



Title	液晶空間光変調器を用いたホログラム型光スイッチに関する研究
Author(s)	山崎, 裕史
Citation	大阪大学, 1997, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3129274
rights	
Note	

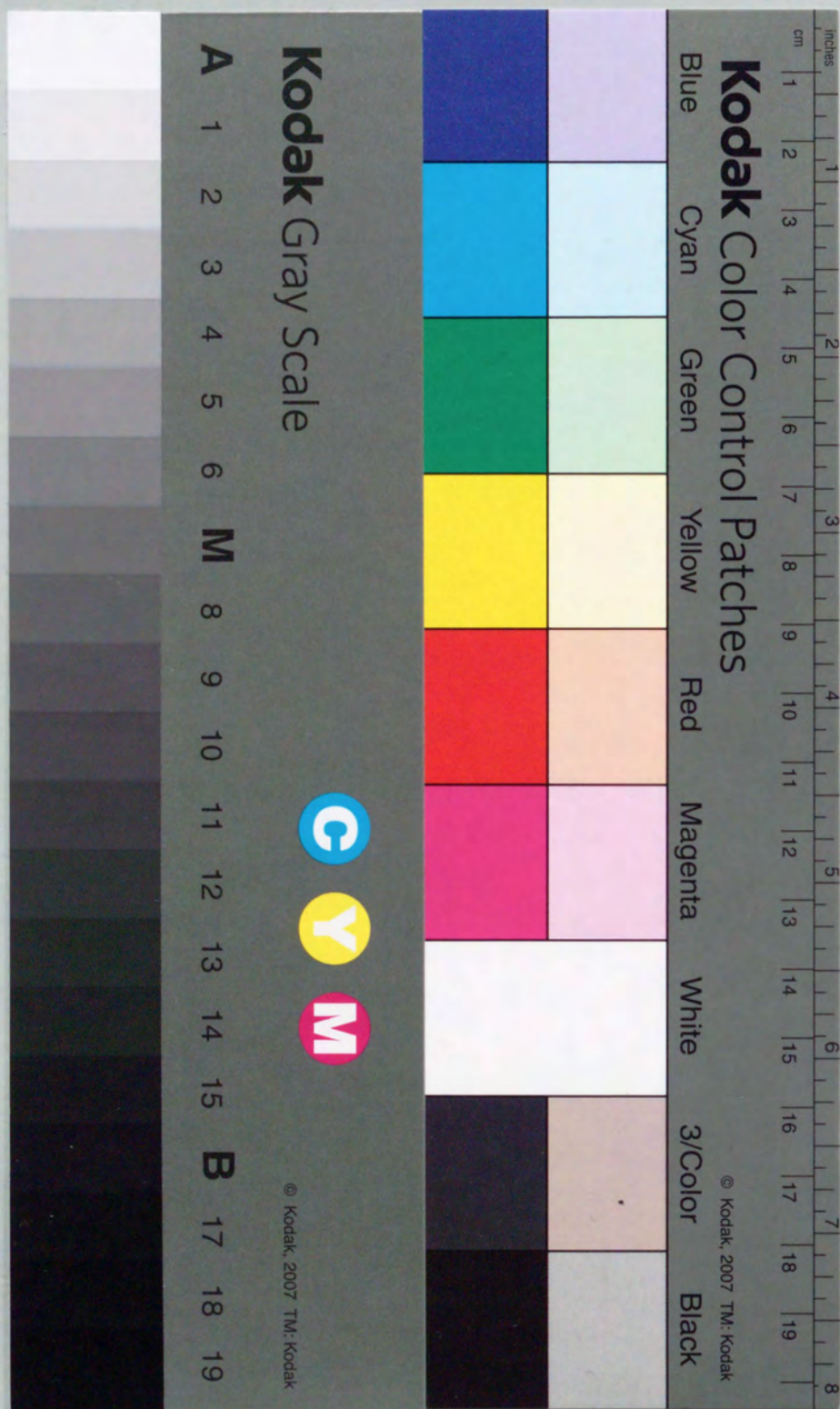
The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

液晶空間光変調器を用いた
ホログラム型光スイッチに関する研究

山崎 裕史



①

液晶空間光変調器を用いた
ホログラム型光スイッチに関する研究

山崎 裕史

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 交換システムのスイッチ	2
1.3 光を情報媒体に利用する場合の特徴	5
1.4 光スイッチング方式	6
1.5 本研究の目的と本論文の構成	9
第2章 大規模光スイッチの実現技術	12
2.1 はじめに	12
2.2 空間伝搬型光スイッチ	12
2.3 ホログラフィ	14
2.3.1 ホログラフィの由来	15
2.3.2 光波面情報の記録方式	15
2.3.3 光波面情報の生成法	16
2.3.4 ホログラム記録媒体	17
2.4 ホログラム型光スイッチの研究状況	19
2.5 本章のまとめ	20
第3章 液晶ディスプレイを用いたホログラム型光スイッチ	21
3.1 はじめに	21
3.2 液晶ディスプレイによる光スイッチングの原理	21
3.2.1 光スイッチングの原理	21
3.2.2 回折実験	24
3.3 光スイッチの構成	27
3.4 液晶ディスプレイ上のパターンと出力位置の関係	29

3.5	スイッチングの実証実験	35
3.5.1	1 x 64スイッチングの実験	35
3.5.2	2 x 32スイッチングの実験	38
3.6	考察	40
3.7	本章のまとめ	40
3.8	付録	41
第4章	強誘電性液晶空間光変調器を用いたホログラム型光スイッチ	44
4.1	はじめに	44
4.2	強誘電性液晶空間光変調器による光スイッチングの原理	44
4.2.1	強誘電性液晶空間光変調器の動作原理	44
4.2.2	強誘電性液晶空間光変調器による位相変調	47
4.2.3	強誘電性液晶空間光変調器による光スイッチング	49
4.3	光スイッチの構成	51
4.4	制御光の強度バラツキと回折効率	55
4.5	グレーティング	63
4.6	スイッチングの実証実験	64
4.7	出力位置	69
4.8	4 x 1204スイッチングの実験	71
4.9	考察	78
4.10	本章のまとめ	79
第5章	ホログラム型光スイッチの拡張性	81
5.1	はじめに	81
5.2	液晶ディスプレイを用いたホログラム型光スイッチの出力数	81
5.2.1	b の値に対するスイッチの出力数	82
5.2.2	LCDの画素数とスイッチの出力数の関係	88
5.2.3	計算結果の検証	96

5.3	FLC-SLMを用いたホログラム型光スイッチの出力数	97
5.3.1	制御光源のパワーと制御光の分割数との関係	97
5.3.2	制御光源のパワーとスイッチの出力数の関係	105
5.4	考察	107
5.5	本章のまとめ	108
第6章	結論	110
6.1	本研究の成果	110
6.2	展望と課題	112
謝辞		115
参考文献		117
研究業績		124

第1章 序論

1.1 本研究の背景

近年目覚ましい進歩を遂げている情報処理の分野では、コンピュータを中心とするデジタル技術の進展に伴い映像情報処理を含めたデータ処理が普及しつつある。また、最近では多くの計算機をネットワークで接続して使用する分散コンピューティングという形態が普及しつつある[1]。これに伴い、通信網は従来の電話のみならず高速のデータ通信に対応できることが要求されており、動画像通信など各種のサービスが近未来技術として考えられている。図1.1.1に各種の通信サービスと要求される通信速度を示す[2]。これらの通信サービスは有線・無線に関わらず、この図に示す通信速度を必要とする。このような多様な通信サービスを提供できる通信網の実現に向けて、広帯域デジタルサービス統合網 (Broadband aspects of integrated services digital network, B-ISDN) と呼ばれるデジタル通信網が提唱されている[3,4]。このような通信網の伝送路としては金属のケーブルに比してより大量の情報を送ることのできる光ファイバが用いられ、既に幹線系の伝送システムに導入されている。そして、加入者系の伝送路においても、21世紀初頭までに全ての家庭へ光ファイバを敷設する "Fiber to the home (FTTH)" と呼ばれる計画が進められようとしている[5]。このような伝送システムの大容量化に対応して交換システムにおいても ATM (Asynchronous Transfer Mode) 交換機のような広帯域電子交換システムが開発されている[6,7]。しかしながら、電子回路の動作限界やシステム内の信号転送能力などから電子交換システムの伝達容量は高々数百 Gbit/s であろうと云われている。これに対して、光ファイバが全国の家計にまで張り巡らされ、広帯域通信サービスが普及し、数百 Mbit/s の情報が頻繁に送受信される時代には、1 交換システムあたりの伝達容量は 100 Tbit/s 程度になると試算されている[8]。このような大容量の情報の送受信は上述の電子交換システムでは不可能であり、その限界を打破するために、電子

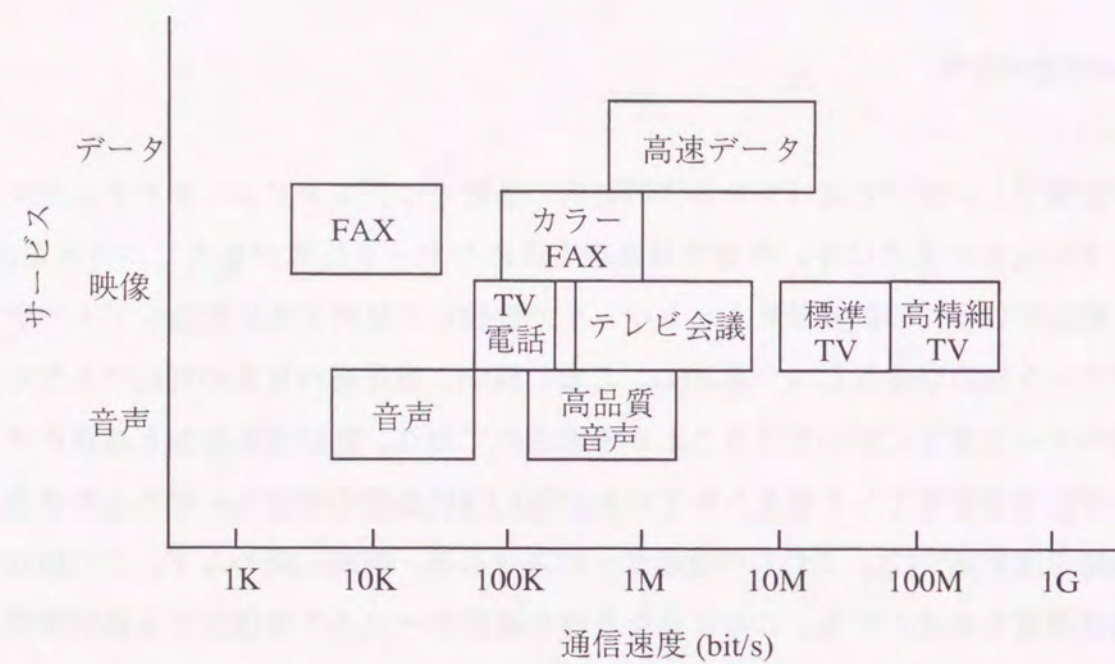


図1.1.1 通信サービスと要求される通信速度

技術にはない特長をもつ光技術の交換システムへの適用が考えられており、光交換システムの研究が活発に行われている[9]。

1.2 交換システムのスイッチ

交換システムで使用するスイッチングの方式を分類すると空間分割スイッチングと時分割多重スイッチングに分けられる[10]。

空間分割スイッチングはスイッチにつながる信号線の接続を物理的に切り替える方式である。最も基本的な空間分割スイッチであるマトリクススイッチの動作原理を図1.2.1に示す。入線と出線の交点にクロスポイントスイッチが置かれ、このクロスポイントスイッチをON/OFFすることにより接続する入線と出線の組み合わせを決める。空間分割スイッチングは、接続されている回線は1組の端末間の通信に占有されるので、スイッチの動作は信号の速度や形式に関係なく通信の開始時と終了時のみに実行される。そのため、制御が容易であること、スイッチング速度が10ms程度と比較的遅くてよいこと、等の特長があげられる。

時分割多重スイッチングでは、複数の端末からの信号が時間軸上に分割されてハイウェイと呼ばれる信号線上に存在し、それらの信号の時間順序を入れ替えてスイッチング機能を実現する。時分割多重スイッチの基本的な構成を図1.2.2に示す。時分割多重スイッチは多重化スイッチと時間スイッチからなる。多重化スイッチは端末からの信号を順次サンプリングしてハイウェイ上に並べていく。時間スイッチは、時分割多重された各端末からの信号をメモリ内の異なるアドレスに順次格納し、読

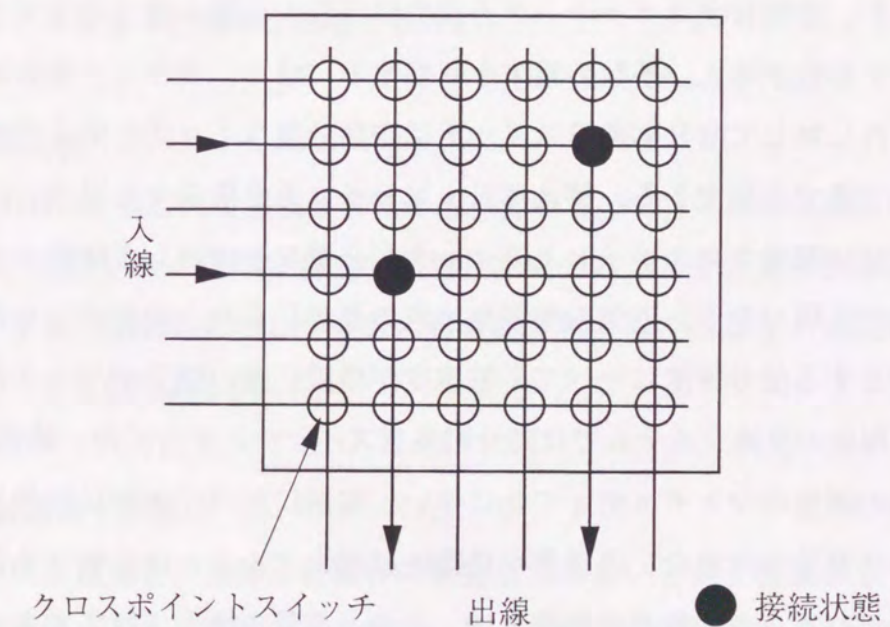


図1.2.1 マトリクススイッチの構成

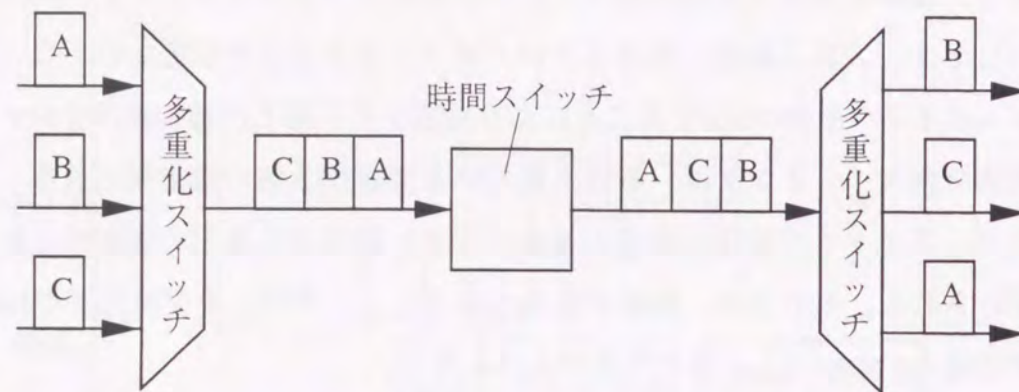


図1.2.2 時分割多重スイッチの構成

み出す順番を任意に制御することで、ハイウェイ上での順番を入れ替える。出力側の多重化スイッチは時分割多重されたハイウェイ上の信号を順次出線に並べていく。このようにして信号の交換を行う。

現在の交換システムが収容する端末数は少ないもので数千台、多いものでは10万台以上になるが、空間分割スイッチング方式では収容する端末数に応じてクロスポイントスイッチの数が増え、多数の端末を収容するにはハードウェア量の増大が問題となる。これに対して時分割多重スイッチは空間分割スイッチと同じ機能を少ないハードウェア量で実現できる。例えば $N \times N$ スイッチを構成する場合、マトリクススイッチでは N^2 個のクロスポイントスイッチが必要なのに対して時間スイッチは N 個のメモリで実現できる。近年の半導体技術の進歩により、現在の主な端末である電話が必要とする信号速度に比べて応答速度が格段に速い電子デバイスが実用化されたため、現在の交換システムでは時分割多重スイッチング方式が一般的である。しかし、今後の通信のマルチメディア化に伴い、電話に比べ圧倒的に情報量が多い動画通信等が普及した場合、通信量が飛躍的に増大することは必須である。これに対して電子デバイスの動作速度の向上は、この通信量の増大に対応できるほどは見込めない。今の電話による音声サービスがそのまま動画通信に変わるとすると通信量は3桁程度増えるが、電子デバイスは数十Gbit/sの信号を扱うのが限度と考え

られ、応答速度の向上は1桁程度しか見込めない。したがって、時分割多重による多重度が大幅に減少し、時分割多重スイッチング方式の電子交換システムでは通信量の増大に対応しきれないと考えられる。このような事態を避けるために電子技術にはない特長をもつ光技術を用いて交換システムを大容量化する必要があると考えられる。

1.3 光を情報媒体に利用する場合の特徴

光交換方式に有効な光の特長は大別して高速性、高周波性、無漏話無干渉性の3つが挙げられる[9]。

(1) 高速性

電気信号の場合、信号速度(単位時間あたりに送る情報量)の上限は回路のRC時定数によって制限されるが、光信号の場合ではこのような制約がなく、同じ時間内に電気信号よりも多くの情報を伝達できる。

(2) 高周波性

光は200THzもの広大な周波数帯域をもっているので、多くの周波数帯域に分割することができ、各々の帯域に独立した信号を乗せることで大量の情報を運ぶことができる。また、周波数ごとに光信号の行き先を割り当てるなど、光信号を制御する手段としても有効である。

(3) 無漏話無干渉性

光は空間を直進し、外部の電磁界の影響を受けないという特徴をもつ。現在の技術では導波路による光配線は電気配線に比べて作製が困難であり、交換システムのような大規模な光回路の実現は容易ではない。しかし、この光の特徴を利用して光信号に空間を伝搬させることで配線部の構造を簡素化し、大規模な光回路が実現で

きると考えられる。

1.4 光スイッチング方式

光スイッチングの方式は電子交換システムと同様の「空間分割スイッチング」、
「時分割多重スイッチング」の他に「周波数分割多重スイッチング」を含めた3つの
方式に分類される。空間分割スイッチング方式と時分割多重スイッチング方式は光
の高速性を利用することで、周波数分割多重スイッチング方式は光の高周波性を利用
することで交換システムを大容量化することができる。この節ではこれらの方式
と現在の研究状況について述べる。

(1)空間分割スイッチング

空間分割スイッチングの特長は、接続されている回線が1組の端末間の通信に占
有されているので、一旦接続されると信号速度や変調方式に関わらず通信が可能で
あり、光の高速性を利用することで回線あたりの信号帯域の広帯域化が容易で各端
末の扱う情報量の増大に有効である。また、スイッチングは通信の開始時と終了時
のみ行えばよく制御が容易で、スイッチング速度も10ms程度と低速でよい。ただ、
端子数の増加に対するハードウェア量の増大が著しい。空間分割スイッチによって
交換システムの伝達容量をどの程度拡大できるかは実現できる光スイッチの規模に
よって決まる。例えば、各端末が高精細動画通信が可能な1Gbit/sの信号を送受信し、
10000端子の光スイッチが実現されたとすると、交換システムの伝達容量は10Tbit/s
となる。大規模な光スイッチの実現技術については第2章で述べる。

光スイッチの開発は各種行われており、 $4 \times 4 \sim 8 \times 8$ のニオブ酸リチウム導波
路光スイッチ[11-14]や 8×8 石英系光導波路型光スイッチ[15]の実現例が報告され
ている。また、半導体光スイッチの開発も行われている[16]。これらの光スイッチ
を使った空間分割スイッチング方式の交換システムでは 8×8 ニオブ酸リチウム導
波路光スイッチを多段接続した128回線の光交換システム[17]、 4×4 レーザダイオ
ードゲート光スイッチや 8×8 石英系光導波路型光スイッチを用いた光交換システ

ムの実験[18,19]などが報告されている。ただ、現在の技術では大規模な導波路型光
スイッチの作製は困難であり、小規模な実験にとどまっている。

(2)時分割多重スイッチング

時分割多重スイッチングの特長は信号の多重度を大きくすることで少ないハード
ウェア量で多くの端末間の通信ができることである。光の高速性を利用することで
多重度を大きくすることができ、交換システムを大容量化できる。光が光ファイバ
や光スイッチ素子を通過できる周波数帯域は10THz程度であり、この制約により信
号速度の上限は10Tbit/s程度になる。したがって、時分割多重スイッチングによる交
換システムの伝達容量は原理的には10Tbit/s程度まで拡大できる。

研究状況は光メモリとして光遅延線を用いたものが研究されており[20]、時間ス
イッチとしては、光ファイバ遅延線とニオブ酸リチウム光スイッチ素子を用いた光
時間スイッチ[21]、光ファイバ遅延線とレーザダイオード光スイッチ素子を用いた
光時間スイッチ[22]、双安定レーザダイオードを用いた光時間スイッチ[23]について
実験例が報告されており、現在までに動作速度512Mbit/sの4チャンネル光時間ス
イッチが実現されている[24]。また、半導体光スイッチと電子メモリを組み合わせた
システムの提案[25]、光短パルスを使ったシステムの提案[26]がされている。しかし、
時分割多重スイッチング方式の光交換システムを実用化するには光メモリをはじめ、
高速の光信号を制御する技術がまだ不十分である。また、制御回路が一般に電気回
路であり電子デバイスは数十Gbit/sの信号を扱うのが限度と考えられるので、制御回
路の処理速度が光の高速性を生かしきれない要因となっている。今後、これらの課
題の解決が必要である。

(3)周波数分割多重スイッチング

周波数分割多重スイッチングでは、各端末から送られてくる信号にそれぞれ周波
数を割り当てて合波し、ハイウェイ上で周波数を変換してスイッチング機能を実現
する。周波数分割多重スイッチの基本的な構成を図1.4.1に示す。周波数分割多重ス
イッチは多重化スイッチと周波数スイッチからなる。多重化スイッチは端末からの

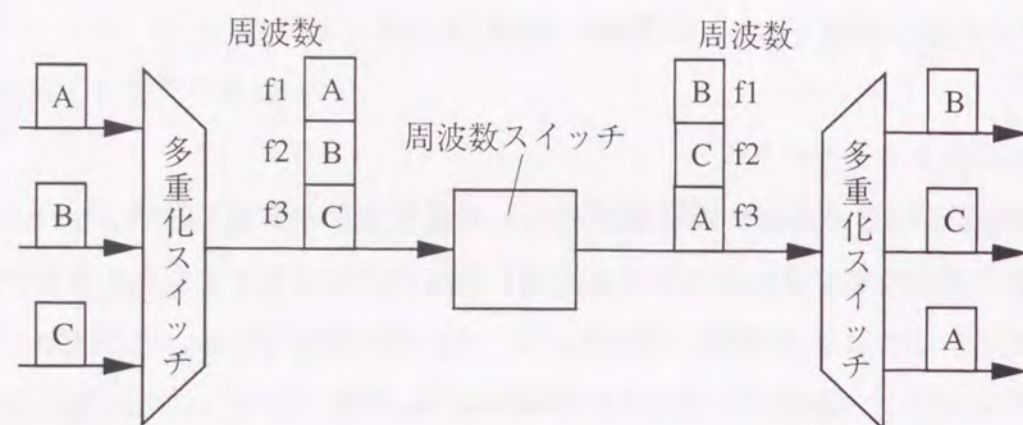


図1.4.1 周波数分割多重スイッチの構成

信号を各入線に割り当てられた周波数に変換して合波する。周波数スイッチは、周波数多重された信号をそれぞれ任意の周波数に変換する。出力側の多重化スイッチは周波数多重されたハイウェイ上の信号を周波数に対応する出線に出力する。このようにして信号の交換を行う。周波数分割多重スイッチングの特長は、光の高周波性を利用して多くの周波数の各々に独立した信号を乗せて配線を共有することで大量の情報を転送できること、周波数ごとに光信号の行き先を割り当て、フィルタなどの受動素子で光信号を制御できることである。光が光デバイスを通過できる周波数帯域が10THz程度で周波数フィルタの分解能の限界が数GHzと考えられるので、周波数の多重度の限界は数千と考えられる。したがって、各周波数に数Gbit/sの信号を割り当て数千の周波数を多重することで交換システムの伝達容量は10Tbit/s程度まで拡大できる。

周波数変換素子やフィルタなどのデバイスの開発では半導体レーザをベースとした素子の研究がされており、数チャンネル～数十チャンネル程度の動作実験が報告されている[27-29]。周波数交換システムとしては実用的なデバイスがなかったことから基礎的な検討や実験にとどまっていたが[30-33]、最近の半導体可変周波数光源[34]や導波路型周波数フィルタ[35]等の周波数制御デバイスの進展により新たなシステムの提案[36]やシステム実験[37]の報告がされるようになってきた。また、空間分

割スイッチ、時分割多重スイッチとの組み合わせも検討されている[38-40]。ただ、現状では1つの素子で複数の周波数を独立に制御することができないため、制御素子のところでは周波数ごとに分波する必要がある。

以上のように各方式ともに精力的に研究が行われており、電子交換システムの伝達容量の限界が数百Gbit/sであるのに対して、光スイッチング方式により伝達容量10Tbit/s程度の交換システムが実現可能と考えられる。そして、3つの光スイッチング方式を組み合わせることで、将来は伝達容量100Tbit/sの交換システムが実現されるであろう。しかし、現在、各光スイッチング方式はそれぞれ解決しなければならない課題をもっており、空間分割スイッチングでは大規模なスイッチの構成技術、時分割多重スイッチングでは光メモリの実用化と制御回路の高速化、周波数分割多重スイッチングでは周波数制御デバイスの実用化、といった問題がある。当面はこれらの問題を解決し、各光スイッチング方式の特長を生かすことで伝達容量が数Tbit/sから10Tbit/sの交換システムが開発されると考えられる。

1.5 本研究の目的と本論文の構成

本研究では、通信のマルチメディア化に伴う飛躍的な通信量の増大に対応できる交換システムを実現する方法として、スイッチの制御が信号速度に関係なく容易なこと、スイッチング速度が低速でよいこと等、比較的要求条件の緩いことから、前節で述べた3つのスイッチング方式の中から空間分割スイッチング方式を選び、この方式の課題である大規模なスイッチの構成法について検討を行う。そして大規模なスイッチを実現する方法として液晶空間光変調器を用いた新しいホログラム型光スイッチの構成を提案し、それらを実験的に検証する。

本論文の第2章では、大規模な光スイッチの実現技術について述べ、本研究で液晶空間光変調器を用いたホログラム型光スイッチを実現手段として選択した経緯を明らかにする。

本論文の第3章では、はじめに液晶ディスプレイの位相変調による光の回折現象について述べ、実際の回折現象を実験で示した後、液晶ディスプレイをホログラム媒体として用いた新しいホログラム型光スイッチの構成を提案する。そして実験により提案したホログラム型光スイッチの動作の確認を行い、損失の測定結果を示す。

本論文の第4章では、はじめに強誘電性液晶空間光変調器を用いて光をスイッチングする原理について述べた後に、強誘電性液晶空間光変調器をホログラム媒体として用いた新しいホログラム型光スイッチの構成を提案する。そして、制御光の強度のバラツキの影響について検討し、不要な回折光によるクロストークを避けるための出力位置の決め方について述べる。また、実験により提案したホログラム型光スイッチの動作を確認し、損失とクロストークの測定結果を示す。

本論文の第5章ではホログラム型光スイッチの拡張性について検討するため、はじめに液晶ディスプレイを用いたホログラム型光スイッチにおいて出力数の制約要因である1入力に割り当てる画素数とスイッチの出力数の関係を求める。次に強誘電性液晶空間光変調器を用いたホログラム型光スイッチにおいて出力数の制約要因である制御光源のパワーとスイッチの出力数の関係を明らかにする。最後に交換システムで使用されるような大規模なスイッチの実現の可能性について、これら2つのタイプのホログラム型光スイッチを実現可能なスイッチ規模の観点から比較検討する。

本論文の第6章では、本研究で得られた結論と今後の展望と課題を述べる。

各章の関係は、第1章で本研究の目的を述べ、第2章では、その実現方法の選択を行う。第3章と第4章では第2章で選択した方法により、具体的に2つのタイプの新しいホログラム型光スイッチを提案する。そして、第5章では第3章と第4章の結果を踏まえて、これらの2つのタイプのスイッチによる目標達成の可能性を検討する。最後に第6章でこれらの結論をまとめる。図1.5.1に各章の関係を示す。

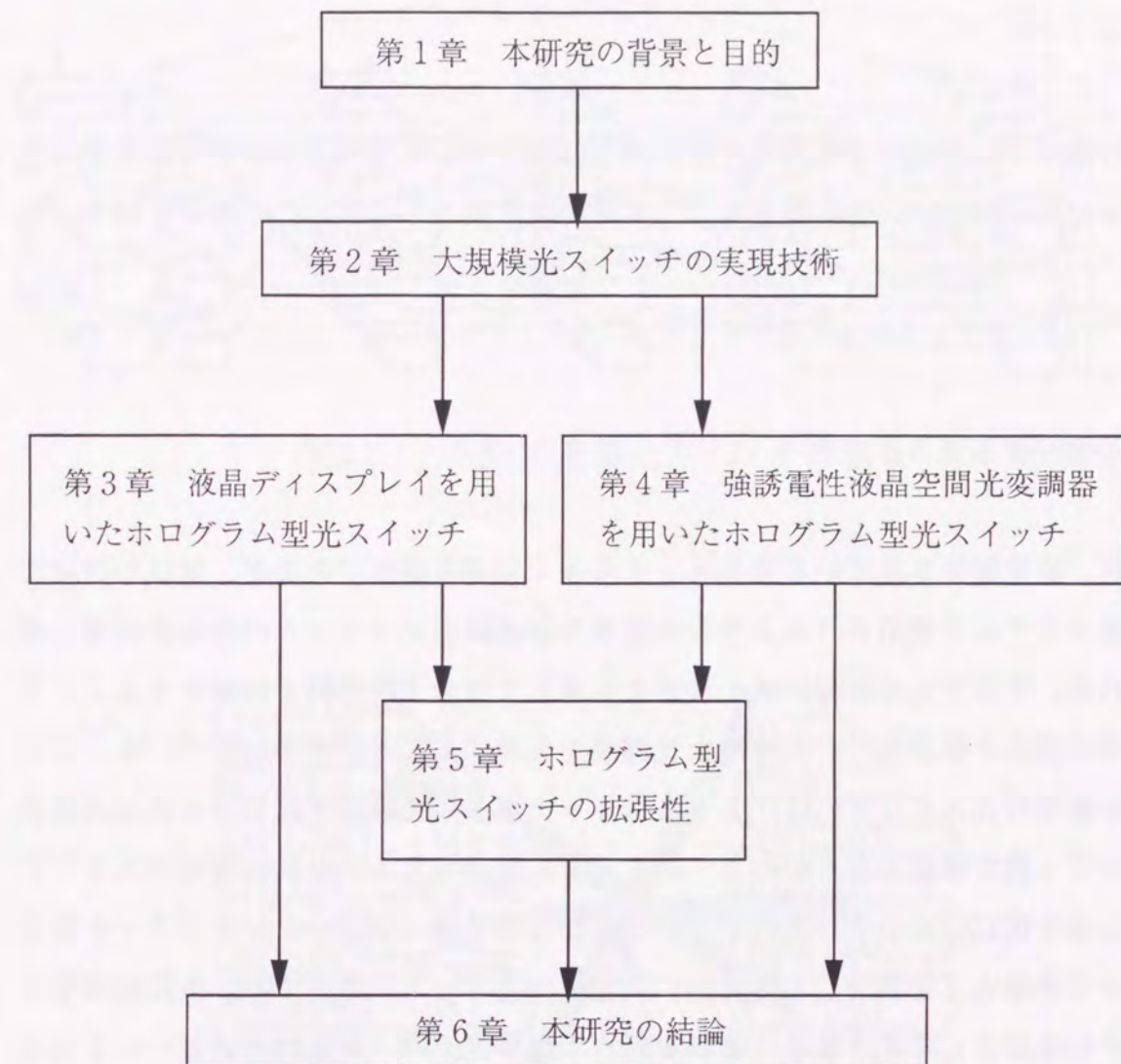


図1.5.1 本論文の構成および各章の関係

第2章 大規模光スイッチの実現技術

2.1 はじめに

この章では、大規模な光スイッチの実現技術について述べ、本研究で液晶空間光変調器を用いたホログラム型光スイッチを実現手段として選択した経緯を明らかにする。

2.2 空間伝搬型光スイッチ

現在、研究開発されている光スイッチの多くは導波路型であるが、現状の技術では交換システムで使用されるような大規模な導波路型光スイッチの作製は困難と考えられる。そこで光の無漏話無干渉性を利用して信号光に空間を伝搬させることで配線部の構成を簡素化し、大規模な光回路を実現することが考えられている。この空間伝搬型の光スイッチには、 2×2 スイッチを多段に接続するものと光偏向素子を使って1段で構成するものの2つのタイプに分けられる。多段接続型光スイッチの概念図を図2.2.1に示す。入力ポートから出た信号光は各段の 2×2 スイッチ素子によって進路を二者択一し、最終的に所望の出力ポートに到達する。多段接続型スイッチの実験として光の通過・遮断を行う半導体光デバイスを2048個並べた2次元アレイを立体光回路で5段接続した実験や[41-44]、液晶デバイスを使った 2×2 スイッチを多段に接続したスイッチの実験例が報告されている[45,46]。しかし、多段接続するタイプのスイッチはスイッチの規模が大きくなるに連れてハードウェア量が著しく増大する欠点がある。これに対して、光偏向素子を用いた光スイッチでは光デバイスを多段接続する必要がなく、立体光回路の構成が極めて簡単になるため、空間分割スイッチング方式の欠点であるスイッチの大規模化に伴うハードウェア量の増大を抑えることができる。光偏向素子を用いた光スイッチの概念図を図2.2.2に

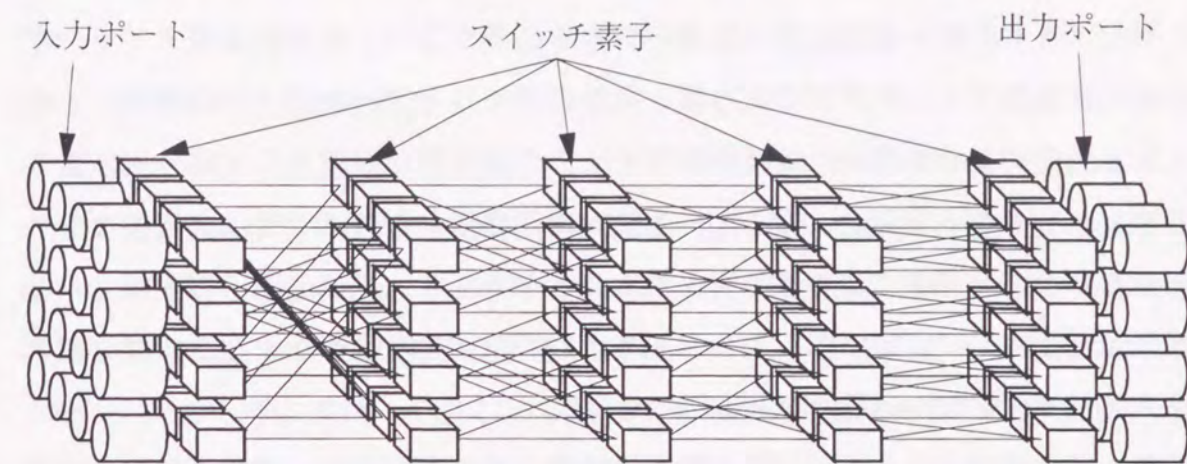


図2.2.1 多段接続型光スイッチの構成

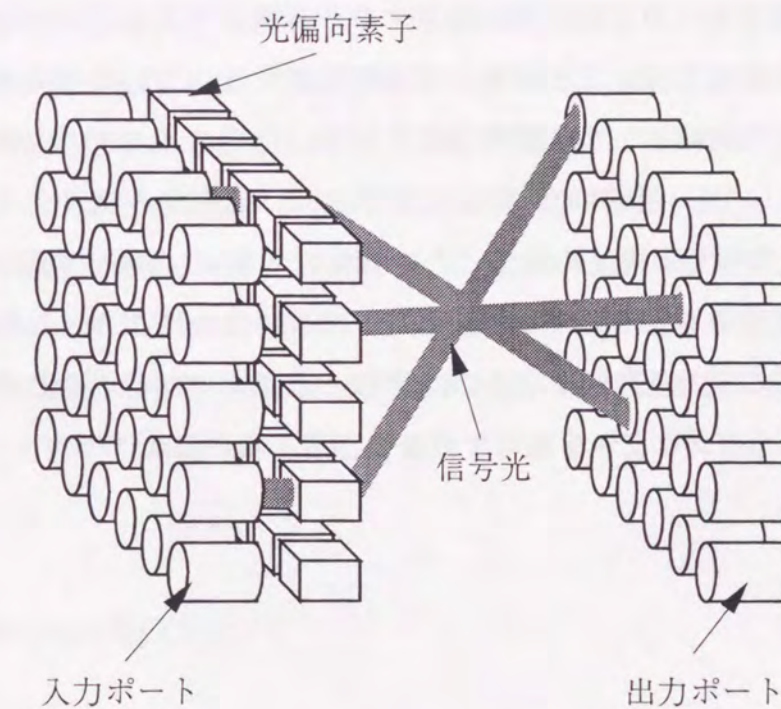


図2.2.2 光偏向素子を用いた光スイッチの構成

示す。各入力に割り当てられた光偏向素子によって各入力光を独立に2次元に偏向して入出力ポート間を接続する。光偏向素子の数は入力数と同じでよく、入力ポートと出力ポートの間を個別に結ぶ配線をつくる必要がない。時分割多重スイッチが入力側の多重化スイッチだけで入力数と同数のメモリとゲート素子が必要なことを考えると光偏向素子を用いた空間分割スイッチの素子数は原理的には時分割多重スイッチよりも少なくなる。このように光偏向素子を用いたスイッチは大規模な光スイッチを少ないハードウェア量で構成することができる。光偏向素子に要求される条件は光を2次元に偏向できることと、スイッチング速度は少なくとも空間分割スイッチングに必要な10ms程度であることである。

従来、光を偏向する方法として、機械的偏向、電気光学偏向、音響光学偏向が考えられてきた[47,48]。機械的偏向はミラーなど光路を曲げることでできるものを機械的に動かして光を偏向する。電気光学偏向は LiNbO_3 などの電気光学結晶に電界を加えることで結晶の屈折率を変化させることで光を偏向する。音響光学偏向は LiNbO_3 などの音響光学材料に音波を伝搬させると音響ひずみに応じた屈折率変化が生じ、位相格子が形成されることを利用して光を回折する。これまでに光偏向素子を用いた光スイッチの実験として音響光学素子を用いた光スイッチの実験などが報告されている[49]。しかし、機械的偏向は光を2次元に偏向する装置をスイッチ内に多数配列することが困難と考えられること、電気光学偏向は数kVの高い駆動電圧が必要なこと、音響光学素子は数Wと消費電力が大きいことにより、これらの光偏向素子を光スイッチの中で多数使用するの難しいと考えられる。そこで他の方法として光偏向素子にホログラフィを適用することが考えられる。

2.3 ホログラフィ

この節では、ホログラフィがどのようなものであるかを述べ[50-52]、光スイッチ

への適用の可能性を示す。

2.3.1 ホログラフィの由来

ホログラフィは写真技術の一種である。しかし、従来の写真技術では光波の振幅成分しか記録できなかったのに対し、ホログラフィは光波の振幅と位相の両成分を記録している。ホログラフィの原理は1948年にD. Gaborによって考案されたが[53,54]、そのとき、彼はこの新しい写真技術を波面再生法と呼び、また、物体光波面を記録した写真にギリシャ語で「すべてが記録されたもの」の意味をもつホログラムという名称を与えた。それ以来、従来の写真技術フォトグラフィに対比させて、ホログラムを使うこの新しい写真技術をホログラフィと呼ぶようになった。その後、1962年にE. N. LeithとJ. Upatnieksによって二光束法が考案された[55,56]。二光束法は1つの光源から出た光を2つに分けて一方を物体に照射し、生じた散乱光と他方の均一な光で干渉縞を発生させ、この干渉縞をホログラム記録媒体に記録する。そのころレーザが実用化されたこともあり、二光束法によってホログラフィは著しい進歩を遂げた。これをきっかけにホログラフィの研究が急速に進み、その応用として3次元画像の記録・再生、ホログラムメモリ、光情報処理等が研究されている。

このようにホログラフィは光の波面を再生する技術であるから、ホログラフィを使って信号光の波面を所望の波面に変換すれば信号光を2次元に偏向することができ、光スイッチの中で光偏向素子として使用できると考えられる。

2.3.2 光波面情報の記録方式

ホログラム記録媒体に光波面の情報をどのような形で記録するかによって、以下の3つに大別される。

(1)振幅ホログラム

光の波面情報をホログラム媒体の振幅透過率、あるいは振幅反射率の変化として記録したものである。ホログラムによって光を場所的に振幅変調することで回折し、波面を再生する。光の吸収があるために再生された光波面は暗い。

(2)位相ホログラム

光の波面情報をホログラム媒体の厚み、あるいは屈折率の変化として記録したものである。ホログラムによって光を場所的に位相変調することで回折し、波面を再生する。振幅ホログラムと異なり光の吸収がないので、一般に再生された光波面は明るい。

(3)複素振幅ホログラム

光の波面情報をホログラム媒体の振幅変化と位相変化の両方で記録したものである。ホログラムによって光を場所的に振幅変調と位相変調の両方を行い、波面を再生する。

光スイッチでの使用を想定して上記の3つの記録方式を比較すると、光の吸収がなくスイッチの損失が小さくなる位相ホログラムが適当であることがわかる。

2.3.3 光波面情報の生成法

光波面の情報をどのような方法で記録できる形にするかで、以下の2つに分けられる。

(1)光波面直接記録ホログラム

物体表面で散乱されたレーザ光(物体光)と、それと同じレーザ光源が発した別の均一な照明光(参照光)によって生じる干渉縞をホログラム媒体に直接記録する。

(2)計算機ホログラム

ホログラム記録面に生じるであろう干渉縞を計算機により求め、そのパターンをホログラム媒体に記録する。計算機ホログラムの特長は実在しない架空の光波面を計算によって作り出せることである。

2.3.4 ホログラム記録媒体

ホログラムの記録媒体としてハロゲン化銀感光材料が広く用いられているが、書き換えができないため光スイッチの中では使用できない。光スイッチで用いるホログラム媒体は、一般にホログラム媒体に要求される書き込み光に対する高い感度、高分解能といった条件のほかに書き換え時間が短い、少なくとも空間分割スイッチで要求される10ms程度の時間で書き換え可能なことが要求される。以下に書き換え可能なホログラム媒体を示す。

(1)サーモプラスチック

帯電させたサーモプラスチックを露光して再び帯電させることで露光したパターンと同じ電荷分布がサーモプラスチック上に生じる。この状態で加熱すると電荷分布に応じた凹凸のパターンが形成され、位相ホログラムとなる。サーモプラスチックの書き込み光に対する感度は数mJ/cm²と比較的高く、分解能も1000 line pairs/mm程度と比較的高い。ただ、書き込み時間は数十秒と長く、サーモプラスチックを帯電させるために数kVの高電圧を必要とする。

(2)フォトリフラクティブ結晶

光の照射された部分の屈折率が変化するために干渉縞を結晶内に屈折率分布として記録する。分解能は1500 line pairs/mm程度と高いが、書き込み光に対する感度が1J/cm²以上と低いので、高速な書き込みには大きなパワーの光による書き込みや、数kVといった高電圧による駆動が必要になる。

(3)液晶空間光変調器

液晶空間光変調器はサーモプラスチックやフォトリフラクティブ結晶と比べて数Vと低電圧駆動が可能で数百mWと消費電力も比較的小さいという特長をもつ。液晶空間光変調器には電気アドレス型と光アドレス型がある。

電気アドレス型はテレビや計算機のディスプレイなどで広く使われている液晶ディスプレイ(LCD)である。電気アドレス型は光による直接書き込みは行わず、予め制御装置のメモリに記録されているパターンを電気信号により読み出して表示する。したがって、書き込みをするための光学系が不要であり、計算機ホログラムの媒体として架空の光波面をつくることもできる。一般にLCDは液晶により光の偏光方向を制御し、偏光板を通すことで光の通過・遮断をし、表示を行っている。しかし、液晶は複屈折材料であるため、偏光板を取り外して光の位相変調も行うことができる。したがって、振幅ホログラム、位相ホログラム共に表示することができる。分解能は数十line pairs/mmと低い、書き換え時間は数十msと速い。

光アドレス型にはネマチック液晶を用いたものと強誘電性液晶を用いたものがあるが、書き込んだパターンを記録できるのは強誘電性液晶を用いたものである。光アドレス型も液晶により光の偏光方向を制御し、偏光板を通すことで光強度を変調して画像の表示を行うものであるが、入射光の偏光方向を調整することで光の位相変調も可能である。したがって、光アドレス型も振幅ホログラム、位相ホログラム共に記録することができる。分解能は100 line pairs/mm程度と低い、書き込み時間は数msと速く、感度は1μW/mm²程度である。

上記のホログラム記録媒体を光スイッチで使用する事を考えると、サーモプラ

スチックは分解能と感度は高いが書き換え時間が長く高電圧が必要、フォトリフラクティブ結晶は分解能は高いが駆動に大きなパワーの光または高電圧が必要、液晶空間光変調器は書き換え時間は速く低電圧駆動が可能であるが分解能が低いと、それぞれ長所短所があることがわかる。

2.4 ホログラム型光スイッチの研究状況

この節では光偏向素子にホログラフィを適用したホログラム型光スイッチの研究状況について述べる。

サーモプラスチックを用いた光スイッチの提案[57]やフォトリフラクティブ結晶を用いた光スイッチングの実験[58]が報告されているが、その後、サーモプラスチックを用いた光スイッチの実験の報告はされておらず、フォトリフラクティブ結晶を用いた光スイッチは原理の確認にとどまっている。これは、サーモプラスチックはスイッチで使用するには応答速度が遅く、フォトリフラクティブ結晶は高電圧やパワーの大きな光源が必要なためにシステムの中に組み込みにくい、などの問題が解決されていないためと考えられる。これに対して近年急速に進歩した液晶空間光変調器は低電圧駆動が可能で、空間分割スイッチで必要とされる10ms程度のスイッチング速度が得られ、サーモプラスチックやフォトリフラクティブ結晶のもつ問題点はない。また、最近では液晶空間光変調器の問題点である分解能も向上してきている。液晶空間光変調器による実験は1987年にMaromらによって1入力を多出力に分配する実験が報告され[59]、1991年に筆者らにより入出力間を1対1接続する4x4スイッチングの実験が報告された[60]。その後、液晶空間光変調器を使った様々な実験が行われたが[61-63]、スイッチの規模は多くて入力数は2、出力数は64であった。しかし、1996年に筆者らによって4x1204スイッチの実験が報告され[64]、液晶空間光変調器を用いたホログラム型スイッチの規模拡大の可能性が示された。

2.5 本章のまとめ

本章では大規模な光スイッチの実現技術について述べた。そして本研究では、少ないハードウェア量で大規模な光スイッチを実現できること、スイッチング速度が比較的速いこと、駆動電圧や消費電力が低いことから、実現手段として液晶空間光変調器を用いたホログラム型光スイッチを選択した。最後に光スイッチの実現技術の分類と本研究の位置づけを図2.5.1に示す。

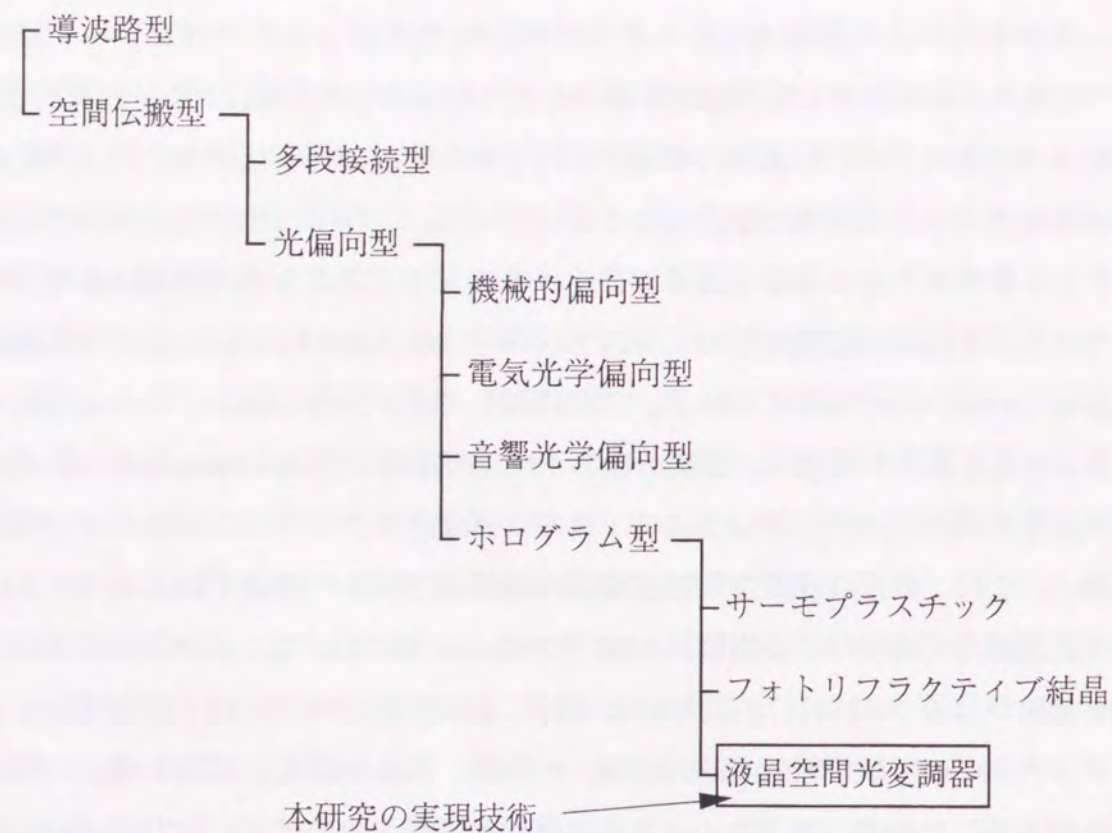


図2.5.1 光スイッチの実現技術による分類と本研究の位置づけ

第3章 液晶ディスプレイを用いた ホログラム型光スイッチ

3.1 はじめに

液晶ディスプレイ(LCD)は近年著しい進歩を遂げ、計算機のディスプレイやビデオカメラのモニタ等に使用され普及には目覚ましいものがある。これに伴い、LCDは信頼性の向上、低コスト化が進み、取り扱い容易な空間光変調器となった。一般にLCDは液晶により光の偏光方向を制御し、偏光板を通すことで光の通過・遮断をし、画像の表示を行っている。しかし、液晶は複屈折材料であるため、光の位相変調も行うことができる。本研究で提案するホログラム型光スイッチでは計算機で生成したパターンをLCD上に表示して光の位相を変調することで信号光を回折し、スイッチングを行うものである。この章ではLCDを用いたホログラム型光スイッチの原理とその構成を述べた後、その実証実験について述べる。

3.2 液晶ディスプレイによる光スイッチングの原理

3.2.1 光スイッチングの原理

一般にLCDでは、画素に電圧を加えない状態(OFF状態)では液晶分子の方向は図3.2.1(a)のようにガラス基板に対して平行であるが、画素に電圧を加えた状態(ON状態)では、その電界により液晶分子の方向は図3.2.1(b)のようにガラス基板に対して垂直になる。液晶は複屈折材料であるために、光がガラス基板に垂直に入射するとOFF状態とON状態とでは光に対する液晶分子の向きが異なり屈折率が異なる。OFF状態の屈折率を n_1 、ON状態の屈折率を n_2 とするとOFF状態の画素を通った光とON状

態の画素を通った光とでは式(3.2.1)で表される位相差 $\Delta\theta$ が生じる。

$$\Delta\theta = \frac{2\pi d(n_1 - n_2)}{\lambda} \quad (3.2.1)$$

ここで、 d は液晶層の厚さ、 λ は光の波長である。LCD上に適当なパターンを表示す

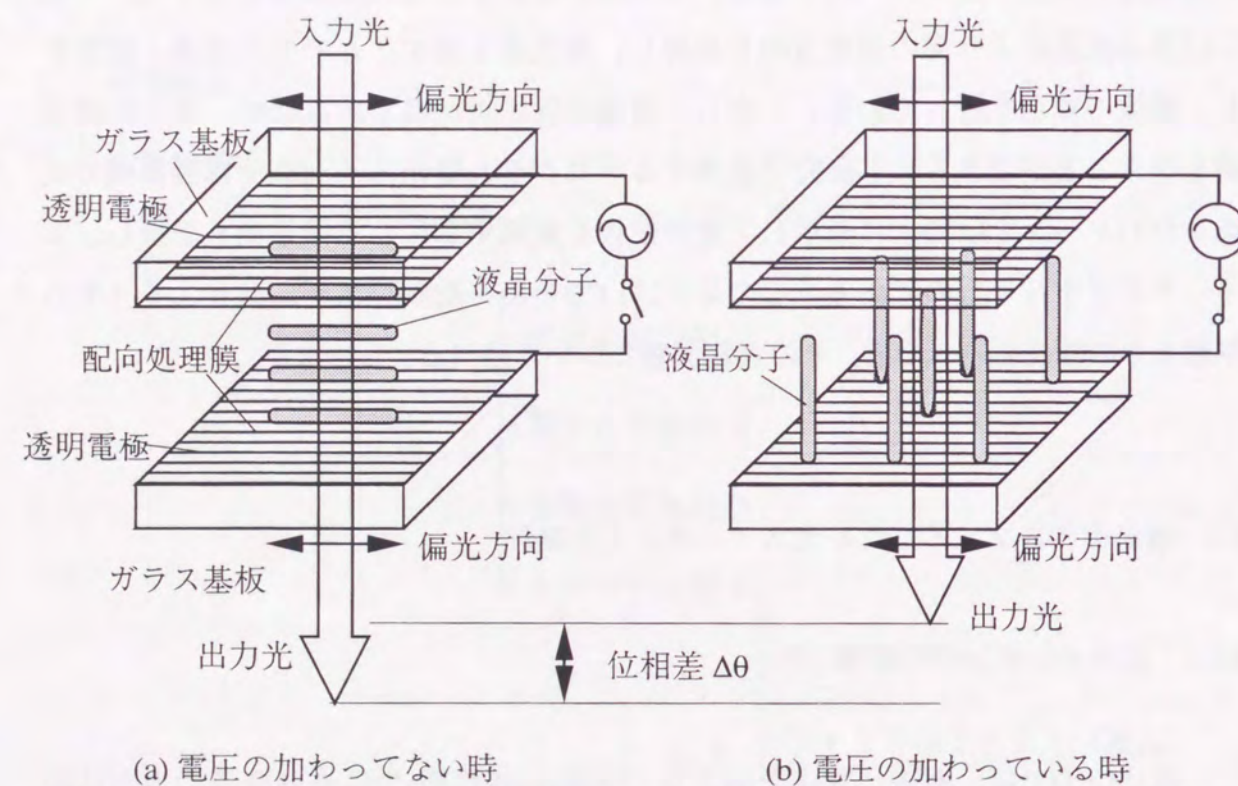


図3.2.1 LCDによる位相変調の原理

ることでLCDは位相回折格子の働きをし、通過するレーザ光は回折される。また表示パターンの空間周波数を変えることで回折角度が変わり、スイッチングを行うことができる。

一般にLCDはツイストネマチック液晶と呼ばれる液晶を使用しており、通過する光の偏波面を回転させ偏光板により光の強度変調を行う。この液晶は図3.2.2に示すようにOFF状態で液晶分子が螺旋状に並ぶように配向処理されているためにOFF状態の画素を通った光の偏波面は90度回転する。しかし、本研究で提案するホログラム型光スイッチでは光の損失を小さくするために偏光板をはずして強度変調は行わず、位相変調のみを行う。また、ツイストネマチック液晶の場合、OFF状態の画素を通った光とON状態の画素を通った光とでは偏光方向が直交するために互いに干渉

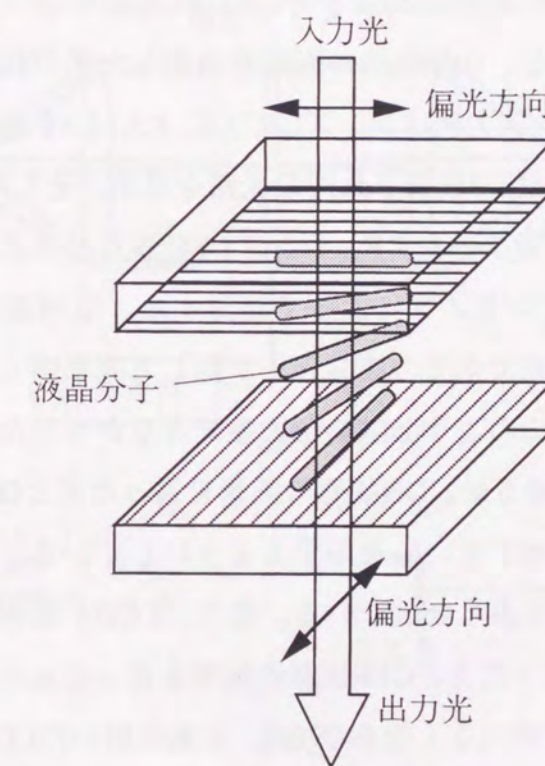


図3.2.2 ツイストネマチック液晶による偏光方向の回転

しない。これを避けるために図3.2.1(a)のようにOFF状態で液晶分子が全て同じ方向を向くように配向処理することが必要である。液晶分子の向きはガラス基板上の配向処理膜の形状によって決まるため、配向処理膜の形状を変えることで液晶分子を全て同じ方向に配列することができる。

3.2.2 回折実験

実際にLCDによって光の回折が起こることを確認する実験を行った。図3.2.3に実験系を示す[65]。LCDはアクティブドットマトリクス液晶モジュールで640 x 400の画素をもち、画面の大きさは211.2mm x 132mmである。1画素の大きさは0.33mm x 0.33mmでツイストネマチック液晶を使用している。実験では位相変調のみ行うため偏光板は取り付けしていない。光源はHe-Neレーザー(波長633nm)を用い、入射光は $\lambda/4$ 板と偏光板を用いて直線偏光とし、OFF状態の画素を通過した光が楕円偏光にならないように偏光方向を合わせた。入力光はレンズL1、L2、L3、L4を通り、LCDを透過、レンズL5、L6を通り、ミラーM2で反射され同じ光路を戻る。そしてミラーM3によって取り出されレンズL8、空間フィルタF、レンズL9を通り、半透明スクリーン上に投射される。これをビジコンカメラによって観測する。位相変調を行うには図3.2.1(a)に示したようにOFF状態で全ての液晶分子が同じ方向を向くように配向処理されたLCDが必要であるが、このようなLCDが入手できなかったため、この光学系では光ビームにLCDを2回通過させ、ON状態の画素を通った光とOFF状態の画素を通った光の偏光方向を一致させて互いに干渉するようにしている。そのため、行きと帰りと同じ画素を通る光学系となっている。また、LCDを位相回折格子として用いるときON状態の画素を通った光とOFF状態の画素を通った光との間で位相差が π に近いほど1次回折光の強度が大きくなるが[66]、実験に用いたLCDでは $\pi/3$ しか得られない。そこで、LCDを2回通すことで位相差 $2\pi/3$ となり、 π に近づけることができる。また、レンズL3、L4によってビーム径を10倍に拡大し、レンズL4、L7によってビーム径を1/10に縮小している。これはLCDの1画素が0.33mm x 0.33mmと粗いた

めで、光ビームの直径を拡大することで光ビームの通過する画素数が多くなり、LCD通過後、光ビームの直径を縮小することで実際の画素サイズよりも小さな画素を用いたのと同じ効果が得られ、回折角を大きくすることができる。この実験ではLCD上でのビームの直径は22mmであった。レンズL8、L9と空間フィルタFによって画素間にある配線によって生じる不要な回折光を除去している[67]。

回折の実験ではLCD上に1画素おきに交互にON状態とOFF状態のラインを描き、空間周波数が1.5 line pairs/mmの位相回折格子を形成した。この位相回折格子による1次光の回折角は0.055度であるが、レンズL4、L7によってビーム径を1/10に縮小しているために、より細かなピッチの位相回折格子を形成したのと同じ効果が得られ、

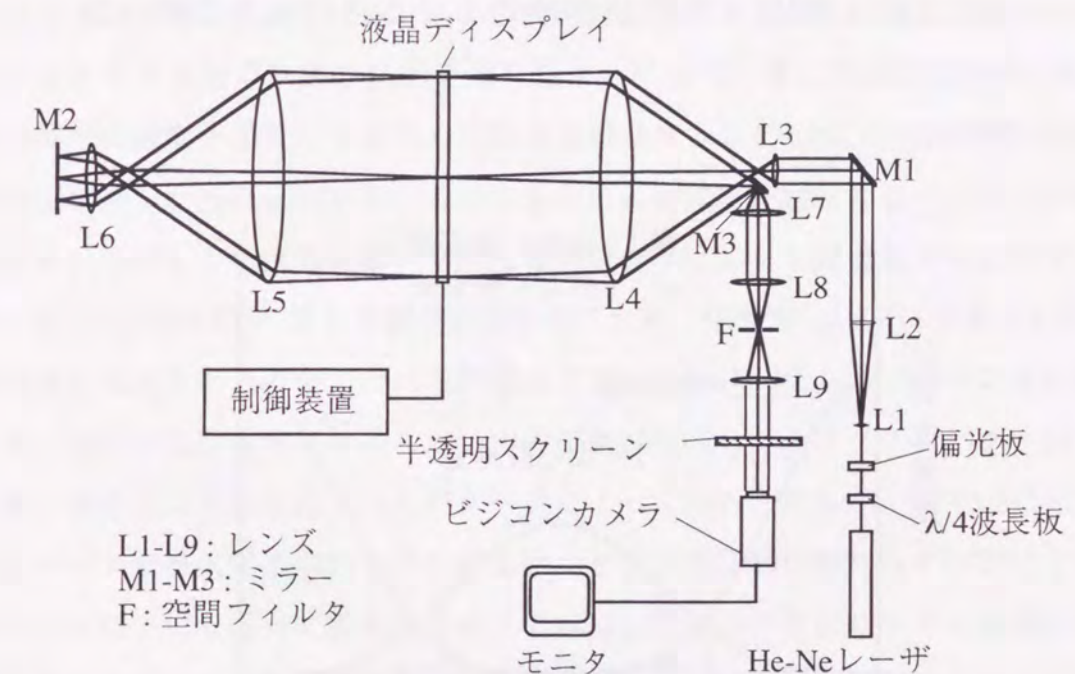
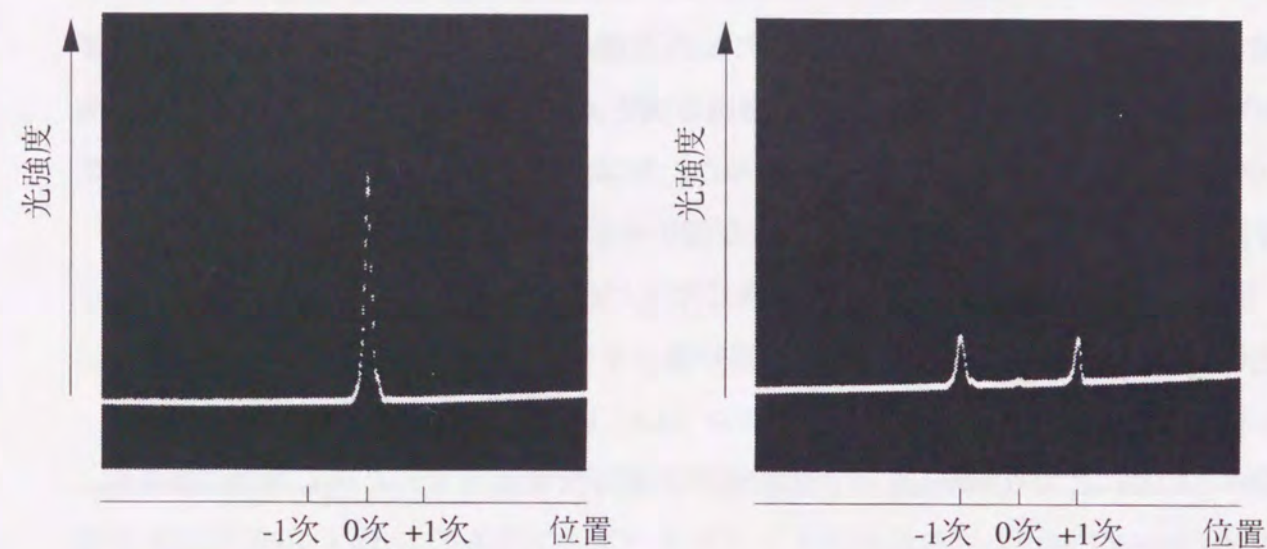


図3.2.3 LCDによる回折の実験系



(a) 回折格子を表示しないとき

(b) 回折格子を表示したとき

図3.2.4 LCDによる回折実験における出力光の強度分布

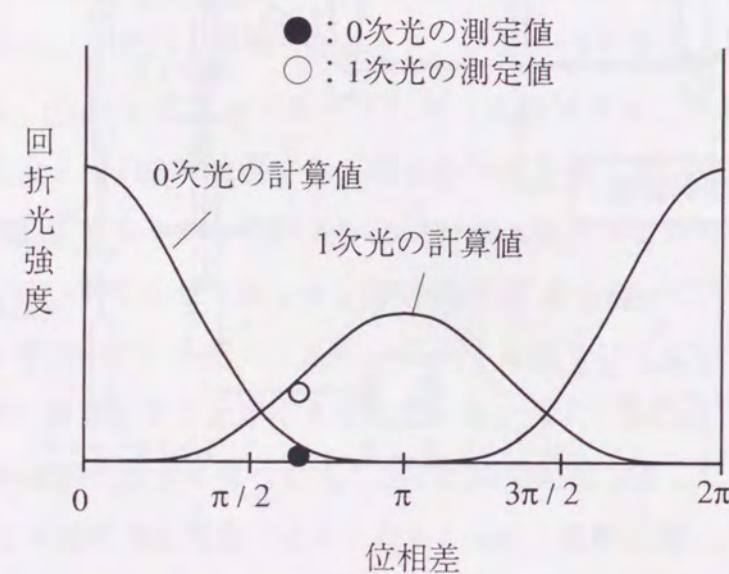


図3.2.5 LCDの位相差に対する回折光強度

レンズL9通過後の回折角は0.55度である。図3.2.4に位相回折格子を描いた場合と描かない場合の回折光の強度分布を示す。位相回折格子を描かない場合の0次光強度を100%とすると回折格子を描いた場合の0次光強度は1.6%(-18dB)であり、1次光強度は24%(-6dB)であった。これは図3.2.5に示したLCDのON状態とOFF状態の位相差と出力光強度の計算結果において位相差 $2\pi/3$ の値ではほぼ一致している。図3.2.5より位相差 π が得られるLCDを用いれば、0次光を消去し、1次光の強度を最大にすることができる。

3.3 光スイッチの構成

本研究で提案するLCDをホログラム媒体に用いた光スイッチの構成を図3.3.1に示す。LCDと出力面をそれぞれレンズの前側焦点面と後側焦点面に置く。LCDはアクティブマトリクス型で2値の位相変調を行う。出力光には1次回折光を用いるが、1次回折光の強度を最大にするために位相変調の大きさを π とし、OFF状態とON状態の画素を通った光の偏波面を一致させるために偏波面が回転しないように液晶を配向する。このようなLCDを用いることで信号光はLCDを1回通過するだけでよくなる。各入力にはLCDの異なる領域が割り当てられ、信号光はLCDに垂直入射する。制御装置にはあらかじめ全ての出力位置に対応したホログラムのパターンを記録しておき、LCD上に信号光を接続したい出力位置に対応したホログラムパターンを表示する。信号光はこの表示されたパターンによって回折されるが、図3.3.2に示すようにフーリエ変換光学系のレンズの働きにより、入力位置に関わらずLCDによる回折角度のみによって出力位置が決まる。これはLCDと出力面がレンズの前側焦点面及び後側焦点面にあるためである。レンズを用いない場合、入力位置と出力位置の両方を考慮してホログラムのパターンを決めなければならず、一般に $N \times N$ スイッチをつくるには N^2 種類のパターンが必要である。これに対してフーリエ変換光学系の場合はLCDによる回折角度、すなわち、ホログラムのパターンと出力位置が1対1に対応するので、出力位置と同数の N 種類のパターンでよく、レンズは必要なホ

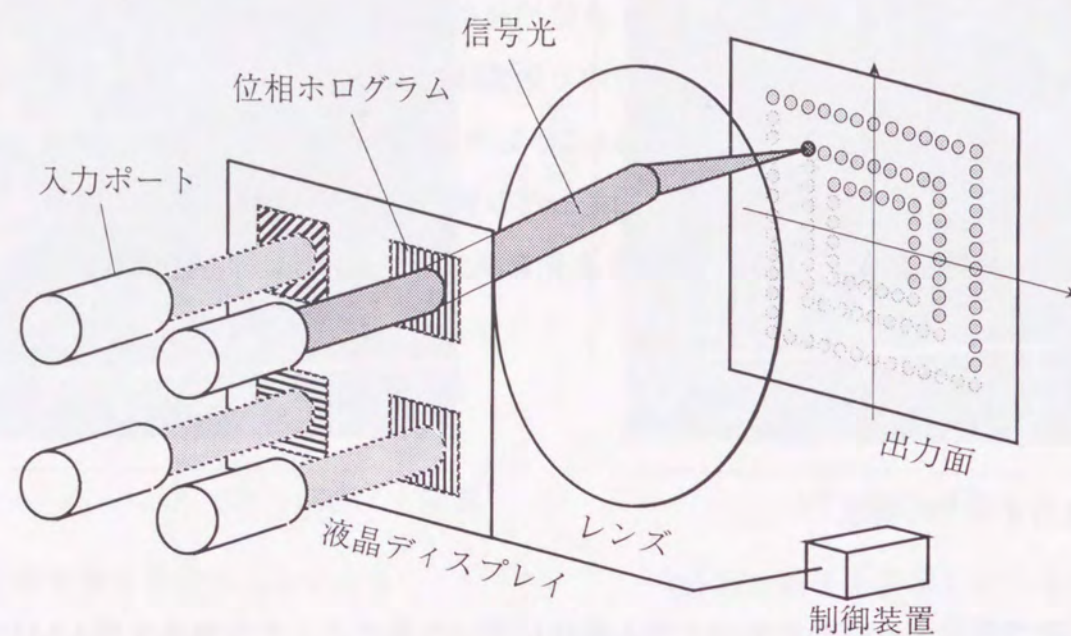


図3.3.1 LCDを用いたホログラム型光スイッチの構成

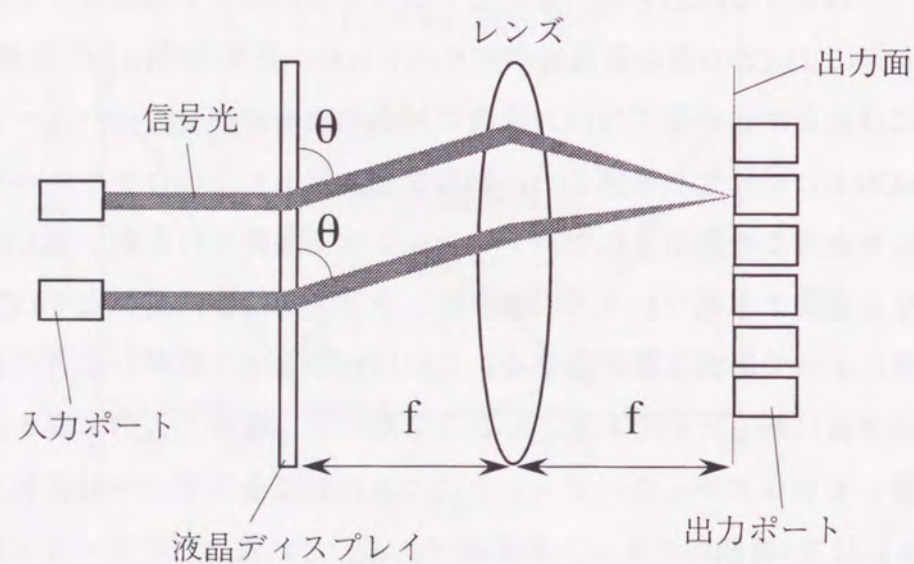


図3.3.2 フーリエ変換光学系におけるレンズの働き

ログラムの数を減らす効果がある。また、LCDによる2値の位相ホログラムは1次回折光の他に-1次や高次の回折光を生じるが、このスイッチの構成はこれら不要な回折光の出力位置も入力位置に関係なくLCDでの回折角度のみで決まるため、不要な回折光の分離が容易となる。

3.4 液晶ディスプレイ上のパターンと出力位置の関係

次にスイッチングに用いるホログラムのパターンとその出力位置の関係について述べる。最近では計算機により様々なパターンの生成法が試みられているが[68,69]、一般に計算機ホログラムの生成には時間がかかるため、ここでは多くのパターンを容易に生成するために単純なストライプパターンを採用した。また、LCDと出力面がそれぞれレンズの前側焦点面と後側焦点面にあるため、出力位置はLCD上のパターンをフーリエ変換することで求めることができる。なお、回折光の出力位置は入力位置に関わらずLCD上の回折角によって決まるので、1つの入力に対して出力位置を求めれば、その出力位置は全ての入力に対して使用できる。

ここではフーリエ変換を式(3.4.1)のように定義する。

$$H(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) \exp [-j(xu + yv)] dx dy \quad (3.4.1)$$

但し、

$$u = \frac{2\pi X}{\lambda f}$$

$$v = \frac{2\pi Y}{\lambda f}$$

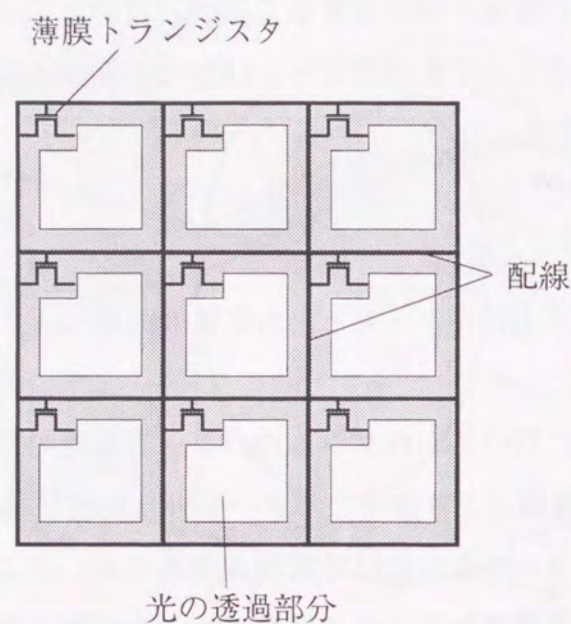


図3.4.1 液晶ディスプレイのセルの構成

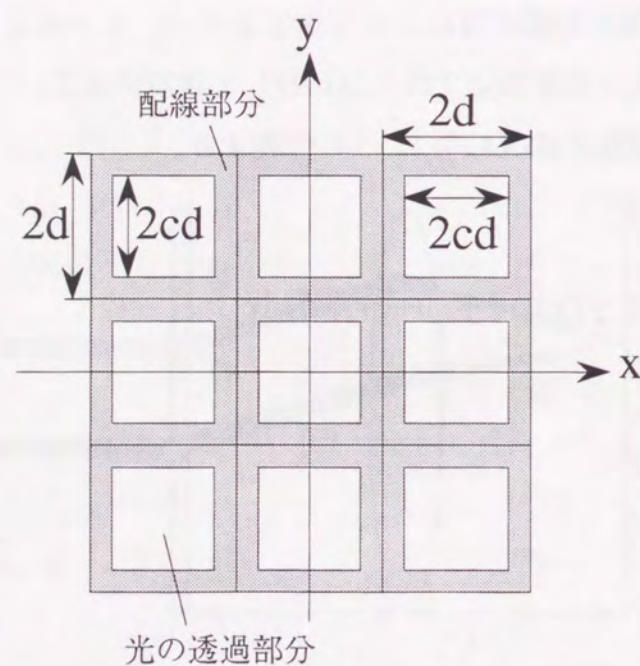


図3.4.2 計算に用いたLCDのモデル

ここで X と Y は出力面での位置座標、 λ は光の波長、 f はレンズの焦点距離、 $j = \sqrt{-1}$ を表す。

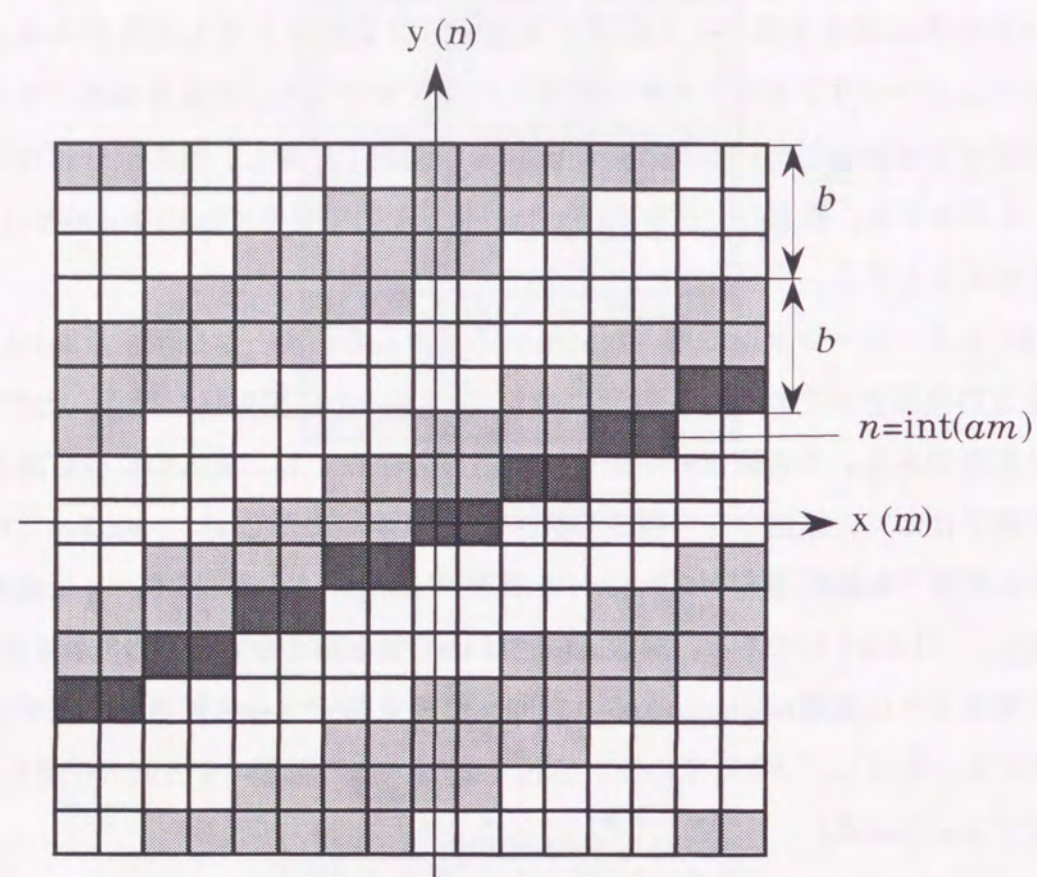
図3.4.1に薄膜トランジスタを用いたアクティブマトリクス型のLCDのセル構成を示す。セルの中には光を透過する部分と薄膜トランジスタと電気配線がある。図3.4.2はシミュレーションを行うために使用したモデルである。計算を容易にするため画素の形状を単純化している。透過部分は光の位相を変調し、他の部分は光を透過しないものとする。画素の大きさは $2d \times 2d$ とし、その中央部に $2cd \times 2cd$ ($0 < c < 1$)の透過部分があるとする。

図3.4.3にシミュレーションに用いた位相ホログラムのパターンを示す。図3.4.3で灰色部分と白色部分はそれぞれ入射光に対して θ と $\theta + \pi$ の位相変調を行う。ただし θ は任意の実数である。ある画素の中央を直交座標の原点とし、画素の位置を画素の大きさで量子化して、原点からの画素の数 (m, n) で表す。ただし m は $-m_0 \leq m \leq m_0$ を満足する整数である。直線 $n = \text{int}(am)$ を液晶ディスプレイ上に描く。 a は直線の傾きを表し、 $-1 \leq a \leq 1$ である。関数 $\text{int}(am)$ は am の値を超えない最大の整数を表す。図3.4.3に示すように直線 $n = \text{int}(am)$ から y 方向へ位相変調 θ と $\theta + \pi$ の画素を b 個ずつ交互に配列する。ただし、 $b \geq 2$ である。位相変調 θ と $\theta + \pi$ の画素の y 方向の位置 n_1 、 n_2 は次の式で与えられる。

$$n_1 = \text{int}(am) + 2lb + i \quad (3.4.2)$$

$$n_2 = \text{int}(am) + (2l+1)b + i \quad (3.4.3)$$

ここで i は $0 \leq i \leq b-1$ を満たす整数で、 l は直線 $n = \text{int}(am)$ からのパターンの周期を表し、 $-l_0 \leq l \leq l_0$ を満たす整数である。したがって、ホログラムのパターンは式(3.4.4)のように表される。



位相変調の大きさ

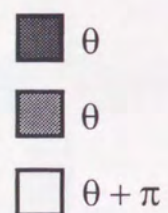


図3.4.3 ホログラムのパターン

$$h(x, y) = \sum_{m=m_0}^{m_0} \sum_{l=l_0}^{l_0} \sum_{i=0}^{b-1} \text{rect} \left[\frac{x-2dm}{2cd} \right] \text{rect} \left[\frac{y-2dn_1(l, i)}{2cd} \right] \exp(-j\theta) \\ + \sum_{m=m_0}^{m_0} \sum_{l=l_0}^{l_0} \sum_{i=0}^{b-1} \text{rect} \left[\frac{x-2dm}{2cd} \right] \text{rect} \left[\frac{y-2dn_2(l, i)}{2cd} \right] \exp\{-j(\theta+\pi)\} \quad (3.4.4)$$

ただし、関数 $\text{rect}(x)$ は式(3.4.5)のように定義する。

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq \frac{1}{2} \\ 0, & |x| > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (3.4.5)$$

$h(x, y)$ をフーリエ変換した関数を $H(u, v)$ 、 $H(u, v)^*$ を $H(u, v)$ と複素共役な関数とすると、出力面上での光の強度分布 $I(u, v)$ は HH^* に比例する。 $h(x, y)$ をフーリエ変換すると式(3.4.6)となる。

$$H(u, v) = \frac{2 \sin(cdu)}{u} \frac{2 \sin(cdv)}{v} \frac{\sin(bdv)}{\sin(dv)} \frac{\sin\{2bd(2l_0+1)v\}}{\sin(2bdv)} \\ \times 2 \cos\left(bdv + \frac{\pi}{2}\right) \exp[-j\{(2b-1)dv + \theta + \frac{\pi}{2}\}] \\ \times \sum_{m=m_0}^{m_0} \exp[-j2d\{mu + \text{int}(am)v\}] \quad (3.4.6)$$

この式より出力位置を求めるには各パターンごとに計算機による計算が必要である。そこで計算を簡単にするために $\text{int}(am)$ を am とおく。この近似の妥当性は3.8 付録に示す。その結果、式(3.4.6)は式(3.4.7)となる。

$$H(u, v) = \frac{2 \sin(cdu)}{u} \frac{2 \sin(cdv)}{v} \frac{\sin(bdv)}{\sin(dv)} \frac{\sin\{2bd(2l_0+1)v\}}{\sin(2bdv)} \\ \times 2 \cos(bdv + \frac{\pi}{2}) \exp[-j\{(2b-1)dv + \theta + \frac{\pi}{2}\}] \\ \times \frac{\sin\{d(2m_0+1)(u+av)\}}{\sin\{d(u+av)\}} \quad (3.4.7)$$

出力面上での光の強度分布 $I(u, v)$ は HH^* に比例するので式(3.4.8)となる。

$$I(u, v) = A \frac{4 \sin^2(cdu)}{u^2} \frac{4 \sin^2(cdv)}{v^2} \frac{\sin^2(bdv)}{\sin^2(dv)} \frac{\sin^2\{2bd(2l_0+1)v\}}{\sin^2(2bdv)} \\ \times 4 \cos^2(bdv + \frac{\pi}{2}) \frac{\sin^2\{d(2m_0+1)(u+av)\}}{\sin^2\{d(u+av)\}} \quad (3.4.8)$$

ここで A は入力光の強度によって決まる定数である。式(3.4.8)によれば、出力面上での光強度のピークは(3.4.9)で指定される位置に現れる。

$$(u, v) = \left(\frac{\pi k_1}{d} - \frac{a\pi(2k_2-1)}{2bd}, \frac{\pi(2k_2-1)}{2bd} \right) \quad (3.4.9)$$

ここで k_1 と k_2 は任意の整数である。 (k_1, k_2) の値が $(0, 1)$ と $(0, 0)$ のピークが出力面上の光強度のピークの中で最も強いので、そのうちの1つ、 $(k_1, k_2) = (0, 1)$ のピークを出力光として用いる。この出力光の位置は(3.4.10)で表される。

$$(u, v) = \left(-\frac{a\pi}{2bd}, \frac{\pi}{2bd} \right) \quad (3.4.10)$$

(3.4.10)より、出力光は b の値で決まる直線 $v = \pi/2bd$ 上に現れることがわかる。また、図3.4.3のパターンの x 軸と y 軸を入れ替えたパターンの場合は出力光は直線 $u = \pi/2bd$ 上に現れる。したがって、出力光はストライプパターンのピッチによって決まる正方形の返の上に現れる。なお、このシミュレーションの中では位相変調の大きさを π としているので0次光は現れない。すなわち式(3.4.8)より $I(0, 0) = 0$ となる。

3.5 スイッチングの実証実験

3.5.1 1 x 64スイッチングの実験

提案したLCDを用いたホログラム型光スイッチが実際に動作することを確認するために1 x 64光スイッチングの実験を行った。図3.5.1に実験系を示す。LCDは3.2.2の回折実験と同じものを用いた。光源はHe-Neレーザ(波長633nm)を用い、入射光はグラントムソンプリズムと $\lambda/2$ 板を用いて直線偏光とし、OFF状態の画素を通過した光が楕円偏光にならないように偏光方向を合わせた。入力光はレンズL1、L2、L3、L4を通り、LCDを透過、レンズL5、L6を通り、ミラーM2で反射され同じ光路を戻る。そしてミラーM3によって取り出されレンズL8、空間フィルタF、レンズL9、L10を通り、半透明スクリーン上に投射される。ビジコンカメラによってこれを観測する。ビームの直径はレンズL3、L4によって9倍に拡大した。この実験系においても図3.2.3の実験系と同様に光ビームにLCDを2回通過させ、ON状態の画素を通った光とOFF状態の画素を通った光の偏光方向を一致させ、位相変調の大きさを π に近づけている。図3.2.3の実験系と異なる点はレンズL10を加えたことであり、レンズL10により3.3節で述べたようにLCD上のパターンと出力位置を1対1に対応させている。また、レンズL4とL9との間でのビーム径の縮小率を1/70と大きくし、回折角をより大きくしている。ホログラムパターンは b の値を2、3、5とし、 a の値は出力面上で b の値と(3.4.10)で決まる線分上で出力光が等間隔に並ぶように定めた。

図3.5.2に実験結果を示す。この図は1つの入力光を64ヶ所の出力位置へ次々とス

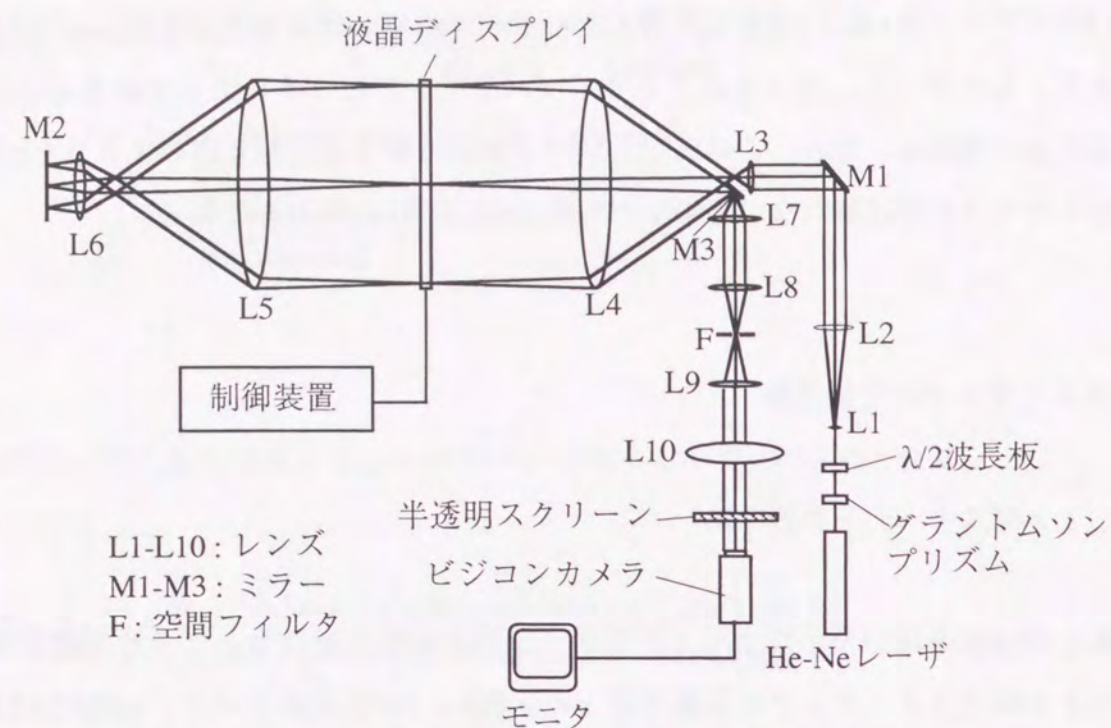


図3.5.1 LCDによる光スイッチングの実験系

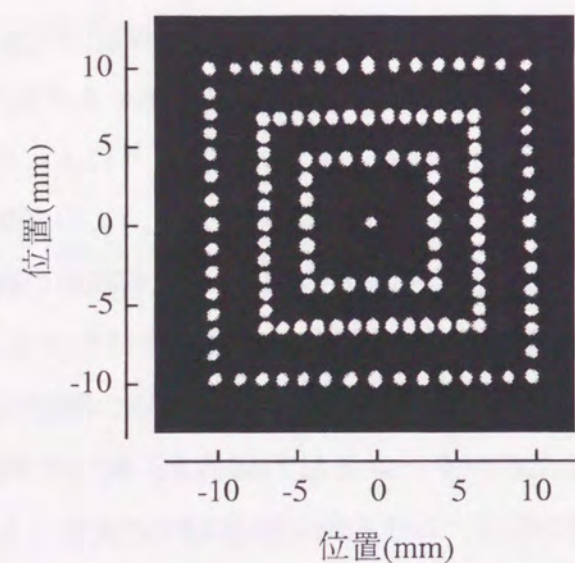


図3.5.2 LCDを用いた1 x 64ホログラム型光スイッチにおいて信号光を各出力位置に順次スイッチングしたときの出力光の多重露光写真

スイッチングしていく様子を多重露光によって撮影したものである。図中では129個の光スポットが写っているが、3.4節の計算結果通り、 b の値で決まる3つの正方形の辺の上に出力光が並んでいることがわかる。中央の光スポットは入力光の0次光であり、これが現れる原因は書き換えの際にホログラムを一旦消すため、光ビームが0次光の位置に達するためと、位相変調の大きさが π でないことで0次光が完全に消去されないためである。0次光はクロストークの原因となるため、光スイッチの中では0次光の位置は出力位置として使用しない。また、ホログラムが3.4節で述べたように単純なストライプパターンであるために式(3.4.9)での (k_1, k_2) の値が $(0, 1)$ と $(0, 0)$ のピークが中央の0次光のスポットに対して点対称に現れる。従って、光スポットは129個あるが選択できる出力位置の数は64個である。なお、このときのスイッチング速度は30msであり、空間分割スイッチングでの目安である10msよりも遅いが、これは応答速度の速い液晶を使用することで改善可能である。

図3.5.3に1 x 64スイッチの損失を示す。出力光をパワーメータにより測定した。

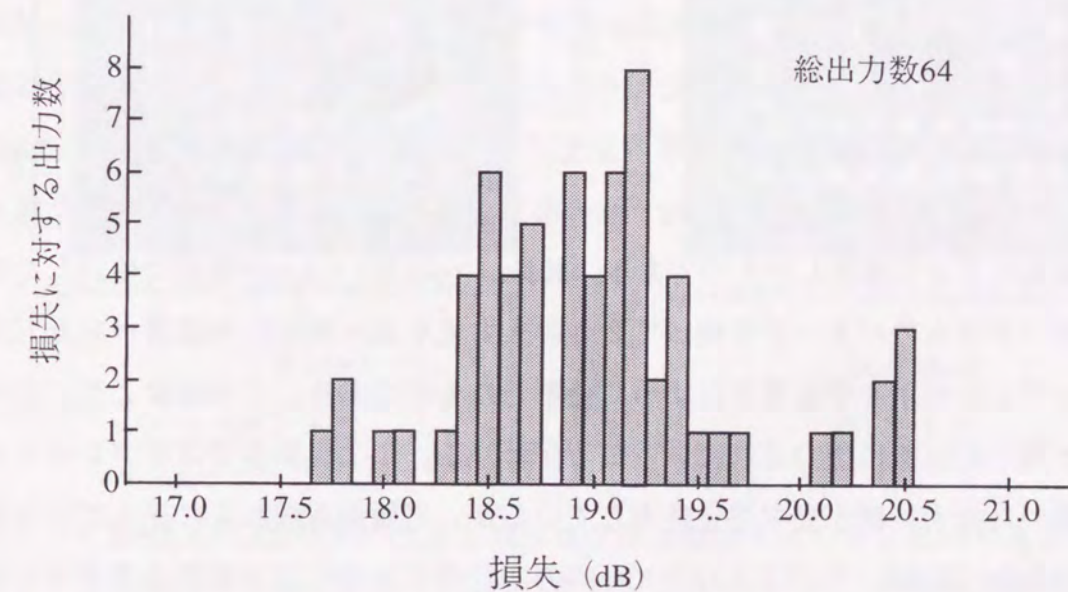


図3.5.3 LCDを用いた1 x 64ホログラム型光スイッチの各出力位置での損失を損失の各値に対する出力数で示した測定結果

損失の平均値、最大値、最小値はそれぞれ19.3dB、20.5dB、17.7dBであり、損失のばらつきは3 dB以内に収まっている。LCDを除いた図3.5.1の光学系の損失は7.3dBであった。また、3.2.2の回折実験で1次回折光はLCD上に何も表示しないときの0次光の強度より6dB小さかった。この値は表示するパターンによって多少異なるが平均損失からこれらの値を差し引いた約6dBの損失はLCDによる遮光や反射が原因と考えられる。損失のばらつきの原因は、回折角度が大きくなるに連れて回折光が弱くなることがあるが、その他に図3.8.2に見られるように出力位置、すなわち、ホログラムのパターンによって出力光の強度が変動することが挙げられる。なお、図3.8.2に見られるノイズはスイッチとして使用する際、クロストークの原因となるので、ノイズの低減が必要である。

3.5.2 2 x 32スイッチングの実験

次にレンズL10の働きにより入力位置に関わらずホログラムのパターンと出力位置が1対1に対応し、複数の入力を同じホログラムで同じ出力位置にスイッチングできることを確認するために、2 x 32スイッチングの実験を行った。この実験では図3.5.1の光学系に入力光として2本の平行な光ビームを入射した。実験結果を図3.5.4に示す。図3.5.4(a)は1つの入力光が32ヶ所の出力位置へ次々とスイッチングした様子を多重露光によって撮影したものである。図3.5.4(b)は図3.5.4(a)の実験で使ったのと同じホログラムのパターンを使って2つの入力光を32ヶ所の出力位置へ次々とスイッチングした様子を多重露光によって撮影したものである。この結果より、2つの入力が同一の位置に出力されていることがわかる。この実験系ではダブレットレンズを用いた拡大／縮小光学系を使用しているが、光軸から離れるに従って主に歪曲収差が大きくなる。そこで入力光ビームの直径を小さくし、2本の入力光ビームを光軸に近づけ収差の影響を抑えた。また、光学系自体の収差を減らすために収差の最も大きな原因であったレンズL9を開口径0.22のレンズから開口数0.11のレンズに

替えた。この変更によりレンズL4とL9との間でのビーム径の縮小率が1/35と1/2になり、1 x 64スイッチの実験と比べLCDによる回折角が約1/2になった。したがって、2入力の場合は出力数が32に減少し、図3.5.4の光スポットの大きさは図3.5.2に比べ大きく写っている。この実験によりレンズL10を挿入することで、入力位置の異なる入力を同一のホログラムによって同一の出力位置に出力できることが確認できた。したがって、提案したスイッチ構成をとることで、必要なホログラムの種類がスイッチの入力数に関わらず出力数と同数でよいことが実証された。

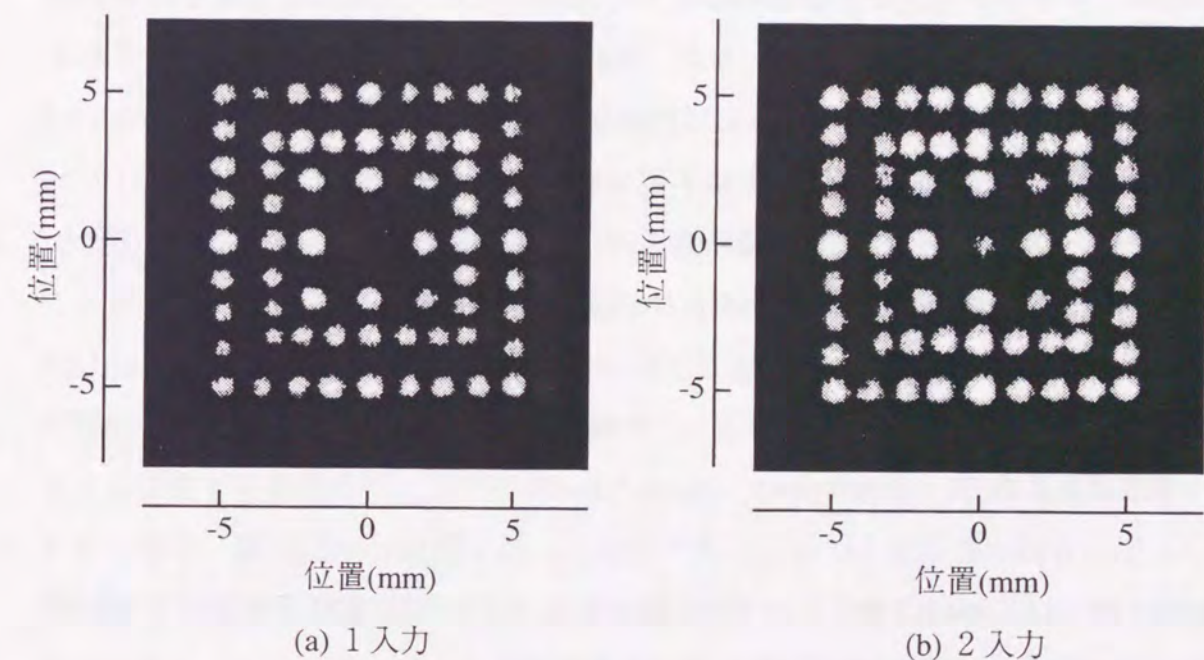


図3.5.4 LCDを用いた2 x 32ホログラム型光スイッチにおいて信号光を各出力位置に順次スイッチングしたときの出力光の多重露光写真

3.6 考察

実験結果を踏まえてLCDを用いたホログラム型光スイッチの実現への課題について検討する。

図3.5.1に示した実験系は図3.3.1に示したスイッチ構成に比べて複雑になった。この原因は、ツイストネマチック液晶を使用していたために偏波面が回転するので、偏向方向をそろえるためにLCDを2回通過させなければならなかったことと、画素が大きかったために拡大／縮小光学系が必要であったことによる。したがって、図3.3.1に示すような単純なスイッチ構成にするには、偏波面を回転させないために画素に電圧を加えないとき液晶分子が全て同じ向きになるように配向処理し、画素を小さくすることが必要である。また、スイッチング速度は実験では30msであり、空間分割スイッチング方式で必要な10msよりも遅かったが、これは応答速度の速い液晶を用いることで改善可能である。なお、実験においてLCDの駆動電圧は5Vであったが、これはシステム内で使用するには問題ない値といえる。

提案したLCDを用いたスイッチでは不要な回折光が生じるが、これらはクロストークの原因となるために出力位置は不要な回折光が到達しないところを選ばなければならない。具体的な出力位置の決め方は5.2節で述べる。

3.7 本章のまとめ

本章では、はじめにLCDをホログラム媒体として用いて光の位相変調による回折現象について述べ、実際に回折が起こることを確認した。

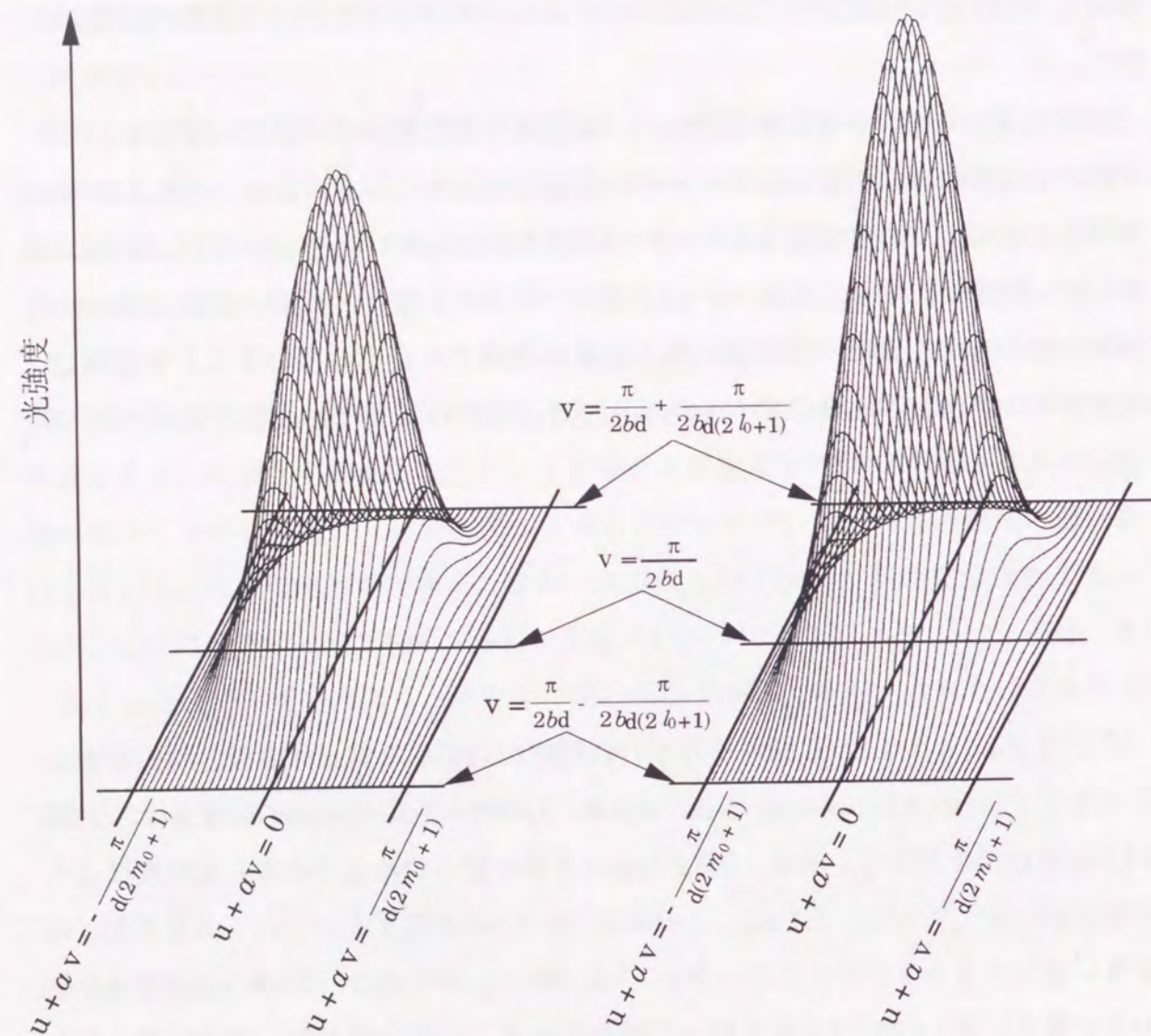
次にLCDを用いた新しいホログラム型光スイッチの構成を提案した。このスイッチではLCD上に表示したパターンによって信号光を回折してスイッチングを行う。提案したスイッチ構成ではLCDと出力面をそれぞれレンズの前側焦点面と後側焦点面に置くことで、入力位置に関わらずホログラムのパターンと出力位置を1対1に対応させた。これにより必要なホログラムの数を減らすことができ、不要な回折光

の出力位置からの分離が容易となった。スイッチングに用いるホログラムには計算時間がかからず、多くのパターンを容易に生成できる単純なストライプパターンを採用し、シミュレーションによりホログラムのパターンとその出力位置の関係を求めた。

実験では1 x 64スイッチングを行い、本研究で提案したホログラム型光スイッチの動作を確認し、この1 x 64スイッチの損失の測定を行った。また、交換システムで使用されるような大規模なスイッチでは膨大な数のホログラムを用意しなければならない問題があるが、実験で2 x 32スイッチングを行い、実際に提案したスイッチ構成でホログラムのパターンと出力位置が1対1に対応していることを確認し、必要なホログラムの種類がスイッチの入力数に関わらず出力数と同数でよいことを示した。

3.8 付録

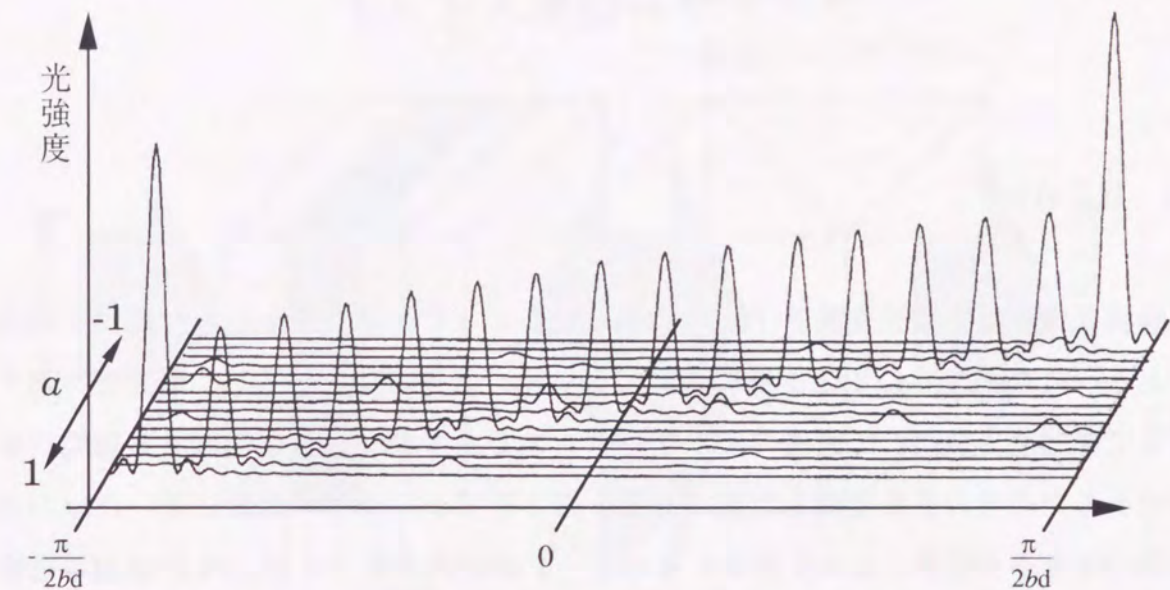
ここでは $\text{int}(am)=am$ の近似が出力ビーム径と出力位置を算出する際、妥当であることを示す。図3.8.1に $a=-0.6$ 、 $b=3$ 、 $m_0=40$ 、 $l_0=7$ のときの出力光の強度を示す。図3.8.1(a)は近似を使わない場合、図3.8.1(b)は近似を使った場合である。光強度は違うが形状は一致している。図3.8.2に a の値が-1から1に変化するにつれて出力光がどのように変化するかを示す。このとき $b=2$ 、 $m_0=40$ 、 $l_0=10$ である。図3.8.2(a)は近似を使わない場合、図3.8.2(b)は近似を使った場合である。近似を使わない場合は使ったものに対して出力光強度が場所によって変動しており、ノイズもみられるが、出力位置は一致している。従って、この近似の使用は出力ビーム径と出力位置を算出する計算で問題ないといえる。



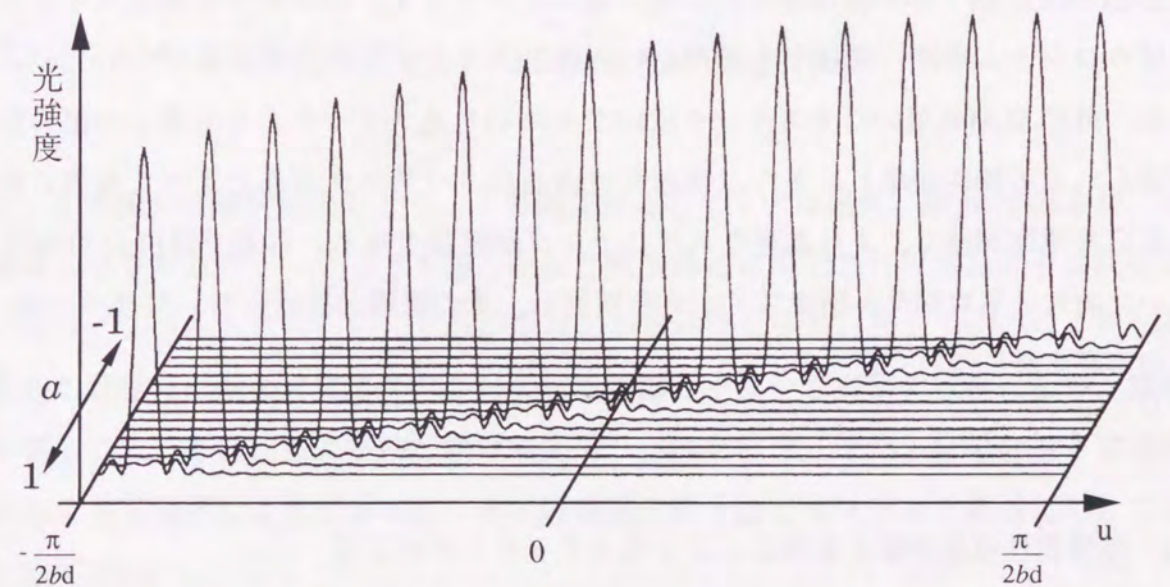
(a) $\text{int}(am)=am$ の近似を使用しなかった場合

(b) $\text{int}(am)=am$ の近似を使用した場合

図3.8.1 $a=-0.6$, $b=3$, $m_0=40$, $l_0=7$ のときの式(3.4.8)より得られる出力光のピークから第一零までの領域における $\text{int}(am)=am$ の近似の有無に対する光強度分布の計算結果



(a) $\text{int}(am)=am$ の近似を使用しなかった場合



(b) $\text{int}(am)=am$ の近似を使用した場合

図3.8.2 $b=2$, $m_0=40$, $l_0=10$ のときに a の値を-1から1まで変化させた場合の $\text{int}(am)=am$ の近似の有無に対する出力光の光強度の計算結果

第4章 強誘電性液晶空間光変調器を用いた ホログラム型光スイッチ

4.1 はじめに

強誘電性液晶空間光変調器(FLC-SLM)は光によって画像を書き込む空間光変調器である。FLC-SLMはLCDと同様に液晶により光の偏光方向を制御し、偏光板を通して光強度を変調して画像の表示を行うものであるが、強誘電性液晶も複屈折材料であるため光の位相変調も可能である。第3章でホログラム媒体に用いたLCDは画素の大きさや形状によって表示するパターンが制約を受けるが、FLC-SLMは画素をもたないため、このような制約がなくLCDよりも多様なパターンの表示ができる。例えば、LCD上に描かれる線の幅は画素の大きさの整数倍でなければならないが、FLC-SLM上に描く線の幅は連続的に変えることができる。ホログラム型光スイッチではホログラム媒体に表示できるパターン数がスイッチの出力数に結びついているため、FLC-SLMを用いた光スイッチはLCDを用いた光スイッチよりも多くの出力数が得られる可能性がある。また、強誘電性液晶はネマチック液晶と比べて電界に対する応答速度が速く、より高速なスイッチングが可能である。本章ではFLC-SLMを用いた新しいホログラム型光スイッチを提案し、その原理と構成について述べた後、その実証実験について述べる。

4.2 強誘電性液晶空間光変調器による光スイッチングの原理

4.2.1 強誘電性液晶空間光変調器の動作原理

FLC-SLMの構造とその動作について述べる[70,71]。強誘電性液晶は自発分極をも

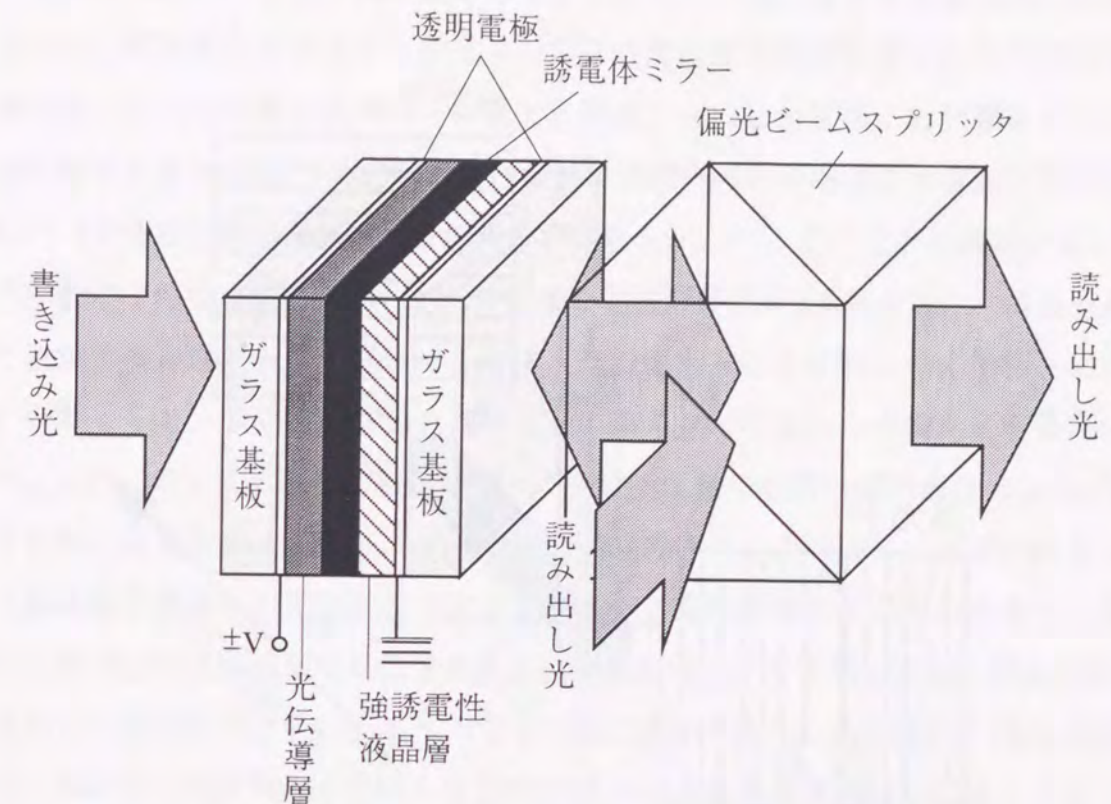


図4.2.1 FLC-SLMの構造 [70]

ち、その配列は螺旋構造をとる。この螺旋構造のピッチは通常、数 μm であるが、液晶層の厚さがこのピッチよりも薄くなると螺旋構造は解消されて液晶分子は双安定となり、2つの向きのうちいずれか片方しかとれなくなる。そして、このような双安定の状態では加える電界の向きによって液晶分子はいずれかの状態になり、電界を切っても、その状態を維持し続けるメモリー性を示す。また、自発分極と電界の大きな相互作用により電界に対する応答速度は数十 μs とネマチック液晶に対して2桁程度速い。

図4.2.1にFLC-SLMの構造を示す。透明電極のついた2枚のガラス基板の間にアモルファスシリコンの光伝導層、誘電体ミラー、強誘電性液晶層がある。この空間光変調器の中では液晶層の厚さは1 μm 程度と強誘電性液晶の螺旋構造のピッチよりも薄いために液晶分子は双安定である。書き込み光が光伝導層に入射すると光伝導層

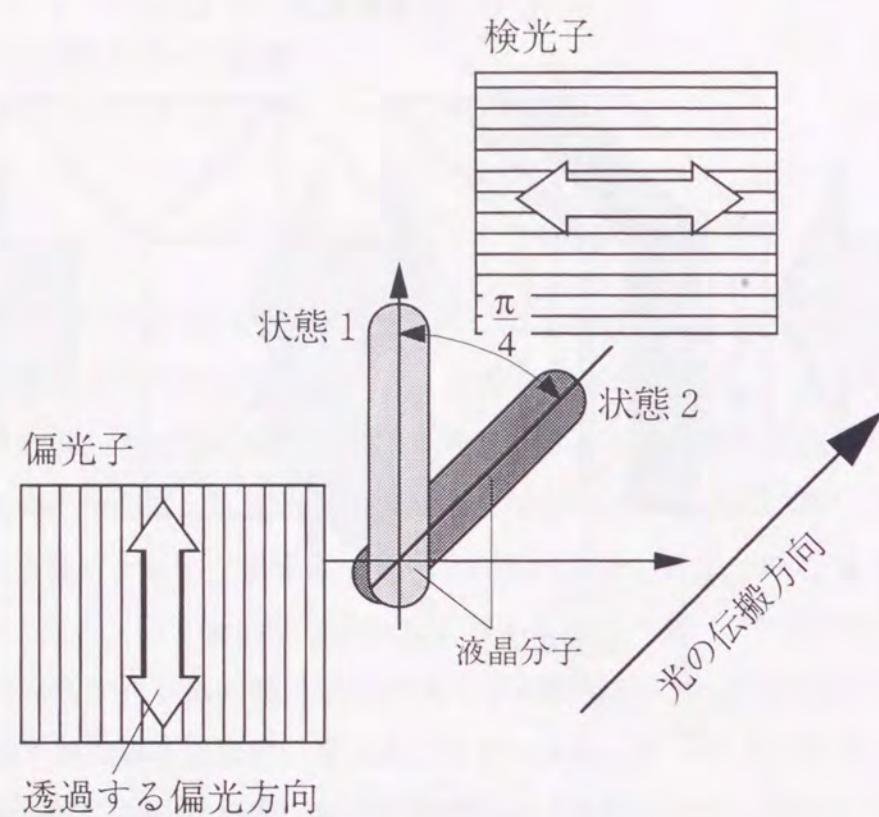


図4.2.2 画像読み出しの原理

の電気抵抗が下がる。このときに透明電極に電圧を加えると書き込み光が照射された光伝導層の部分の液晶に電圧が加わり液晶分子の向きが変わる。

画像を書き込むには、一様な光を光伝導層に照射して負電圧を加えることで予め全ての液晶分子の向きをそろえておく。次に画像を書き込み光として照射して正電圧を加えることで画像に対応した液晶分子のみの向きが変わる。電圧を加えないときは液晶が双安定であることから液晶の向きは変わらず、書き込まれた画像は2値の画像として記録される。画像の読み出しは偏光ビームスプリッタ(PBS)を通して行われる。画像の読み出しの原理を図4.2.2を用いて説明する。FLC-SLMでは光はミラーで反射され液晶層を2度通る反射型であるが、図4.2.2では説明を容易にするため

に光が液晶層を1度だけ通る透過型のモデルを用いる。透過する偏光方向が直交するように配置された偏光子と検光子の間に強誘電性液晶層を置く。ここでは強誘電性液晶の2つの状態を状態1と状態2と呼ぶことにし、状態1と状態2とは光学軸の傾きの差が $\pi/4$ とする。強誘電性液晶は複屈折材料であるため液晶分子の光学軸に平行な偏波と垂直な偏波では屈折率が異なるが、ここでは光が液晶層を通るとき、光学軸に平行な偏波の位相に対して垂直な偏波の位相が π ずれるように液晶層の厚さを設定する。強誘電性液晶層に入射する光の偏光方向を状態1の光学軸と同じ方向に合わせると、状態1の液晶を通った光の偏光方向は変わらず検光子を通過できない。これに対して状態2の液晶を通った光は光学軸に垂直な偏波成分の位相が π ずれるために偏光方向は $\pi/2$ 回転し、検光子を通過できる。このように液晶の向きによって液晶層を通過した光の偏光方向が変わり、2値の画像として読み出すことができる。図4.2.2では説明を容易にするために透過型のモデルを用いたが、反射型のFLC-SLMでは液晶層の厚さを1/2にすることで同じ効果が得られる。また、FLC-SLMの場合、読み出し光をPBSに反射させてFLC-SLMに入射させ、PBSを透過してきた光を読み取ることで、1つのPBSが偏光子と検光子の役割を果たす。

4.2.2 強誘電性液晶空間光変調器による位相変調

次にFLC-SLMによって光の位相を変調する方法について図4.2.3を用いて述べる。強誘電性液晶で光の位相変調を行うには、図4.2.2と同様に透過する偏光方向が直交するように配置された偏光子と検光子の間に強誘電性液晶層を置く。強誘電性液晶層に入射する光の偏光方向を状態1と状態2の液晶の光学軸間の角度を2等分するような方向に調整する。このような状態の時、検光子を通過して出てくる光は図4.2.3の中の θ の値に関わらず状態1と状態2の間で位相差が π となる。このとき検光子を通過して出てくる光強度は状態1と状態2とで等しく、式(4.2.1)で与えられることが知られている[57]。

$$T = 0.5 \sin^2(2\theta) [1 - \cos(\varphi)] \quad (4.2.1)$$

また、液晶分子の光学軸に平行な偏波に対する垂直な偏波の位相の遅れ φ は式(4.2.2)である。

$$\varphi = \frac{2\pi d (n_1 - n_2)}{\lambda} \quad (4.2.2)$$

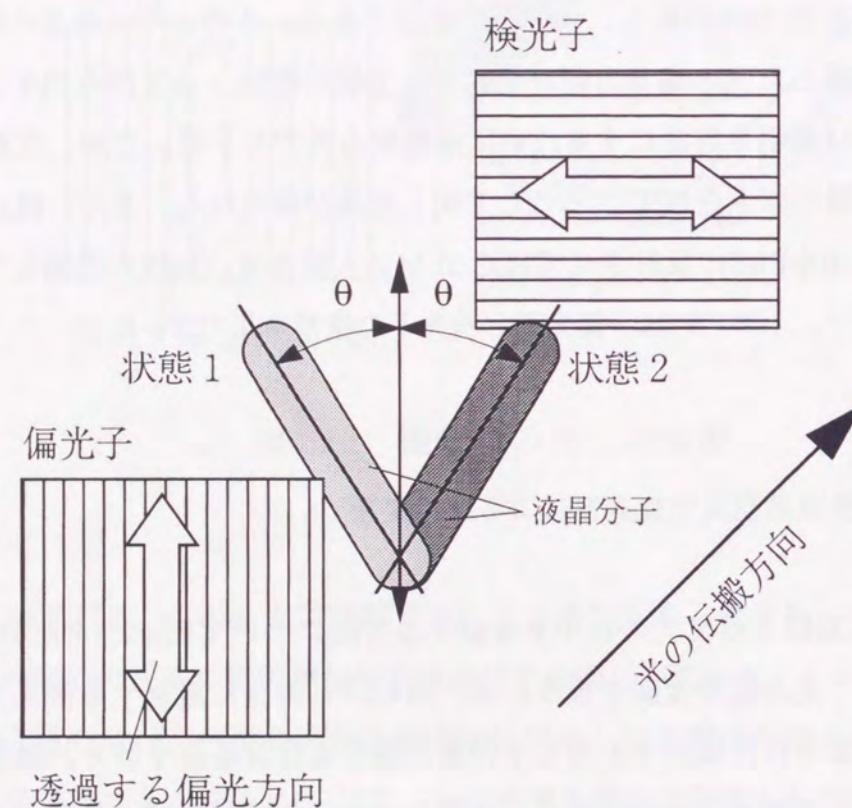


図4.2.3 位相変調の原理

ここで d は液晶層の厚さ、 n_1 は液晶の光学軸に平行な偏波に対する屈折率、 n_2 は液晶の光学軸に垂直な偏波に対する屈折率、 λ は光の波長である。式(4.2.1)より $\varphi = \pi$ のとき出力光が最大になることがわかる。図4.2.3も図4.2.2と同様に説明を容易にするために透過型のモデルを用いたが、反射型であるFLC-SLMの場合は液晶層の厚さを1/2にすることで同じ効果が得られる。

4.2.3 強誘電性液晶空間光変調器による光スイッチング

次にFLC-SLMによるスイッチングの原理について図4.2.4を用いて述べる。ホログラム型光スイッチの中ではスイッチの損失を小さくするため、4.2.2で述べたように

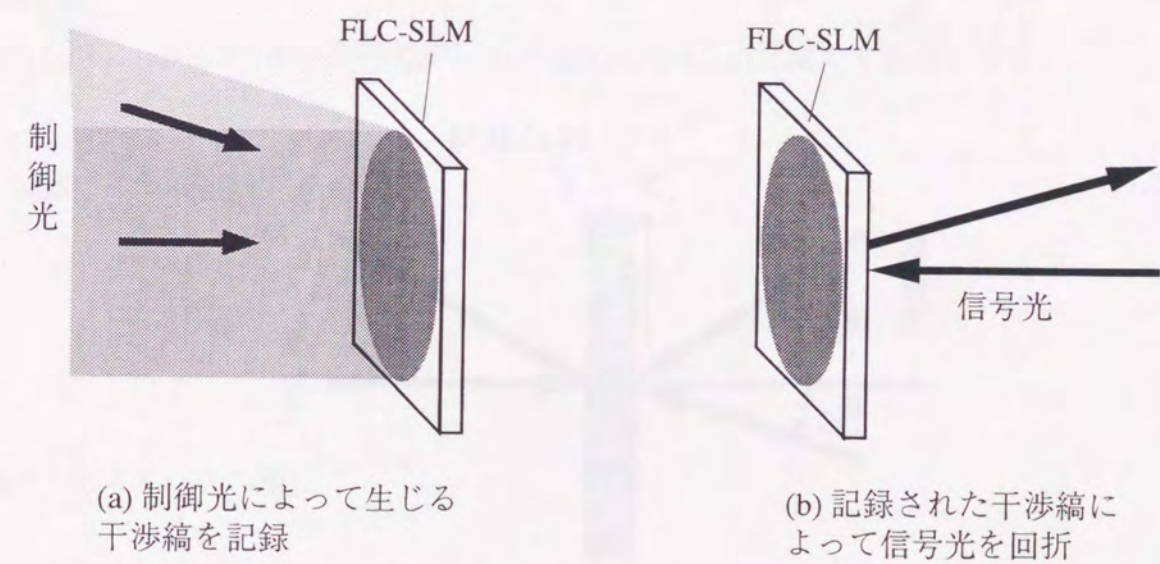


図4.2.4 スwitchingの原理

FLC-SLMによって位相変調を行う。図4.2.4(a)のように2方向から制御光としてのレーザ光を照射し、FLC-SLM上に干渉縞をつくる。このときFLC-SLMに電圧を加えて干渉縞をホログラムとして記録する。FLC-SLMでは制御光と電圧を切っても書き込まれたパターンは保持されるので、LCDのように表示するパターンを保持するために電圧を加え続ける必要はない。制御光と電圧を切った後に図4.2.4(b)のように信号光としてのレーザ光を強誘電性液晶層側から入射する。信号光は記録されている干渉縞のパターンに応じた方向へ回折される。信号光の出力先を変えるには制御光の角度を変え、干渉縞のパターンを変えることで行う。

次に制御光の入射角度と信号光の回折角度の関係を示す。制御光は強度が一樣な平面波とし、図4.2.5に示すように2つの制御光がFLC-SLMに θ_{c1} 、 θ_{c2} の角度で入射するときの制御光の電界を式(4.2.3)、式(4.2.4)とする。

$$E_{c1} = A \exp \left[j \left(\omega t - \frac{2\pi x \sin \theta_{c1}}{\lambda_c} \right) \right] \quad (4.2.3)$$

$$E_{c2} = A \exp \left[j \left(\omega t - \frac{2\pi x \sin \theta_{c2}}{\lambda_c} \right) \right] \quad (4.2.4)$$

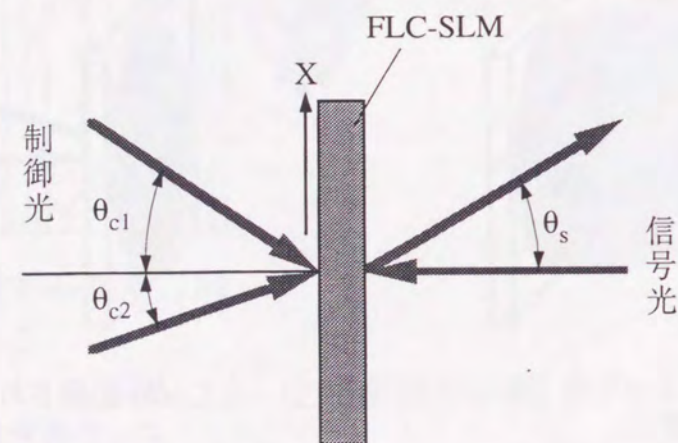


図4.2.5 制御光の入射角と信号光の回折角度の関係

A は電界の強度によって決まる定数、 λ_c は制御光の波長である。制御光によって生じる干渉縞の光強度 I_c は式(4.2.5)となる。

$$I_c = 2A^2 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi x (\sin \theta_{c1} - \sin \theta_{c2})}{\lambda_c} \right) \right] \quad (4.2.5)$$

したがって、干渉縞のピッチ d は式(4.2.6)となる。

$$d = \frac{\lambda_c}{\sin \theta_{c1} - \sin \theta_{c2}} \quad (4.2.6)$$

出力光には1次回折光を使用するので、信号光の波長を λ_s とすると信号光の回折角度 θ_s は式(4.2.7)を満たす。

$$d \sin \theta_s = \lambda_s \quad (4.2.7)$$

式(4.2.6)、式(4.2.7)より信号光の回折角度 θ_s は式(4.2.8)を満たす角度になる。

$$\sin \theta_s = \frac{\lambda_s}{\lambda_c} (\sin \theta_{c1} - \sin \theta_{c2}) \quad (4.2.8)$$

4.3 光スイッチの構成

次に本研究で提案するFLC-SLMを用いたホログラム型光スイッチの構成を図4.3.1に示す。レンズL1、L2、L3の各焦点面にグレーティング、液晶シャッターアレイ、FLC-SLM、出力ポートを置く。ある入力を所望の出力に接続するために、制御光源

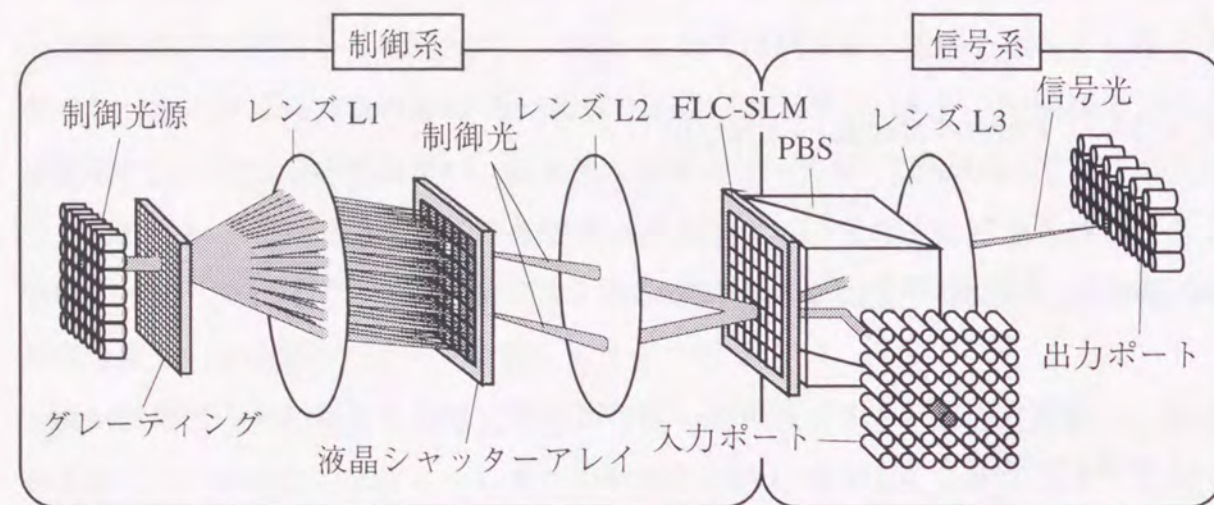


図4.3.1 FLC-SLMを用いたホログラム光スイッチの構成

から出たレーザ光はグレーティングによって分割され、液晶シャッターアレイによって2つの制御光が選択される。この2つの制御光によってFLC-SLM上に干渉縞が生じ、FLC-SLMはこの干渉縞を記録する。制御光が切られた後、信号光が入力ポートから出射され、PBSにより反射されてFLC-SLMに入射する。信号光はFLC-SLMに記録されたパターンに応じた方向へ回折され、PBSとレンズL3を透過して所望の出力位置に到達する。したがって、出力位置の選択は液晶シャッターアレイによって選択する制御光の組み合わせを変えることで行う。

この光スイッチでは各入力を独立して制御するためにFLC-SLMの電極を分割し、この各ピクセルに1つの入力を割り当てる。また、大規模な光スイッチでも小さなパワーの制御光源で制御できるように各ピクセルに1つの制御光源を割り当てる。すなわち、各入力に1つの制御光源を割り当てる。もし、多くの入力をもつ光スイッチを1つの制御光源で制御すると、制御光を広い領域に並んだ多くのピクセルに入射させなければならないが、FLC-SLMに干渉縞を書き込むにはある程度以上の光

強度が必要なので、制御光源は大きなパワーが必要となる。これに対して各入力に1つの制御光源を割り当てると制御光の照射面積を小さくできるので小さなパワーの制御光源でスイッチの制御が可能になる。

図4.3.2に制御光源を各ピクセルに割り当てる光学系を示す。グレーティング、液晶シャッターアレイ、FLC-SLMをレンズL1、L2の焦点面に置く。制御光源C1を出たコリメートされたレーザ光はグレーティングにより分割されるが、4.5節で述べるグレーティングを用いることで各ビームの強度が等しいビームアレイとなる。レンズL1を通ることで、各ビームは制御光源の位置とは関係なくグレーティングによって回折された角度に対応した位置の液晶シャッターに導かれる。液晶シャッターを通過したビームはレンズL2を通過することで全てピクセルP3に到達する。同様に制御光源

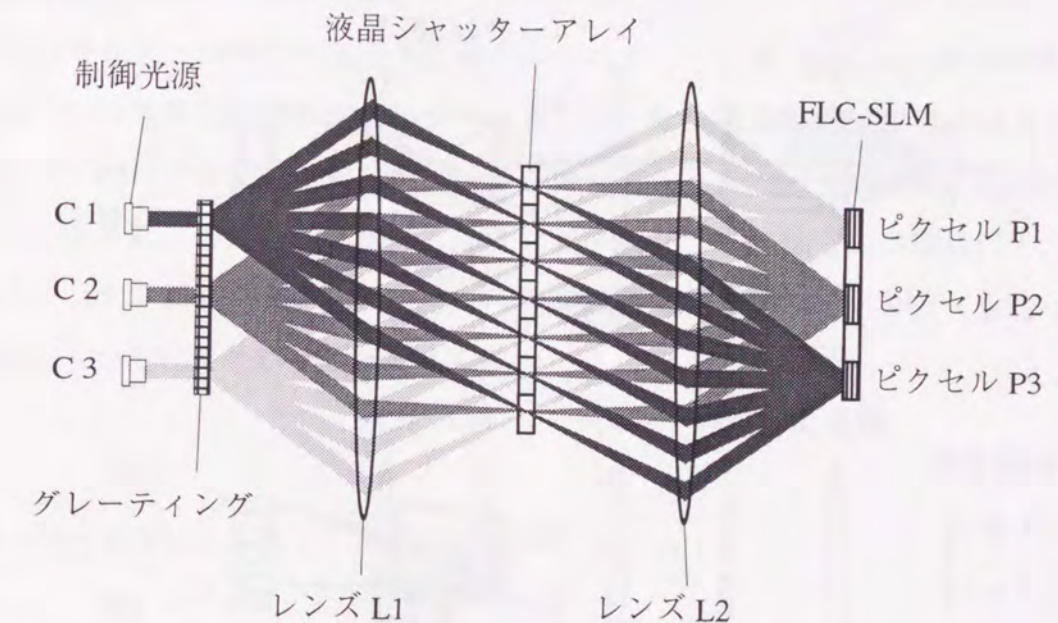


図4.3.2 制御系の光学系

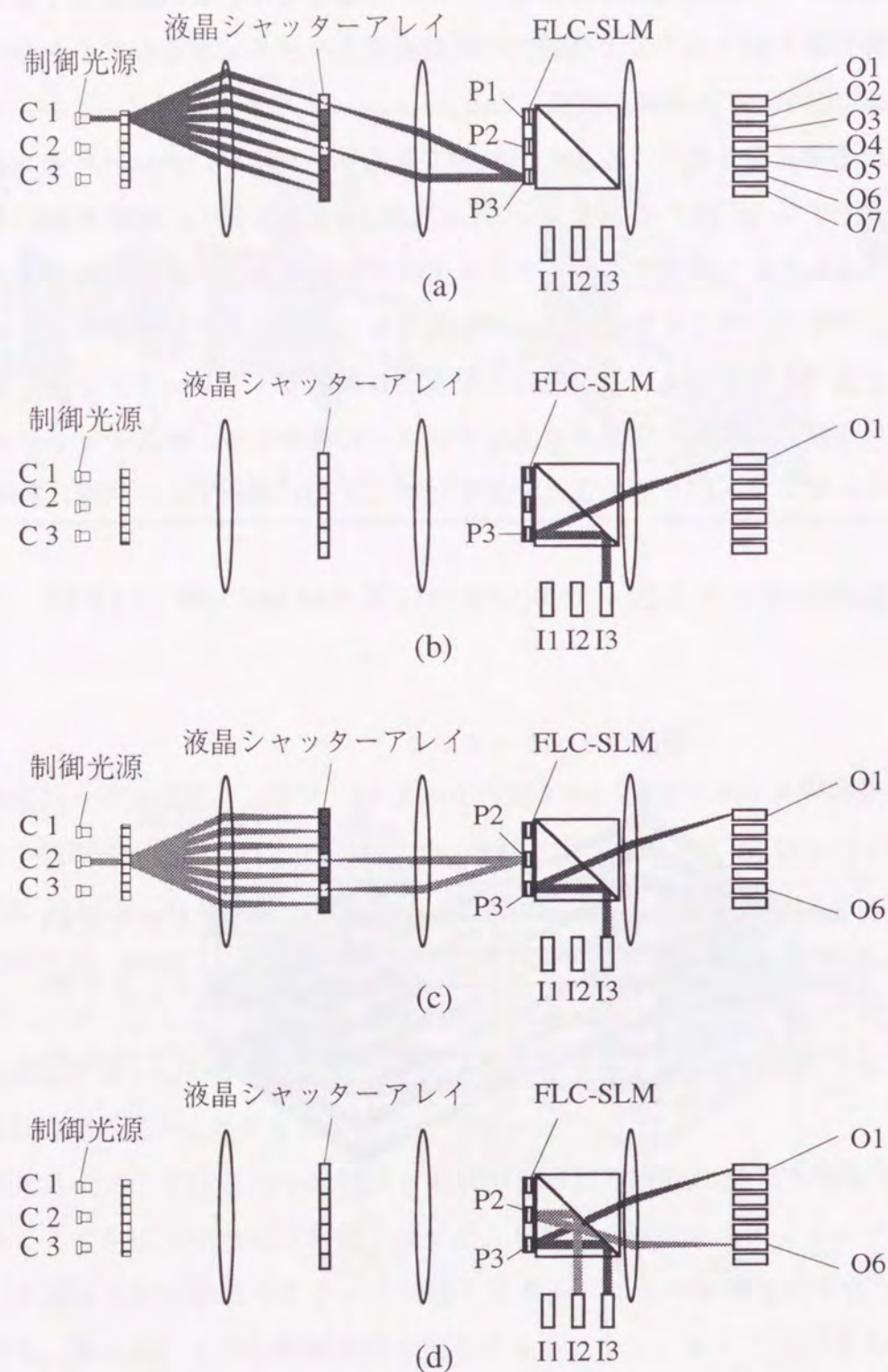


図4.3.3 スイッチの制御法

C2から出た光はピクセルP2に、制御光源C3から出た光はピクセルP1に入射する。この制御系では全ての入力光が液晶シャッターアレイを共用しているため、スイッチングは各入力を順次行うことになるが、制御系を簡素化することができる。スイッチの入力数は制御光源、ピクセル、入力ポートを2次元に配列することで増やすことができる。

次にこのスイッチの制御法を例を挙げて述べる。図4.3.3にその動作を示す。初めに入力I3と出力O1の接続を行う。このスイッチでは入力の選択を制御光源とピクセルの選択で行うので、図4.3.3(a)では制御光源C1からレーザ光を出射し、ピクセルP3に電圧を加える。また、出力位置は液晶シャッターアレイで出力O1に対応した2本の制御光を選択する。これによりピクセルP3に干渉縞が記録される。制御光と電圧が切られた後、入力I3から信号光がピクセルP3に入射し、入力I3と出力O1が接続される。これを図4.3.3(b)に示す。

次に入力I3と出力O1の接続を保持したまま、入力I2と出力O6の接続を行う。これを図4.3.3(c)に示す。制御光源C2からレーザ光を出射し、ピクセルP2に電圧を加える。このときピクセルP3には電圧が加わらないので、この接続動作はピクセルP3に記録されている干渉縞には影響を与えず、入力I3と出力O1の接続は保持される。そしてピクセルP2に干渉縞が記録され、図4.3.3(d)のように入力I2と出力O6が接続される。

このように、各入力を順次スイッチングする。この制御方法は複数の入力を同時にスイッチングできないが、端末からの接続要求ごとにスイッチングを行うことを想定しているので十分対応可能である。

4.4 制御光の強度バラツキと回折効率

4.3節で述べたホログラム型光スイッチでは出力位置を決めるのに分割された制御光の中から2つを選んでFLC-SLMに干渉縞を書き込むが、2つの制御光の強度が異なると損失の原因となる。この節では2つの制御光の強度比と損失の関係を明らかにする。

このシミュレーションでは計算を容易にするために2つの制御光を光強度の一般的な平面波とする。まず、これらの制御光の強度比とFLC-SLM上に生じるグレーティングの形状の関係を求める。そして、グレーティングの形状と回折効率の関係を明らかにし、これら2つの関係より2つの制御光の強度比と回折効率の関係を示す。

初めに制御光の強度比とFLC-SLM上に生じるグレーティングの形状の関係を求める。2つの制御光の電界 E_1 、 E_2 を式(4.4.1)、式(4.4.2)とする。

$$E_1 = A \exp \left[j \left(\omega t - \frac{2\pi a x}{\lambda} \right) \right] \quad (4.4.1)$$

$$E_2 = B \exp \left[j \left(\omega t - \frac{2\pi b x}{\lambda} \right) \right] \quad (4.4.2)$$

但し、AとBは制御光の電界強度によって決まる定数、aとbはFLC-SLMに対する制御光の光波面の傾きによって決まる定数である。

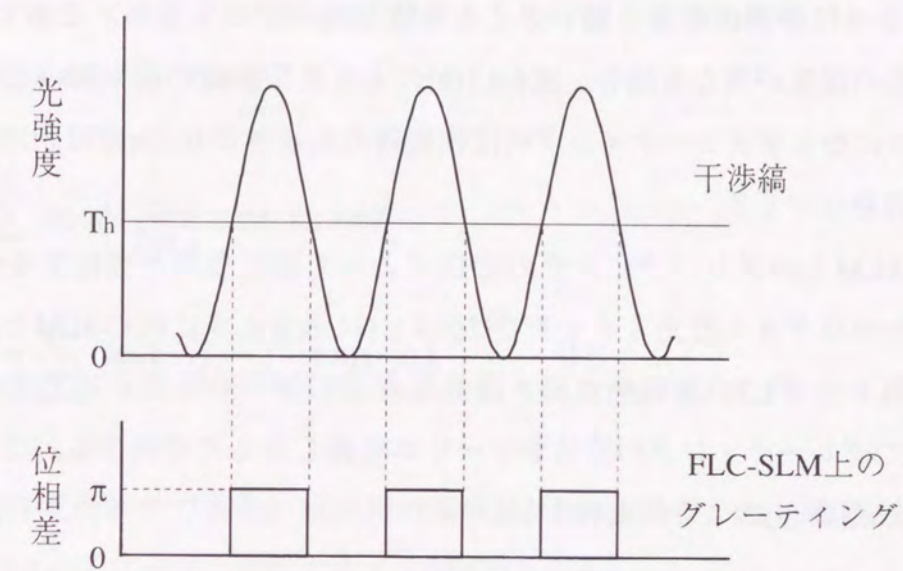
式(4.4.1)と式(4.4.2)よりFLC-SLM上に生じる干渉縞の電界 E_0 は式(4.4.3)となる。

$$E_0 = E_1 + E_2 \quad (4.4.3)$$

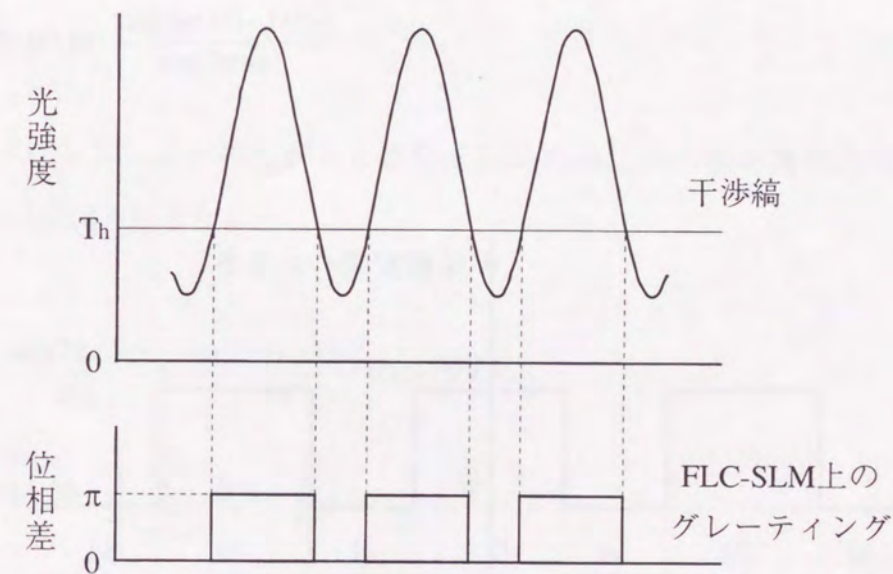
よって、この干渉縞の光強度 I_0 は式(4.4.4)となる。

$$\begin{aligned} I_0 &= E_0 E_0^* \\ &= 4AB \cos^2 \left[\frac{\pi(a-b)x}{\lambda} \right] + (B-A)^2 \end{aligned} \quad (4.4.4)$$

ここで E_0^* は E_0 と複素共役な関数である。2つの制御光の強度が異なる場合、式(4.4.4)の第1項で示される干渉縞の強度振幅が変わらなくても、第2項で示される2つの制御光の電界強度の差によって干渉縞の強度がFLC-SLMの閾値に対して変動



(a) 2つの制御光の強度が等しい場合



(b) 2つの制御光の強度が等しくない場合

図4.4.1 制御光強度とグレーティングの形状

することがわかる。この様子を図4.4.1に示す。2つの制御光の強度が等しい場合、図4.4.1(a)のように干渉縞の最も弱いところは光強度がゼロとなる。これに対して、2つの制御光の強度が異なる場合、図4.4.1(b)のように干渉縞の最も弱いところでも光強度はゼロにならずグレーティングの位相変調の大きさが0と π の部分の割合が図4.4.1(a)とは異なってくる。

次にFLC-SLM上のグレーティングの形状によって回折効率が変化することを示す。考案したホログラム型光スイッチでは図4.3.1に示すようにFLC-SLMと出力ポートはそれぞれレンズL3の前側焦点面と後側焦点面に置かれるため出力光の電界はFLC-SLM上のグレーティングの形状をフーリエ変換したもので決まる。ここではフーリエ変換を式(4.4.5)のように定義する。

$$H(u) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x) \exp(-j2\pi xu) dx \quad (4.4.5)$$

但し、

$$u = \frac{X}{\lambda f}$$

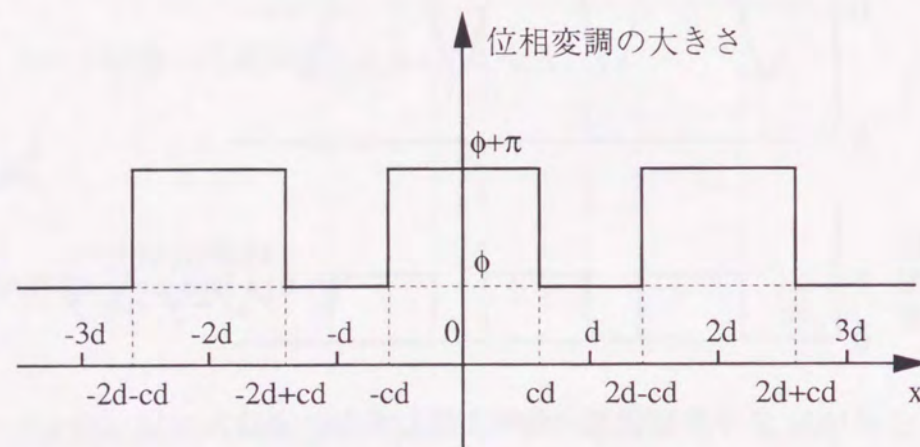


図4.4.2 FLC-SLM上のグレーティングの形状

ここでXは出力面での位置座標、 λ は光の波長、fはレンズの焦点距離を表す。FLC-SLM上のグレーティングは図4.4.2に示すように2値の矩形の位相グレーティングであるから式(4.4.6)のように表される。

$$g(x) = \sum_{n=-N}^N \text{rect}\left[\frac{x-2nd}{2cd}\right] \exp[-j(\phi+\pi)] + \sum_{n=-N}^N \text{rect}\left[\frac{x-(2n+1)d}{2(1-c)d}\right] \exp(-j\phi), \quad 0 \leq c \leq 1 \quad (4.4.6)$$

ここで ϕ は任意の実数である。出力光の電界は式(4.4.6)をフーリエ変換したもので決まり、式(4.4.6)をフーリエ変換すると式(4.4.7)となる。

$$G(u) = \left[-\frac{\sin(2\pi cdu)}{\pi u} + \frac{\sin\{2\pi(1-c)d\}}{\pi u} \exp(-j2\pi du) \right] \times \exp(-j\phi) \frac{\sin[2\pi(2N+1)du]}{\sin(2\pi du)} \quad (4.4.7)$$

ここではグレーティングの広がりの影響を除くためにNの値を無限大にする。すると式(4.4.7)は式(4.4.8)となる。

$$G(u) = \left[-\frac{\sin(2\pi cdu)}{\pi u} + \frac{\sin\{2\pi(1-c)d\}}{\pi u} \exp(-j2\pi du) \right] \times \exp(-j\phi) \frac{1}{2d} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta\left(u - \frac{m}{2d}\right) \quad (4.4.8)$$

ここで関数 $\delta(u)$ は式(4.4.9)のように定義する。

$$\delta(u) = \begin{cases} 1, & u = 0 \\ 0, & u \neq 0 \end{cases} \quad (4.4.9)$$

式(4.4.8)より出力光の強度 P は式(4.4.10)となる。

$$P(u) = C_0 \left[\sin^2(2\pi cdu) - 2\sin(2\pi cdu) \sin\{2\pi(1-c)du\} \cos(2\pi du) + \sin^2\{2\pi(1-c)du\} \right] \left(\frac{1}{2\pi du} \right)^2 \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta\left(u - \frac{m}{2d}\right) \quad (4.4.10)$$

ここで C_0 は入力光の光強度で決まる定数である。出力光として用いるのは1次回折光である。1次回折光は $m=1$ 、すなわち、 $u=1/2d$ に現れるので、これを式(4.4.10)に代入すると1次回折光の強度 P_1 となる。これを式(4.4.11)に示す。

$$P_1 = C_0 \left(\frac{2}{\pi} \right)^2 \sin^2(\pi c) \quad (4.4.11)$$

式(4.4.11)より、グレーティングの形状が変化して c の値が変わるとき、回折効率は $c=1/2$ のとき最大となり、 $c=0$ と 1 のときゼロとなることがわかる。

次に式(4.4.4)と式(4.4.11)から制御光の強度比と回折効率の関係を明らかにする。

式(4.4.4)より干渉縞の1周期 Δx は式(4.4.12)となる。

$$\Delta x = \frac{\lambda}{a-b} \quad (4.4.12)$$

また、図4.4.2より干渉縞の1周期は $2d$ である。したがって、式(4.4.13)の関係が成り立つ。

$$a-b = \frac{\lambda}{2d} \quad (4.4.13)$$

式(4.4.13)より式(4.4.4)は式(4.4.14)となる。

$$I_0 = 4AB \cos^2\left(\frac{\pi x}{2d}\right) + (B-A)^2 \quad (4.4.14)$$

ここでFLC-SLMの閾値を T_h とおき、2つの制御光の強度が等しいとき回折効率最大になるように制御光の強度を設定する。すなわち、式(4.4.14)で $A=B$ 、 $I_0=T_h$ のとき $c=1/2$ 、すなわち、 $x=d/2$ であるから式(4.4.15)の関係が得られる。

$$A^2 = \frac{T_h}{2} \quad (4.4.15)$$

2つの制御光の強度が異なるときについて検討する。一方の制御光の光強度を式(4.4.15)で示すように $T_h/2$ とし、2つの制御光の強度比を式(4.4.16)のようにおく。

$$r = \left(\frac{B}{A} \right)^2 \quad (4.4.16)$$

図4.4.1と図4.4.2より $I_0=T_h$ のとき $x=cd$ であるから、式(4.4.14)、(4.4.15)、(4.4.16)より式(4.4.17)が得られる。

$$\cos(\pi c) = \frac{1-r}{2\sqrt{r}} \quad (4.4.17)$$

式(4.4.11)と式(4.4.17)から式(4.4.18)の関係が成り立つ。

$$P_1 = C_0 \left(\frac{2}{\pi} \right)^2 \left(-\frac{r}{4} + \frac{3}{2} - \frac{1}{4r} \right) \quad (4.4.18)$$

$r=1$ のとき P_1 は最大値をとり、これを式(4.4.19)のように定める。

$$P_{1\max} = C_0 \left(\frac{2}{\pi} \right)^2 \quad (4.4.19)$$

2つの制御光の光強度の比に対する1次回折光の強度を1次回折光の最大値との比 P_r で表すと式(4.4.20)となる。

$$P_r = \frac{P_1}{P_{1\max}}$$

$$= -\frac{r}{4} + \frac{3}{2} - \frac{1}{4r} \quad (4.4.20)$$

式(4.4.20)の関係を図4.4.3に示す。この図は制御光の一方の光強度が $T_h/2$ のとき、 $r \leq 3-2\sqrt{2}$ で干渉縞の光強度は全ての場所でFLC-SLMの閾値以下となり、また、 $r \geq 3+2\sqrt{2}$ で干渉縞の光強度は全ての場所でFLC-SLMの閾値以上となり、FLC-SLMに干渉縞は書き込まれないことを示している。

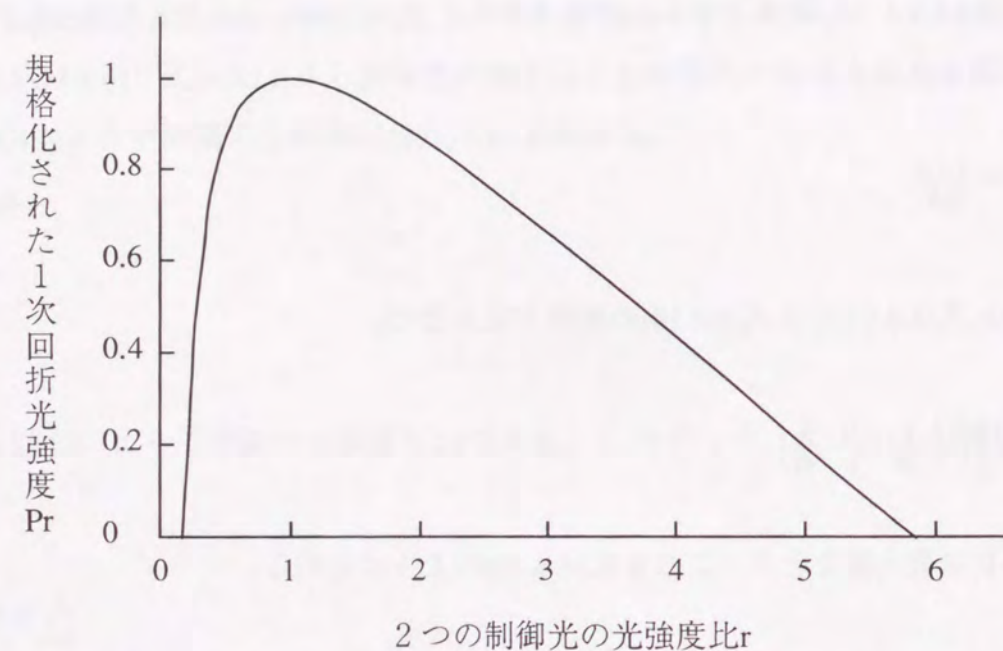


図4.4.3 制御光の強度比と出力光強度

4.5 グレーティング

FLC-SLMの閾値に対する制御光の強度の調整はグレーティングによって分割されてきた全ての制御光の強度が等しい場合は制御光の組み合わせに関わらず制御光源のパワーは同じでよく、調整は容易である。これに対して2つの制御光の強度が異なる場合は4.4節で示したように制御光の強度比によって出力光の強度が変動する。したがって制御光の組み合わせごとに調整が必要となり、スイッチの制御が困難になる。そこで分割後の各ビームの強度が等しくなるようなグレーティングの設計をDammannらによって考案された方法に基づいて行った[72,73]。これは2値の計算機プログラム的一种であり、計算機で生成したパターンをエッチングにより石英基板上につくり込んだ。この石英基板で光の位相を2値変調する。作製したグレーティングのパターンの例を図4.5.1に示す。このグレーティングは入射光を11 x 11本に分割する。このグレーティングの出力光を図4.5.2に示す。

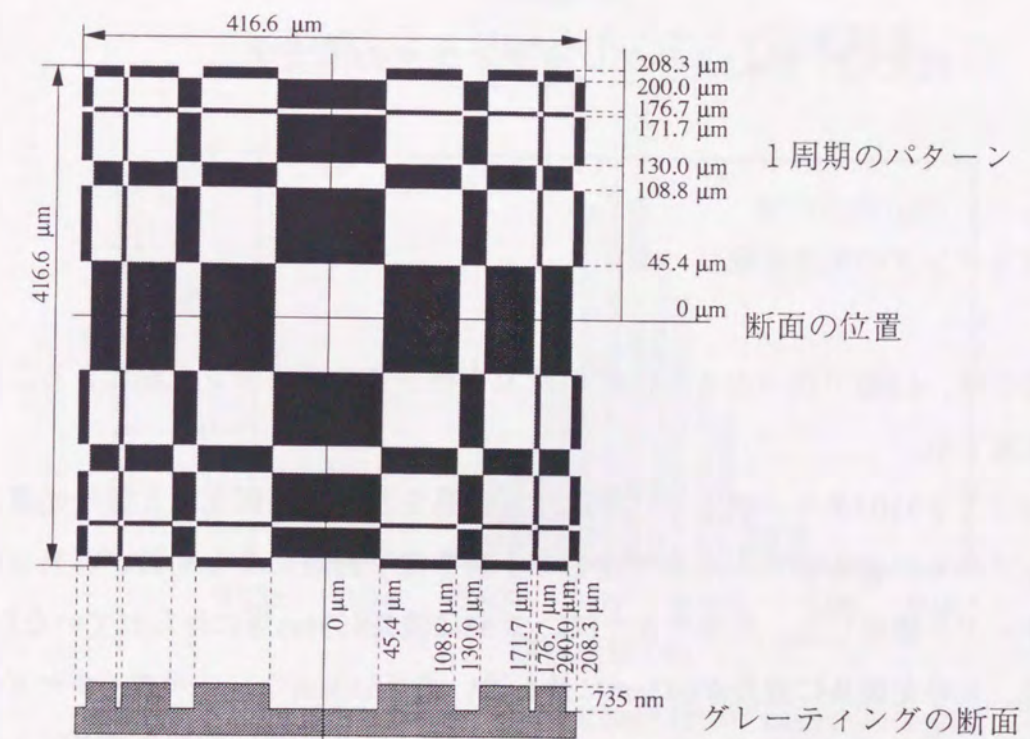


図4.5.1 グレーティングパターンの例

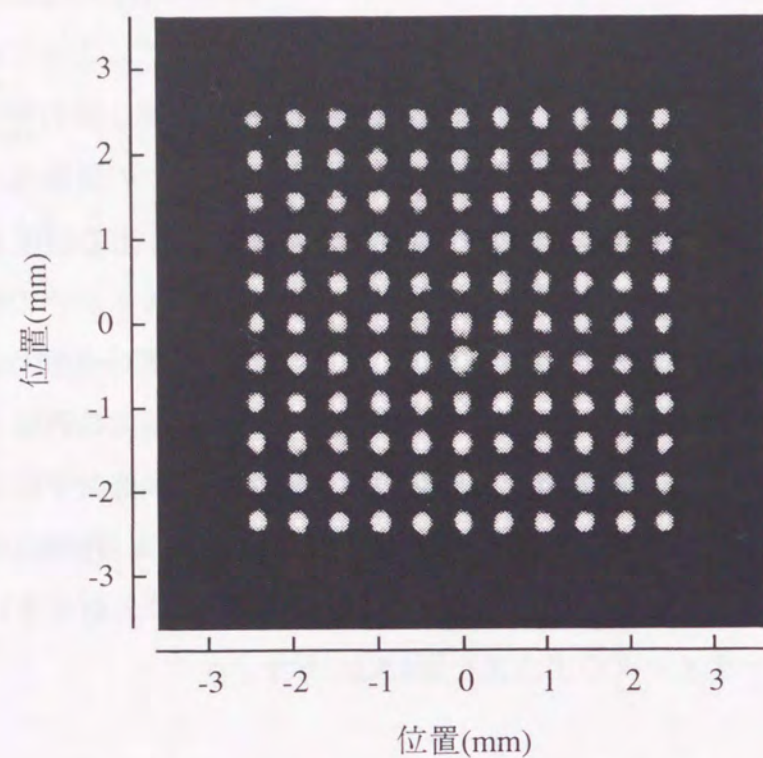


図4.5.2 図4.5.1のグレーティングの出力光

4.6 スイッチングの実証実験

この節では、4.2節で述べたようにFLC-SLMを使ってスイッチングができることを実験で実証する。

図4.6.1に1 x 1104スイッチングに用いた実験系を示す。制御光源と信号光源には実際にシステムに組み込むことを想定して小型で電子回路による制御が容易なレーザダイオードを使用した。入手できたFLC-SLMは波長633nm用に作られていたため、制御光源、信号光源共に波長が633nmに最も近い波長670nmのレーザダイオードを用いた。制御光源から出射したコリメートされたレーザ光はグレーティングにより33 x 33本 (=1089本) のビームに分割される。なお、グレーティングは図4.5.1に示し

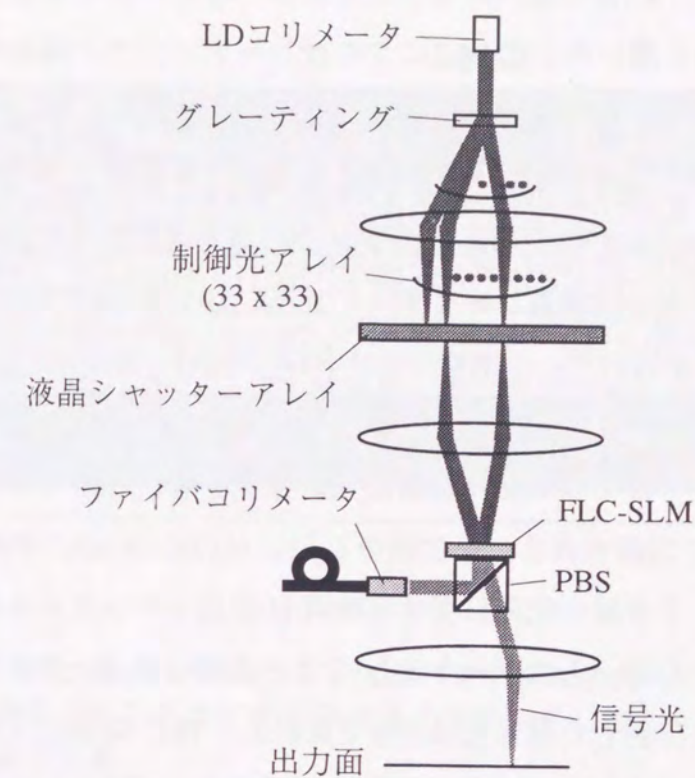


図4.6.1 1 x 1104スイッチングの実験系

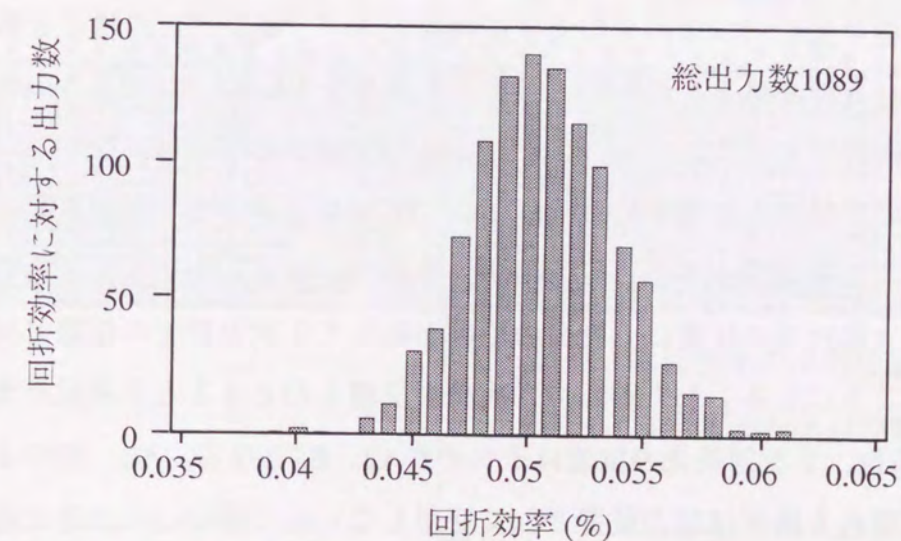


図4.6.2 1 x 1104スイッチングの実験において制御光の分割に使用したグレーティングの回折効率を回折効率の各値に対する出力数で示した測定結果

たものとは異なるが、4.5節で述べたように分割後の各ビームの強度が等しくなるように設計されたものを用いた。図4.6.2にこのグレーティングの回折効率を示す。このグレーティングによって分割された制御光の強度比は最大で1.6であったので式(4.4.20)より1次回折光強度は最大時の0.94であるから、制御光強度のバラツキによる損失は0.3dBになることがわかる。分割された制御光はレンズを通過後、液晶シャッターアレイに到達する。液晶シャッターアレイにはアクティブドットマトリクス型液晶ディスプレイを用いた。1画素の大きさは0.33mm x 0.33mmでツイストネマチック液晶を使用している。液晶シャッターを開くのに要する時間は4msであった。液晶シャッターアレイによって2つの制御光が選択され、この2つの制御光による干渉縞がFLC-SLMに記録される。干渉縞の記録にはFLC-SLMに15Vの電圧を8ms加えた。したがって、干渉縞の記録に要する時間は液晶シャッターを開くのに必要な4msと併せて12msである。入力ポートとしてファイバコリメータを用い、このファイバコリメータから出射した信号光はPBSで反射し、FLC-SLMに入射し、記録されているホログラムのパターンに応じた方向に反射され、PBSとレンズを通過後、出力面に至る。出力位置は液晶シャッターアレイで選択する2本の制御光の組み合わせで決める。

図4.6.3は信号光を1104カ所の出力位置に順次スイッチングした様子を多重露光により撮影したものである。出力光には1次回折光を用いた。このときの制御光源のパワーは6.3mWであった。図4.6.3の上方で出力位置がとびとびになっているのは高次の回折光の入射する位置を出力位置として使用しなかったためである。図4.6.4に図4.6.3における各回折光の出力位置の関係を示す。提案した光スイッチでは出力面において2次回折光の位置は0次光の位置から見て1次回折光の位置と同方向で2倍離れたところになる。したがって0次光の位置をOとすると1次回折光の位置がA1、B1の場合、2次回折光の位置はそれぞれA2、B2となる。A2、B2のような高次の回折光が現れる場所は出力位置として使用しないので図4.6.3の上方で出力位置がとびとびになっている。なお、図4.6.3の中で出力位置を明確にするために0次光、マイナス次、高次の回折光は写真に写らないようにマスクにより遮光した。

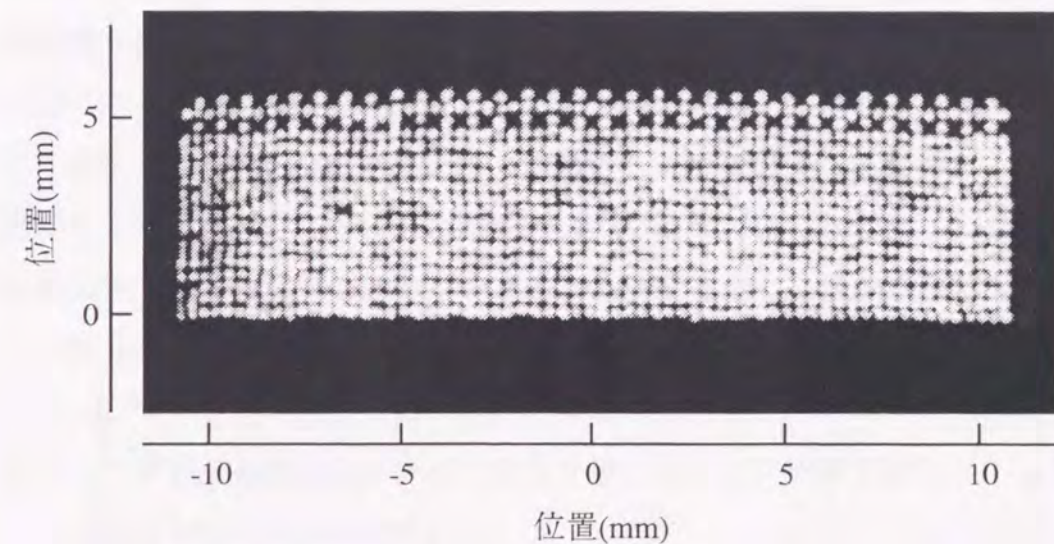


図4.6.3 FLC-SLMを用いた1 x 1104ホログラム型光スイッチにおいて信号光を各出力位置に順次スイッチングしたときの出力光の多重露光写真

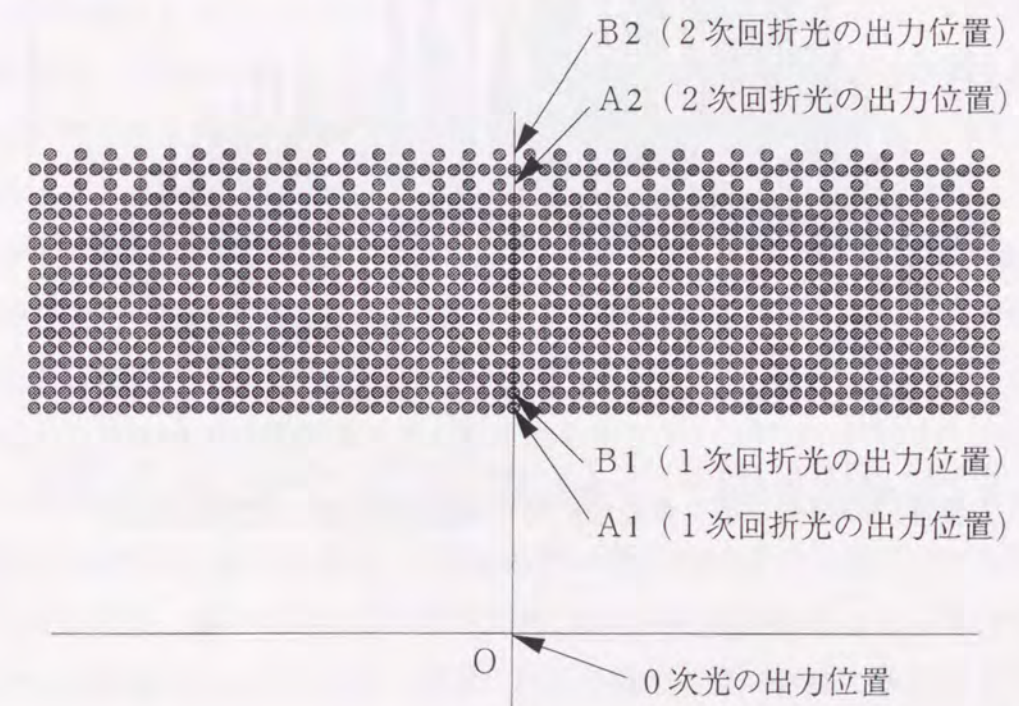


図4.6.4 図4.6.3における各回折光の出力位置の関係

図4.6.5は1 x 1104スイッチの損失を測定した結果である。最小損失、最大損失、平均損失はそれぞれ27.6dB、36.9dB、31.6dBであった。この実験によりFLC-SLMをホログラム媒体として用いることで、レーザダイオードによる制御が可能で出力数1000程度の光スイッチがつけられることがわかった。

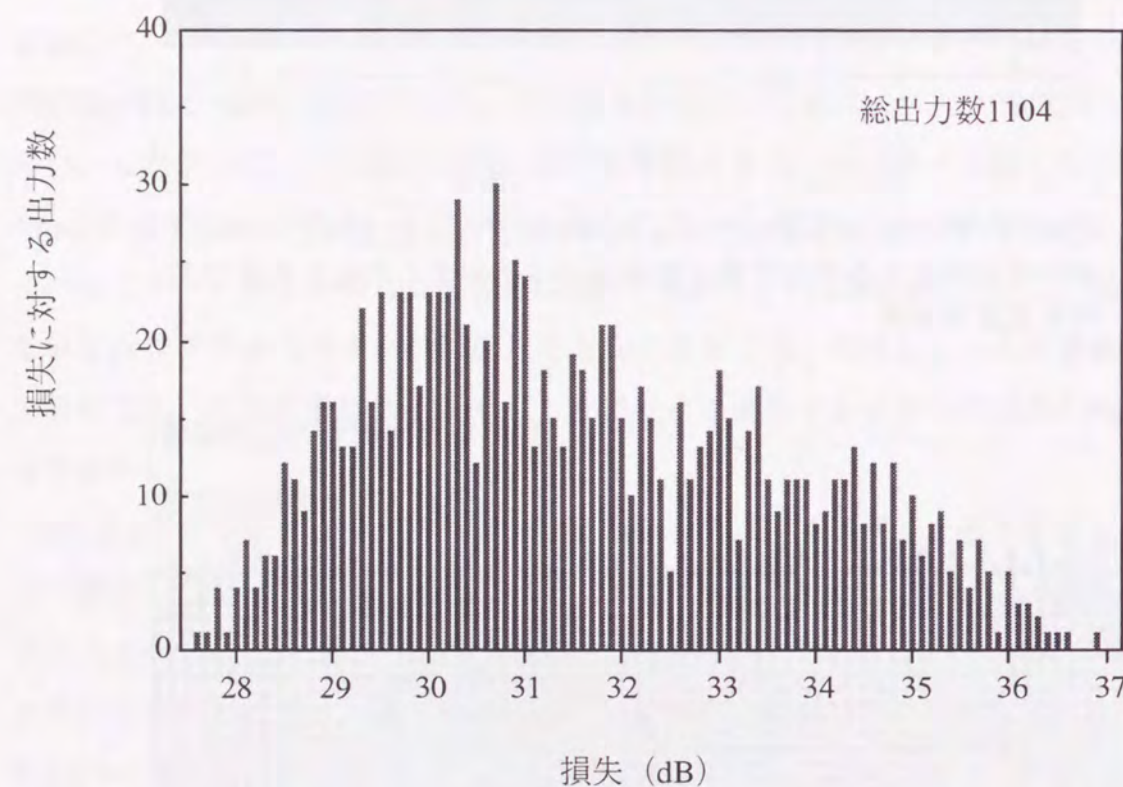


図4.6.5 FLC-SLMを用いた1 x 1104ホログラム型光スイッチの各出力位置での損失を損失の各値に対する出力数で示した測定結果

4.7 出力位置

提案したFLC-SLMを用いたホログラム型光スイッチでは1次回折光を出力光として使うが、同時にFLC-SLMに記録された干渉縞は高次やマイナス次の回折光を生じる。高次やマイナス次の回折光はクロストークの原因になるため、これらの不要な回折光が重ならないように出力位置を決めなければならない。図4.3.1に示すようにFLC-SLMと出力面はそれぞれレンズL3の前側焦点面と後側焦点面にあるため、全ての回折光の出力位置は入力位置に関わらずFLC-SLM上での回折角によって決まる。したがって、1つの入力に対する出力位置を求めれば、その出力位置は全ての入力に対して使用できる。ここでは、出力位置の決め方を制御光が7 x 7本のビームアレイの場合を例に挙げて説明する。

まず初めに1次回折光の到達できる場所を求める。信号光の出力位置を決めるために制御系の液晶シャッターアレイの中の2つを開くが、説明を簡単にするために1つのシャッターの位置を7 x 7シャッターアレイの角の1つに固定する。そして、他の一方を残りのシャッターのいずれかとする。固定したシャッターの位置が左下の角の場合、+1次回折光は図4.7.1(a)に示すように出力面で0次光の位置を除く右上の7 x 7格子点上に現れる。同様に固定したシャッターの位置が右下、左上、右上の角のとき、+1次回折光はそれぞれ出力面の左上、右下、左下の領域に現れる。したがって、+1次回折光は図4.7.1(a)の灰色と白色の点で示す168カ所に現れる。なお、中央の0次光の位置は0次光によりクロストークが大きくなるため、出力位置としては使用しない。

次に、この168カ所に重なる不要な回折光を生じるホログラムのパターンに対応する1次回折光の位置を除く。マイナス次の回折光はプラス次の回折光と0次光の位置に対して対称な位置に現れる。-1次回折光は常に168カ所の位置のいずれかに重なる。したがって、図4.7.1(b)に示すように出力位置は半分の84となる。また、n次光は0次光の位置からみて1次光の位置と同じ方向でn倍の距離にある。2次光が図4.7.1(c)の灰色の点で示す位置にあるとき、1次光は黒色の点で示す位置に現れる。1次光が黒色の点の外側にあるとき、全ての高次の回折光は灰色の点の外側に現れ

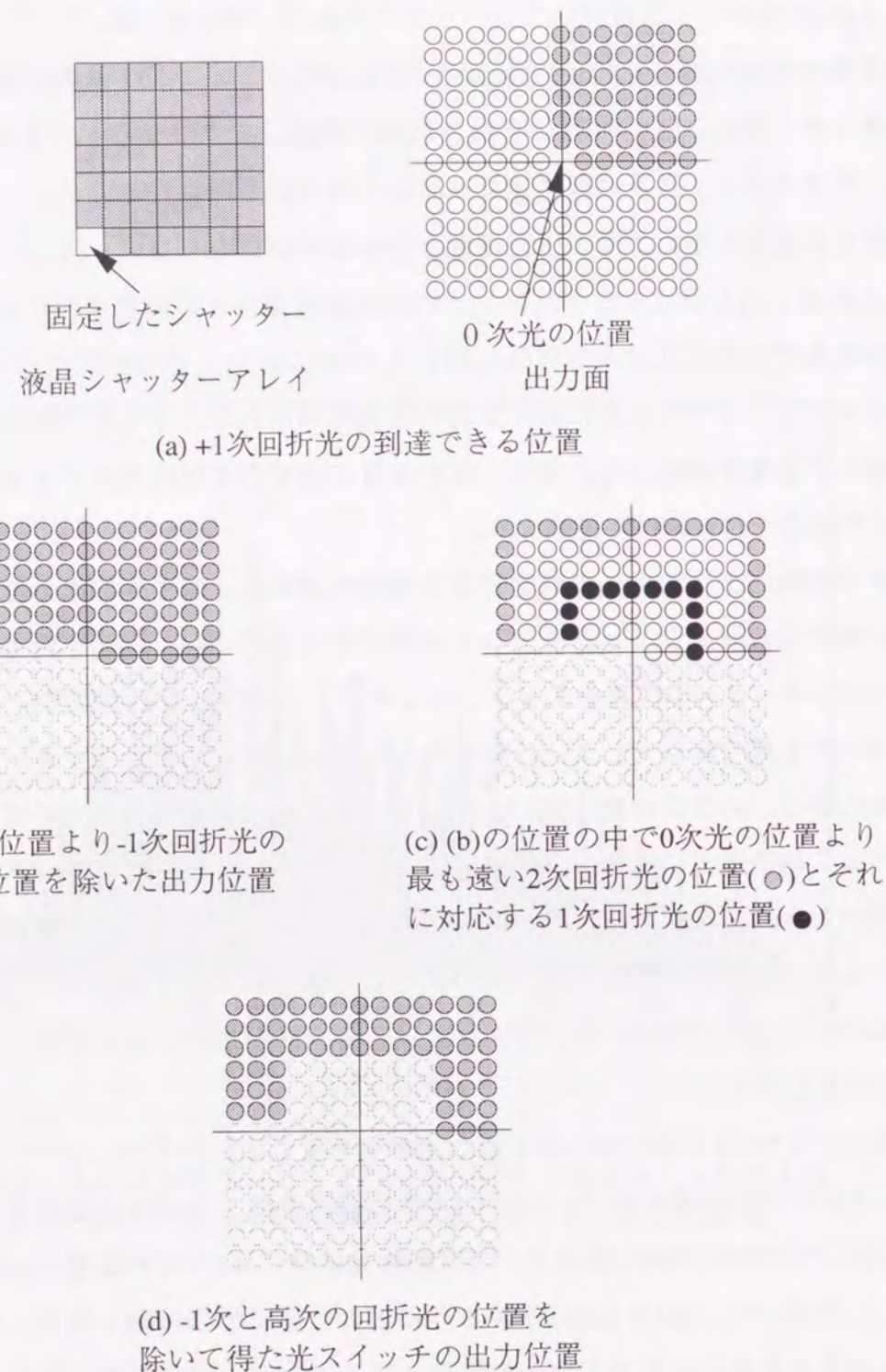


図4.7.1 出力位置の決め方

ることになり、クロストークの原因とはならない。したがって、出力位置は図4.7.1(d)の灰色の点で示す位置となる。その数は60個ある。

一般に制御光をグレーティングにより $M \times M$ 本のビームに分割する場合、1次光の到達できる場所の数は $4M(M-1)$ となる。 M の値は我々の用いたグレーティングの設計法によって奇数となる。-1次光の位置を除くと、その数は $2M(M-1)$ 。そしてクロストークの原因となる高次の回折光を生じる位置を除くと出力数 N_{out} は式(4.7.1)となる。

$$N_{out} = \frac{(M-1)(3M-1)}{2} \quad (4.7.1)$$

4.8 4 x 1204スイッチングの実験

4.6節のスイッチングの実験で出力数1000程度のスイッチができることを確認したが、この節では4.3節で提案した光スイッチの動作を確認するために入力数を複数にした4 x 1204スイッチングの実験について述べる。実験では4つの入力をそれぞれ1204カ所の出力位置にスイッチングし、その損失を測定した。そして、1入力のクロストークの測定を行った。

図4.8.1に4 x 1204スイッチの実験系を示す。制御光源には15mWのレーザダイオードを使った。グレーティングの分割数は29 x 29であり、式(4.7.1)より出力数は1204となる。このグレーティングによって分割された制御光の最大強度比は1.6であったので、式(4.4.20)より制御光強度のバラツキによる損失は0.3dBである。液晶シャッターアレイにはツイストネマチック液晶のアクティブドットマトリクス液晶ディスプレイを用いた。1画素の大きさは0.33mm x 0.33mmで、液晶シャッターを開くのに要する時間は4msであった。信号光源に波長670nmのレーザダイオードを、4つの入力ポートにファイバーコリメータを用いた。FLC-SLMの分解能は110 line pairs/mmであり、実験で書き込んだ干渉縞の空間周波数は最小値37 line pairs/mm、

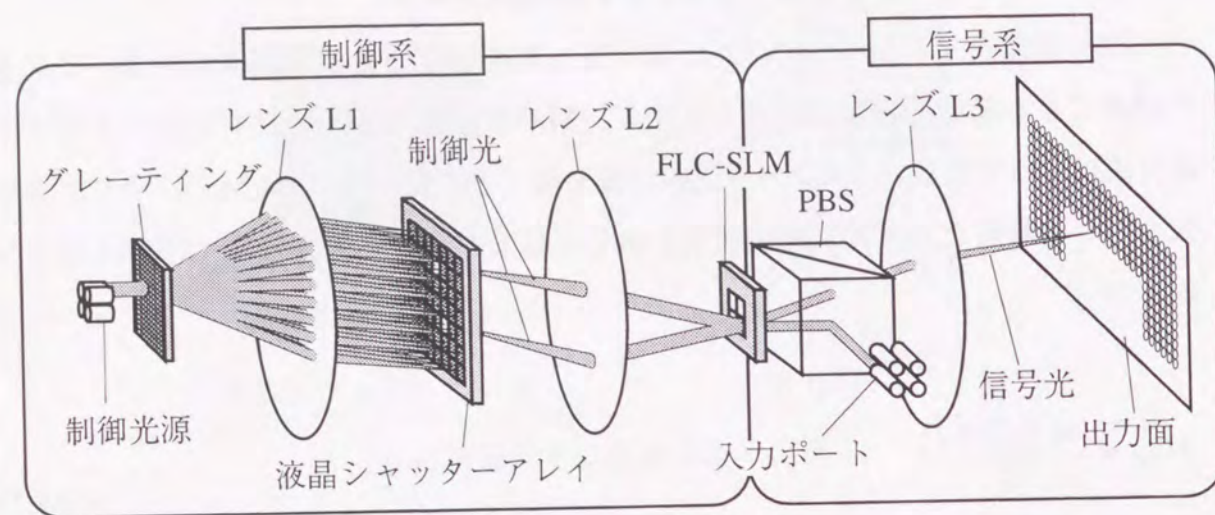
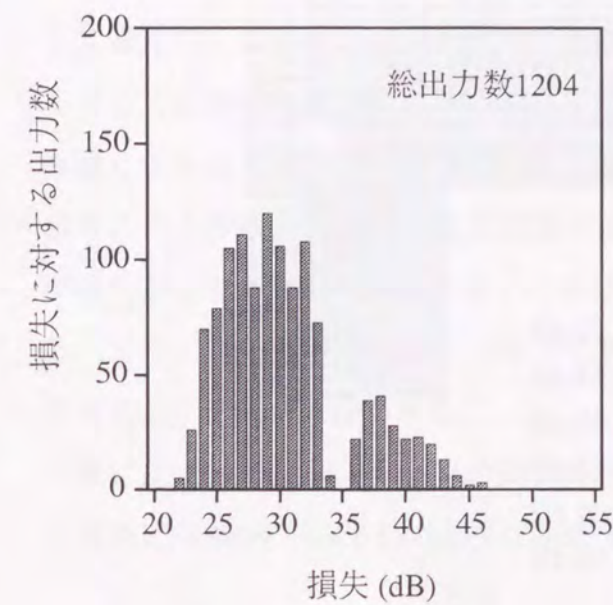


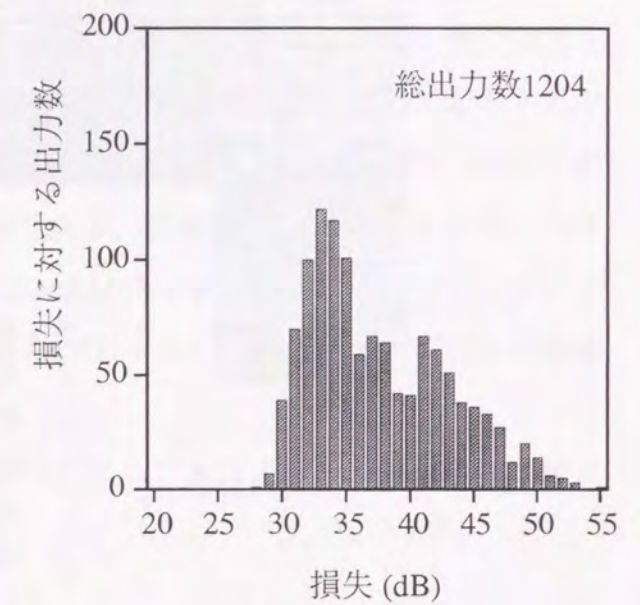
図4.8.1 4 x 1204スイッチングの実験系

最大値 98 line pairs/mmであった。干渉縞の記録にはFLC-SLMに15Vの電圧を8ms加えた。したがって、干渉縞の記録に要する時間は液晶シャッターを開くのに必要な4msと併せて12msである。

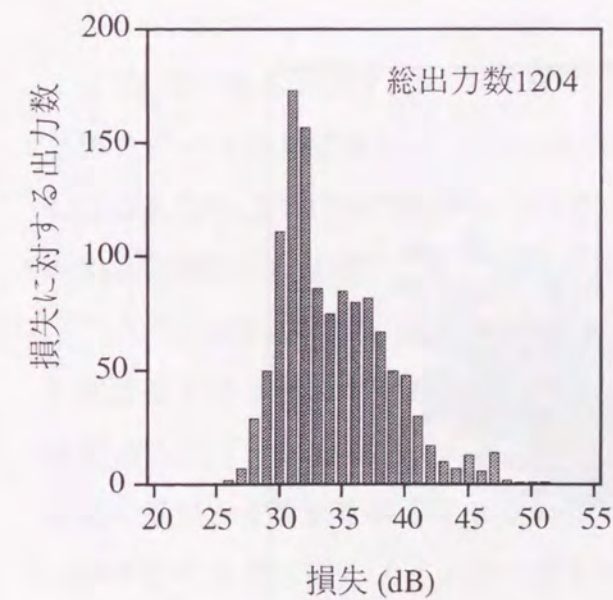
図4.8.2に4 x 1204スイッチの損失の測定結果を示す。出力ポートにはフォトダイオードを用いた。4入力の平均損失は28、33、35、36dBであった。FLC-SLMに25 line pairs/mmの干渉縞を書き込んだとき回折効率1%以上であった。この結果は4 x 1204スイッチにおいて最小損失20dBとなることが想定される。実験で使ったFLC-SLMは原理上の損失が7dBで、干渉縞の不完全な記録が損失を増大させることが報告されている[74]。4 x 1204スイッチングの実験では25 line pairs/mmよりも細かなパターンを使用した。FLC-SLMの分解能は限られているので細かなパターンは損失の原因となる。平均損失の4入力間での差は、ピクセル間で干渉縞の記録する能力が不均一であったためである。また、図4.8.2からわかるように各入力の損失の最大値と最小値の差は23dB以上あった。実験したホログラム型光スイッチでは損失は出力位置に依存性がある。図4.8.3は入力No.2の各出力位置での損失である。こ



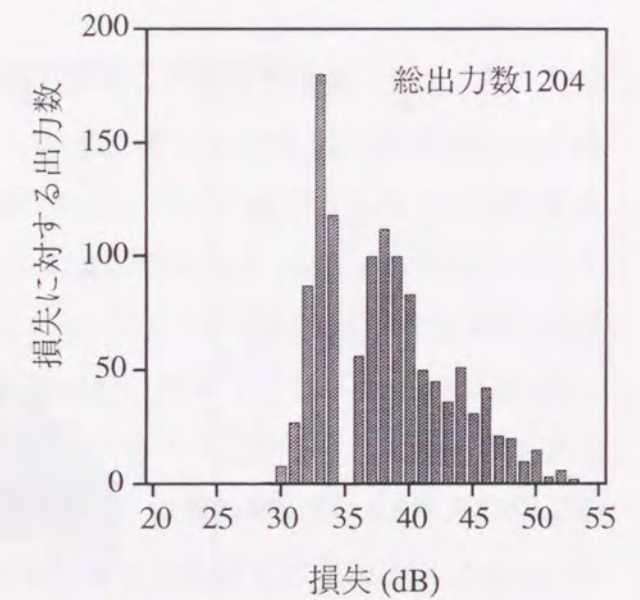
(a) 入力 No.1



(c) 入力 No.3



(b) 入力 No.2



(d) 入力 No.4

図4.8.2 FLC-SLMを用いた4 x 1204ホログラム型光スイッチの各出力位置での損失を損失の各値に対する出力数で示した測定結果

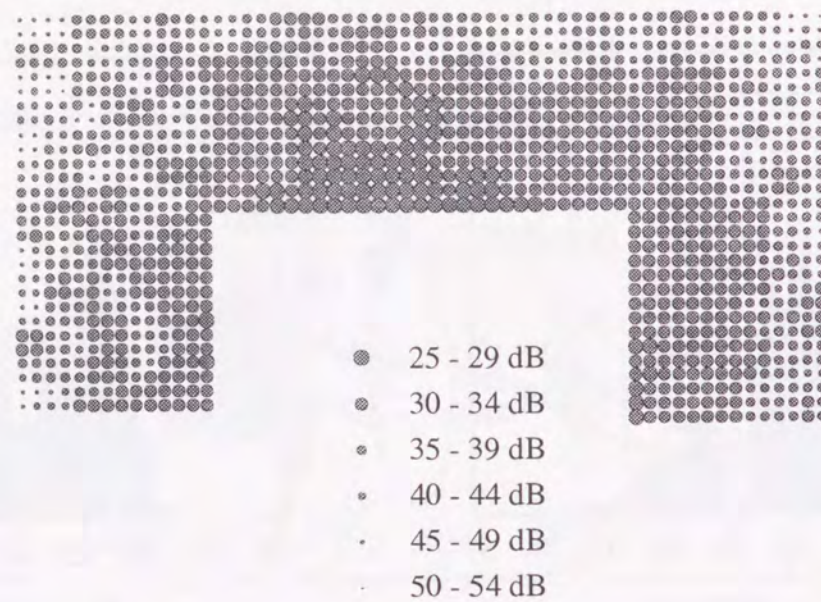


図4.8.3 入力No. 2の各出力位置での損失

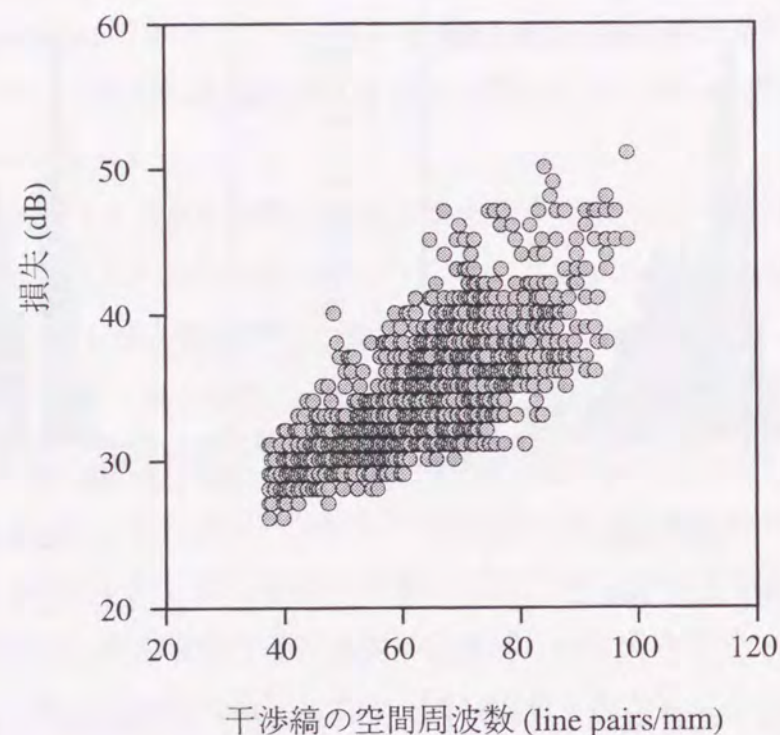


図4.8.4 入力No. 2の干渉縞の空間周波数と損失の関係

ここで出力位置は4.7節で述べたように不必要な回折光によるクロストークを避けるように選んだ。この図より出力位置が0次光の位置から遠ざかるにつれて損失は大きくなるのがわかる。このホログラム型光スイッチでは出力位置が0次光の位置から遠くなるほどFLC-SLMに記録される干渉縞は細くなる。図4.8.4はFLC-SLMに記録された干渉縞の空間周波数と損失の関係である。空間周波数が大きくなるにつれて損失が大きくなるのがわかる。これはFLC-SLMの分解能が限られていることによる。また、空間周波数が同じであっても損失のばらつきが大きい、これは干渉縞の不完全な記録が原因である。

次に1入力のクロストークの測定を行った。ここでクロストークの信号光に対する強度比(XSR)を式(4.8.1)のように定義する。

$$XSR = 10 \log \left(\frac{I_B}{I_A} \right) \quad (4.8.1)$$

ここで I_A は、ある入力を出力ポートAに接続したときの出力光強度、 I_B は、その入力を出力ポートBに接続したときに出力ポートAに漏れてくる光の強度である。図4.8.5は入力No.2が1204カ所の出力位置に順次スイッチングしたときの全出力位置でのXSRを測定した結果である。測定の結果、XSRの平均値は-16dBであった。クロストークの主な原因はFLC-SLMからの散乱光であった。この散乱光の強度はFLC-SLMに干渉縞を書き込まない状態で測定したとき損失に換算すると平均53dBであった。FLC-SLMに干渉縞を書き込んだときは干渉縞のパターンによって散乱光の強度は多少変化するが、干渉縞を書き込まないときと同じように現れた。図4.8.6は入力No.2を1204カ所の出力位置にスイッチングしたときの各出力位置での平均XSRである。この図より0次光の位置から離れるにつれて平均XSRが大きくなるのがわかる。図4.8.7は入力No.2を1204カ所の出力位置にスイッチングしたときのFLC-SLMに書き込んだ干渉縞の空間周波数とXSRの関係を示している。この図より空間周波数が大きくなるにつれてXSRは大きくなるが、図4.8.4の損失に比べてXSRは空間周波数に対する依存性が小さいことがわかる。これはクロストークの原因である散乱光の強度

も空間周波数が大きくなるにつれて小さくなるが、損失に比べて空間周波数に対する依存性が小さいためである。

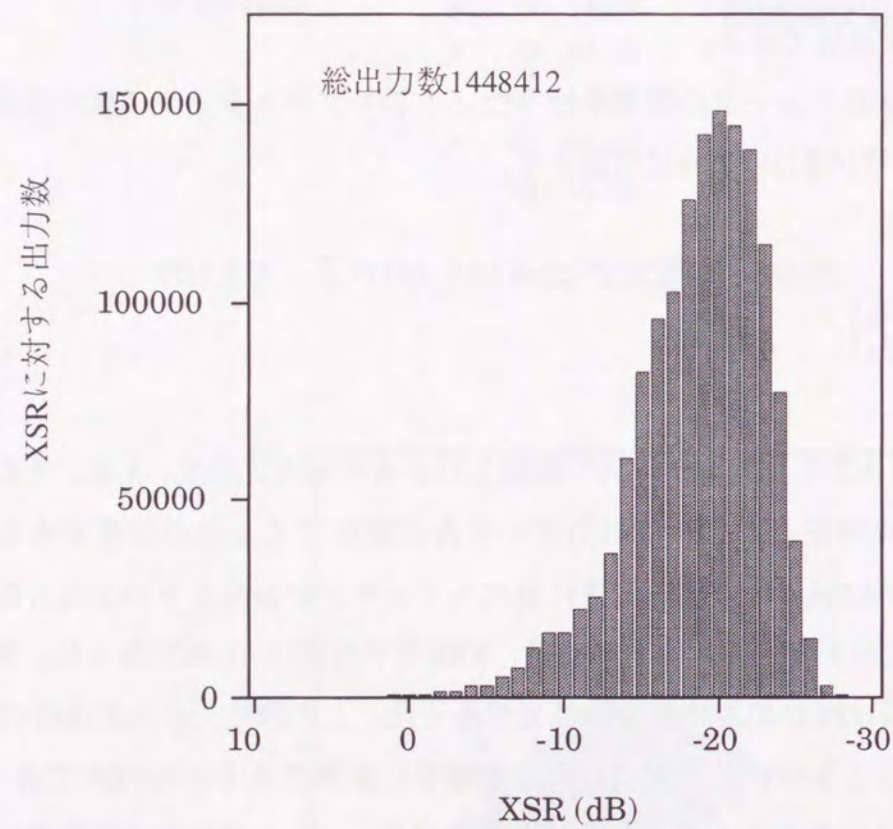


図4.8.5 4 x 1204光スイッチの入力No.2を各出力位置に接続したときのその他の出力位置のXSRをXSRの各値に対する出力数で示した測定結果

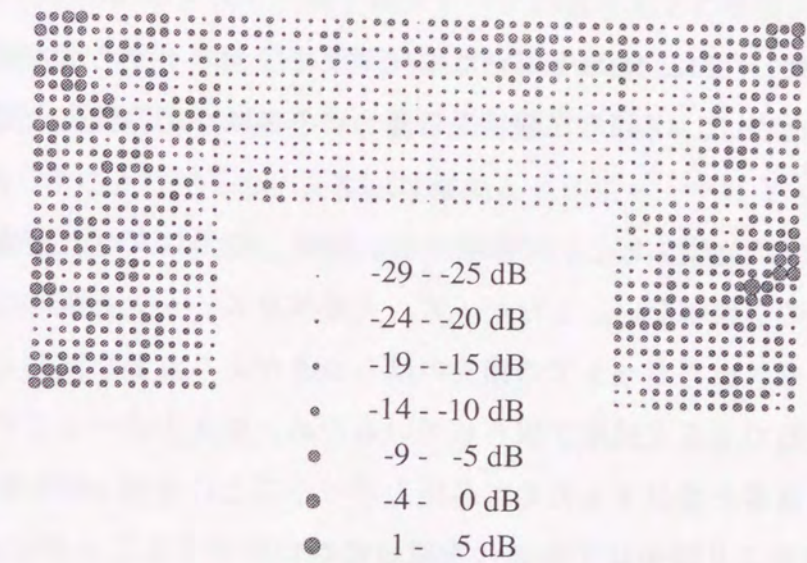


図4.8.6 入力No.2の各出力位置での平均XSR

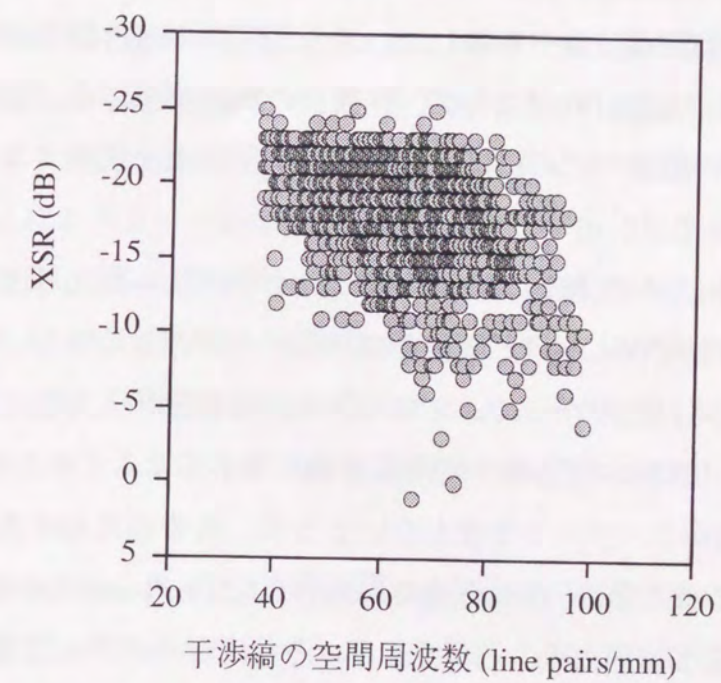


図4.8.7 入力No. 2の干渉縞の空間周波数とXSRの関係

4.9 考察

この節では提案したFLC-SLMを用いたホログラム型光スイッチで大規模な光スイッチを実現するために、4.8節の実験結果に基づいてスイッチの損失とXSRについて検討する。

はじめにスイッチの損失について検討する。提案したホログラム型光スイッチは1段構成で損失の累積はない。したがって、大規模なスイッチを構成した場合、損失の大きさよりも各出力ポートでの損失のばらつきがより重要な問題となる。一般に受光素子は受信できる光強度が限られているため、各出力ポートでの損失のばらつきが大きいと信号を受信するために各出力ポートごとに受信レベルの調整が必要になる。実験結果より損失は干渉縞の空間周波数に依存することがわかったので、あまり細かなパターンを使わないことで、ある程度損失のばらつきを抑えることができる。例えば、図4.8.4では損失のばらつきの幅は25dBであるが、干渉縞の空間周波数を64 line pairs/mm以下に制限すると損失のばらつきの幅は15dBに抑えることができる。ただ、干渉縞の空間周波数を制限すると出力ポートの設置できる領域が狭くなり、干渉縞の最大空間周波数を制限しない場合と同数の出力数を確保するには出力ポートの間隔を狭くしなければならず、作製上の制約が生じる。また、一層の損失と損失のばらつきの低減のためには、FLC-SLMの干渉縞を記録する特性を改善する必要がある。

次にスイッチのXSRについて検討する。提案したホログラム型光スイッチは1段構成であるため、入力数が増えるほど累積クロストークが大きくなり、受信する光信号の識別が困難になる。したがって、クロストークの累積が入力数を制約することになる。実験結果よりXSRは干渉縞の空間周波数に依存することがわかったので、損失と同様、あまり細かなパターンを使わないことで、ある程度XSRを抑えることができる。例えば、図4.8.7では干渉縞の空間周波数を62 line pairs/mm以下に制限することでXSRを-10dB以下に抑えることができる。それにホログラム型光スイッチは出力ポートの置ける領域が広いので、XSRがあまりに大きい所は避けて他の場所に

出力ポートを設置することでXSRの改善をすることができる。しかし、信号を出力ポートで読みとるために必要な累積クロストークの信号光との強度比が-10dBとすると、入力数が実験での出力数とほぼ同数の1000入力の場合、1入力からのクロストークと信号光との強度比が-40dB必要となる。上述の対策をしたとしても実験結果はこの要求を満たすことはできない。XSRは損失とクロストークによって決まるので、この要求を満たすためにはスイッチの損失を小さくし、FLC-SLMからの散乱光を抑制しなければならない。

4.10 本章のまとめ

本章では、はじめにFLC-SLMをホログラム媒体として用いた光スイッチングの原理について述べ、FLC-SLMを用いた新しいホログラム型光スイッチの構成を提案し、その動作について述べた。このスイッチでは制御光によって生じる干渉縞をFLC-SLMに記録し、この記録された干渉縞によって信号光を回折することでスイッチングを行う。本研究で提案した光スイッチではパワーの小さな制御光源で大規模な光スイッチの制御を可能とするために、各入力に1つの制御光源を割り当てる構成とした。このスイッチの制御系ではグレーティングにより制御光を分割し、液晶シャッターアレイにより2つの制御光を選択することで出力位置を決めるが、分割された制御光の強度のばらつきがスイッチの損失の原因となるため、この関係を定量的に求めた。そして光強度の均一な制御光アレイをつくるためのグレーティングの設計を行った。また、不要な回折光によるクロストークを避けるための出力位置の決め方を考案し、グレーティングによる制御光の分割数とスイッチの出力数の関係を明らかにした。

実験ではホログラム媒体としてFLC-SLMを用い、制御光源としてレーザダイオードを用いてスイッチングが可能であること示し、出力数1000程度のスイッチができることを確認した。また、提案したスイッチの制御系では各入力に1つの制御光源

を割り当てるが、この制御系の機能を確認するために 4×1204 スイッチを構成し、その動作を確認した。また、 4×1204 スイッチの損失とクロストークの測定を行い、これらの結果より、提案したホログラム型光スイッチで大規模な光スイッチを実現するには、損失とクロストークの低減が必要ことが明らかとなった。

第5章 ホログラム型光スイッチの拡張性

5.1 はじめに

大規模な空間分割スイッチを実現するために、第3章、第4章でLCDとFLC-SLMを用いた新しいホログラム型光スイッチを提案し、実験によりその動作を確認した。スイッチの規模を拡大する場合、入力数については提案した2つのタイプのホログラム型光スイッチはともに入力ポートとデバイスを2次元に配列することで増やすことができる。しかし、出力数については、ホログラム媒体にLCDを用いた場合は1入力に割り当てる画素数が、FLC-SLMを用いた場合は制御光源のパワーが制約要因になる。この章では、これらの関係を明らかにし、最終的な目的である交換システムに使用されるような大規模な光スイッチ実現の可能性を検討する。

5.2 液晶ディスプレイを用いたホログラム型光スイッチの出力数

一般にLCDは電圧を加える画素と電圧を加えない画素の組み合わせで画像を表示するので、LCD上に表示できるパターン数は画素数によって決まる。したがって、LCDを用いたホログラム型光スイッチの出力数は画素数によって制約される。なお、ホログラム型光スイッチでは画素が大きい場合は回折角度が小さくなるが、レンズの焦点距離を長くすることで小さな画素を用いたときと同じ出力位置に信号光を導くことができるので、原理的には画素の大きさは出力数を制約しない。3.4節ではホログラムとしてストライプパターンを用いたときの出力位置を求めた。この節では3.4節の結果を踏まえて1入力に割り当てるLCDの画素数とスイッチの出力数の関係を求める。(3.4.10)より図3.4.3に示された a と b の値によって出力位置が決まることがわかる。はじめに b の値を一定として a の値を変えたときに得られる出力数を算

出する。次に不要な回折光が出力位置に重ならないように使用可能な b の値を求める。そしてこれらの結果より、1 入力に割り当てられる LCD の画素数とスイッチの出力数の関係を明らかにする。

5.2.1 b の値に対するスイッチの出力数

(3.4.10) より、 b の値が一定で a の値が -1 から 1 までかわるとき出力光は直線 $v = \pi/2bd$ 上を移動することがわかる。(3.4.9) より他の回折光は a の値に関わらず、この出力光が移動する軌跡に重ならないことがわかる。直線 $v = \pi/2bd$ 上に確保できる出力数は図 5.2.1 に示すように出力光が移動する軌跡の長さ L と隣接する出力位置の間隔 OO' から求められる。出力光が移動する軌跡の長さ L は (3.4.10) より式 (5.2.1) で表される。

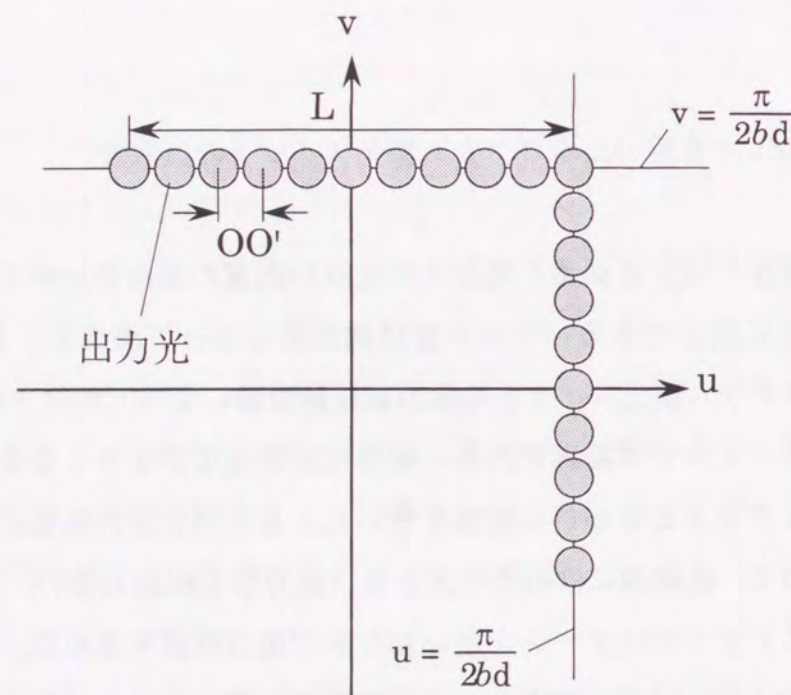


図 5.2.1 LCD を用いたホログラム型光スイッチにおける b の値で決まる出力位置

$$L = \frac{\pi}{bd} \quad (5.2.1)$$

OO' の最小値は入力光のビーム径によって決まる出力光のビーム径とホログラムのパターンによって決まる出力光のビーム径のいずれか大きい方によって決まる。ここで入力光はガウシアンビームとし、その電界強度を式 (5.2.2) とする。

$$g(x, y) = A \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r^2}\right) \quad (5.2.2)$$

入力光の通過する画素数が $Q \times Q$ 個とすると、1 画素の大きさは 3.4 節で定めたように $2d \times 2d$ であるから入力光のビーム半径は dQ となる。ここでは隣接する出力光からのクロストークを小さくするためにビーム径を大きくとり、電界強度がピークの $\exp(-2)$ になるところとする。すると式 (5.2.2) より式 (5.2.3) の関係が導かれる。

$$r = \frac{dQ}{\sqrt{2}} \quad (5.2.3)$$

図 3.3.1 に示すように LCD と出力面はそれぞれレンズの前側焦点面と後側焦点面にあるので出力光は入力光をフーリエ変換することで求めることができる。ここではフーリエ変換を式 (3.4.1) で定義する。よって、出力光の電界は式 (5.2.4) となる。

$$G(u, v) = A\pi r^2 \exp\left(-\frac{r^2(u^2 + v^2)}{4}\right) \quad (5.2.4)$$

式 (5.2.4) より出力光の直径 D_0 は式 (5.2.5) となる。

$$D_0 = \frac{4\sqrt{2}}{r} \quad (5.2.5)$$

式(5.2.3)と式(5.2.5)より出力光の直径 D_0 は式(5.2.6)となる。

$$D_0 = \frac{8}{dQ} \quad (5.2.6)$$

入力ビーム径で決まる OO' の最小値はこの D_0 である。

次にホログラムのパターンによって決まる OO' の最小値を求める。ここで出力光の幅を図5.2.2に示すように光強度がゼロになる第一零と定義する。

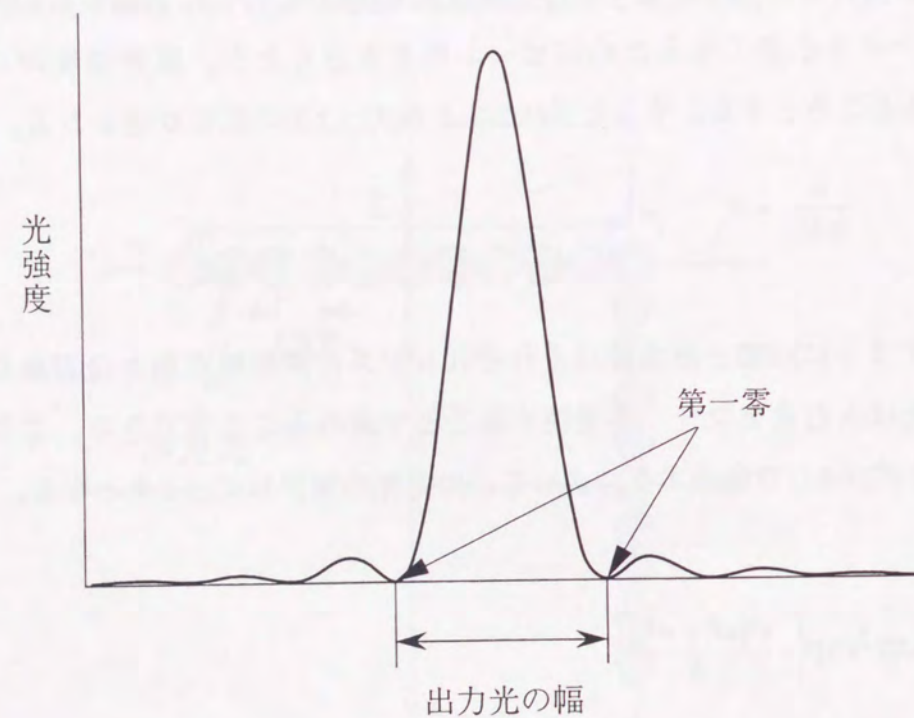


図5.2.2 ホログラムのパターンをフーリエ変換することで決まる出力光の幅

ホログラムのパターンをフーリエ変換すると出力光の形は式(3.4.8)より図5.2.3に示すように平行四辺形ABCDとなる。隣り合う平行四辺形ABCDと $A'B'C'D'$ が重ならないためにはBCと $B'C'$ が重ならないようにしなければならない。Cと B' が一致したとき、 OO' が最小値になる。式(3.4.8)より直線CD、 $A'B'$ 、 BC' はそれぞれ式(5.2.7)、式(5.2.8)、式(5.2.9)となる。

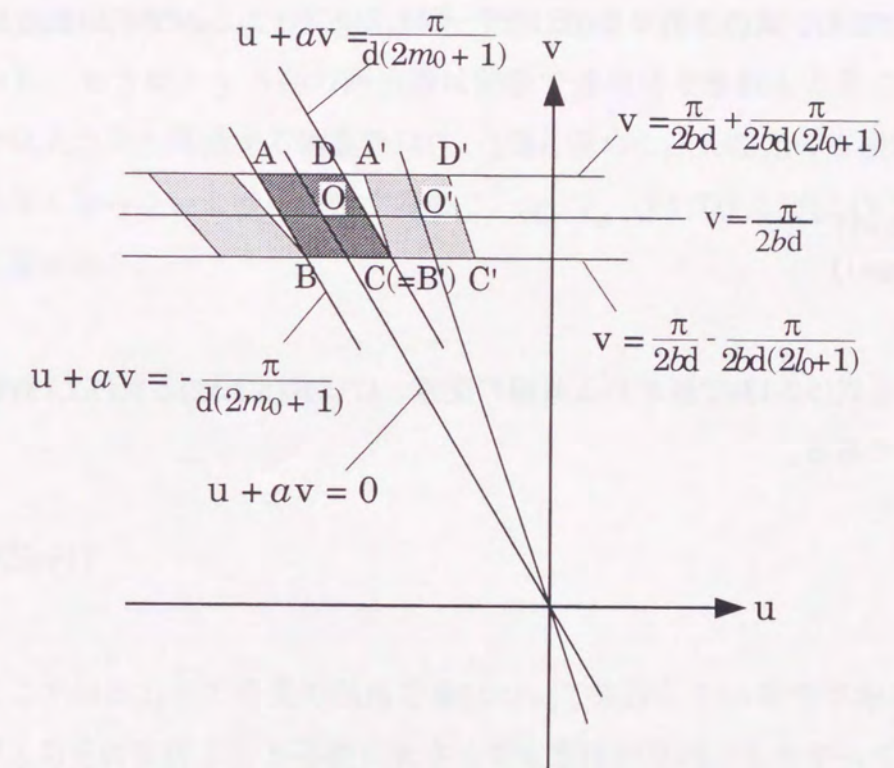


図5.2.3 ホログラムのパターンをフーリエ変換することで決まる出力光の形状

$$u + av = \frac{\pi}{d(2m_0 + 1)} \quad (5.2.7)$$

$$u + a'v = -\frac{\pi}{d(2m_0 + 1)} \quad (5.2.8)$$

$$v = \frac{\pi}{2bd} - \frac{\pi}{2bd(2l_0 + 1)} \quad (5.2.9)$$

式(5.2.7)、式(5.2.8)、式(5.2.9)よりCとB'が一致したときのaとa'の関係は式(5.2.10)となる。

$$a - a' = \frac{2b(2l_0 + 1)}{l_0(2m_0 + 1)} \quad (5.2.10)$$

Oは式(5.2.11)と式(5.2.13)で表される直線の交点、O'は式(5.2.12)と式(5.2.13)で表される直線の交点である。

$$u + av = 0 \quad (5.2.11)$$

$$u + a'v = 0 \quad (5.2.12)$$

$$v = \frac{\pi}{2bd} \quad (5.2.13)$$

したがって、Oの位置は(u,v)=(-aπ/2bd, π/2bd)、O'の位置は(u,v)=(-a'π/2bd, π/2bd)となる。よって、OO'の距離は(a-a')π/2bdである。式(5.2.10)より、ホログラムのパターンによって決まるOO'の最小値D₁は式(5.2.14)となる。

$$D_1 = \frac{\pi(2l_0 + 1)}{dl_0(2m_0 + 1)} \quad (5.2.14)$$

これまでに入力ビーム径で決まるOO'の最小値D₀とホログラムのパターンによって決まるOO'の最小値D₁を求めたが、実際のOO'の最小値はD₀とD₁の大きい方で決まる。D₀とD₁との大小を判断するにはm₀とl₀とQの関係が明らかでなければならない。3.4節でホログラムはx方向の2m₀+1個、y方向の2b(2l₀+1)個の画素で構成されると定めたが、特にbの値が大きいときはl₀の値が変わるとy方向の画素数は大きく変化する、離散的な値しかとれない。これに対して入力光は断面が円形のガウシアンビームを想定しており、x方向とy方向の画素数は同数で連続的な整数をとることができる。この節では入力光の通過する画素数はQ×Q個と定めた。入力光の直径はホログラムよりも大きくならないように設定するので、m₀、l₀、Qは式(5.2.15)と(5.2.16)の関係を満たす必要がある。

$$Q \leq 2m_0 + 1 \quad (5.2.15)$$

$$Q \leq 2b(2l_0 + 1) \quad (5.2.16)$$

また、ここでは出力面での光の強度分布について検討しているのであるから、ホログラムが入力光の直径より不必要に大きくても意味がない。したがって、m₀とl₀の値は式(5.2.15)と(5.2.16)を満たす最小値となる。これを式(5.2.17)、(5.2.18)に示す。

$$m_0 = \text{int}\left(\frac{Q+1}{2}\right) \quad (5.2.17)$$

$$l_0 = \text{int}\left(\frac{Q}{4b} + \frac{1}{2}\right) \quad (5.2.18)$$

Q と b の値が与えられれば、式(5.2.6)、(5.2.14)、(5.2.17)、(5.2.18)より D_0 と D_1 との大小を判断することができる。

以上の結果、式(5.2.1)、(5.2.6)、(5.2.14)より $v=\pi/2bd$ 上で得られる出力数を算出できる。また、図3.4.3に示すパターンの座標 (x,y) を座標 (y,x) に入れ替えたパターンを使用した場合、 a の値を-1から1まで変えると出力位置 O_x は $u=\pi/2bd$ 上を動く。 $u=\pi/2bd$ 上で得られる出力数は $v=\pi/2bd$ 上で得られる出力数と同数である。したがって、 b の値が与えられたとき、 $v=\pi/2bd$ 上と $u=\pi/2bd$ 上で得られる出力数の和 N_t は式(5.2.19)で与えられる。

$$N_t = 2\text{int}\left(\frac{\pi Q}{8b}\right), \quad D_0 \geq D_1 \quad (5.2.19)$$

$$N_t = 2\text{int}\left(\frac{l_0(2m_0+1)}{b(2l_0+1)}\right), \quad D_0 < D_1$$

5.2.2 LCDの画素数とスイッチの出力数の関係

b の値が一定の時、高次の回折光の位置は a の値が変わっても出力位置とは重ならない。しかし、 b の値が変わるとき、 b の値によっては高次の回折光の位置が他の b の値の出力位置に重なるものがある。そのような b の値はクロストークが大きくなるために使用できない。そこで、この節では使用可能な b の値を算出する。

不要な回折光が出力光の位置に重ならないような b の値を求めるには次の2つの

条件を満たさなければならない。

(1)出力光の位置は0次光と重なってはならない。

(2)全ての回折光はすでに使用可能とした b の値によって決まる出力光の位置に重なってはならない。

はじめに全ての回折光の出力面での大きさを求める。スイッチングのためホログラムを消した際、0次光は $(u,v)=(0,0)$ の位置に現れる。そのとき液晶ディスプレイ上のパターンは式(5.2.20)で表される。

$$h(x, y) = \sum_{m=-m_0}^{m_0} \sum_{n=-2bl_0}^{2b(l_0+1)-1} \text{rect}\left[\frac{x-2dm}{2cd}\right] \text{rect}\left[\frac{x-2dn}{2cd}\right] \exp(-j\theta) \quad (5.2.20)$$

出力面上の光の強度分布は式(5.2.20)の $h(x,y)$ のフーリエ変換で決まる。 $h(x,y)$ をフーリエ変換すると式(5.2.21)となる。

$$H(u, v) = \frac{2 \sin(cdu)}{u} \frac{2 \sin(cdv)}{v} \frac{\sin\{d(2m_0+1)u\}}{\sin(du)} \times \frac{\sin\{2bd(2l_0+1)v\}}{\sin(dv)} \exp[-j\{(2b-1)dv+\theta\}] \quad (5.2.21)$$

したがって、スイッチングのためホログラムを消したときの出力面での光強度分布 $I(u,v)$ は式(5.2.22)となる。

$$I(u, v) = HH^*$$

$$= A \frac{4 \sin^2(cdu)}{u^2} \frac{4 \sin^2(cd v)}{v^2} \times \frac{\sin^2\{d(2m_0+1)u\}}{\sin^2(du)} \frac{\sin^2\{2bd(2l_0+1)v\}}{\sin^2(dv)} \quad (5.2.22)$$

ここでAは入力光強度によって決まる定数である。式(5.2.22)よりLCD上のパターンで決まる0次光の形状は式(5.2.23)と(5.2.24)で表されるようなu方向の幅が L_u 、v方向の幅が L_v の長方形となることがわかる。

$$L_u = \frac{2\pi}{d(2m_0+1)} \quad (5.2.23)$$

$$L_v = \frac{2\pi}{2bd(2l_0+1)} \quad (5.2.24)$$

しかし、式(5.2.6)、(5.2.15)、(5.2.16)より L_u と L_v は共に D_0 よりも小さい。したがって、0次光のu軸上の幅とv軸上の幅は共に D_0 となる。

式(3.4.8)より、ホログラムのパターンで決まる全ての回折光のv方向の幅 S_v は式(5.2.25)で表される。

$$S_v = \frac{2\pi}{2bd(2l_0+1)} \quad (5.2.25)$$

式(5.2.6)、(5.2.16)、(5.2.25)からわかるように S_v は D_0 よりも小さい。したがって、出力光を含む全ての回折光のv方向の幅は D_0 となる。

以上の結果に基づき不要な回折光が出力光の位置に重ならないようなbの値を求める。はじめに(3.4.9)で $k_1=0$ の時の使用可能なbの値を捜す。aの値を変えた場合、(3.4.9)より全ての回折光はu軸に平行に動くので、bの値を変えたとき出力光がv軸上で重ならないければv軸上以外の位置でも重ならない。そこでv軸上の出力位置について検討する。v軸上の光強度のピークの位置を v^{k_2} とおく。ここで添字 k_2 は(3.4.9)での整数 k_2 である。式(5.2.19)よりbの値が小さくなるほど出力数は多くなることがわかる。それゆえ、bの小さい値から優先的に使用可能とする。bの最小値は2である。bの値は条件(1)を満たすために式(5.2.26)に示す制約を受ける。

$$v_{b_s}^1 > D_0 \quad (5.2.26)$$

b_s は使用可能かどうかを調べるbの値を表す。bの値が大きくなるほど出力光は0次光の位置に近づくからbの最大値は式(5.2.26)の関係を満たす最大の整数となり、使用可能なbの値を捜す範囲は式(5.2.27)となる。

$$2 \leq b_s \leq \text{int}\left(\frac{\pi Q}{16}\right) \quad (5.2.27)$$

また、条件(2)は式(5.2.28)で表される。

$$|v_{b_s}^{k_2} - v_b^1| > D_0 \quad (5.2.28)$$

すなわち、

$$\left| \frac{2k_2-1}{b_s} - \frac{1}{b} \right| > \frac{16}{\pi Q} \quad (5.2.29)$$

ここで、 b はすでに使用可能とわかっている全ての b の値を示す。

回折光の出力位置は k_2 の値が大きくなるほど $(u,v)=(0,0)$ より離れていく。その b の値が使用可能かどうかは、原点より最も離れた出力光の位置 v_2^1 よりも遠い $v_2^{k_2}$ が見つかるまで、 k_2 の値を変えて調べなければならない。 k_2 の最大値は式(5.2.30)を満たす最小値である。

$$v_{b_s}^{k_2} - v_2^1 > D_0 \quad (5.2.30)$$

それゆえ、 k_2 の値を変化させる範囲は式(5.2.31)となる。

$$1 \leq k_2 \leq \text{int}\left(\frac{8b_s}{\pi Q} + \frac{b_s}{4} + \frac{1}{2}\right) + 1 \quad (5.2.31)$$

もし、式(5.2.27)と式(5.2.31)の範囲で式(5.2.29)が成り立つなら、その b の値は $k_1=0$ で使用可能である。

次に(3.4.9)で $k_1 \neq 0$ の時について考える。 b の最小値が2で出力光の v 方向の幅が D_0 であるから、(3.4.10)より出力位置 O と O_{α} の全ては式(5.2.32)で示される範囲にある。

$$\begin{aligned} -\frac{\pi}{4d} - \frac{D_0}{2} \leq u \leq \frac{\pi}{4d} + \frac{D_0}{2} \\ -\frac{\pi}{4d} - \frac{D_0}{2} \leq v \leq \frac{\pi}{4d} + \frac{D_0}{2} \end{aligned} \quad (5.2.32)$$

(3.4.9)より $k_1 \neq 0$ の回折光は $(u,v)=(\pi k_1/d, 0)$ を中心に現れ、 k_1 の値は1または-1のときが式(5.2.32)で示される範囲に最も近づくことがわかる。また、 b の値が2のとき

$k_1 \neq 0$ の回折光は $(u,v)=(\pi k_1/d, 0)$ から最も離れた位置に現れる。すなわち、式(5.2.32)で示される範囲に最も近づく。図5.2.4に $k_1=1$ 、 $b=2$ のときの回折光の出力位置を示す。図5.2.4からわかるように式(5.2.32)で示される範囲に最も近づく場合でも $k_1 \neq 0$ の回折光は式(5.2.32)で示される範囲と重なることはない。したがって、 k_1 の値に関わらず式(5.2.27)と式(5.2.31)の範囲で式(5.2.29)が成り立つなら、その b の値は使用可能である。

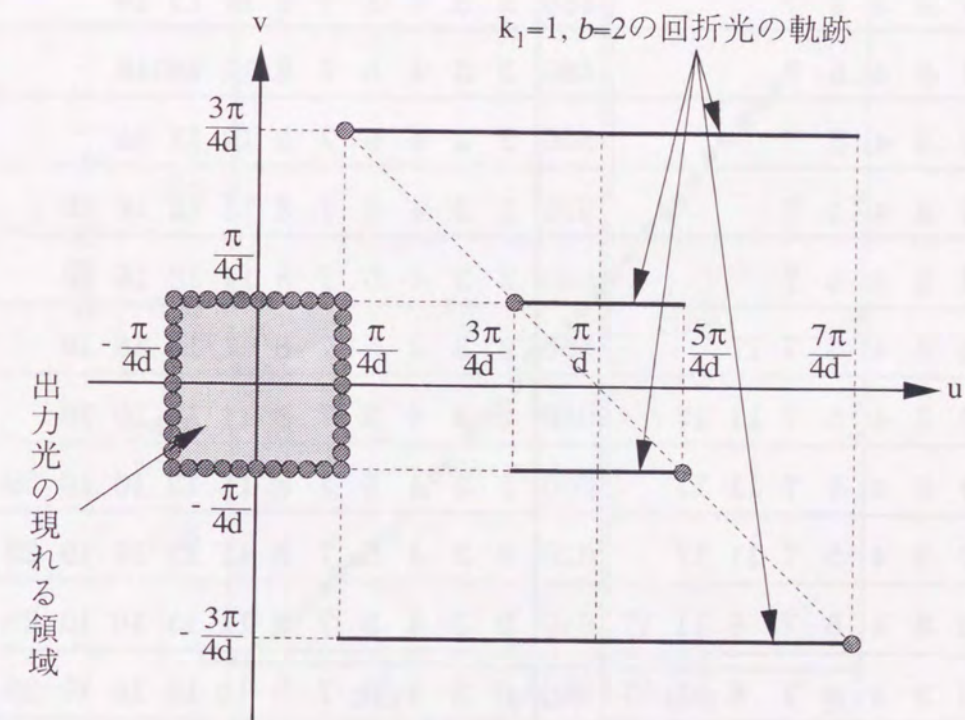


図5.2.4 $k_1=1$ 、 $b=2$ のときの回折光の出力位置

表5.2.1 1入力に割り当てる画素数の平方根Q
の値に対する使用可能なbの値

Q	使用可能なbの値	Q	使用可能なbの値
40	2 3	380	2 3 4 5 7 8 11 13 17
60	2 3 5	400	2 3 4 5 7 8 11 13 17
80	2 3 4 7	420	2 3 4 5 7 8 11 13 16
100	2 3 4 7	440	2 3 4 5 7 8 11 13 16
120	2 3 4 5 7	460	2 3 4 5 7 8 11 13 16
140	2 3 4 5 7	480	2 3 4 5 7 8 11 13 16
160	2 3 4 5 7	500	2 3 4 5 7 8 11 13 16
180	2 3 4 5 7	520	2 3 4 5 7 8 11 13 16 19
200	2 3 4 5 7	540	2 3 4 5 7 8 11 13 16 19
220	2 3 4 5 7 17	560	2 3 4 5 7 8 11 13 16 19
240	2 3 4 5 7 11 17	580	2 3 4 5 7 8 11 13 16 19
260	2 3 4 5 7 11 17	600	2 3 4 5 7 8 11 13 16 19 29
280	2 3 4 5 7 11 17	620	2 3 4 5 7 8 11 13 16 19 29
300	2 3 4 5 7 8 11 17	640	2 3 4 5 7 8 11 13 16 19 29
320	2 3 4 5 7 8 11 17	660	2 3 4 5 7 8 11 13 16 19 29
340	2 3 4 5 7 8 11 17	680	2 3 4 5 7 8 11 13 16 19 29
360	2 3 4 5 7 8 11 17	700	2 3 4 5 7 8 11 13 16 19 29

計算機により使用可能なbの値の算出した。この結果を表5.2.1に示す。この表では1入力に割り当てられる液晶ディスプレイの画素数を $Q \times Q$ とし、各Qに対する使用可能なbの値を示す。この表と式(5.2.19)より画素数 $Q \times Q$ のホログラムに対する出力数を求めることができる。Qの値とスイッチの出力数の関係を図5.2.5に示す。Qの値とスイッチの出力数はほぼ比例していることがわかる。この計算結果より1入力で画素数700 x 700を割り当てると出力数は1016となることがわかった。

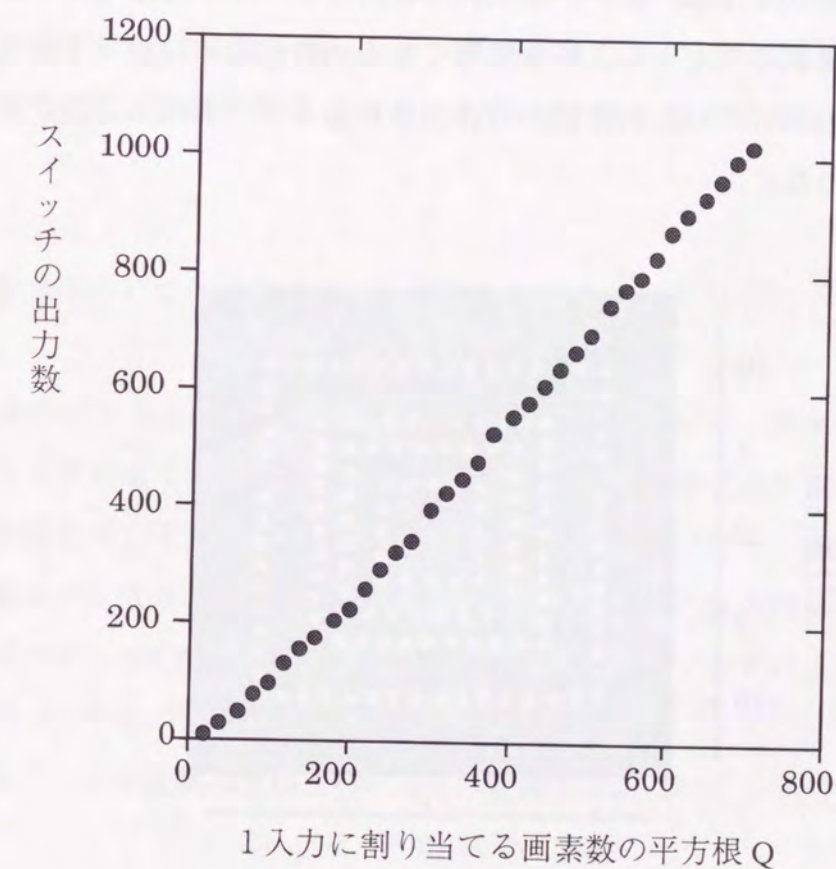


図5.2.5 LCDを用いたホログラム型光スイッチにおける1入力に割り当てる画素数と出力数の関係

5.2.3 計算結果の検証

この節では1入力に割り当てた画素数から図5.2.5に示したスイッチの出力数が得られるかを実験により確認する。実験系は図3.5.1に示したものをを用いた。実験では1入力に80 x 80の画素を割り当てた。すなわち、 $Q=80$ となる。表5.2.1より、使用できる b の値は2、3、4、7であり、式(5.2.19)より出力数は72となる。 a の値は b の値によって決まる出力光の軌跡の上に等間隔に出力位置が並ぶように定めた。図5.2.6は出力光が72カ所の出力位置に順次スイッチングした様子を多重露光によって撮影したものである。出力光の描く4つの正方形はそれぞれの b の値に対応する。図5.2.6には145個の出力光が写っているが、中央の1つが0次光で残りが+1次光と-1次光である。したがって、実際使用できる出力位置は72箇所である。このように1入力に割り当てられた画素数から算出されるスイッチの出力数が実際に得られることがわかった。

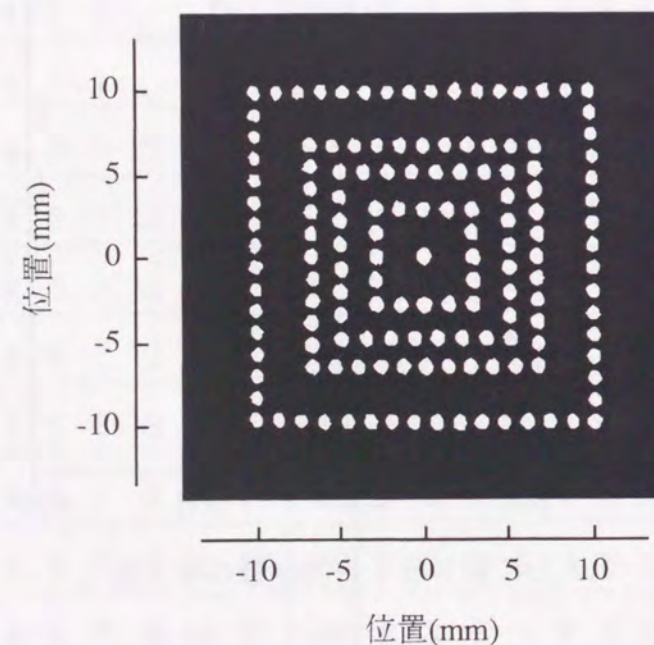


図5.2.6 LCDを用いたホログラム型光スイッチにおいて1入力に画素数80 x 80を割り当てたときの出力位置

5.3 FLC-SLMを用いたホログラム型光スイッチの出力数

本研究で提案したFLC-SLMを用いたホログラム型光スイッチでは、4.3節で述べたように、入力数を増やすにはFLC-SLMのピクセル、制御光源、入力端子を2次元に配列すればよい。これに対して出力数は、液晶シャッターアレイにより選択された2つの制御光によって生じるホログラムのパターン数によって決まるので、グレーティングによる制御光の分割数を増やすことでスイッチの出力数を増やすことができる。しかし、FLC-SLMにホログラムを書き込むにはある程度の制御光の強度が必要であるため、制御光の分割数を増やすと制御光源のパワーも大きくしなければならない。つまり、スイッチの出力数は制御光源のパワーによって制約を受ける。そこで、この節ではFLC-SLMを用いたホログラム型光スイッチの実現可能な規模を明らかにするために、制御光源のパワーとスイッチの出力数の関係を求める。

5.3.1 制御光源のパワーと制御光の分割数との関係

制御光源のパワーとスイッチの出力数の関係を求めるには、制御光源のパワーとグレーティングによる制御光の分割数の関係を求め、制御光の分割数とスイッチの出力数の関係を求める。この2つの関係より制御光源のパワーとスイッチの出力数の関係が明らかになる。制御光の分割数とスイッチの出力数の関係についてはすでに4.7節で述べた。5.3.1では制御光源のパワーとグレーティングによる制御光の分割数の関係について述べる。

ここではフーリエ変換は式(5.3.1)のように定義する。

$$H(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) \exp [-j2\pi(xu+yv)] dx dy \quad (5.3.1)$$

但し、

$$u = \frac{X}{\lambda f}$$

$$v = \frac{Y}{\lambda f}$$

ここでXとYは出力面での位置座標、 λ は光の波長、 f はレンズの焦点距離を表す。

制御光源からの出射光はガウシアンビームとする。その電界強度は式(5.3.2)で表される。

$$g_d(x, y) = A \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_c^2}\right) \quad (5.3.2)$$

ここで r_c を制御光の半径とする。この半径は電界強度がピークの $\exp(-1)$ となる場所である。4.5節で述べたようにグレーティングは分割された全てのビームの強度が等しくなるように設計されている。ここでは分割数を $2N+1 \times 2N+1$ 本とする。グレーティングのパターンの1周期を $h(x, y)$ と表し、その大きさを $2d \times 2d$ とすると、グレーティングのパターンは式(5.3.3)で表される。

$$d_g(x, y) = h(x, y) * \left[\text{comb}\left(\frac{x}{2d}\right) \text{comb}\left(\frac{y}{2d}\right) \right] \quad (5.3.3)$$

ここで $*$ は重畳積分を表す。関数 $\text{comb}(x)$ は式(5.3.4)のように定義する。

$$\text{comb}(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - n) \quad (5.3.4)$$

グレーティングを通った制御光の電界 S_1 は式(5.3.5)となる。

$$S_1(x, y) = g_d(x, y) h(x, y) * \left[\text{comb}\left(\frac{x}{2d}\right) \text{comb}\left(\frac{y}{2d}\right) \right] \quad (5.3.5)$$

図4.3.1に示すようにグレーティングと液晶シャッターアレイはそれぞれレンズL1の前側焦点面と後側焦点面にあるため、液晶シャッターアレイ上での制御光の電界 $S_2(u, v)$ は $S_1(x, y)$ をフーリエ変換したものとなり、式(5.3.6)となる。

$$\begin{aligned} S_2(u, v) &= G_d(u, v) * \left[H(u, v) 4d^2 \text{comb}(2du) \text{comb}(2dv) \right] \\ &= G_d(u, v) * \left[H(u, v) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(u - \frac{m}{2d}, v - \frac{n}{2d}\right) \right] \end{aligned} \quad (5.3.6)$$

ここで $G_d(u, v)$ は $g_d(x, y)$ をフーリエ変換したものであり、式(5.3.7)で表される。

$$G_d(u, v) = A \pi r_c^2 \exp\{-\pi^2 r_c^2 (u^2 + v^2)\} \quad (5.3.7)$$

グレーティングは制御光を強度が等しい $2N+1 \times 2N+1$ 本の光ビームに分割するように設計されているので、式(5.3.6)は式(5.3.8)となる。

$$S_2(u, v) = G_d(u, v) * \left[H_0 \sum_{m=-N}^N \sum_{n=-N}^N \delta\left(u - \frac{m}{2d}, v - \frac{n}{2d}\right) \right] \quad (5.3.8)$$

ここで H_0 は定数である。液晶シャッターアレイ上では隣り合うビームは十分に離れており、その電界が互いに影響を及ぼさないものとする。液晶シャッターアレイは

信号光の出力位置を決めるため2本のビームを選択する。液晶シャッターアレイで選択された制御光の電界 $S_3(u,v)$ は式(5.3.9)となる。

$$S_3(u, v) = G_d(u, v) * \left[H_0 \left\{ \delta \left(u - \frac{m_1}{2d}, v - \frac{n_1}{2d} \right) + \delta \left(u - \frac{m_2}{2d}, v - \frac{n_2}{2d} \right) \right\} \right] \quad (5.3.9)$$

ここで m_1 、 m_2 、 n_1 、 n_2 は開いたシャッターの位置を表す。この2つの制御光はレンズを通り、FLC-SLMに到達する。液晶シャッターアレイとFLC-SLMは図4.3.1に示すようにそれぞれレンズL2の前側焦点面と後側焦点面にあるため、FLC-SLM上の電界 $S_4(x,y)$ は $S_3(u,v)$ をフーリエ変換したものであり、式(5.3.10)となる。

$$S_4(x, y) = H_0 A \exp \left(- \frac{x^2 + y^2}{r_c^2} \right) \times \left[\exp \left\{ -j \frac{\pi}{d} (m_1 x + n_1 y) \right\} + \exp \left\{ -j \frac{\pi}{d} (m_2 x + n_2 y) \right\} \right] \quad (5.3.10)$$

したがって、FLC-SLM上の制御光の強度分布 $I_4(x,y)$ は式(5.3.11)となる。

$$I_4(x, y) = S_4 S_4^* = 2 H_0^2 A^2 \exp \left\{ - \frac{2(x^2 + y^2)}{r_c^2} \right\} \left[1 + \cos \left\{ \frac{\pi}{d} (\Delta m x + \Delta n y) \right\} \right] \quad (5.3.11)$$

ここで S_4^* は S_4 と複素共役な関数である。また、 Δm と Δn は式(5.3.12)と(5.3.13)で与えられる。

$$\Delta m = m_1 - m_2 \quad (5.3.12)$$

$$\Delta n = n_1 - n_2 \quad (5.3.13)$$

式(5.3.11)が波長の項を含まないのでFLC-SLM上の干渉縞は制御光源の波長変動の影響を受けないことがわかる。次に計算を容易にするために図5.3.1のように x, y 座標を s 軸が干渉縞に対して垂直な s, t 座標に変換する。すると式(5.3.11)は式(5.3.14)となる。

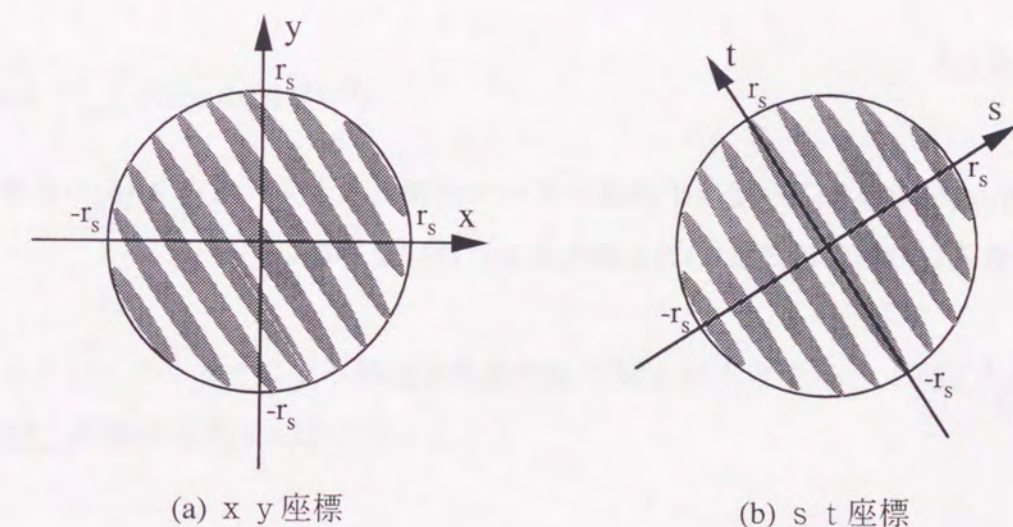


図5.3.1 x, y 座標から s, t 座標への変換

$$I_4(s, t) = 2H_0^2 A^2 \exp\left\{-\frac{2(s^2+t^2)}{r_c^2}\right\} \left\{1 + \cos\left(\frac{\pi}{d}\sqrt{\Delta m^2 + \Delta n^2} s\right)\right\} \quad (5.3.14)$$

また、信号光は式(5.3.15)で表されるガウシアンビームとする。

$$g_s(s, t) = B \exp\left\{-\frac{s^2+t^2}{r_s^2}\right\} \quad (5.3.15)$$

ここで r_s は信号光の半径である。信号光をスイッチングするには干渉縞を式(5.3.16)の領域に書き込まなければならない。

$$s^2 + t^2 \leq r_s^2 \quad (5.3.16)$$

式(5.3.14)より $s=0$ のところでは干渉縞のピークが現れるから、式(5.3.16)の領域に干渉縞を書き込むためには式(5.3.17)を満たさなければならない。

$$I_4(0, r_s) \geq T_h \quad (5.3.17)$$

ここで T_h はFLC-SLMに干渉縞を書き込むに必要な光強度の閾値である。そして制御光源が最小のパワーでスイッチングするときの条件が式(5.3.18)である。

$$I_4(0, r_s) = T_h \quad (5.3.18)$$

式(5.3.14)より式(5.3.18)は式(5.3.19)となる。

$$4H_0^2 A^2 \exp\left\{-\frac{2r_s^2}{r_c^2}\right\} = T_h \quad (5.3.19)$$

液晶シャッターアレイを通ったビームの1つの電界 $g_{SLM}(x, y)$ は式(5.3.10)よりFLC-SLM上で式(5.3.20)となることがわかる。

$$g_{SLM}(x, y) = H_0 A \exp\left\{-\frac{x^2+y^2}{r_c^2} - j\frac{\pi}{d}(m_1 x + n_1 y)\right\} \quad (5.3.20)$$

このビーム $g_{SLM}(x, y)$ のパワー P_{SLM} は式(5.3.21)となる。

$$P_{SLM} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_{SLM} g_{SLM}^* dx dy = \frac{H_0^2 A^2 \pi r_c^2}{2} \quad (5.3.21)$$

ここでグレーティングによる制御光の分割数を $M \times M$ 本とすると、制御光源のパワー P_c と P_{SLM} の関係は式(5.3.22)となる。

$$\alpha P_c = M^2 P_{SLM} \quad (5.3.22)$$

ここで α ($0 \leq \alpha \leq 1$)は全てのシャッターを開いたときの制御光源からFLC-SLMまでの光学系の損失係数である。 $\alpha=1$ のとき制御系は損失がない。また、式(5.3.8)でグレーティングは制御光を $2N+1 \times 2N+1$ 本に分割すると定めたので、式(5.3.23)の関係が成り立つ。

$$M=2N+1 \quad (5.3.23)$$

式(5.3.19)、(5.3.21)、(5.3.22)より式(5.3.24)と(5.3.25)が導かれる。

$$P_c = \frac{T_h M^2 \pi r_c^2}{8\alpha} \exp\left(\frac{2r_s^2}{r_c^2}\right) \quad (5.3.24)$$

$$M = \text{odd}\left[\sqrt{\frac{8\alpha P_c}{T_h \pi r_c^2}} \exp\left(-\frac{r_s^2}{r_c^2}\right)\right] \quad (5.3.25)$$

ここで関数odd[]は[]内の値を越えない最大の奇数を与える。これはグレーティングの設計法によりMの値が奇数となるためである。

式(5.3.24)より式(5.3.26)が導かれる。

$$\frac{dP_c}{dr_c} = \frac{T_h M^2 \pi}{4\alpha} \left(r_c - \frac{2r_s^2}{r_c}\right) \exp\left(\frac{2r_s^2}{r_c^2}\right) \quad (5.3.26)$$

式(5.3.26)より r_c が式(5.3.27)のとき P_c の値が最小となることがわかる。

$$r_c = \sqrt{2} r_s \quad (5.3.27)$$

すなわち、ビーム半径 r_c が式(5.3.27)のときスイッチングに必要な制御光源のパワーが最小になる。

5.3.2 制御光源のパワーとスイッチの出力数の関係

5.3.1で制御光源のパワーとグレーティングの分割数との関係が明らかになった。また、グレーティングの分割数とスイッチの出力数の関係は式(4.7.1)で与えられる。この節ではこれらの関係と実験値に基づいて制御光源のパワーとスイッチの出力数の関係を算出する。

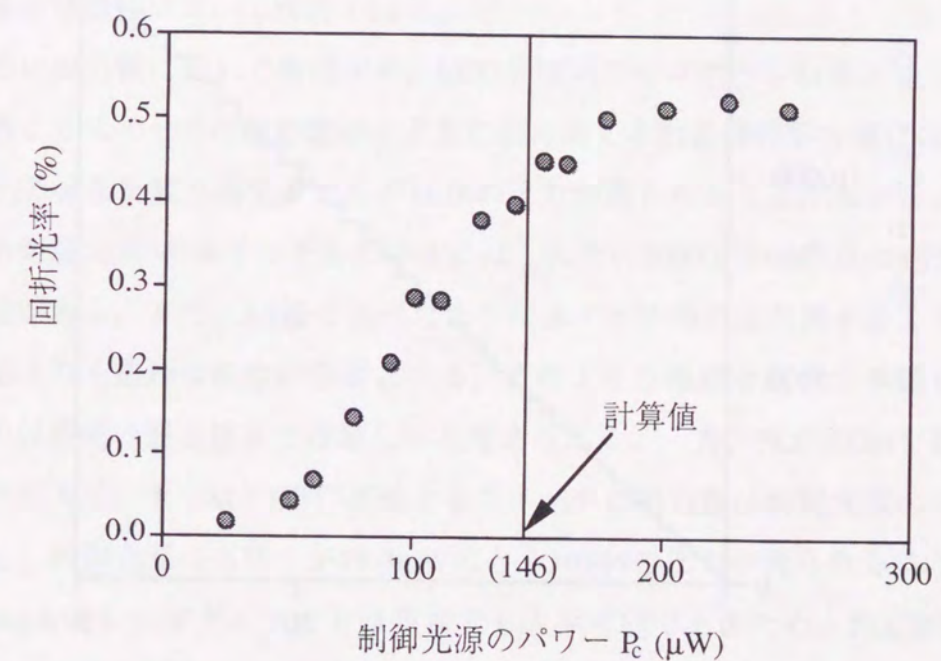


図5.3.2 FLC-SLMを用いたホログラム型光スイッチにおける制御光源のパワーと1次回折光の回折効率の関係

まず、図4.3.1のスイッチ構成で1入力の場合に相当する図4.6.1に示す実験系を構成し、スイッチの出力数の算出に必要な式(5.3.25)の中の定数の測定を行い、次に式(5.3.24)より算出される制御光源のパワーで実際にスイッチングが可能であることを確認するために制御光源のパワーと1次回折光の回折効率の関係を測定した。この実験系ではグレーティングによる制御光の分割数は 7×7 ($M=7$)であった。測定の結果、FLC-SLMの閾値 T_h は $1.06 \mu\text{W}/\text{mm}^2$ 、制御系の損失 α は0.192、制御光のビーム半径 r_c は $625 \mu\text{m}$ 、信号光のビーム半径 r_s は $495 \mu\text{m}$ であった。これらの値と式(5.3.24)よりスイッチングに必要な制御光源のパワーは $146 \mu\text{W}$ と考えられる。図5.3.2に制御光源のパワーに対する1次回折光の回折効率の測定結果を示す。計算値の $146 \mu\text{W}$ あたりで1次回折光の回折効率が飽和しているのがわかる。この結果より式(5.3.24)から算出される制御光源のパワーでスイッチングが可能であることがわかった。

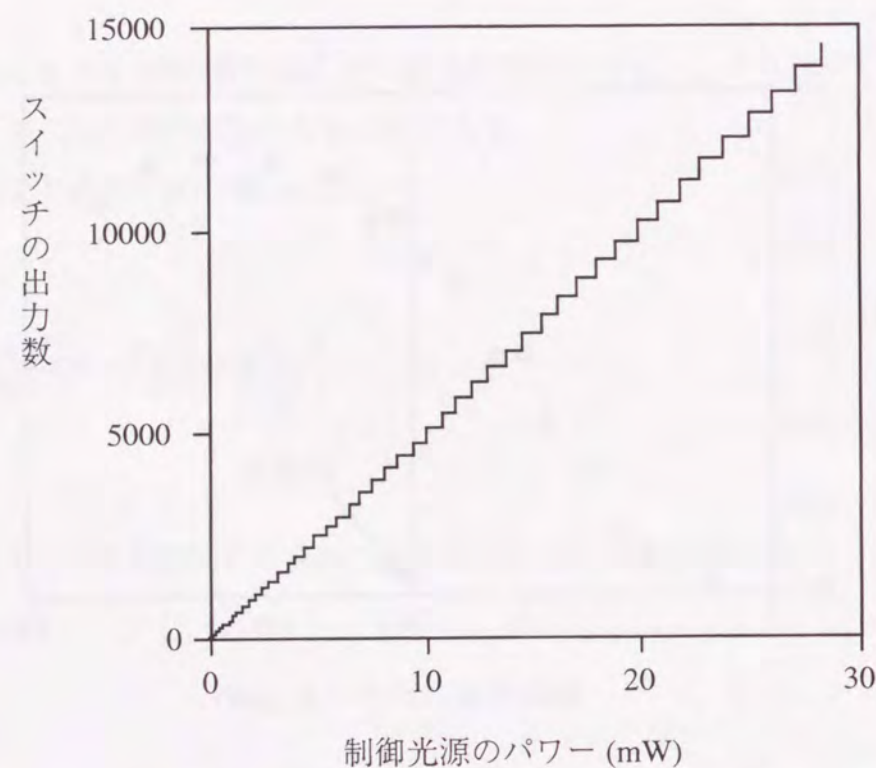


図5.3.3 FLC-SLMを用いたホログラム型光スイッチにおける制御光源のパワーと出力数の関係

次に、実験値に基づいて制御光源のパワーとスイッチの出力数の関係を求める。損失係数 α 、FLC-SLMの閾値 T_h 、信号光のビーム半径 r_s は実験値を用いる。式(5.3.27)より制御光のビーム半径 r_c は $700 \mu\text{m}$ とする。式(5.3.25)と式(4.7.1)より制御光源のパワーとスイッチの出力数の関係が明らかになる。これを図5.3.3に示す。スイッチの出力数は制御光源のパワーにほぼ比例し、制御光源のパワーが 19.9mW のときにスイッチの出力数が10168個になることがわかった。

5.4 考察

現在の交換システムでは少ない場合で数千、多い場合で10万以上の端末を収容している。ここでは入出力数10000を目途に5.2節、5.3節の結果を踏まえて本研究で提案したホログラム型光スイッチによって、そのような大規模なスイッチが実現できるか、その可能性について検討を行う。

はじめに出力数に関して検討する。LCDを用いたホログラム型光スイッチでは5.2節の結果よりスイッチの出力数は1入力に割り当てる画素数の平方根にほぼ比例し、 700×700 の画素を割り当てることで1016の出力が得られることがわかった。したがって、出力数10000のスイッチをつくるには1入力に 7000×7000 程度の画素を割り当てる必要がある。また、3.6節で述べたようにスイッチの入出力数を多くするには従来のLCDよりも微細な画素が必要となる。このような微細な画素を多数もつLCDをつくるのは現在の製造技術では難しいと考えられる。一方、FLC-SLMを用いたホログラム型光スイッチでは5.3節の結果よりスイッチの出力数は制御光源のパワーにほぼ比例し、制御光源のパワーが 19.9mW のとき10168の出力が得られることがわかった。 19.9mW のレーザダイオードは現在でも入手可能であるため、FLC-SLMをホログラム媒体に用いた場合、出力数10000のスイッチの実現は十分可能と考えられる。

入力数に関してはLCDを用いたスイッチ、FLC-SLMを用いたスイッチ共に入力ポートやデバイスを2次元に配列することで入力数を増大させることができ、原理的には同じである。

以上のように双方の制約要因を比較するとFLC-SLMを用いたホログラム型光スイッチの方が大規模なスイッチの実現に適しているといえる。ただ、実際にホログラム型光スイッチをつくる場合、FLC-SLMを用いたスイッチでは制御用の光学系が必要となりLCDを用いたスイッチに比べて構成が複雑である。多数の光デバイスを配列するには現在の実装技術では十分でないため、実装の面では部品点数の多いFLC-SLMを用いたスイッチの方が不利であり、今後の実装技術の進展が待たれる。また、3.5節のLCDを用いたスイッチの実験では平均損失が19.3dB、損失のバラツキが3dB以内であったのに対して、4.8節のFLC-SLMを用いたスイッチの実験では4入力の平均損失は33dB、各入力の損失のバラツキはいずれも23dB以上と大きい。これはFLC-SLMの干渉縞の記録が不十分であることが大きな原因で、LCDと比べてFLC-SLMはホログラム媒体として改善の必要がある。

そのほかに、双方のホログラム型光スイッチについていえることであるが、入出力数が大きくなるとスイッチの体積が増大する。これはデバイスを2次元に配列するためにスイッチの断面積が大きくなるだけでなく、スイッチの長さも大きくなるためである。スイッチは近軸近似の成り立つ範囲でつくられることを前提とした構成になっており、断面積が大きくなるとレンズの収差を抑えるためにレンズの焦点距離を長くしなければならず、スイッチの長さも大きくなる。したがって、スイッチの体積を抑えるために2次元に配列されるデバイスは高密度に実装することが望ましい。

5.5 本章のまとめ

本章では最終的な目的である交換システムに使用されるような大規模な光スイッチの実現の可能性について、本研究で提案した2つのタイプのホログラム型光スイッチについてシミュレーションにより検討した。

5.2節ではLCDを用いたホログラム型光スイッチについて検討した。はじめに3.4節の結果を踏まえてホログラムとして使用したストライプパターンのピッチに対する

スイッチの出力数を算出した。次に不要な回折光が出力位置に重ならないようなストライプパターンのピッチを求め、1入力に割り当てられるLCDの画素数とスイッチの出力数の関係を明らかにした。その結果、スイッチの出力数は1入力に割り当てる画素数の平方根にはほぼ比例し、700 x 700の画素を割り当てることで1016の出力が得られることがわかった。

5.3節ではFLC-SLMを用いたホログラム型光スイッチについて検討した。まず、制御光源のパワーとグレーティングによる制御光の分割数の関係を求め、次に4.7節で明らかにした制御光の分割数とスイッチの出力数の関係と実験値に基づいて制御光源のパワーとスイッチの出力数の関係を明らかにした。その結果、スイッチの出力数は制御光源のパワーにはほぼ比例し、制御光源のパワーが19.9mWのとき10168の出力が得られることがわかった。

最後に2つのタイプのホログラム型光スイッチの規模拡張性について比較検討した。その結果、入力数の拡張については双方のスイッチとも原理的には同じであるが、出力数の拡張については上述の制約要因の点でホログラム媒体にLCDを用いるよりもFLC-SLMを用いた方が出力数の拡張が容易であり、交換システムで使用されるような大規模な光スイッチを構成するのにはFLC-SLMを用いたホログラム型光スイッチの方が適していることがわかった。

以上の結果より、交換システムで使用されるような大規模な光スイッチの実現はFLC-SLMを用いたホログラム型光スイッチにより原理的には可能であることがわかったが、実際にそのような大規模なスイッチをつくるためには多数の光デバイスを2次元に配列する実装技術やスイッチの損失とそのバラツキの低減のためのFLC-SLMの改善などが今後の課題である。

第6章 結論

6.1 本研究の成果

通信のマルチメディア化に伴う飛躍的な通信量の増大に対応できる交換システムを実現するために光技術の適用が考えられており、光スイッチング方式は空間分割スイッチング、時分割多重スイッチング、周波数分割多重スイッチングの3つに大別される。本研究では、スイッチの制御が信号速度に関係なく容易なこと、スイッチング速度が低速でよいこと等、比較的要求条件の緩いことから空間分割スイッチング方式を選んだ。この方式は大規模な光スイッチの実現が課題となっているが、本研究では実現手段として、少ないハードウェア量で大規模な光スイッチを実現できること、スイッチング速度が比較的速いこと、駆動電圧や消費電力が低いことから液晶空間光変調器を用いたホログラム型光スイッチを採用し、検討を行った。本論文は大規模な光スイッチの実現を目的とした液晶空間光変調器を用いたホログラム型光スイッチに関する研究をまとめたものである。本研究で得られた成果を以下に示す。

(1) LCDを用いたホログラム型光スイッチの構成を提案した。このスイッチではLCD上に表示したパターンによって信号光を回折してスイッチングを行う。提案したスイッチ構成ではLCDと出力面をそれぞれレンズの前側焦点面と後側焦点面に置くことで、入力位置に関わらずホログラムのパターンと出力位置を1対1に対応させた。これにより必要なホログラムの数を減らすことができ、不要な回折光の出力位置からの分離が容易となった。

スイッチングに用いるホログラムには計算時間がかからず、多くのパターンを容易に生成できる単純なストライプパターンを採用し、シミュレーションによりホログラムのパターンとその出力位置の関係を求めた。そして、実験では1 x 64スイ

チ、2 x 32スイッチを構成し、提案したホログラム型光スイッチの動作を確認した。

(2) FLC-SLMは画素をもたず、表示するパターンが画素の大きさや形状の制約を受けないため、LCDよりも多様なパターンの表示ができる。したがって、FLC-SLMを用いたホログラム型光スイッチはLCDを用いたホログラム型光スイッチよりも多くの出力数が得られる可能性がある。また、強誘電性液晶はネマチック液晶と比べて電界に対する応答速度が速く、より高速なスイッチングが可能である。このような特長をもつFLC-SLMを用いたホログラム型光スイッチの構成を提案した。このスイッチでは制御光によって生じる干渉縞をFLC-SLMに記録し、この記録された干渉縞によって信号光を回折することでスイッチングを行う。提案した光スイッチではパワーの小さな制御光源で大規模な光スイッチの制御を可能とするために、各入力に1つの制御光源を割り当てる構成とした。このスイッチの制御系ではグレーティングにより制御光を分割し、液晶シャッターアレイにより2つの制御光を選択することで出力位置を決めるが、分割された制御光の強度のばらつきがスイッチの損失の原因となるため、この関係を定量的に求めた。そして光強度の均一な制御光アレイをつくるためのグレーティングの設計を行った。また、不要な回折光によるクロストークを避けるための出力位置の決め方を考案し、グレーティングによる制御光の分割数とスイッチの出力数の関係を明らかにした。

実験ではホログラム媒体としてFLC-SLMを用い、制御光源としてレーザダイオードを用いてスイッチングが可能であること示し、出力数1000程度のスイッチができることを確認した。また、提案したスイッチの制御系では各入力に1つの制御光源を割り当てるが、この制御系の機能を確認するために4 x 1204スイッチを構成し、その動作を確認した。また、4 x 1204スイッチの損失とクロストークの測定を行い、これらの結果より提案したホログラム型光スイッチで大規模な光スイッチを実現するには、損失とクロストークの低減が必要なことが明らかとなった。

(3) 最終的な目的である交換システムに使用されるような大規模な空間分割光スイッチの実現の可能性を、提案した2つのタイプのホログラム型光スイッチについて

シミュレーションにより検討を行った。

LCDを用いたホログラム型光スイッチでは、出力数の制約要因である1入力に割り当てられるLCDの画素数とスイッチの出力数の関係を明らかにした。この結果、スイッチの出力数は1入力に割り当てられる画素数の平方根にほぼ比例し、1入力に700 x 700の画素を割り当てることで出力数1016が得られることがわかった。

FLC-SLMを用いたホログラム型光スイッチでは、実験値に基づいて出力数の制約要因である制御光源のパワーとスイッチの出力数の関係を明らかにした。この結果、スイッチの出力数は制御光源のパワーにほぼ比例し、制御光源のパワーが19.9mWのときに出力数10168が得られることがわかった。

2つのタイプのホログラム型光スイッチの規模拡張性について比較検討した。その結果、入力数の拡張性については双方のスイッチとも原理的には同じであるが、出力数の拡張性については上述の制約要因の点でホログラム媒体にLCDを用いるよりもFLC-SLMを用いた方が出力数の拡張が容易であり、交換システムで使用されるような大規模な光スイッチを構成するのにはFLC-SLMを用いたホログラム型光スイッチの方が適していることがわかった。

6.2 展望と課題

本論文の締めくくりとして、光交換システムが実用可能になった時期を想定して通信網の将来像を描き、その中で本研究の成果の適用領域を考察する。また、そのために解決しなくてはならない課題について述べる。

第1章で述べたように、幹線系のみならず端末と交換システムを結ぶ加入者系にも光ファイバ伝送路が敷設され、多様な通信サービスが利用される時代では通信網の構成がどのようなになるか不明な点も多いが、端末を直接収容する加入者系交換機と、加入者系交換機間を接続する中継系交換機とで構成される階層構造は採用されることが考えられる。また、マルチメディア時代では通信網の管理者が用意したサービ

スを利用するだけでなく、利用者が考案したサービスが普及することも考えられ、より利用者主導で通信サービスが変わっていくと考えられる。このような状況では通信サービスや利用状況等の環境の急激な変化に対応できる交換システムが求められる。

本研究の適用について、はじめに加入者系について検討を行う。加入者系通信網の特徴は加入者が広い領域に分散して存在するために1本の加入者系伝送路に接続される端末は1台ないし数台と少数であり、信号は時分割多重されていない、または多重度が非常に小さいことである。したがって、加入者系交換機では時分割多重スイッチを用いた場合は大規模な多重化スイッチが必要なものに対して、空間分割スイッチを用いた場合は、信号が時分割多重されていたとしても小規模な多重化スイッチでよい。そして、空間分割スイッチを本研究のホログラム型スイッチ等の光偏向素子を用いたスイッチ構成にすることで空間分割スイッチの欠点とされる大きなハードウェア量を抑制することができ、多重化スイッチを含めた時分割多重スイッチに比べてハードウェア量で遜色ないものになると考えられる。また、空間分割スイッチは接続されている回線が1組の端末間の通信に占有されており、一旦接続されると信号速度や変調方式に関わらず通信が可能のため、大きな通信量を必要とするサービスが急速に普及する、等の急激な環境変化に対して比較的柔軟に対応できると考えられる。

次に中継系について検討を行う。中継系通信網の特徴は交換機間を結ぶ中継回線を有効利用するために非常に多くの端末からの信号を多重して送っていることである。現在は信号を時分割多重しているが、将来は周波数分割多重を併用することも考えられている。中継回線の有効利用のためには将来も信号の時分割多重は行われると考えられ、この多重度の大きな信号を空間分割スイッチで制御するために分離や多重をするには大規模な多重化スイッチが必要になる。これに対して、時分割多重スイッチを用いた場合は交換機間を結ぶ中継系交換機の入線と出線は少数であるために小規模な多重化スイッチでよい。したがって、中継系交換機では空間分割スイッチよりも時分割多重スイッチを用いた方がよいと考えられる。

以上のように本研究のホログラム型光スイッチは加入者系交換機に適用することで、その効果を発揮すると考えられる。

最後に本研究の成果が実用システムに適用されるために、解決しなければならない課題について述べる。本研究で提案した液晶空間光変調器を用いたホログラム型光スイッチは光部品を2次元に配列することで規模の拡張を行う。しかし、現在の光部品の実装技術では大規模な集積ができないのが実情であり、今後、光部品を精度よく2次元集積する技術の進展が望まれる。また、実用システムの中で使用するにはホログラム記録媒体の改善が必要であり、分解能や応答速度の他に信頼性を含めた特性向上のための研究開発が重要になる。さらに、本研究のFLC-SLMを用いたホログラム型光スイッチの処理能力を向上させるには複数の入力を同時に制御する方法の検討も必要になる。そして、将来の動画通信の普及による通信量の飛躍的増大に対応するには2次元情報をそのまま伝送・交換する並列画像通信等、現在のデジタル通信とは異なった通信技術の研究も必要になるであろう。

将来の通信網は生活や経済活動において、より一層重要性を増すと考えられるが、そのような通信網を支える技術に本論文の研究成果が多少なりとも貢献できれば幸いである。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、懇切なる御指導、御鞭撻を賜りました大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻 白藤純嗣教授に謹んで感謝の意を表します。

また、本論文に対して有益な御助言、御教示を頂きました大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻 佐々木孝友教授、大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻 池田博昌教授、大阪大学大学院工学研究科物質・生命工学専攻 一岡芳樹教授に厚く御礼申し上げます。

また、本論文に対して有益な御意見、御検討を頂きました大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻 松浦虔士教授、熊谷貞俊教授、辻毅一郎教授、青木亮三教授、大阪大学レーザー核融合研究センター 山中龍彦教授、中塚正大教授に厚く御礼申し上げます。

本研究は、筆者が日本電信電話株式会社における研究業務の一環として担当したものであり、多くの方々に御指導と御協力を頂きました。本研究の機会を与えて頂き、御指導、御鞭撻を賜りました研究開発本部 青木利晴本部長、ネットワーク部 石川宏部長、NTTアドバンステクノロジー株式会社 内山徹氏（元NTT交換システム研究所伝達システム研究部長）、株式会社日立製作所 江川哲明氏（元NTT交換システム研究所伝達システム研究部長）、NTTヨーロッパ 富田修二氏（元NTT交換システム研究所伝達システム研究部長）、ネットワークサービスシステム研究所 鈴木滋彦所長、NTTエレクトロニクステクノロジー株式会社 千葉由一氏（元ネットワークサービスシステム研究所伝達システム研究部長）、ネットワークサービスシステム研究所伝達システム研究部 秋山延義部長に厚く感謝の意を表します。

本研究を遂行するに当たり直接の上司として御指導いただきました光ネットワークシステム研究所光通信研究部 小林郁太郎部長、ネットワークサービスシステム研究所 行松健一主席研究員、松永亨主幹研究員、山口正泰主幹研究員、渡部直也主幹研究員、平林克彦主幹研究員に心から感謝致します。

本研究を遂行する過程でデバイスの面から御指導、御協力を頂きました光エレクトロニクス研究所 黒川隆志主幹研究員、システムエレクトロニクス研究所 福島誠治主任研究員、光エレクトロニクス研究所 伊藤敏夫研究主任に厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり御協力、御助言を頂きました基礎研究所 中野秀俊主任研究員、ネットワークサービスシステム研究所 平松淳主任研究員、柳谷雅之研究主任、山本剛社員、NTTアドバンステクノロジー株式会社 照屋英雄氏、三宅泰世氏に厚く御礼申し上げます。また、本研究に関する資料作成において御協力いただきました浜屋芳実嬢、酒井淳子嬢に心から感謝致します。

参考文献

- [1] 木下研作, "マルチメディアLANサービス," NTT R&D, 43, 189-196 (1994).
- [2] 富永英義, "B-ISDN入門," オーム社, 1992.
- [3] H. Inose, "An introduction to digital integrated communications systems," Univ. of Tokyo Press, 1979.
- [4] 秋山稔, "広帯域時代を迎えて," 信学誌, 74, 1142-1145 (1991).
- [5] 石原広司, "アクセス系設備の現状と今後の展望," NTT R&D, 43, 143-152 (1994).
- [6] 濃沼健夫, 高橋達郎, "ATMノードシステム技術," NTT R&D, 42, 275-282 (1993).
- [7] 宮保憲治, 土井幸浩, 平野美貴, 高木康志, "ATM交換システム構成技術," NTT R&D, 42, 283-296 (1993).
- [8] T. Egawa, K. Yukimatsu, and K. Yamasaki, "Recent research trends and issues in photonic switching technologies," NTT Review, 5, 30-37 (1993).
- [9] 石川宏, 行松健一, "光スイッチング入門," 電気通信協会, 1993.
- [10] 秋丸春夫, 池田博昌, "現代交換システム工学," オーム社, 1989.
- [11] R. V. Schmidt and L. L. Buhl, "Experimental 4 x 4 optical switching network," Electron. Lett. 12, 575-577 (1976).
- [12] M. Kondo, Y. Ohta, M. Fujiwara, and M. Sakaguchi, "Integrated optical switch matrix for single-mode fiber networks," IEEE J. Quantum Electron. 18, 1759-1765 (1982).
- [13] P. Granstrand, B. Stoltz, L. Thylen, K. Bergvall, W. Doldissen, H. Heinrich, and D. Hoffmann, "Strictly nonblocking 8 x 8 integrated optical switch matrix," Electron. Lett. 22, 816-818 (1986).
- [14] 近藤充和, 小松啓郎, 鈴木修司, 三橋真成, 太田義徳, "LiNbO₃ 8x8 マトリクス光スイッチ," 昭61信学光・電波部門全大, 289.
- [15] 長瀬亮, 姫野明, 加藤邦治, 奥野将之, 行松健一, 河内, 正夫 "駆動回路をハイブリッド集積した石英導波路型8x8マトリクス光スイッチモジュール," 信学技報OQE93-34, 1993.

- [16] 石田宏司, 井上宏明, "化合物半導体光スイッチ," 信学技報OSW88-10, 1988.
- [17] C. Burke, M. Fujiwara, M. Yamaguchi, H. Nishimoto, and H. Honmou, "Studies on a 128 line photonic space division switching network using LiNbO₃ switch matrices and optical amplifiers," Topical Meeting on Photonic Switching (PS'91), FA4-1, 1991.
- [18] T. Matsunaga, K. Kikuchi, and M. Ikeda, "Optical space division switching system using laser diode optical switches," International Switching Symposium (ISS'87), C12.3.1-5, 1987.
- [19] T. Matsunaga, M. Yamaguchi, and M. Okuno, "Photonic SD-switching for subscriber network in B-ISDN," Topical Meeting on Photonic Switching (PS'90), 13C-1, 1990.
- [20] H. Inoue, T. Kato, Y. Sasaki, K. Ishida, K. Mizuishi, and E. Amada, "InP based 4 x 4 optical switch module and its application to ATM switching," Topical Meeting on Photonic Switching (PS'89), FA4-1, 1989.
- [21] R. Langenhorst, M. Eiselt, W. Pieper, G. Grobkopf, R. Ludwig, L. Kuller, E. Dietrich, and H. G. Weber, "Fiber loop optical buffer," J. Lightwave Technol. 14, 324-335 (1996).
- [22] M. Kondo, K. Komatsu, Y. Ohta, S. Suzuki, and K. Nagashima, "High-speed optical time switch with integrated optical 1 x 4 switches and single-polarisation fibre delay lines," 4th International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (IOOC'83), 29D3-7, 1983.
- [23] T. Matsunaga and M. Ikeda, "Experimental application of LD switch modules to 256 Mb/s optical time switching," Electron. Lett. 21, 945-946, (1985).
- [24] H. Goto, K. Kobayashi, Y. Ohta, K. Nagashima, Y. Odagiri, M. Kondo, S. Suzuki, and K. Komatsu, "An experimentation optical time-division digital switching using bistable laser diodes and optical switches," IEEE Global telecommunications conference (GLOBECOM'84), 26.4, 1984.
- [25] 村上孝三, 下江敏夫, 黒柳智司, 六川裕幸, 清野實, 女鹿田直之, 小田川哲史, "高速時分割型光交換システムの構成法," 信学論(B-1), J73-B-I, 751-759, (1990).
- [26] Y. Shimazu and M. Tsukada, "Ultrafast photonic ATM switch with optical output

- buffers," J. Lightwave Technol. 10, 265-272 (1992).
- [27] G. Grosskopf, R. Ludwid, and H. G. Weber, "140 Mbit/s DPSK transmission using all-optical frequency convertor with 4000 GHz conversion range," Electron. Lett. 24, 1106-1107 (1988).
- [28] K. Kondo, M. Kuno, S. Yamakoshi, and T. Sakurai, "A tunable optical-wavelength conversion laser with TM-polarized input light," Proc. IEEE Int. Semiconductor Laser Conference, J3, 1988.
- [29] K. Tanaka, T. Inoue, M. Matsuda, T. Yamamoto, H. Kobayashi, K. Wakao, and T. Mikawa, "A wide-wavelength-tunable active filter with a $\lambda/4$ -shifted DFB structure with independently current-injected tuning waveguide," Topical Meeting on Photonic Switching (PS'91), WB2, 1991.
- [30] 山口正泰, 松永亨, 菊地克昭, "波長変換技術を用いた光時分割通話路構成法," 昭60信学総全大, 1970.
- [31] S. Suzuki and K. Nagashima, "Optical broadband communications network architecture utilizing wavelength-division switching technologies," Topical Meeting on Photonic Switching (PS'87), ThA2.1, 1987.
- [32] H. Kobrinski, R. M. Bulley, M. S. Goodman, M. P. Vecchi, C. A. Brackett, L. Curtis, and J. L. Gimlett, "Demonstration of high capacity in the Lambda-net architecture: A multiwavelength optical network," Electron. Lett. 23, 824-826 (1987).
- [33] 西尾誠, 鈴木修司, 沼居貴陽, 藤原雅彦, 水戸郁夫, 下坂直樹, "波長分割光交換の基礎実験," 昭62信学総全大, 1843.
- [34] Y. Tohmori, Y. Yoshikuni, H. Ishii, F. Kano, T. Tamamura, and Y. Kondo, "Over 100 nm wavelength tuning in super structure grating (SSG) DBR lasers," Electron. Lett. 29, 352-354 (1993).
- [35] H. Takahashi, S. Suzuki, K. Kato, and I. Nishi, "Arrayed-waveguide grating for wavelength division multi/demultiplexer with nanometer resolution," Electron. Lett. 26, 87-88 (1990).
- [36] K. Sasayama, K. Habara, W. De Zhong, and K. Yukimatsu, "Photonic ATM switch

using frequency-routing-type time-division interconnection network," *Electron. Lett.* 29, 1778-1779 (1993).

- [37] K. Sasayama, Y. Yamada, F. Fruh, K. Habara, K. Yukimatsu, S. Suzuki, and H. Ishii, "Demonstration of a photonic ATM switch using a frequency-routing-type time-division interconnection network (FRONTIERNET)," *European Conference on Optical Communication (ECOC'94)*, WeA2.2, 1994.
- [38] 鈴木修司, 藤原雅彦, "波長分割・時分割複合光通話路の検討," *信学技報CMN87-70*, 1987.
- [39] 黒柳智司, 下江敏夫, 村上孝三, "時分割・波長分割融合型光通話路の検討," *90信学秋全大*, B372.
- [40] 秋山稔, 水澤純一, 土谷浩史, "波長分散遅延素子を用いた複合形光交換方式," *信学技報PST91-10*, 1990.
- [41] T. J. Cloonan, M. J. Herron, F. A. Tooley, G. W. Richards, F. B. McCormick, E. Derbis, J. L. Brubaker, and A. L. Lentine, "An all-optical implementation of a 3-D crossover switching network," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2, 438-440 (1990).
- [42] F. B. McCormick, F. A. P. Tooley, T. J. Cloonan, J. L. Brubaker, A. L. Lentine, R. L. Morrison, S. J. Hinterlong, M. J. Herron, S. L. Walker, and J. M. Sasian, "Experimental investigation of a free-space optical switching network by using symmetric self-electro-optic-effect devices," *Appl. Opt.* 31, 5431-5446 (1992).
- [43] S. J. Hinterlong, "Free-space photonic switching technology demonstration," *International Switching Symposium (ISS'92)*, P20, 1992.
- [44] F. B. McCormick, T. J. Cloonan, A. L. Lentine, J. M. Sasian, R. L. Morrison, M. G. Beckman, S. L. Walker, M. J. Wojcik, S. J. Hinterlong, R. J. Crisci, R. A. Novotny, and H. S. Hinton, "A 5-stage embedded-control EGS network using FET-SEED smart pixel arrays," *Topical Meeting on Photonics in Switching (PS'93)*, PD5, 1993.
- [45] M. Yamaguchi, T. Matsunaga, S. Shirai, and K. Yukimatsu, "Analog free-space optical switch structure based on cascaded beam shifters," *IEICE Trans. Commun.* E77-B, 163-173, (1994).

- [46] K. Noguchi, T. Sakano, and T. Matsumoto, "A rearrangeable multichannel free-space optical switch based on multistage network configuration," *J. Lighwave Technol.* 9, 1726-1732 (1991).

- [47] レーザー学会, "レーザーハンドブック," オーム社, 1982.
- [48] 稲場文男, 霜田光一, "レーザーハンドブック," 朝倉書店, 1973.
- [49] D. O. Harris, "Multichannel acousto-optic crossbar switch," *Appl. Opt.* 30, 4245-4256 (1991).
- [50] 大越孝敬, "ホログラフィ," 電子通信学会, 1977.
- [51] 本田貞夫, "ホログラフィのはなし," 日刊工業新聞社, 1987.
- [52] 鈴木正根, "実践ホログラフィ技術," オプトロニクス社, 1986.
- [53] D. Gabor, "A new microscopic principle," *Nature*, 161, 777-779 (1948).
- [54] D. Gabor, "Microscopy by reconstructed wave-fronts," *Proc. Phys. Soc., A* 194, 454-487 (1949).
- [55] E. N. Leith and J. Upatnieks, "Reconstructed wavefronts and communication theory," *J. Opt. Soc. Am.* 52, 1123-1130 (1962).
- [56] E. N. Leith and J. Upatnieks, "Wavefront Reconstruction with continuous-tone object," *J. Opt. Soc. Am.* 53, 1377-1381 (1963).
- [57] P. Gravery and J. Le Rouzic, "Optical switching technologies for high capacity exchanges," *International Switching Symposium (ISS'84)*, 41A-5, 1984.
- [58] J. P. Herriau, A. Delboulbe, J. P. Huignard, G. Roosen, and G. Pauliat, "Optical beam steering for fiber array using dynamic holography," *European Conference on Optical Communication (ECOC'85)*, 1, 419, 1985.
- [59] E. Marom and N. Konforti, "Dynamic optical interconnections," *Opt. Lett.* 12, 539 - 541 (1987).
- [60] H. Yamazaki and M. Yamaguchi, "4 x 4 free-space optical switching using real-time binary phase-only holograms generated by a liquid-crystal display," *Opt. Lett.* 16, 1415-1417 (1991).
- [61] S. E. Broomfield, M. A. A. Neil, E. G. S. Paige, and G. G. Yang, "Programmable binary

phase-only optical device based on ferroelectric liquid crystal SLM," *Electron. Lett.* 28, 26-28 (1992).

- [62] H. Yamazaki and M. Yamaguchi, "Experiments on a multichannel holographic optical switch with the use of a liquid-crystal display," *Opt. Lett.* 17, 1228-1230 (1992).
- [63] D. C. O'Brien, R. J. Mears, T. D. Wilkinson, and W. A. Crossland, "Dynamic holographic interconnects that use ferroelectric liquid-crystal spatial light modulators," *Appl. Opt.* 33, 2795-2803 (1994).
- [64] H. Yamazaki, T. Matsunaga, S. Fukushima and T. Kurokawa, "4 x 1204 holographic switching with a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator," *Topical meeting on Photonics in Switching (PS'96)*, PThD3, 1996.
- [65] T. H. Barnes, T. Eiji, K. Matsuda, and N. Ooyama, "Phase-only modulation using a twisted nematic liquid crystal television," *Appl. Opt.* 28, 4845-4852 (1989).
- [66] J. L. Horner and J. R. Leger, "Pattern recognition with binary phase-only filters," *Appl. Opt.* 24, 609-611 (1985).
- [67] D. Casasent and S. F. Xia, "Phase correction of light modulators," *Opt. Lett.* 11, 398-400 (1986).
- [68] M. A. Seldowitz, J. P. Allebach, and D. W. Sweeney, "Synthesis of digital holograms by direct binary search," *Appl. Opt.* 26, 2788-2798 (1987).
- [69] M. R. Feldman and C. C. Guest, "Iterative encoding of high-efficiency holograms for generation of spot arrays," *Opt. Lett.* 14, 479-481 (1989).
- [70] S. Fukushima, T. Kurokawa, and M. Ohno, "Ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator achieving bipolar image operation and cascability," *Appl. Opt.* 31, 6859-6868 (1992).
- [71] 日本学術振興会情報科学用有機材料第142委員会・液晶部会, "液晶辞典," 培風館, 1989.
- [72] H. Dammann and K. Gortler, *Opt. Commun.* "High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms," *Opt. Commun.* 3, 312 - 315 (1971).
- [73] J. Jahns, M. M. Downs, M. E. Prise, N. Streibl, and S. J. Walker, "Dammann gratings for

laser beam shaping," *Opt. Eng.* 28, 1267-1275 (1989).

- [74] S. Fukushima and T. Kurokawa, "Diffraction characteristics of ferroelectric liquid crystal grating," *Jpn. J. Appl. Phys.* 33, 5747 - 5754 (1994).

研究業績

論文

- [1] K. Iwatsuki, M. Saruwatari, M. Kawachi, and H. Yamazaki, "Waveguide-type optical passive ring-resonator gyro using a time-division detection scheme," *Electron. Lett.* 25, 688-689 (1989).
- [2] H. Yamazaki and M. Yamaguchi, "Liquid-crystal based opto-electronic hybrid structure for optical parallel processing devices," *Jpn. J. Appl. Phys.* 29, L1244-L1247 (1990).
- [3] H. Yamazaki and M. Yamaguchi, "4 x 4 free-space optical switching using real-time binary phase-only holograms generated by a liquid-crystal display," *Opt. Lett.* 16, 1415-1417 (1991). (第2章)
- [4] H. Yamazaki and M. Yamaguchi, "Experiments on a multichannel holographic optical switch with the use of a liquid-crystal display," *Opt. Lett.* 17, 1228-1230 (1992). (第2章)
- [5] H. Yamazaki, M. Yamaguchi, and S. Fukushima, "Holographic optical switching using a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator," *Proc. SPIE* 1807, 382-383 (1992).
- [6] H. Yamazaki, M. Yamaguchi, and K. Hirabayashi, "Estimation of the possible scale for holographic switches with liquid-crystal displays," *Appl. Opt.* 34, 1333-1340 (1995). (第2, 4章)
- [7] H. Yamazaki, T. Matsunaga, and S. Fukushima, "1 x 1104 holographic switching with a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator," *Opt. Lett.* 20, 1430-1431 (1995). (第3章)
- [8] H. Yamazaki and S. Fukushima, "Holographic switch with a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator for a large-scale switch," *Appl. Opt.* 34, 8137-8143 (1995). (第3, 4章)
- [9] H. Yamazaki, T. Matsunaga, S. Fukushima and T. Kurokawa, "4 x 1204 holographic

switching with an optically-addressed spatial light modulator," *Appl. Opt.* 投稿中
(第3, 4章)

国際会議

- [10] H. Yamazaki, M. Yamaguchi, and S. Fukushima, "Holographic optical switching using a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator," *Topical meeting on Photonic Switching (PS'92)*, 3D4, 1992.
- [11] M. Yamaguchi and H. Yamazaki, "Holographic free-space optical switch using a liquid-crystal display," *International Switching Symposium (ISS'92)*, B10.2, 1992. (第2章)
- [12] H. Yamazaki, M. Yamaguchi, K. Hirabayashi, S. Fukushima, and T. Ito, "Multi-channel non-blocking holographic switching with a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator," *IEEE Laser and Electro-Optics Society annual meeting (LEOS'93)*, OS1.4, 1993.
- [13] H. Yamazaki, T. Matsunaga, and S. Fukushima, "1 x 1104 holographic switching with a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator," *International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (IOOC'95)*, TuD2-5, 1995. (第3章)
- [14] H. Yamazaki, T. Matsunaga, S. Fukushima and T. Kurokawa, "4 x 1204 holographic switching with a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator," *Topical meeting on Photonics in Switching (PS'96)*, PThD3, 1996. (第3章)
- [15] H. Yamazaki, T. Matsunaga, S. Fukushima and T. Kurokawa, "Large-scale holographic switch with a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator," *Optoelectronics and Communications Conference (OECC'96)*, 19C2-1, 1996. (第3章)
- [16] H. Yamazaki and M. Yamaguchi, "Optical parallel processing devices with liquid-crystal based opto-electronic hybrid structures," *Optical computing (OC'90)*, 10H2, 1990.

研究会 (電子情報通信学会)

- [17] 山崎裕史、山口正泰、"液晶ディスプレイを用いたホログラム型 4 x 4 空間光スイッチングの実験," 信学技報, PST91-39, 1991. (第 2 章)
- [18] 山崎裕史、山口正泰、"多端子ホログラム型光スイッチの実験," 信学技報, SSE91-108, 1991. (第 2 章)
- [19] 山崎裕史、松永亨、福島誠治、"1 x 1104 光制御型ホログラム光スイッチの実験," 信学技報, SSE94-213, 1995. (第 3 章)

全国大会 (電子情報通信学会)

- [20] 山崎裕史、山口正泰、"液晶ディスプレイを用いた空間光スイッチングの検討," 1991 信学春季全大, C-393. (第 2 章)
- [21] 山崎裕史、山口正泰、"ホログラム型 4 x 4 空間光スイッチングの実験," 1991 信学秋季全大, B-286.
- [22] 山崎裕史、山口正泰、福島誠治、"液晶ライトバルブを用いたホログラム型光スイッチの実験," 1992 信学春季全大, SC-3-11.
- [23] 山崎裕史、山口正泰、"液晶ディスプレイを用いたホログラム型光スイッチの出力数の算出," 1993 信学春季全大, C-347. (第 2, 4 章)
- [24] 山崎裕史、山口正泰、平林克彦、福島誠治、伊藤敏夫、"強誘電性液晶空間光変調器を用いたマルチチャンネルホログラム型光スイッチの実験," 1993 信学秋季全大, C-280.
- [25] 山崎裕史、平林克彦、福島誠治、"光制御型ホログラム光スイッチの光源アレイによる制御法の提案," 1994 信学春季全大, C-413. (第 3 章)
- [26] 山崎裕史、福島誠治、"光制御型ホログラム光スイッチの制御光源出力と出力端子数の関係," 1994 信学秋季全大, C-251. (第 3, 4 章)
- [27] 山崎裕史、松永亨、福島誠治、"光制御型ホログラム光スイッチによる 1 x 1104 スwitchングの実験," 1995 信学春季全大, C-313. (第 3 章)
- [28] 山崎裕史、松永亨、福島誠治、黒川隆志、"4 x 222 ホログラム光スイッチの実験," 1995 信学秋季全大, B-361.

- [29] 山崎裕史、松永亨、福島誠治、黒川隆志、"4 x 1204 ホログラム型光スイッチの損失とクロストークの測定," 1996 信学春季全大, C-308. (第 3 章)
- [30] 山崎裕史、山口正泰、"液晶偏光制御素子を用いた並列処理用光機能デバイス," 1989 信学秋季全大, C-343.
- [31] 山崎裕史、山口正泰、"液晶を用いた並列光処理用アレイデバイスの動作特性," 1990 信学秋季全大, C-317.

全国大会 (応用物理学会)

- [32] 山崎裕史、松永亨、山口正泰、平林克彦、"液晶ディスプレイを用いた 6 x 15 ホログラム型光スイッチ," 応用物理学会学術講演会 1995 秋, 27p-N-7

その他

- [33] 山崎裕史、行松健一、福島誠治、"液晶空間光変調器を用いたホログラム型光スイッチ," 日本光学会「光学」, 24, 339-340 (1995). (第 3 章)

