

空間光変調器とホログラムメモリを用いた光情報検索システムの動作実験

土田恵一¹

¹電気電子システム工学科 (Department of Electrical Engineering, Nagaoka National College of Technology)

OPERATION OF OPTICAL INFORMATION RETRIEVAL SYSTEM USING A SPATIAL LIGHT MODULATOR AND HOLOGRAPHIC MEMORIES

Keiichi TSUCHIDA¹

Abstract

Operation of optical information retrieval system using a spatial Light Modulator and holographic memories was reported. In the system a commercial spatial light modulator was used as a page composer of holographic memories and an optical filter of parallel data processing. Optical design of the system was based on the spatial light modulator. Holographic memories were recorded on the photopolymer films and used as data storage section. In this study, four holographic data containing 18 bit were retrieved by the system in parallel. In order to increase holographic data optical setup of the system are discussed.

Key Words : *Optical computing, Holographic memory, Spatial light modulator, Fourier optics*

1. はじめに

現在,我々の生活の周りで電子計算機は重要な役割を果たしている.しかし,このような既存の電子計算機が対応できないようなケースは存在する.その多くは莫大な計算量を必要とする行列計算や画像処理,自然現象のシミュレーションである.このような電子計算機の限界を超える方法のひとつが光情報処理である.光情報処理は情報の処理や何らかの演算のために光デバイスや光学的現象が用いられるものの総称である.光情報は電気情報を用いた処理と比較して多くの魅力をもつ.具体的に述べると,光情報は自由空間を常に高速で伝播し,他の光情報と影響しあわない.そのため,光接続は問題なく互いに交

わることができ,クロストークも無い.そのため,光情報は空間を異なるチャンネルと交わりながら自由に伝播できる.すなわち,光接続は異なるチャンネルが同一空間を使用する並列性を有する.以上の魅力的な長所を有効に生かした光情報処理は多くの異なるアイデアと可能性を含んでいる.

これらの光情報処理の特長に着目したシステムとしてホログラフィックメモリを用いた情報検索システム^{1),2)}が提案されている.このシステムは情報の高密度記録が可能なホログラムメモリとフーリエ光学系を組み合わせたものであり,大規模な並列処理を実現することにより高速な情報検索が図れるものとして期待されている.しかしながら,現在まで情報検索システムは,大規模な並列処理を実現していな

い. 何故ならば, 光情報を扱うデバイスが未熟であったためである. 情報検索システムを構築するためには, 空間光変調器 (Spatial Light Modulator, SLM) がキーデバイスである. SLM は情報検索時のデータマスクとして使用されるため高コントラストであることが必要である. 更に検索時間は SLM の動作速度に依存し, 並列処理が可能な情報量は SLM の画素数に比例する. これらの条件を十分満たす SLM は当時存在しなかった. また, 情報を蓄えるホログラムメモリの記録媒体としては銀塩乾板が使用されていた. 銀塩乾板はホログラム記録の安定性に優れているが, 現像と定着という湿式の処理が必要であり, 情報の記録を行った後, 迅速に情報検索を行うことが不可能であった.

しかし, 近年のエレクトロニクスの発達により, コントラスト比が高く高速動作可能な空間光変調器が製品化されている. 特に, 半導体技術と微小ミラーを用いた反射型の空間光変調器は液晶や光学結晶を用いたものに比べて高いコントラスト比を有する. また, ホログラム記録媒体については, 安価かつ記録後に湿式の処理を必要としないフォトポリマーの研究が進展している. このフォトポリマーを記録媒体としたホログラムメモリは情報の記録直後に情報検索を行うことが可能となる.

そこで本研究では, これらの進歩したデバイスを用いて小型の動作実証用システムを構成し動作確認を試みた. 空間光変調器としては市販の反射型の SLM を使い, フォトポリマーは PVA とアクリルアミド系のものを製作して用いた. システムの光学系は反射型 SLM の特性を考慮し, ホログラムメモリの記録と再生を行うことができるように構成した. そして, 18bit の情報を蓄えた 4 個のホログラムアレイによる検索を行い, 今後のシステムの性能向上について考察を行った.

2. 情報検索システムの概要

図-1 にフーリエ光学系を用いた情報検索システムの基本構成を示す. システムは入力面にホログラムアレイ, データマスクとして使用する SLM, 出力面にデテクタアレイおよび 2 枚のフーリエ変換レンズから構成されている. 入力面には多数のホログラムアレイが配置されている. その 1 つ 1 つには任意の情報が入力されている. その 1 つ 1 つには任意の情報が入力されている.

ホログラムアレイがコリメートされたレーザー光で再生されると, 記録された 2 進情報はフーリエ変換レンズを通じ, SLM 上に再生される. 図-2 はホログラ

ム M1 と M2 に記録されている 2 進情報が再生されている様子を示す. ここで 2 進情報の表し方は図-2 のような光点 (ドット) の到達する位置によって 0 と 1 を表現する. 再生光が到達する SLM では, k ビット目の情報を制御するために 2 つの窓が用意されてい

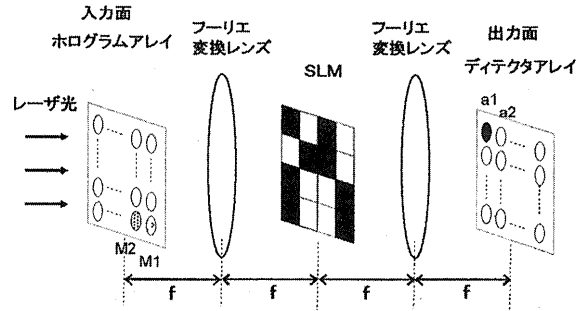


図-1 情報検索システムの基本構成

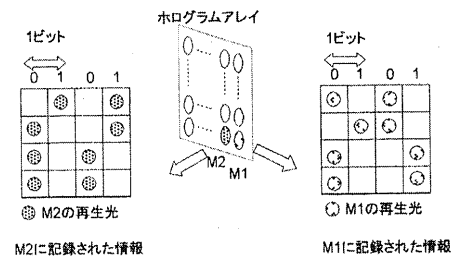


図-2 ホログラム M1 と M2 に記録されている 2 進情報

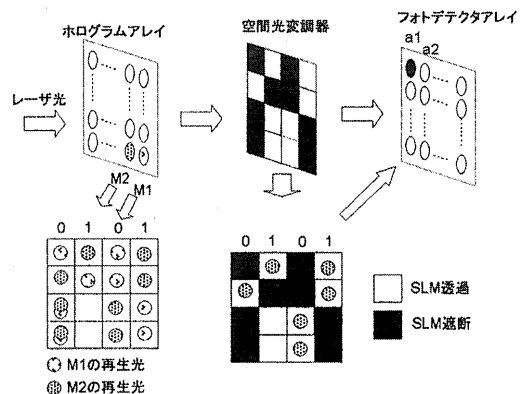


図-3 情報検索の原理

る.このように SLM をフィルタとして用いることにより検索がなされる.SLM を通過した光波はもう 1 枚のフーリエ変換レンズにより出力面に結像する.このとき入力面の位置と出力面の位置関係は光学的共役の関係にある.つまり,図-1 に示すホログラム M1 に対応する出力は検出部の a1,ホログラム M2 に対応する出力は a2 という位置関係になる.次に情報検索の原理について説明する.図-3 は検索の原理を説明するための概略図である.ホログラム M1 と M2 には図-2 で示した 2 進情報が記録してある.ホログラムにレーザ光を照射すると,図-3 の SLM 上のドットのように再生光は情報に対応した所定の位置にフーリエ変換されて結像する.このとき,得たい情報の 2 進符号に対応する SLM の窓が閉じていれば,ホログラムからの再生光は SLM により遮断され出力面に到達しない.それに対し,ホログラムの情報が 1 ビットでも異なっていれば,その情報光が SLM を透過して出力面に到達する.従って,検索すべき情報は出力面上で暗点となり,対応するフォトデテクタの光強度を調べることにより検索がなされる.

本システムでは,ホログラムに記録されている情報と SLM により遮断する情報のハミング距離が近いほど対応するフォトデテクタアレイの光強度は弱くなる.すなわち,本システムは画像情報の相関器としても応用できる.

3. 情報検索システムの設計

前章で述べた情報検索システムでは,大量の情報を並列的に処理することが可能となる.

このシステムを構成する上で最も重要となるデバイスは SLM とフーリエ変換レンズである.本章では,本研究で用いる SLM について説明する.そして,SLM の仕様に基づいてフーリエ変換レンズを選定する.

3.1 SLM

本研究で使用する SLM である Texas Instruments 社の DMD(Digital Micro mirror Device)の仕様を表-1 に示す³⁾.DMD は半導体素子と微小ミラーから構成されている反射型の SLM である.微小なミラーは微小なヒンジで保持されており,個々のミラーを独立に傾けることが可能である.DMD を制御する信

表-1 DMD の仕様

密度[Pixel]	動作周波数[Hz]	データ転送速度[Pixel/sec]	コントラスト比
1024×768	50h	39G	1000:1

号は DMD のミラー配置と等しい 1024×768 画素からなる BITMAP 画像である.BITMAP 画像はパーソナルコンピュータから USB を通じて DMD 内のメモリにダウンロードされる.そして,ある BITMAP 中のひとつの画素が白であれば,その場所に対応したミラーが基板の水平面に対して+12° 傾く.逆に,あるひとつの画素が黒であれば,その場所に対応したミラーが基板の水平面に対して-12° 傾く.その結果,BITMAP 画像で白い画素に対応するミラーの反射光と黒い画素の対応するミラーに反射光は 24° 異なる方向に反射される.

このように,DMD はミラーの傾きを変えることにより,高いコントラストと高速動作が可能である.この DMD を情報検索システムに用いるため,本研究では DMD を光軸に対し 12° 傾けて使用する.すなわち,BITMAP 画像で白い画素に対応するミラーの反射光は光軸と平行に反射し,黒い画素に対応するミラーの反射光は光軸に対し 24° 傾き反射する.以上の方法により光波に対し空間的な光強度変調を加えることにより,ホログラムの記録と並列処理を行う.

3.2 フーリエ変換レンズ

フーリエ変換レンズはホログラムメモリの記録密度を決めるデバイスである.本研究では,フーリエ変換レンズの口径と焦点距離を以下の理由により決定した⁴⁾.

まず,フーリエ変換レンズの口径はホログラムアレイの大きさと SLM の大きさにより決まる.図-4 に示すように,フーリエ変換レンズの口径 D は SLM の対角線の長さ l_{SLM} とホログラムアレイの対角線の長さ l_{HO} の和以上でなければならない.なぜならば,ホログラムアレイからの再生光は全てフーリエ変換レンズを通過した後,SLM に結像するためである.このとき, l_{HO} は l_{SLM} に比べて長すぎる場合と短すぎる

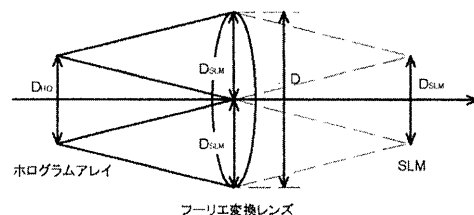


図-4 フーリエ変換レンズの口径と入力面及び空間周波数面の関係

場合, ホログラムアレイ周辺からの再生光は光軸に対して大きな角度をなす. その結果, デテクタアレイに結像する際, レンズの収差の影響が大きくなる. ホログラムアレイの周辺部からの再生光が光軸となす角は, l_{HO} は l_{SLM} が等しいとき最小となる. 以上の理由より, 本システムでは l_{HO} と l_{SLM} は等しい長さ 18mm とした. その結果, フーリエ変換レンズの口径 D は l_{HO} と l_{SLM} の和である 36mm 以上であり最も近い市販品である 40mm とした.

次に, フーリエ変換レンズの焦点距離 f は SLM の反射光の条件から決定した. 前述の通り, SLM は光軸から 12° 傾けて配置されている, そして, SLM の画素が OFF 時の反射光は 24° 傾いて反射される. このとき, レンズの焦点距離 f が短すぎると OFF 時の反射光がレンズに入射しノイズとなる. $D=40\text{mm}$, $l_{SLM}=18\text{mm}$ とし て OFF 時の反射光がレンズに入射しない f を求めると 192mm となる. よって, f はこの 192mm 以上で最も近い市販品である 200mm とした.

4. ホログラムメモリ記録再生実験

本システムでは, DMD を記録物体として, ホログラムに情報を記録し, ホログラムメモリを製作することが必要となる. 本章ではシステムに用いるホログラムメモリの記録と再生の実験方法および結果を説明する.

4.1 ホログラム記録材料

ホログラム記録材料はホログラム記録特性を決める重要なデバイスである. 本研究で用いたフォトポリマーは PVA (Poly Vinyl Alcohol) をマトリックスとし, アクリルアミドをモノマー, トリエタノールアミンをイニシエータとするものを用いた. PVA とアクリルアミドを用いたフォトポリマーは作製が容易で安価であるという特長を有する. また, レーザ光を吸収する色素は YVO レーザの波長 532nm を吸収するエオシン Y を用いた⁵⁾.

表-2 に本研究で作製したフォトポリマーの水溶液の処方を示す. この水溶液を暗所でスライドガラス上に塗布し, 1 週間乾燥させた. 乾燥後のフォトポリマーの膜厚は $60\mu\text{m}$ である.

表-2 フォトポリマー水溶液の処方

蒸留水	ポリビニルアルコール	エオシン Y	アクリルアミド	トリエタノールアミン
100g	10g	5mg	10g	10ml

4.2 ホログラム記録の光学系

図-5 にホログラム記録の光学系を示す. YVO レーザから射出したビームはビームスプリッタ BS_1 により 2 つのビームに分けられる. BS_1 により分けられた 2 つのビームは物体光と参照光となる. まず, 物体光が通過する経路を説明する. BS_1 を通過したビームは顕微鏡対物レンズに入射し, 発散する球面波に変換される. そして, その球面波はビームスプリッタ BS_2 と BS_3 を通過し, フーリエ変換レンズに入射する. ここで, 顕微鏡レンズフーリエ変換レンズの距離はレンズの焦点距離 $f=200\text{mm}$ 離れている. そのため, 発散する球面波はフーリエ変換レンズを通過した後, 直径 40mm の円形な平面波に変換される. 平面波となったレーザー光は SLM に入射する. SLM には, ホログラムに記録される光情報が表示されている. 3.1 節に述べたように, SLM は光軸に対し 12° 傾いて配置されている. SLM の 1 画素に 2 進情報の 1 を表示する場合, その画素のミラーは光軸と垂直な状態となる. すると, その画素に入射したレーザー光は光軸と平衡な向きに反射する. 一方, SLM の 1 画素に 2 進情報の 0 を表示する場合, その画素のミラーは光軸と 24° をなす状態となる. すると, その画素から反射したレーザー光はフーリエ変換レンズの外側に向かう. 以上説明した動作により, レーザ光は振幅変調を受け, 再度再度フーリエ変換レンズに入射する. フーリエ変換レンズを再度通過したレーザー光は BS_3 により反射しされ, フォトポリマーフィルムに入射する. このとき, DMD とフーリエ変換レンズおよびフーリエ変換レンズとフォトポリマーフィルムの距離はいずれもレンズの焦点距離 $f=200\text{mm}$ 離れて配置されている. よって, SLM に表示された光情報とフォトポリマーフィルム上に入射する像は光学的フーリエ変換の関係となる. このフォトポリマーフィルム上に集光するレーザー光が物体光である. 一方, BS_1 により反射

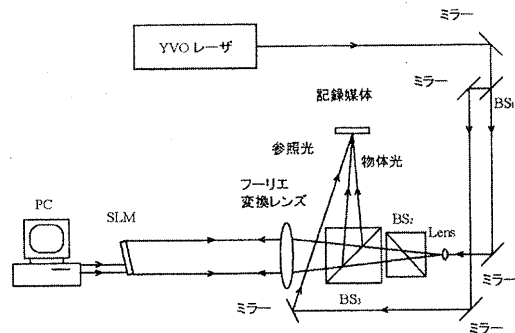


図-5 ホログラム記録の光学系

されたビームはミラーを介してフォトポリマーフィルムに入射される。これが参照光である。BS₁ からフォトポリマーフィルムまでの物体光と参照光の距離は等しくした。物体光の光軸と参照光がなす角は 20° とした。物体光の光強度は 110 μW, 参照光の光強度は 10mW とし、露光時間は 90sec とした。

フーリエ変換ホログラムに記録する情報は図-6 の M1 から M4 に示す 4 種類のものとした。本システムでは、2 つの隣り合う窓を用いて 1bit を表している。そのため、M1 の情報を基準として、他に 1~5bit 内容が異なる情報を用意した。M2 に示す情報は左上の 2 つの窓の白と黒が反転している。すなわち、M1 に比べて M2 の窓は 2 進情報にして 1bit のみ異なる。同様に、M1 の情報と比べて M3 の情報は 2bit 異なり、M4 の情報は 5bit 異なる。これらの情報を持つホログラムを 1 枚のフォトポリマー上の異なる場所に記録した。

記録したホログラムは物体光を遮り、参照光を入射させることにより再生した。再生光はフーリエ変換レンズを通してスクリーン上で観測した。同時にパワーメータを用いて再生光強度の測定を行った。

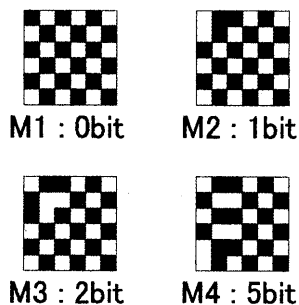


図-6 ホログラムに記録した情報

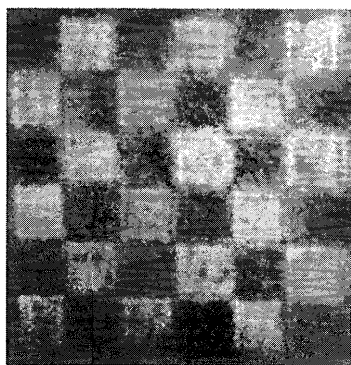


図-7 ホログラム M1 の再生像

4.3 結果と考察

M1 の情報を記録したフーリエ変換ホログラムの再生像を図-7 に示す。図より SLM を記録物体としたフーリエ変換ホログラムの実時間記録と再生が可能であることがわかる。また、再生像は明るい部分と部分が見られる。これは、SLM を照射したコリメート光の明るさに偏りがあったため生じたと考えられる。

次に 4 種類のホログラムの再生光強度を測定した結果、M1 の再生光強度は 5.0 μW, M2 の再生光強度は 3.2 μW, M3 の再生光強度は 2.9 μW, M4 の再生光強度は 3.4 μW であった。これらの結果から、1 枚のフォトポリマーに記録したホログラムでも再生光強度の値が異なることがわかる。この再生光強度の最小値は 2.9 μW であり、その最大値は 5.0 μW である。最小値と最大値は 2 倍以内の範囲に収まっており、回折光強度の差は小さいと言える。以上の結果から、エオシン Y を用いたフォトポリマーフィルムはフーリエ変換ホログラムをコンスタントに記録し再生できることがわかった。

5. 情報検索システムの動作実験

前章では、SLM を用いたホログラムの記録と再生について述べた。本章では、前章にて記録した 4 個のホログラムを同時に再生し、情報検索システムとしての動作実験について述べる。

5.1 実験方法

図-8 に情報検索の光学系を示す。まず、YVO レーザから射出したレーザー光はミラーにより反射した後、ビームエキスパンダに入射する。ビームエキスパンダに入射したレーザー光は直径 30mm の円形なビームに変換され、ホログラムアレイを照射する。このとき、レーザー光は、ホログラム記録時の参照光の入射方向

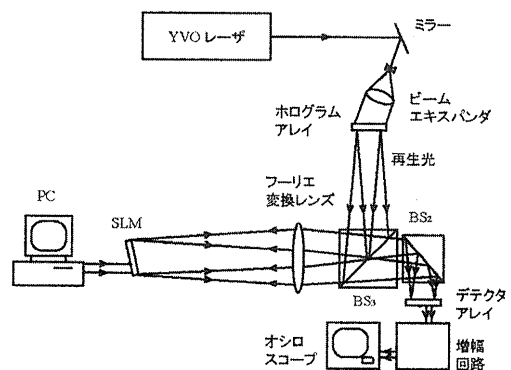


図-8 情報検索の光学系

と逆の方向から照射した。すると、ホログラムアレイから再生される情報光はホログラム書き込み時と逆の方向に再生される。その結果、ホログラムアレイからの再生光は記録時と逆の光路を辿る。そして、BS₃で反射された後、フーリエ変換レンズを透過し、DMD上に再生される。DMD上には検索すべき情報を反転したものが表示されている。ホログラムアレイから再生された光情報のうち、検索される情報と一致するものはDMDによりフーリエ変換レンズの外側へ反射され、光学系の外部へ消えてゆく。一方、検索される情報と一致しないものはフーリエ変換レンズを通過した後、BS₂により反射されフォトデテクタ上に集光する。その結果、フォトデテクタ上の光強度を測定し、最も弱い光強度のアドレスが検索すべきホログラムメモリのアドレスとなる。

フォトデテクタにより光強度は電気信号に変換され、増幅回路により増幅された後、オシロスコーブにより測定された。

5.2 結果と考察

上記の光学系により、ホログラムアレイを再生し、検索を行ったときのオシロスコーブ上の電圧を表-3に示す。表-3の行は検索するホログラム、列はフォトデテクタのアドレスを示す。表より、a1の電圧はM1の検索を行ったとき230mVであり、他のホログラムを検索したときと比べて最も低い値であることがわかる。同様に、a2, a3, a4の電圧もM2, M3, M4を検索したとき105mV, 75mV, 140mVであり、最小値となっている。よって、全てのアドレスで検索を行ったとき、最小の電圧値となっていることがわかる。これは、ホログラムに記録された光情報がSLMにより遮断されていることを意味している。

このことから、それぞれのアドレスに対して最小の値と2番目に小さい値の間にしきい値を設定すれば、情報検索が可能であることがわかる。その一方で、各アドレスの最小の光強度は大きく異なる。この理由としては、ホログラムアレイの回折効率が一定ではないことが考えられる。このことは、4.3節で述べたホログラムの再生光強度と表-3の出力電圧の大小関係が対応していることから説明できる。以上のことから、情報検索を行うときに、ホログラムアレイの回折効率のばらつきが大きい場合、情報検索が困難となる可能性が高いことがわかる。大規模な情報検索を行うためには、莫大なホログラムアレイ数が必要である。そのとき、各アドレス毎にしきい値を設定することは現実的ではない。よって、大規模な情報検索を図るためには、ホログラムアレイの回折効

表-3 情報検索時の各チャンネル出力電圧

		ホログラム検索対象			
		M1	M2	M3	M4
アドレス	a1	230	250	260	275
	a2	125	105	110	130
	a3	110	90	75	105
	a4	170	160	160	160

(単位 mV)

率のばらつきを少なくすることが重要である。

6. まとめ

本研究では、市販のSLMとフォトポリマーを用いたホログラムメモリを用いて情報検索システムの動作確認を行った。その結果、市販のSLMとフォトポリマーを用いてホログラムメモリの記録と再生が可能であることがわかった。また、ホログラム記録と情報検索の光学系を工夫することにより、ホログラム記録直後の情報検索が可能であることもわかった。情報検索の動作実験の結果から、各アドレスにしきい値を設定すれば情報検索が可能であることがわかった。しかしながら、大規模な並列処理を目指すためにはホログラムの回折効率のばらつきを極力少なくする必要がある。この問題を解決するためには、フォトポリマーの記録と再生時の安定性を向上させることが必要である。

今回用いたフーリエ変換レンズはホログラム記録と情報検索において特に問題はなかった。しかし、大規模な並列処理を行うためには焦点距離が短く、収差の少ないレンズが必要とされる。何故ならば、ホログラムの単位面積あたりの情報記録密度はフーリエ変換レンズの焦点距離と反比例するためである。本研究で使用したレンズの焦点距離はホログラム面とSLM面の大きさに比べて十分短いとは言えず、ホログラムの高密度記録は困難である。そのため、反射角度の大きいSLMの開発が望まれる。

また、動作実験では、光学系の構築とホログラムの記録と再生に重点を置いたため、フォトデテクタ以降の信号処理系を準備していない。そのため、自動的な検索結果の表示はできなかった。本システムを応用するためには、フォトデテクタ以降の信号処理系を開発し、自動的に検索結果を表示するシステムの開発が望まれる。

参考文献

- 1) X. Z. Wang, A. Hirai, K. Shioya, M. Ohkawa, S. Sekine, and

- S. Ando: Fast and highly parallel content addressing of a large amount of information recording in a holographic memory, *Appl. Opt.*, **33**, pp.3003-3009, 1994.
- 2) 羽鳥雅章, 塩谷康平, 土田恵一, 三田元仁, 大河正志, 関根征士: 空間光変調器を用いた光情報検索システムの動作実験, 電子情報通信学会論文誌C-1 Vol.J79-C-1, No1, pp.10-18 1996.
- 3) H. J. Coufal, D. Psaltis, G. T. Sincerbox: *Holographic Data Storage*, Springer Series in OPTICAL SCINES 76, p. 251, 2000.
- 4) 土田恵一, 関根征士, 大河正志, 三田元仁: 情報検索ホログラムメモリのレンズ系設計と情報量限界, 光学, 第28巻, 第3号, pp.149-154, 1997.
- 5) K. Tsuchida, M. Ohkawa and S. Sekine: Stability of holographic gratings recorded in photopolymer films using different dyes, *Proceedings of SPIE Practical Holography XIX: Materials and Applications*, Vol. 6136, pp.61360-1-61360-9, 2006.

(2007. 9. 3 受付)