長線上で更なる進展も期待できるのではないかと思われる。今後、デバイス側・システム側の両面からのアプローチにより、本研究で明らかとなった課題を克服されることを期待する。

5.6. 第5章の参考文献

- 1) K.Nakano, "Associatron – A Model of Associative Memory", IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Vol. SMC-2, pp.380-388 (1972).
- 2) T.Kohonen, "Correlation matrix memories", IEEE Trans. Compu. C-21, pp.353-359 (1972)
- 3) S.Amari, "Learning Patterns and Pattern Sequences by Self-Organizing Nets of Threshold Elements", IEEE Trans. Compu., Vol.C-21, pp.1197-1206 (1972).
- 4) J.A.Anderson, "A Simple Neural Networks Generating Interactive Memory", Math. Biosci., Vol.14, pp.197-220 (1972).
- 5) H.Wingstrom, "A Neuron Model with Learning Capability and its Relation to Mechanism of Association", Kybernetik, Vol.12, pp.204-215 (1973).
- 6) B.Widrow and M.E.Hoff, "Adaptive Switching Circuits", IRE WESCON Conv. Rec., pp.96-104 (1960).
- 7) T.Kohonen, "An Adaptive Associative Memory Principle", IEEE Trans. Compt., Vol.C-23, pp.444-445 (1974).
- 8) T.Kohonen, "Self-organization and associative memory principle", 2nd edition, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, (1987).
- 9) S.Amari, "Neural Theory of Association and Concept-Formation", Biol. Cybern., Vol.26, pp.175-185 (1977).
- 10) A.D.Fisher, W.L.Lippincott and J.N.Lee, "Optical implementations of associative networks with versatile adaptive leaning capabilities", Appl. Opt., Vol.26, pp.5039-5054 (1987).
- 11) N.H.Farhat, D.Psaltis, A.Prata and E.Peak, "Optical implementation of the Hopfield model", Appl. Opt., Vol.24, pp.1649-1675 (1985).
- 12) N.H.Farhat and D.Psaltis, "Optical Implementation of Associative Memory Based on Models of Neural Networks", in Optical Signal Processing, J.H.Horner, Ed., Academic, San Diego, pp.129-162 (1987).
- 13) K.Wagner and D.Psaltis, "Multilayer optical learning networks", Appl. Opt., Vol.26, pp.5061-5076 (1987).
- 14) D.Psaltis, D.Brady and K.Wagner, "Adaptive optical networks using photorefractive crystals", Appl. Opt., Vol.27, pp.1752-1759 (1988).
- 15) M.Ishikawa, N.Mukozaka, H.Toyoda and Y.Suzuki, "Optical associatron: A simple model for optical associative memory", Appl. Opt., Vol.28, pp.291-301 (1989).
- 16) M.Ishikawa, N.Mukozaka, Y.Toyoda and Y.Suzuki, "Experimental studies on learning capabilities of optical associative memory", Appl. Opt., Vol.29, No.2, pp.289-295 (1990).
- 17) 石川正俊, 向坂直久, 豊田晴義, 鈴木義二, "光演算による連想記憶と学習", テレビジョン学会技術報告, Vol.12, pp.31-36 (1988).
- 18) 石川正俊, 向坂直久, 豊田晴義, 鈴木義二, "学習を導入した光連想記憶システム", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.88, pp.61-68 (1988).
- 19) 向坂直久, 豊田晴義, 鈴木義二, 石川正俊, "空間光変調管を用いた連想記憶と学習", テレビジョン学会技術報告, Vol.13, pp.13-18 (1989).

第6章 液晶空間光変調器の光相関システムへの応用

6.1. まえがき

第4章及び第5章では、並列光情報処理にMSLMを応用した例について述べた。MSLMは高い入力感度と豊富な内部演算機能によりその特徴を生かして効果的な応用研究が実現できた。しかしながら、MSLMの空間分解能・動作速度及び、駆動電圧がkVオーダーの高電圧であることや、デバイスが大きくシステムの小型化が困難であるなど問題点が明らかとなった。

そこで、本研究では既に第2章で述べたように、空間光変調器の高解像度化・高速化及び小型・低電圧駆動化を図るべく、光アドレス材料にa-Si:Hを用い、光変調材料に液晶を採用した光アドレス型の液晶空間光変調器を開発した。さらに、第3章で述べたように、近年、実応用を見据えて有望視されている液晶空間光変調器の特性を詳細に評価すると共に、実用化に際して重要となる電子システムとの親和性を考慮した電気書き込み型の液晶空間光変調器を開発しその特性を評価した。

本章では、高解像度・高速化を達成し、2値メモリー機能を有する強誘電性液晶空間光変調器(FLC-SLM)を実時間スペックル相関演算法による実時間速度計へ応用した例について述べる。さらに、小型・低電圧駆動を実現すべく開発された平行配向ネマティック液晶空間光変調器(PAL-SLM)を光相関システムに応用した例についても述べる。

6.2. FLC-SLMを用いたスペックル相関演算法による実時間速度計

6.2.1. はじめに

粗面にコヒーレント光を照射するとスペックルパターンが生じ、粗面の変位あるいは変形に伴いスペックルパターンも変化することを利用して、粗面の変位・変形・回転・傾き等を測定する光学計測技術はよく知られている。中でも、スペックルパターン2重露光によるスペックル写真法^{1), 2)}と光学的処理とを組み合わせる方法は、対象物体の2次元の変位を計測するのに有効である。しかしながら、この方法では写真技術を用いるために、現像という化学処理が必要となり実時間性が達成できない。この問題点を克服するためにTVカメラ・画像処理装置・液晶TV等をを利用したシステムも提案された³⁾⁻¹³⁾が、システムの動作速度は主にTVレート(30frames/sec)で制限されていた。

そこで本研究では、高速・高分解能で2値メモリーの特徴を有する強誘電性液晶空間光変調器(FLC-SLM)¹⁴⁾⁻¹⁷⁾を利用したシステムを提案する。本システムは、移動物体からのスペックルパターンをFLC-SLMに2重露光記録し、JTC型の相関器^{18), 19)}を構成することにより非接触でその変位を解析するシステムである。

FLC-SLMは表面安定化強誘電性液晶(SSFLC)構造を持った空間光変調器であり、SSFLCの特徴である双安定性から2値のメモリー機能を有し^{14), 15), 20)}、応答速度も50 μ sec程度と高速動作が可能である。これらの特性は、本システムにおいて必要とされる、2重露光に必要なメモリー機能、実時間動作させるために必要な高速応答性と非常によくマッチする。

6.2.2. 実時間速度計の動作原理

図6-1に本システムの動作原理図を示す²¹⁾。測定対象表面にシャッター(S1)を介してレーザー光を照射し、生成されたスペックルパターンをFLC-SLM(SLM1)に入力する。SLM1に形成された2重露光像は、シャッター(S2)により制御されたレーザー光により読み出され、レンズ(L1)により光学的にフーリエ変換された後、FLC-SLM(SLM2)に入力される。SLM2を同じくレーザー光で読み出されたパワースペクトラムはレンズ(L2)で光学的にフーリエ変換された後、位置検出素子(PSD)でスポットの位置を計測する。

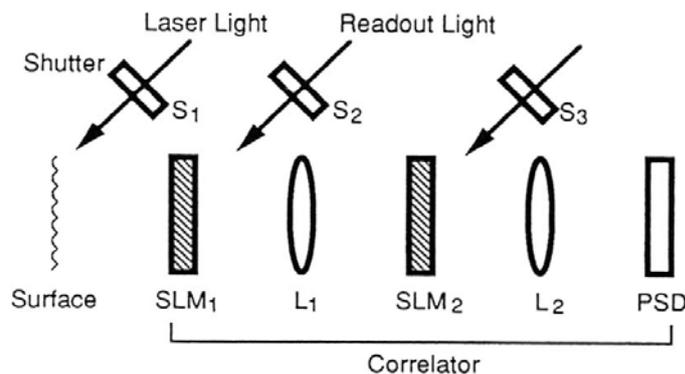


図 6-1 スペックル速度計の動作原理図

2つの FLC-SLM を一度消去した後、短時間の間隔を置いて SLM1 を 2 回露光することにより、対象物体からのスペックルパターンの 2 重露光像を SLM1 に形成する。この 2 重露光像は、対象物体の移動に対応して横方向にシフトした 2 つのスペックルパターンの重なった象となっている。これをレンズで光学的にフーリエ変換して SLM2 に書き込む。この光フーリエ変換像は、2 重露光スペックルパターンの 2 次元強度分布により変調されたフランフォーファー回折像で、ヤング縞と呼ばれる。このヤング縞を読み出してさらに光学的にフーリエ変換することによって、ヤング縞のフーリエ変換の 1 次回折光スポットを位置検出素子で検出する。この光相関処理は合同変換型相関器 (JTC) ²²⁾⁻²⁴⁾と同様である。JTC からの出力結果は、0 次光と ±1 次光の間隔が移動量に比例し、0 次光と 1 次光結ぶ方向が移動方向を示す。

ここで簡単のために対象物体が 1 次元方向にのみ移動すると仮定して数学的に解析を行う。2 重露光した 2 つのパターンが完全に相関があるとし、それぞれのパターンが $f(x)$ 及び $f(x + \Delta x)$ で表されるとすると、SLM2 上に形成される強度分布は次式で表される。

$$I(u) = \left| F(u) + F(u) \exp\left(\frac{j2\pi\Delta x u}{\lambda f_1}\right) \right|^2 \quad (6-1)$$

ただし、 $F(u)$ は $f(x)$ を焦点距離 f_1 のレンズによる光学的フーリエ変換を、 Δx は露光間隔時間における対象物体の移動量、 u は SLM2 上での距離、 λ は SLM1 の読み出し光波長である。(6-1) 式は周期が $\lambda f_1 / \Delta x$ である縞パターンが形成されることを示している。SLM2 に記録されたこのパターンをレンズ 2 で光学的にフーリエ変換するとその結果は次式で表される。

$$2f(x') \otimes f(x') + f\left[x' - \frac{f_2}{f_1} \Delta x\right] \otimes f(x') + f\left[x' + \frac{f_2}{f_1} \Delta x\right] \otimes f(x') \quad (6-2)$$

ただし、 \otimes は相関演算を表す。

(6-2) 式において、最初の項は 0 次光もしくは自己相関であり、その他の項は 2 重露光された 2 つのスペックルパターンの相関結果を表し、0 次光とそれぞれの相関ピーク間の距離は $(f_2/f_1)\Delta x$ となる。よって、相関ピークの位置を計測することにより測定対象物体の移動量又は移動速度が計測可能となる。

このようにして、相関信号の位置により物体の変位量と移動方向がわかるが、さらに移動物体の場合には、FLC-SLM の書き込み時間と移動速度によるスペックルパターンの広がりや考慮する必要がある。それは、移動速度や書き込み時間に関連した動的スペックルの時間統計特性である。時間的に変化するスペックル強度の時間相関長 τd は、移動物体の速度と FLC-SLM の書き込み時間 T_w の積に反比例する。

6.2.3. 実時間速度計のシステム構成

FLC-SLM を用いた実験光学系を図 6-2 に示す²¹⁾。対象物体には#3000 番で研磨したすりガラスを使用し、リニアステージ上に固定し移動速度などをコンピュータ制御した。実験の際のステージ移動速度プロファイルを図 6-3 に示す²¹⁾。停止状態から加速、一定速度を保持、減速して停止の繰り返しとした。ステージ上の総移動距離は 270mm、すりガラス板の大きさは幅 170mm とした。すりガラス板と FLC-SLM1 の距離は 170mm としたので、FLC-SLM1 上でのスポットサイズはおよそ $13\ \mu\text{m}$ となり、そのパワー密度は $240\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ であった。FLC-SLM1 及び FLC-SLM2 の読み出し光パワーはそれぞれ、He-Ne レーザー光 $3\text{mW}/\text{cm}^2$ 及び Ar レーザー光 $22\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ であった。また、各レーザー光は音響光学変調器によって制御した。FLC-SLM1 及び 2 には消去用の LED 光源を用意し、FLC-SLM の駆動波形と共にコンピュータ制御した。最終結果である相関スポットは位置検出光電子増倍管 (PS-PMT) により位置検出される。

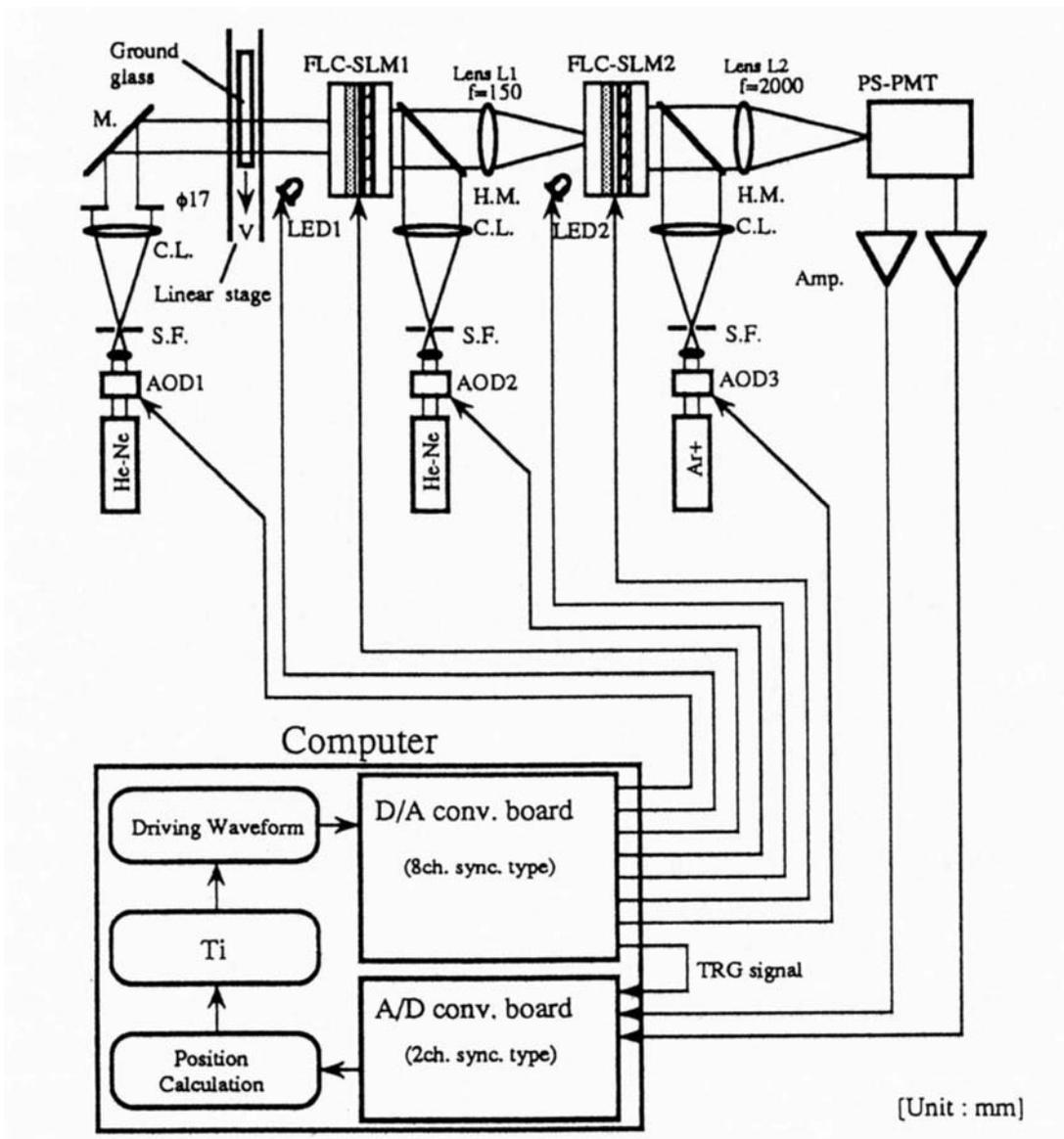


図 6-2 実験光学系

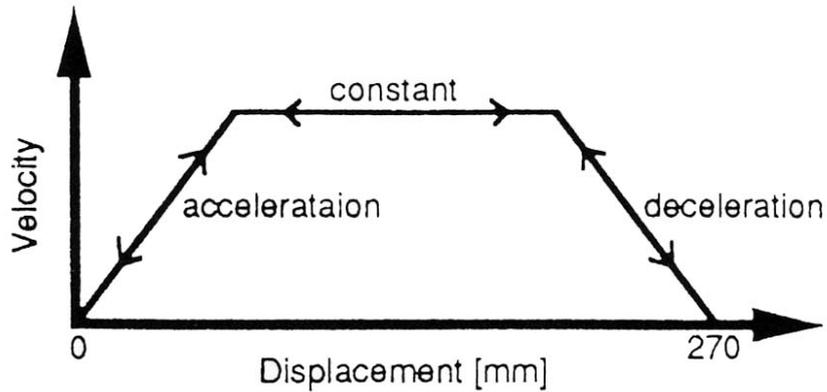


図 6-3 移動速度プロファイル

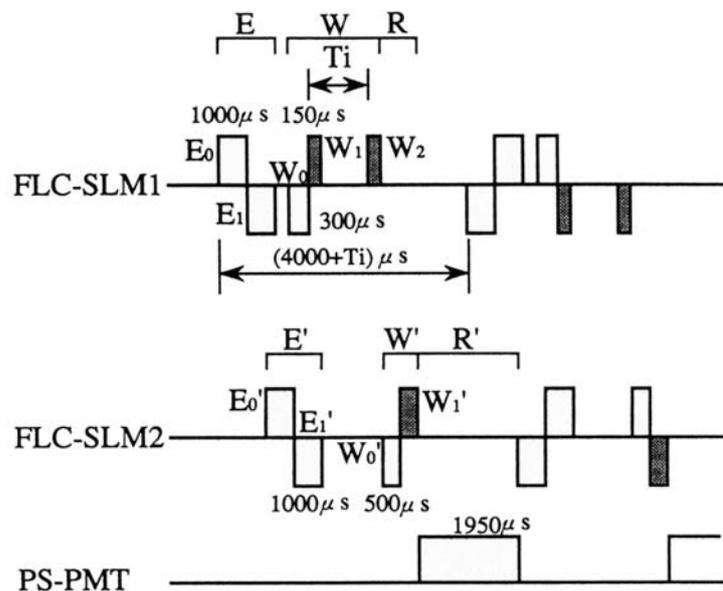


図 6-4 システムの動作シーケンス

図 6-4 に 1 回の計測サイクルにおける各デバイスの動作シーケンスを示し²¹⁾、以下に動作ごとの説明を行う。

- (1) FLC-SLM1 の消去 LED を点灯し、正負の消去電圧 (E_0, E_1) を印加し、消去動作を行う。
- (2) FLC-SLM1 に正負の書き込み電圧 (W_0, W_1) を印加すると共に、その期間内のみ物体に照明光を照射し、 W_1 の期間で第 1 のスペックルパターンを記録する。本実験では露光時間 $T_w=150\mu\text{s}$ とした。
- (3) 2 重露光間隔 T_i の後、正の書き込み電圧 (W_2) を物体への照明と共に印加し、第 2 のスペックルパターンを重ねて記録する。2 重露光間隔は物体の移動速度に応じて 1ms 又は 0.5ms とした。
- (4) FLC-SLM1 に 2 重書き込みをしている間に、FLC-SLM2 の消去 LED を点灯した上

で、正負の消去電圧 (E_0', E_1') を印加し FLC-SLM2 を消去する。

- (5) FLC-SLM1 の読み出し光をオンにして、FLC-SLM2 に正負の書き込み電圧 (W_0', W_1') を印加し、2重露光パターンのパワースペクトラムを FLC-SLM2 に書き込む。この時の書き込み時間は $500\mu\text{s}$ とした。
- (6) FLC-SLM2 の読み出し光をオンにして、そのパワースペクトラム (相関信号) 得ることにより、物体の移動距離又は速度を求めることができる。

以上のように得られた相関ピークの位置は PS-PMT で検出されコンピュータに取り込まれ処理される。1回の計測時間は、図 6-4 に示したように、 $4000+T_i \mu\text{s}$ であり、通常 T_i を 1ms 程度とするので、繰り返し周期は 5ms で 200Hz となる。ここで、FLC-SLM を駆動するにあたり、液晶層にかかる平均電圧をゼロとするバイポーラ駆動法¹⁶⁾を用い、高コントラストと高解像度を達成した。

6.2.4. 露光間隔の適応的制御方法

ここで、相関ピークは 1 次及び 2 次など複数のピークが生成される。本実験システムでは PS-PMT 上に $8\text{mm} \times 1\text{mm}$ の検出エリアを設けたが、その上に複数のピークが生成されるとその重心演算が正確に実行されない。よって、図 6-5 に示すように²¹⁾、検出エリア上に 1 次の相関ピークのみが生成されるようにする必要がある。さらに、物体の移動速度によって PS-PMT 上に現れる相関ピークの位置が計測範囲外になる可能性もある。また、位置検出精度を考慮するとなるべく PS-PMT の中心部分を利用したほうがよい。そこで、検出された移動速度に応じて 2 重露光間隔を変える事により、常に検出エリア上に相関ピークが収まるように制御すると共に、なるべく精度の高い PS-PMT の中心部分に相関ピークが生成されるように適応的に制御する方式を考案した。

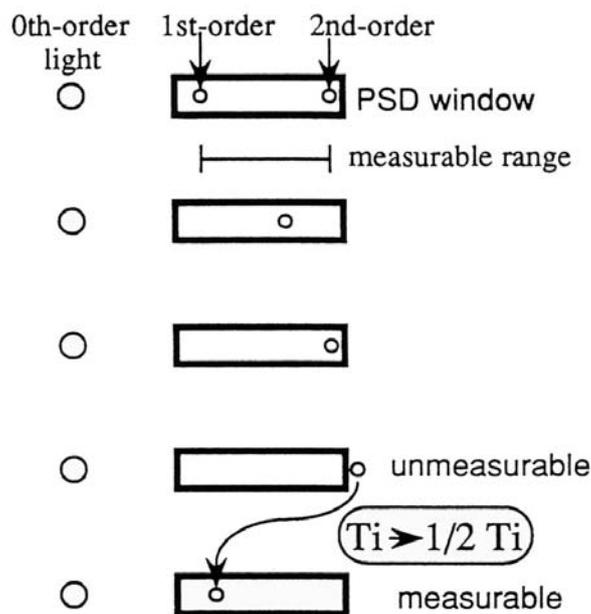


図 6-5 相関ピークと PSD の位置関係

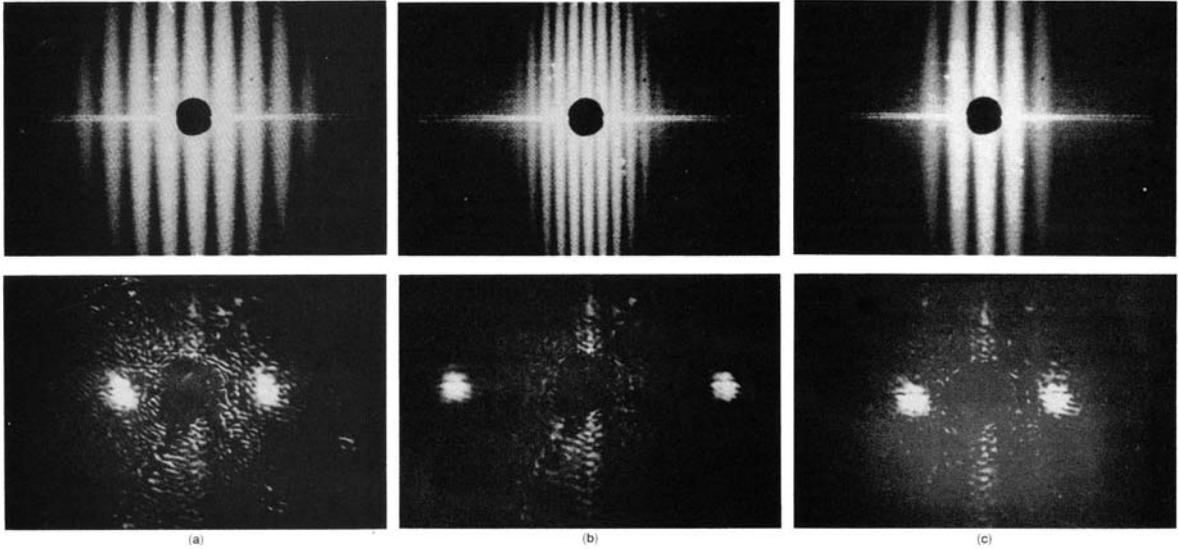


図 6-6 合同変換面と合同変換相関面

6.2.5. 実験結果及び考察

図 6-6 の上部に本実験システムで生成されたスペックルパターン²¹⁾の 2 重露光像のパワースペクトラム (合同変換面 : Joint Transform Plane) を上部に、2 つの FLC-SLM により構成された JTC の相関演算結果を下部に示す²¹⁾。図 6-6 において、(a)は物体の移動速度 $v=200\text{m/s}$ で露光間隔 $T_i=1\text{ms}$ の時、(b)は $v=400\text{m/s}$ と $T_i=1\text{ms}$ 、(c)が $v=400\text{m/s}$ で $T_i=0.5\text{ms}$ の時の結果を示す²¹⁾。鮮明なパワースペクトラムが得られていることがわかる。これは、FLC-SLM の 2 値メモリ特性により、2 重露光がうまく行えた事を示している。図 6-6 下部の(b)と(c)を見ると、前節で提案した露光間隔の適応制御により、同じスピードにおいて相関ピーク位置が 0 次項に近づき、PS-PMT の中心部分を有効に利用可能なことが示された。なお、下部の相関ピーク結果については、見やすいように 0 次項をマスクによりカットしている。

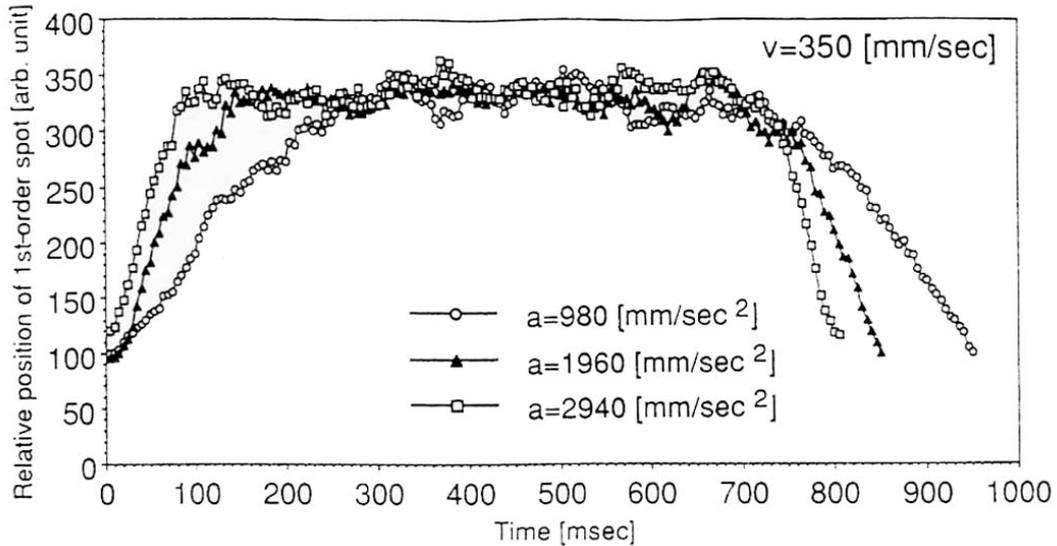


図 6-7 PS-PMT で測定された相関ピーク位置

図 6-7 に、PS-PMT により計測された相関ピーク位置について、等速時の速度 $v=350\text{mm/s}$ 、加減速時の加速度 a を $980, 1960, 2940\text{mm/sec}^2$ とした時の結果を示す²¹⁾。この時の、露光間隔は 1ms で固定とした。さらに詳しく評価するために、物体の移動速度 $v=200, 300, 400, 500\text{mm/sec}$ の時の相関ピーク位置を計測し、移動速度と相関ピーク位置が線型関係であることを確認した。さらに、物体の加速度 $a=-490, -980, -1960, -2940\text{mm/sec}^2$ の時の相関ピーク位置を計測し、各加速度における傾きの平均が加速度に線型関係であることを確認した。図 6-8 にその結果を示す²¹⁾。

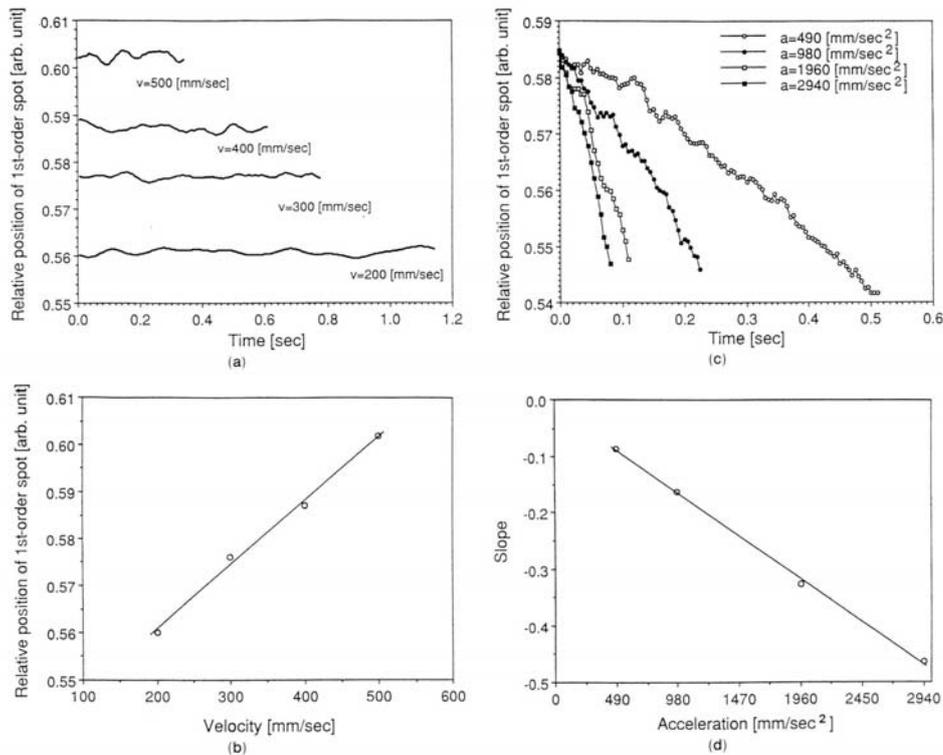


図 6-8 システムの線型性の評価

前項で述べた、計測された移動速度（相関ピーク位置）に応じて2重露光時の間隔を適応的に変えた場合の結果を図6-9に示す²¹⁾。一定の露光間隔ではPS-PMTの計測エリアを外れるように最大速度を設定した。その結果、図6-9の前半部分に見られるように、速度が速くなっていく領域で計測結果がばらついているのが観察される。この領域ではPS-PMTの計測エリアぎりぎりの部分となり不安定な計測結果となった。そこで、計測エリアにおいて不安定な領域に入る前に露光間隔を1/2とすることにより、相関ピークの現れる位置が速度の早い領域であっても、PS-PMTの安定計測エリアに収まっており、安定した計測が行われていることがわかる。

粗面からのスペックルパターンを、FLC-SLMのメモリー機能を利用して2重露光し、もう1つのFLC-SLMと共に合同変換相関器を構成することにより、移動前後の2枚のスペックルパターンからその移動量もしくは移動速度を非接触で計測することができた。FLC-SLMの高速応答性から、2重露光の間隔を1msないしは0.5msに設定することが可能であり、本研究にて考案した露光間隔可変方式により広範囲での速度計測が実現できた。

以上のように、FLC-SLMの持つ2値メモリー特性と、高解像度・高速性を有効に利用する事により、これまで実時間性が達成できなかった問題点を克服することができた。FLM-SLMは、このように優れた特性をもっているが、その反面、安定した特性を維持したデバイスとして製造する点で課題が残っている。今後この点がクリアされ、他の様々な応用に利用されることを期待する。

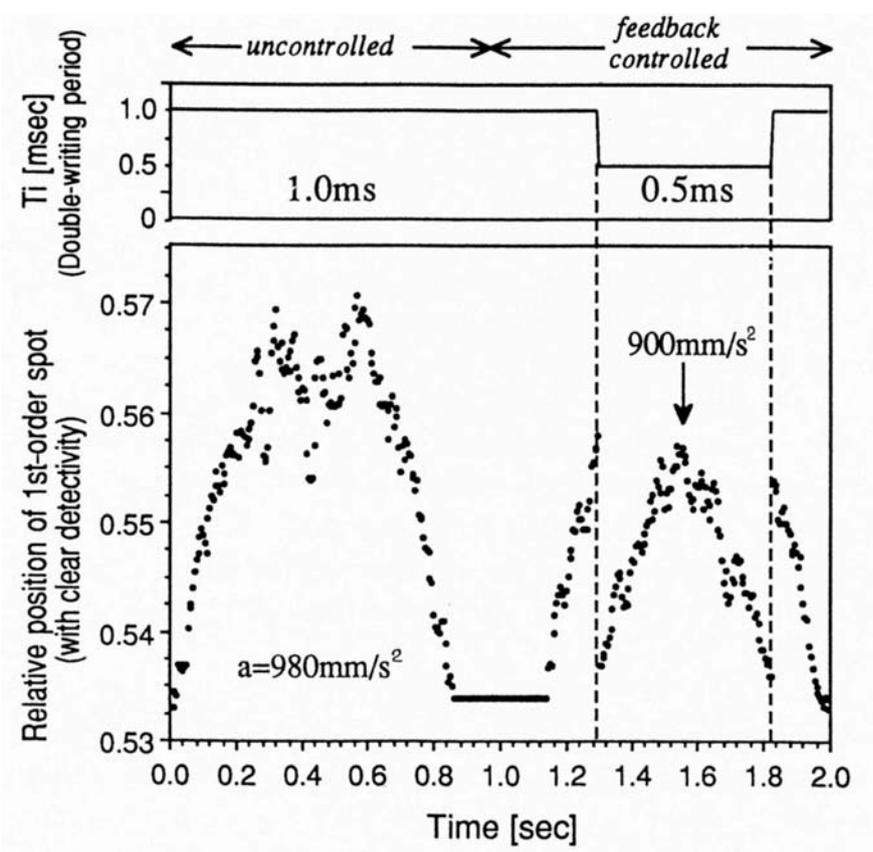


図 6-9 2重露光間隔のフィードバック制御

6.3. PAL-SLMを用いた光相関システム

6.3.1. はじめに

光の高速性・並列性を利用した実時間情報処理システムは、Vander-Lugt 型相関器²⁵⁾、JTC (Joint Transform Correlator) 光相関器²²⁾の研究など幅広い研究がなされてきた。これらの光相関器において実時間処理を実現するためには、2 次元的に光を変調するためのデバイスである空間光変調器 : SLM が不可欠であり、これまでも SLM を用いた光相関システムが報告されている^{26), 27)}。相関演算は光フーリエ変換を基本とした光演算で構成されるため、回折効率の高い位相変調型の SLM が切望されていた。これまでも、電気アドレス型の位相変調型 SLM を用いた実験により、位相変調型の有効性が報告されている²⁸⁾。

そこで本研究では、純粋な位相変調を行うことを目的として開発された、PAL-SLM を JTC 光相関器における入力画像表示と実時間空間フィルタに利用することで、簡単な構成でフレームレート時間での相関演算が実現できるシステムを構築した。さらに、電気アドレス型 SLM で問題となっていた電極パターンによるノイズや回折効率の低下 (電極パターンのコンボリューション像によるフーリエ像強度の分散) の影響を受けない光相関システムの実現を目指した。

6.3.2. JTC型光相関実験システム

JTC 方式は、入力像と参照像を並列的に配置して、2 度のフーリエ変換を行うことで相互相関を計算するものである^{22), 29)}。この JTC 光相関システムは、Vander-Lugt 型の相関器に比較しフィルタの位置合わせが必要なく振動に強いという特長を持っている。この特長は、相関器におけるマッチドフィルタをリアルタイムに作成していることに起因しており、そのためのデバイス、SLM がキーデバイスとなる。

実験系を図 6-10 に示す³⁰⁾。光学系は 2 回のフーリエ変換光学系を基本に構成され、リアルタイムホログラムデバイスとして、高い位相変調特性を持つ PAL-SLM³¹⁾を採用した。比較を行うための入力パターン x と参照パターン r (図 6-10a) を液晶パネルを介して PAL-SLM1 に縮小結像 (SLM 上の像の大きさ $8\text{mm} \times 6\text{mm}$) して書き込む。PAL-SLM1 を半導体レーザーで読み出し、レンズ : L1 を介してフーリエ変換を行う。そのフーリエ変換像 (図 6-10b) を PAL-SLM2 に書き込むことにより強度像に変換し、このパターンをレンズ : L2 によりもう一度フーリエ変換を行うことによって相関パターン (図 6-10c) が得られる。中心の 0 次光 (マスクでカット済み) の両側に、パターン x 及び参照パターン r の相関強度に応じた強度を持つピークが現れた。0 次光と ± 1 次光との距離 d_{out} は、

$$d_{out} = d_{in} \times \frac{f_2}{f_1} \quad (6-3)$$

で表される。ここで、 d_{in} は PAL-SLM1 上でのパターン x と r の距離、 f_1, f_2 はそれぞれレンズ L1, L2 の焦点距離を表す。

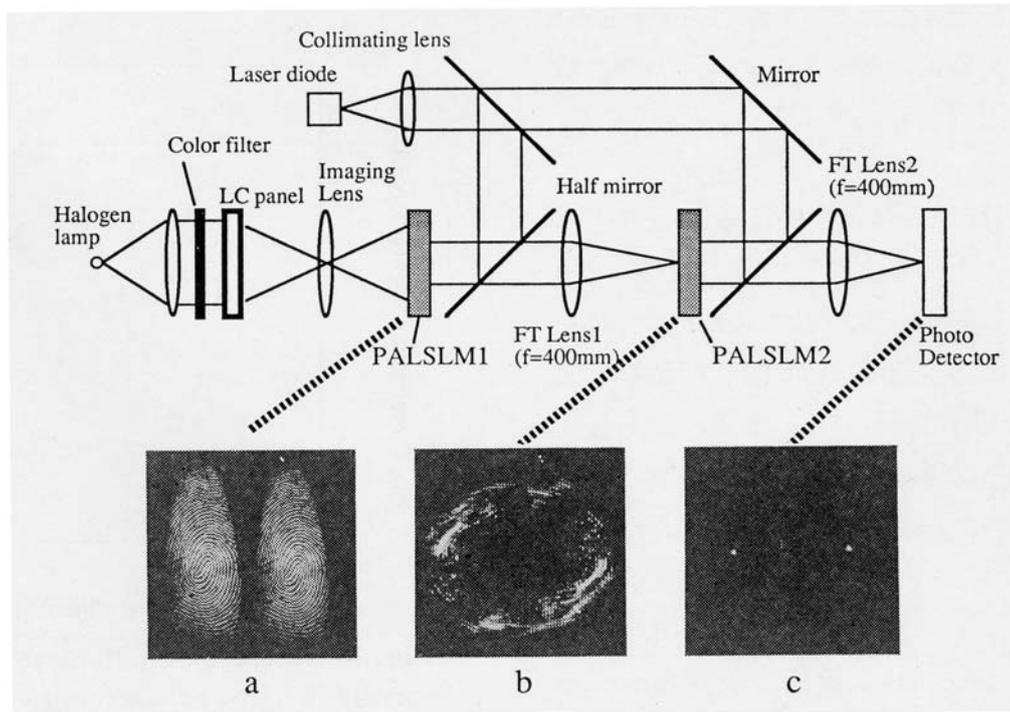


図 6-10 JTC 型光相関システムの実験系

実験では、SLM の読み出しレーザーとして 680nm、20mW の半導体レーザーを用い、PAL-SLM1 の書き込みには、色フィルタ（600nm 以上透過）を透過したハロゲンランプ光で 9 万画素の 1 インチ液晶パネルを読み出して用いた。PAL-SLM1 の読み出しレーザー強度は $4\text{mW}/\text{cm}^2$ 、PAL-SLM2 の読み出し光強度は $1\text{mW}/\text{cm}^2$ でいずれも直径 12mm にコリメートした。フーリエ変換には L1,L2 共に 400mm のレンズを用いた。

認識を行う対象パターンとして指紋のパターンの比較照合を行った。これは、本システムの空間周波数に対する評価を行うために、周波数特徴の局在した指紋パターンが適しているためである。図 6-11 に示すように³⁰⁾、指紋パターンは 3~5 lp/mm の空間周波数を持つ縞から構成され、フーリエ面で局在した特徴を持つことがわかる。PAL-SLM1 上の像の持つ空間周波数は、指紋の空間周波数と縮小倍率で決まり、PAL-SLM2 に書き込まれる干渉縞周波数 u は次式で表される。

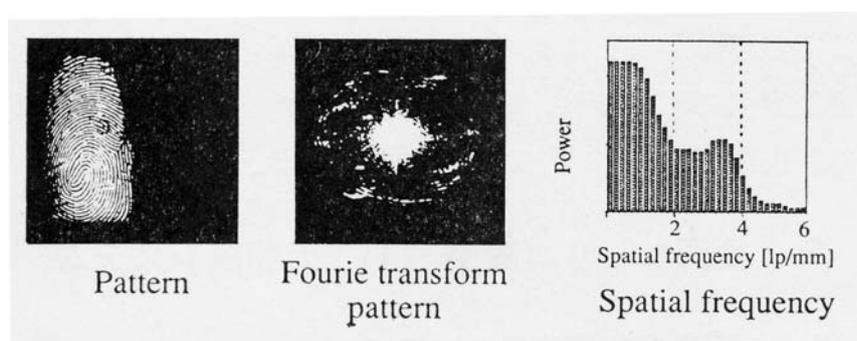


図 6-11 指紋パターンの空間周波数

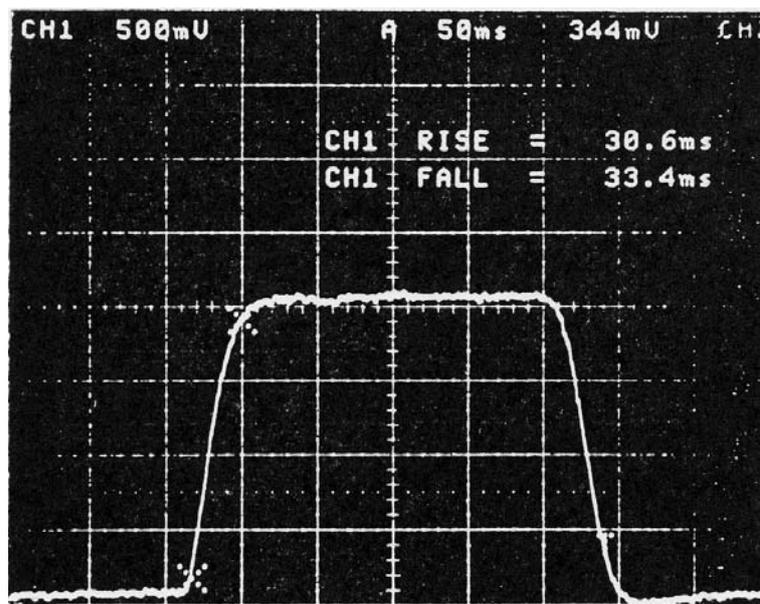


図 6-12 JTC 型光相関システムの応答速度

$$u = \frac{d_m}{f_1 \lambda} \quad (6-4)$$

ここで、 λ はレーザーの波長を表す。PAL-SLM1 及び PAL-SLM2 に同程度の空間周波数（おおむね 15 lp/mm）が書き込まれるように実験系のパラメータ（入力像の縮小倍率、パターン間の距離 d_m 及び L1 の焦点距離 f_1 ）を設定した。

システムの応答速度は PAL-SLM の応答速度と同様に駆動電圧によって決まることになる。3.0V 駆動時に 55ms の上昇時間、リアルタイムの目安となるフレームレートの応答速度は図 6-12 に示したように、3.8V 駆動時に得られた³⁰⁾。また、相関強度の絶対値は入力パターンの種類によるが、指紋パターンの場合には、1 μ W 程度の相関ピーク強度（読み出し光量の 0.1%）が得られた。このように高い相関強度が得られることにより、リアルタイムのフィードバック制御を行う場合などにおいて、位置検出素子：PSD などの後処理系へのインターフェースが容易に行えることになる。

6.3.3. 入力光強度の相関強度への影響

これまでの光相関器では、入力光強度が変化した場合に相関強度が影響を受けてしまい、安定な認識を行うためには、入力光強度を規格化するなどの前処理を必要とした。本システムでは、PAL-SLM の対数的な入出力特性により、入力光強度の相関強度への影響の少ないシステムが構築できることが明らかとなった。

図 6-13 に入力光強度を変化させた場合の相関光強度（最大値で規格化）を示した³⁰⁾。入力パターンとして指紋パターンを用いた場合、100 μ W/cm² 程度でピークが得られている。さらに、20~500 μ W/cm² の広い入力広範囲で最大相関強度の 50% 以上の相関強度が得られている。つま

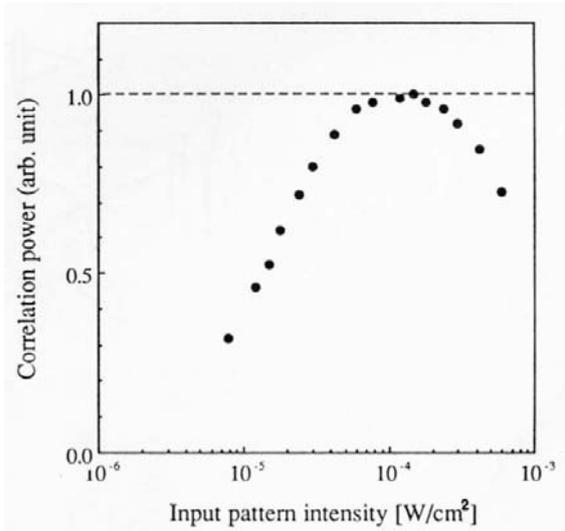


図 6-13 入力光強度と相関強度

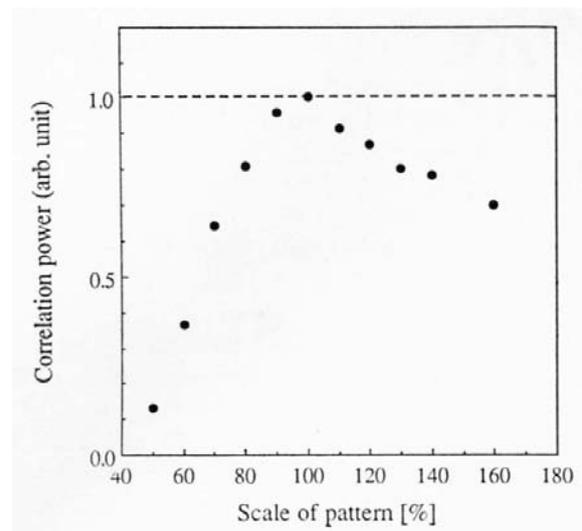


図 6-14 空間周波数と相関強度

り、本システムが入力光強度変化の相関強度への影響が少ないシステムである事がわかる。これは、PAL-SLM の入出力特性が対数特性を持つために、入力光強度が変化しても位相変調どの変化が少ないことに起因している。このため、入力パターン強度を規格化せずに、安定した相関演算が行えることになり、複雑な前処理無しで光相関器が実現できる。

6.3.4. パターンの空間周波数特徴の相関強度への影響

相関器の持つもうひとつの問題として、対象パターンの空間周波数の違いによって、形成されるフーリエ変換強度が変化するため、パターンごとに相関強度が大きく変化したり、パターンを提示する大きさによって相関強度が影響を受けてしまうことがあげられる。この影響を排除するためには、対象パターンの空間周波数特徴に応じた規格化を必要としていた。PAL-SLM の対数的な入出力特性は、こうした空間周波数の異なったパターンを扱う場合にも有利な条件として働く。

対象パターンの空間周波数の違いを、パターンの拡大縮小とみなして実験を行った結果を図 6-14 に示す³⁰⁾。横軸はパターンの拡大縮小率、縦軸は自己相関強度を規格化して示した。入力及び参照パターンを拡大縮小することで、PAL-SLM1 の指紋パターンの空間周波数が変化するために、PAL-SLM2 に書き込まれるフーリエ変換強度が変化することになる。このとき、入力パターンと参照パターンの距離 d_m は一定にしており、PAL-SLM2 上に書き込まれる干渉縞周波数は変わらない。PAL-SLM1 の読み出しレーザー光強度は、パターンの大きさが 100% の時、相関強度が最大となるように調整した。パターンを拡大した場合には、その相関強度への影響は小さかったが、パターンの縮小を行った場合には、指紋パターンの空間周波数が PAL-SLM1 及び液晶パネルの解像度限界に近づくため急速に相関強度が低下した。しかし、75% の縮小から 160% の拡大まで広い範囲で、相関強度の 70% 以上のピーク強度が得られており、空間周波数の変化に対する許容度が向上できることを確認した。

6.4. あとがき

本章では、高解像度化・高速化及び小型・低電圧駆動化を目指して開発された液晶空間光変調器の並列光情報処理への応用について検討を行った。具体的には、FLC-SLM の高速応答・2値メモリーの特性を有効に利用したスペックル相関演算法による実時間速度計への応用と、PAL-SLM の位相変調・対数入出力特性の特性を生かした JTC 型光相関システムについて議論した。

FLC-SLM は強誘電性液晶を光変調材料に用い、SSFLC 構造とすることにより 2 値メモリー特性を持たせたもので、高速応答・2 値メモリーの特徴を有する。この特徴を生かして、これまで写真フィルムに 2 重露光することにより行われていたスペックル写真法を、FLC-SLM 上のメモリー機能で実現することにより、計測の繰り返しを 200Hz で実行できる実時間処理を達成した。さらに、速度計測範囲を拡大するために、計測される速度に応じて 2 重露光間隔を変化させる方式を提案し、実際にその効果を確認した。

PAL-SLM はネマティック液晶を平行配向させることにより純粋な位相変調を行える特徴を持つ。光フーリエ変換を基本演算とする相関演算には回折効率の高い位相変調型のデバイスが適している。そこで、位相変調素子である PAL-SLM を JTC 型光相関システムに適用しその効果を確認した。さらに、これまで光相関器で問題となっていた、入力光強度や空間周波数の違いによる相関強度への影響が、PAL-SLM の持つ対数的入出力特性により、許容できることが明らかとなった。相関器における SLM の非線形特性は、認識における S/N 向上の効果を持つというシミュレーション結果も報告されており^{32),33)}、PAL-SLM の対数特性は、実験で示した許容度の向上だけでなく認識率の向上においても有力な手段となる。

以上のように、本研究では、液晶空間光変調器である FLC-SLM 及び PAL-SLM が、それぞれ持つ特徴を有効に利用して、並列光情報処理システムを構築できることを示した。これらの応用において位相変調特性は非常に重要であることは、既に第 3 章で詳細に議論した通りである。

今後の展望としては、FLC-SLM については、2 値ではあるものの全固体デバイスとしてメモリー機能を有し、高速・高解像度であることから、様々な応用への展開が期待される。しかしながら、その特性とは裏腹に安定したデバイスの製造が困難であることが課題である。更なる研究の余地が残されているものとする。PAL-SLM については、FLC-SLM と比較して非常に安定したデバイスを得ることが可能であり、実際の応用に使える一番近い位置にいるものとする。今後は、さらなる高速化が課題と考えるが、ネマティック液晶の特性上これ以上の大幅な性能向上は期待できない。新たな変調材料の開発に期待したい。また、電気書き込み型にするために LCD と組み合わせているが、これを直接電気書き込み型で同等の性能を得られるデバイスの開発も今後必要と思われる。

6.5. 第 6 章の参考文献

- 1) E.Archbold and A.E.Ennos, "Displacement measurement from double exposure laser photography", *Opt. Acta*, Vol.19, pp.253-271 (1972).
- 2) T.Asakura and N.Takai, "Dynamic laser speckles and their application to velocity measurement of the diffuse object", *Appl. Phys.*, Vol.25, pp.179-194 (1981).
- 3) H.Ogawa and H.Ukita, "A speckle pattern velocimeter using a periodical differential detector", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.14, pp.307-310 (1975).
- 4) D.Robinson, "Automatic fringe analysis with a computer image-processing system", *Appl. Opt.*, Vol.22, pp.2169-2176 (1983).
- 5) R.Erbeck, "Fast image processing with a microcomputer applied to speckle photography", *Appl. Opt.*, Vol.24, pp.3838-3841 (1985).
- 6) T.Rosegn, K.Wozniak and G.Wozniak, "Image processing for laser speckle velocimetry using the two-dimensional fast Fourier transform", *Appl. Opt.*, Vol.29, pp.5298-5302 (1990).
- 7) N.Deng and I.Yamaguchi, "Automatic analysis of speckle photographs with extended range and improved accuracy", *Appl. Opt.*, Vol.29, pp.296-303 (1990).
- 8) J.M.Coupland and N.A.Hallwell, "Automated optical analysis of Young's fringe-optical autocorrelation", *Opt. Lasers Eng.*, Vol.14, pp.351-361 (1991).
- 9) J.Zhang, P.Sun, J.Chen and B.Ding, "Pointwise automatic analysis of speckle photographs", *Opt. Eng.*, Vol.30, pp.382-385 (1991).
- 10) B.Bates, P.C.Miller and W.Luchuan, "Liquid-crystal television optical gates applied real-time speckle metrology", *J. Mod. Opt.*, Vol.36, pp.317-322 (1989).
- 11) B.Bates and P.C.Miller, "Speckle metrology employing LCTV spatial light modulator", *Opt. Lasers Eng.*, Vol.14, P341-349 (1991).
- 12) A.Ogowara, H.Sasaki and J.Ohtubo, "Application of LCTV to nonlinear speckle correlator", *Opt. Commun.*, Vol.86, pp.512-522 (1991).
- 13) T.Okamoto, Y.Egawa and T.Asakura, "Liquid crystal television applied to a speckle correlation method: real time measurement of the object displacement", *Opt. Commun.*, Vol.88, pp.17-121 (1992).
- 14) G.Moddele, K.M.Johnson W.Li, A.Rice, L.A.Pagano-Stauffer and M.A.Handschy, "High-speed binary optically addressed spatial light modulator", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.55, pp.537-539 (1989).
- 15) S.Fukushima, T.Kurokawa, S.Matsuo and H.Kozawaguchi, "Bistable spatial light modulator using a ferroelectric liquid crystal", *Opt. Lett.*, Vol.15, pp.285-287 (1990).
- 16) S.Fukushima, T.Kurokawa and M.Ohno, "Ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator achieving bipolar image operation and cascability", *Appl. Opt.*, Vol.31, pp.6859-6868 (1992).
- 17) D.Cunningham, J.Sharpe and K.M.Johnson, "Application of an optically addressed spatial light modulator to real-time speckle photography", *Opt. Commun.*, Vol.101, pp.311-316 (1993).
- 18) Y.Kobayashi, T.Takemori, N.Mukozaka, Y.Yoshida, T.Hori and S.Fukushima, "Displacement meter with FLC-SLM utilizing speckle photography", *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, Vol.1720, pp.574-580 (1992).
- 19) F.T.S.Yu, K.Pan, C.Uang and P.B.Ruffin, "Fiber specklegram sensing by means of an adaptive joint transform correlator", *Opt. Eng.*, Vol.32, pp.2884-2889 (1993).
- 20) N.A.Clark and S.G.Lagerwall, "Submicrosecond bistable electro-optic switching in liquid crystal",

- Appl. Phys. Lett., Vol.36, pp.899-901 (1980).
- 21) Y.Kobayashi, T.Takemori, N.Mukozaka, N.Yoshida and S.Fukushima, "Real-time velocity measurement by the use of a speckle-pattern correlation system that incorporates a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator", Appl. Opt., Vol.33, No.14, pp.2785-2794 (1994).
 - 22) C.S.Weaver and J.W.Goodman, "Technical for optically convolving two functions", Appl. Opt., Vol.5, pp.1248-1249 (1966).
 - 23) A.Ogiwara, H.Sasaki and J.Ohtsubo, "Real-time optical correlator for doubly exposed clipped speckle", Opt. Commun., Vol.78, pp.213-216 (1990).
 - 24) A.Ogiwara, H.Sasaki and J.Ohtsubo, "Real-time optical joint transform correlator for velocity measurement using clipped speckle intensity", Opt. Commun., Vol.78, pp.322-326 (1990).
 - 25) A.V.Lugt, "Signal detection by complex spatial filtering", IEEE Trans. Inf. Theory, Vol.IT-10, pp.139-145 (1964).
 - 26) F.T.S.Yu, Q.W.Song, Y.Suzuki and M.H.Wu, "Application of a microchannel sparial light modulator to real-time joint transform correlation", Proc. SPIE, Vol.963, pp.322-326 (1988).
 - 27) D.A.Jared, K.M.Johnson and G.Moddel, "Joint transform correlator using an amorphous silicon ferroelectric liquid crystal spatial light modulator", Opt. Commun., Vol.76, pp.97-102 (1990).
 - 28) T.H.Barnes, K.Matsuda, T.Eiju, K.Matsumoto and F.Johnson, "Joint transform correlator using a phase only spatial light modulator", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.29, pp.L1293-L1296 (1990).
 - 29) 谷田貝豊彦, "光情報処理におけるフーリエ変換", 光学, Vol.21, pp.392-399 (1992).
 - 30) 豊田晴義, 吉田成浩, 向坂直久, 小林祐二, 原勉, "位相変調空間光変調器を用いた光相関器", 光学, Vol.23, pp.315-320 (1994).
 - 31) N.Mukozaka, N.Yoshida, H.Toyoda, Y.Kobayashi and T.Hara, "Diffraction efficiency analysis of a parallel-aligned nematic-liquid spatial light modulator", Appl. Opt., Vol.33, No.14, pp.2804-2811 (1994).
 - 32) B.Javidi, "Nonlinear joint power spectrum based optical correlation", Appl. Opt., Vol.28, pp.2358-2367 (1989).
 - 33) C.J.Kuo, "Theoretical expression for the correlation signal of nonlinear jointy transform correlation", Appl. Opt., Vol.31, pp.6264-6271 (1992).

第7章 結論

光は原理的に、高速伝搬性・非干渉性・並列性・広帯域などの多くの特徴を有しており、電子技術では到達できないような高度なシステムに利用できる大きな可能性を秘めている。その可能性を追及すべく様々な研究が成されているが、その研究を支えるキーデバイスの面で電子技術と比較して大きな遅れを取っているため、その進捗状況は芳しくないことを否定できない。しかしながら、現状のデバイスの性能をフルに活用することにより、少しでも光の持つ大きな可能性をこじ開けていく努力も必要である。そのためには、現状のデバイスの性能を十分に把握し、その能力を 100%引き出してシステムを構築し、その結果からデバイスに対する的確な開発指針を導き出すことが重要である。

そこで本研究では、光に原理的に備わった様々な特徴を積極的に利用した並列光情報処理へのアプローチに対して、並列光情報処理を構成するキーデバイスである空間光変調器の側からその特性の評価及び有効な利用方法等を検討した。また、その結果を元に空間光変調器の改良も進めた。さらに、それらの成果を踏まえて具体的な応用についての展開を試み、空間光変調器の並列光情報処理への応用に対して一つの道筋を示すことを目的とした。

第2章では、我々のグループで開発された MSLM, LC-MSLM, FLC-SLM, PAL-SLM について、その構造・動作原理・基本特性について述べた。また、MSLM において明らかとなっている問題点である最大読み出し光量の存在や、相反する動作速度と解像度の問題を克服するために、光変調材料を電気光学結晶から液晶に置き換える改良を行い、その基本特性を評価した。

第3章では、近年、光相関システムや位相補償等への応用に有望であると考えられている液晶空間光変調器に焦点をあて、PAL-SLM の位相変調特性を評価すると共に、応用システムにおいて重要な評価基準となる回折効率に関して理論的な解析も含めて詳細な議論を行った。さらに、応用システムの実用化を目指した場合には、コンピュータシステムとの連携が必要不可欠であることから、コンピュータシステムからの制御による電気書き込み型の空間光変調器を検討し、その位相変調特性について議論した。また、電気書き込み型とすることにより避けられない走査型制御の及ぼす影響についても評価した。その結果、PAL-SLM 及び LCD 書き込み型 PAL-SLM 共に、光相関システムや位相補償システムへの応用に適応可能であることを明らかにした。さらに、本研究における理論解析結果は、システム設計時において有効に利用可能であるものと考えられる。

第4章では、入力感度が高く、カスケード接続・光フィードバックが可能で、様々な内部演算を行うことができるという特徴を持った MSLM の応用として、光デジタル演算と光アナログ演算の両面からアプローチを行い、MSLM の特徴を積極的に活用してシステムを構築することにより MSLM の並列光情報処理への適用性を示した。現在、実用化に際してはまだまだ不十分なデバイスしか存在しないが、光が本質的に持つメリットを生かす応用研究は十分可能で

あることを示した。一方で、光学系では歪や各光学素子間のアライメントの問題を考慮する必要がある点、実用化に際しては光学系の小型化も必須であり、デバイスの開発もさることながら、小型・高精度光学システムの構築方法についても更なる研究が必要である事を指摘した。

第5章では、空間的に高密度な並列処理機構を光の持つ高い並列性により実現する試みの一つとして、大規模並列処理を基本とする学習型情報処理機構であるニューロコンピューティングへの MSLM の応用を検討し、光連想記憶システムである光アソシアトロンを提案し、アナログ処理及びフィードバック型の学習機能が重要な役割である事を議論した。実際に、光連想記憶システムを MSLM を用いて構築し、MSLM の持つアナログ特性が本システム上で有効に機能したことを示した。また、このような光学システムには様々な不均一性が存在することを明らかにし、フィードバック型の学習機能によりそれらの不均一性を補償することができることを示した。ここでも、光学系の持つ問題点、デバイスの持つ課題それぞれを指摘し、今後の研究の方向性を示した。

第6章では、高解像度化・高速化及び小型・低電圧駆動化を目指して開発された液晶空間光変調器の並列光情報処理への応用について検討を行った。FLC-SLM の高速応答・2値メモリー特性を有効に利用し、これまで写真フィルムに2重露光することにより行われていたスペックル写真法を、FLC-SLM 上のメモリー機能で実現することにより、計測の繰り返しを 200Hz で実行できる実時間処理を達成した。さらに、速度計測範囲を拡大するために、計測される速度に応じて2重露光間隔を変化させる方式を提案し、実際にその効果を確認した。また、PAL-SLM の位相変調・対数入出力特性の特性を生かした JTC 型光相関システムについて議論し、その効果を確認した。さらに、これまで光相関器で問題となっていた、入力光強度や空間周波数の違いによる相関強度への影響が、PAL-SLM の持つ対数的入出力特性により、許容できることを明らかにした。ここでは、現状のデバイスによっても、その性能を十分に発揮することにより、並列光情報処理の可能性を拓げることができることを示した。また、現状のデバイスの課題も指摘し、今後のデバイス研究の方向性を示した。

以上のように本論文では、デバイス研究と応用研究の密な連携が重要であることを主張し、並列光情報処理へのアプローチに対して、キーデバイスである空間光変調器の側からその特性の評価及び有効な利用方法について議論した。そして、現状の空間光変調器においても、その性能を十分に発揮することにより様々な並列光情報処理の応用研究が可能であることを示し、実用化に向けたひとつの道筋とした。しかしながら、空間光変調器に対する更なる性能改善が必要であることも事実である。このような状況の中で、デバイス研究側からのデバイスに関する詳細な情報発信、それを受けたシステム研究側によるデバイス性能をフルに引き出した応用開発、そしてその中から出てくるデバイスに対する具体的な要求発信、それに応えるべく更なるデバイス研究、こういったサイクルが機能的に働くことが重要である。今後、デバイス研究とシステム研究の両輪をうまく回すことにより、並列光情報処理の研究が大きく前進することを期待する。

謝辞

本論文は、浜松ホトニクス株式会社に入社以来、17年に亘って携わってきた光情報処理に関する研究の成果をまとめたものであり、こうした機会を与えて頂いたことに深く感謝致します。

本論文をまとめるにあたり、御指導・御鞭撻頂いた静岡大学工学部システム工学科 大坪順次教授に心から感謝の意を表すと共に、適切な御指示を賜った静岡大学工学部電気・電子工学科 篠原茂信教授、静岡大学電子工学研究所新領域創生部門 皆方誠教授、静岡大学工学部共通講座 中島伸治教授、静岡大学工学部電気・電子工学科 江上力助教授に深謝致します。

本研究の機会を与えてくださり、また研究遂行にあたり御助言を頂いた浜松ホトニクス株式会社 晝馬輝夫代表取締役社長、ならびに鈴木義二常務取締役中央研究所長、また研究当初より直接ご指導くださり、終始御鞭撻いただいた原勉第4研究室室長に心から感謝の意を表します。

本研究は、浜松ホトニクス株式会社技術部第1グループ及び中央研究所第4研究室において遂行されたものであり、長年にわたり同じ研究グループで研究を進めていただいた小林祐二氏、吉田成浩氏、豊田晴義氏、研究当初より数々の御助言・御指導下さった東京大学石川正俊教授、実験素子を試作して頂いた飯上芳樹氏、岡本博氏、中村和浩氏、齋藤正之氏に感謝します。本研究に関し、日頃から御討論くださり実験にも御協力いただいた竹森民樹氏、伊ヶ崎泰則氏、福智昇央氏、井上卓氏、田中博氏、宅見宗則氏、松井克宜氏に感謝します。

本研究は、この他にも社内・社外における多くの方々の御協力によるものであり、厚くお礼申し上げます

最後に、日頃の協力と暖かい励ましをもらった家族に感謝の意を表します。

本研究に関する論文リスト

- (1) M.Ishikawa, N.Mukozaka, H.Toyoda and Y.Suzuki,
”Optical associatron: A simple model for optical associative memory”,
Appl. Opt. Vol.28, No.2, pp.291-301 (1989)
- (2) M.Hashimoto, K.Kitayama and N.Mukozaka,
”Space-variant operations using an optical parallel processor based on polarization encoding”,
Opt. Lett. Vol.14, No.8, pp.384-386 (1989)
- (3) M.Hashimoto, K.Kitayama and N.Mukozaka,
” Programmable optical parallel processor based on polarization modulation:
Cascade operarion”,
Appl. Opt. Vol.28, No.20, pp.4305-4312 (1989)
- (4) M.Ishikawa, N.Mukozaka, Y.Toyoda and Y.Suzuki,
”Experimental studies on learning capabilities of optical associative memory”,
Appl. Opt. Vol.29, No.2, pp.289-295 (1990)
- (5) M.Hashimoto, K.Kitayama and N.Mukozaka,
”Neighborhood operations of optical parallel processor”,
Jpn. J. Appl. Phys. Part 2 Vol.29, No.7, pp.L1256-L1258 (1990)
- (6) N.Mukozaka, T.Hara and Y.Suzuki,
”Microchannel spatial light modulator using liquid crystal for modulating material”,
Jpn. J. Appl. Phys. Part 2 Vol.29, No.7, pp.L1227-L1230 (1990)
- (7) H.Toyoda, N.Mukozaka, Y.Suzuki and M.Ishikawa,
”Adaptive optical processing system with optical associative memory”,
Appl. Opt. Vol.32, No.8, pp.1354-1358 (1993)
- (8) Y.Kobayashi, T.Takemori, N.Mukozaka, N.Yoshida and S.Fukushima,
”Real-time velocity measurement by the use of a speckle-pattern correlation system that
incorporates a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator”,
Appl. Opt. Vol.33, No.14, pp.2785-2794 (1994)
- (9) N.Mukozaka, N.Yoshida, H.Toyoda, Y.Kobayashi and T.Hara,
”Diffraction efficiency analysis of a parallel-aligned nematic-liquid spatial light modulator”,
Appl. Opt. Vol.33, No.14, pp.2804-2811 (1994)
- (10) 豊田晴義, 吉田成浩, 向坂直久, 小林祐二, 原勉,
”位相変調型空間光変調器を用いた光相関システム”,
光学 Vol.23, No.5, pp.315-320 (1994)

- (11) H.Toyoda, Y.Kobayashi, N.Mukozaka, N.Yoshida, T.Hara and T.Ohno,
 “Frame-Rate Displacement Measurement System Utilizing an Ultra-High-Speed Shutter Camera and an Optical Correlator”,
 IEEE Trans. Instrum. Meas. Vol.44, No.3, pp.755-758 (1995)
- (12) Y.Kobayashi, H.Toyoda, N.Mukozaka, N.Yoshida and T.Hara,
 “Fingerprint Identification by an Optical Joint Transform Correlation System”,
 Opt. Rev. Vol.3, No.6A, pp.403-405 (1996)
- (13) Y.Igasaki, N.Yoshida, H.Toyoda, Y.Kobayashi, N.Mukozaka and T.Hara,
 “High Speed Parallel Aligned Liquid Crystal Spatial Light Modulator at 180Hz”,
 Opt. Rev. Vol.4, No.1B, pp.167-169 (1997)
- (14) Z.He, K.Hotate and N.Mukozaka,
 “Selective Image Extraction by Synthesis of the Coherence Function Using Two-Dimensional Optical Lock-in Amplifier with Microchannel Spatial Light Modulator”,
 IEEE Photonic Technol Lett Vol.9, No.4, pp.514-516 (1997)
- (15) F.Li, N.Mukozaka, N.Yoshida, Y.Igasaki, H.Toyoda, T.Inoue, T.Hara and Y.Kobayashi,
 “Phase Modulation Characteristics Analysis of Optically-Addressed Parallel-Aligned Mematic Liquid Crystal Phase-Only Spatial Light Modulator Combined with a Liquid Crystal Display”,
 Opt. Rev. Vol.5, No.3, pp.174-178 (1998)
- (16) Y.Igasaki, N.Yoshida, H.Toyoda, T.Inoue, N.Mukozaka, Y.Kobayashi, T.Hara and F.Li,
 “High Efficiency Electrically-Addressable Phase-Only Spatial Light Modulator”,
 Opt. Rev. Vol.6, No.4, pp.339-344 (1999)
- (17) S.Mizuno, K.Fujita, H.Yamamoto, N.Mukozaka and H.Toyoda,
 “A 256X256 compact CMOS Image Sensor With On-chip Motion Detection Function”,
 Journal of Solid-State Circuits, Vol.38, pp.1072-1075 (2003)
- (18) N.Mukozaka, B.Ye and N.Yoshida,
 “Spatial Temporal Analysis of Electrically-Addressable Phase-Only Spatial Light Modulator”,
 Opt. Rev. Vol.10, pp.361-365 (2003)

参考論文リスト

- (1) T.Hara, N.Mukozaka, Y.Suzuki
“Optical parallel logic operation with microchannel spatial light modulator.”
Proc. SPIE Vol.625, pp30-34 (1986)
- (2) H.Toyoda, Y.Kobayashi, N.Mukozaka, N.Yoshida, T.Hara, T.Ohno
“Real-time displacement measurement using a pattern correlation system incorporating an ultra-high-speed shutter camera and parallel aligned nematic liquid crystal spatial light modulators(PAL-SLM).”
Conf. Proc. IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf. Vol.1994, No.3, pp1345-1348 (1994)
- (3) N.Yoshida, H.Toyoda, Y.Igasaki, N.Mukozaka, Y.Kobayashi, T.Hara
“A non-pixelized electrically-addressed Spatial Light Modulator (SLM) by combining an optically-addressed SLM with a CRT.”
Int. Top. Meet. Opt. Comput. Tech. Dig. Vol.12, pp70-71 (1996)
- (4) Y.Igasaki, N.Yoshida, H.Toyoda, Y.Kobayashi, N.Mukozaka, T.Hara
“High Speed Parallel Aligned Liquid Crystal Spatial Light Modulator (PAL-SLM) Operated with 180KHz.”
Int. Top. Meet. Opt. Comput. Tech. Dig. Vol.12, pp140-141 (1996)
- (5) H.Toyoda, Y.Kobayashi, N.Mukozaka, N.Yoshida, Y.Igasaki, T.Hara
“Fingerprint Identification System with Optical Correlation.”
Int. Top. Meet. Opt. Comput. Tech. Dig. Vol.12, pp244-245 (1996)
- (6) N.Yoshida, H.Toyoda, Y.Igasaki, N.Mukozaka, Y.Kobayashi T.Hara
“A non-pixelated electrically-addressed Spatial Light Modulator(SLM) combining an optically-addressed SLM with a CRT.”
Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. Vol.2885, pp132-136 (1996)
- (7) Z.He, T.Okugawa, N.Mukozaka, K.Hotate
“Selective Image Extraction by Synthesis of the Coherence Function Using Two-Dimensional Optical Lock-in Amplifier with Microchannel Spatial Light Modulator.”
Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. Vol.2899, pp222-229 (1996)
- (8) F.Li, N.Mukozaka, N.Yoshida, Y.Igasaki, H.Toyoda, T.Inoue, Y.Kobayashi, T.Hara
“平行配向ネマチック液晶を用いた光アドレス型位相空間光変調器”
電気学会光・量子デバイス研究会資料 Vol.OQD-97, No.53-69, pp95-99 (1997)
- (9) 豊田晴義, 向坂直久, 水野誠一郎, 中坊嘉宏, 石川正俊
“超高速インテリジェントビジョンシステムC P V”
画像センシングシンポジウム講演論文集 Vol.6th, pp213-216 (2000)

- (10) 向坂直久, 豊田晴義, 田中博, 水野誠一郎, 中坊嘉宏, 石川正俊
“超高速インテリジェントビジョンシステム”
電子情報通信学会技術研究報告 Vol.101, No.282, pp63-66 (2001)
- (11) 豊田晴義, 向坂直久, 中村和浩, 宅見宗則, 水野誠一郎, 石川正俊
“イメージインテンシファイア機能付 1 m s ビジョンシステム ; I-CPV”
高速度撮影とフォトニクスに関する総合シンポジウム講演論文集, pp89-92 (2001)
- (12) 宅見宗則, 豊田晴義, 向坂直久, 水野誠一郎
“1KHz画像処理機能付きカメラシステム”
画像センシングシンポジウム講演論文集 Vol.8th, pp569-572 (2002)
- (13) 松井克宜, 豊田晴義, 向坂直久, 宅見宗則, 水野誠一郎
“超小型 1KHzスマートカメラモジュール”
信学技報 ICD2002-91, pp65-68 (2002)

他 2 6 件