



Title	ホログラフィを用いた情報処理に関する研究
Author(s)	西田, 信夫
Citation	大阪大学, 1974, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/420
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

ホログラフィを用いた情報処理に関する研究

西 田 信 夫

ホログラフイを用いた情報処理に関する研究

西 田 信 夫

目 次

第 1 章	緒 論	1
第 2 章	多重記録ホログラム・メモリ	11
2. 1	はじめに	11
2. 2	ホログラム・メモリを用いた図形入力装置の原理	12
2. 3	多重記録ホログラム・メモリ板の製作方法	15
2. 4	多重記録ホログラム・メモリ板の光学的性質の解析	19
2. 4. 1	結像レンズの焦面における物体光点の拡がり	20
2. 4. 2	ガウス領域における再生点像の不動性	21
2. 4. 3	再生点像のおどり (3 次近似における再生像の収差)	26
2. 4. 4	体積ホログラム効果による再生点像の強度変化	30
2. 5	実験結果と考察	37
2. 5. 1	多重記録ホログラム・メモリ板の製作	37
2. 5. 2	再生点像のおどり	41
2. 5. 3	再生点像の強度変化	45
2. 6	結 び	48
第 3 章	多重記録ホログラム・メモリを応用した入力装置	51
3. 1	はじめに	51
3. 2	図形入力装置の設計方針と主要構成部品の設計	52
3. 3	試作図形入力装置の構成、性能と仕様	58
3. 3. 1	構成	58
3. 3. 2	性能と仕様	62
3. 4	指示型漢字入力装置	64
3. 4. 1	試作指示型漢字入力装置の構成	65
3. 4. 2	試作指示型漢字入力装置の性能と仕様	67
3. 5	邦文タイプライタ付漢字入力装置	67
3. 5. 1	試作邦文タイプライタ付漢字入力装置の構成	68
3. 5. 2	試作邦文タイプライタ付漢字入力装置の性能と仕様	71

3. 6	結 び	72
第 4 章	ホログラム連想メモリ	75
4. 1	はじめに	75
4. 2	連想メモリとホログラフィの情報変換作用	76
4. 3	ホログラム連想メモリの原理と記憶密度	79
4. 3. 1	平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリ	79
4. 3. 1. 1	原 理	79
4. 3. 1. 2	記憶密度	84
4. 3. 2	体積ホログラムを用いたホログラム連想メモリ	88
4. 3. 2. 1	原 理	88
4. 3. 2. 2	記憶密度	91
4. 4	実験結果と考察	94
4. 4. 1	平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリの実験	95
4. 4. 2	収縮した写真乳剤の矯正	100
4. 5	結 び	106
第 5 章	総 括	109
	謝 辞	115
	文 献	117

第 1 章 緒 論

プログラム記憶方式のコンピュータが提案されて以来、メモリ装置は論理素子と共にコンピュータの中枢をなしており、高性能で安価なメモリ装置の開発に多大の努力が払われて来た。¹⁾メモリ装置の開発の初期には陰極線管メモリ、水銀柱遅延メモリ、磁性面メモリが用いられたが、間もなく磁心メモリが開発されて以来、その高性能、読み出しの即時性、非揮発性、高信頼性および長寿命のために磁心メモリが内部メモリとして不動の地位を占め、磁気テープ、磁気ドラム、磁気ディスク等の磁性面メモリは外部メモリとして用いられ、陰極線管メモリや水銀柱遅延メモリは殆ど用いられなくなった。しかし磁心メモリや磁性面メモリが万能であるわけではなく、それぞれ弱点も有している。例えば、磁心メモリは大容量のものが製作し難く、かつ高価であり、一方磁性面メモリではランダム・アクセスが困難で、読み出しに時間がかかる。そのため磁性薄膜メモリ、超電導メモリ、ICメモリ、光メモリ等新しいメモリの研究開発も活発に行なわれ、それぞれ記憶容量、読み出し速度等の性能および価格に応じて適材適所の原則により使用されようとしている。

これらのメモリの内で光メモリは他のものとその性格を若干異にしている。光を用いたメモリは、用途をコンピュータに限定しなければ、1839年のDaguerreの銀板写真から数えても優に130年の歴史を持ち、その記憶密度の高いことはよく知られている。しかし従来の写真感光材料を用いた光メモリは書き換えができず、したがって必然的に読み出し専用であるため、コンピュータ開発の初期には殆ど注目されなかった。

光メモリがコンピュータ用の大容量メモリとして考慮されるようになったのは1952年以来で、コンピュータが複雑化するにつれ、大容量で高速読み出しができれば、読み出し専用でもよいファイル・メモリの需要が出て来たことに起因している。したがって当時の論文〔参考文献(2)〕にはいかに速く読み出すかということが問題にされ、その解決策として陰極線管による光点の走査とメモリ板の機械的移動を併用することが提案されているのに比べて、書き込みの方は殆ど考慮されていない。恐らく白点と黒点より成るデータ・パターンの縮小撮影が想定されていたと思われる。その後、読み出

しにおいてはデジタル型光偏向器³⁾や超音波光偏向器⁴⁾を用いて読み出し光を偏向することによってアクセス時間の短縮が計られるようになり、一方書き込みにおいても陰極線管によるデータ・パターンの表出^{5,6)}あるいは電子ビームによる書き込み⁷⁻⁹⁾が行なわれるようになったが、これらの方法による光メモリは幾つかの試作装置が作られただけで、最初に企図された写真感光材料を用いた大容量光メモリはついに商品化されなかった。大容量光メモリとして商品化されているのは、ユニコン(透明なテープに塗布した不透明物質を信号に従ってレーザ・ビームで蒸発させ、穴の有無により情報を記録するもの)¹⁰⁾ぐらいである。

このように写真感光材料を用いた大容量光メモリが実用化され得なかった原因としては読み出し専用という欠点の他に次の欠点をあげることができる。

- (i) ビット・バイ・ビット(bit-by-bit)記録であるため、ほこりやひっかき傷により情報が失われ易い。
- (ii) 速くて精度の良いアクセスが困難である。機械的にアクセスすれば精度はあがるが、アクセス時間を短かくすることができない。陰極線管によりアクセスを行なうと、アクセス時間は短くなるが、輝点の位置精度が十分でなく、輝度も低い。超音波光偏向器やデジタル型光偏向器も高価な割に安定性に難があり、駆動回路も複雑である。

結局、写真感光材料の記憶密度は概念上は非常に高いけれども、実際の写真感光材料には応々にして傷があり、ビット・バイ・ビット記録のように冗長性の低い記録法では傷をも考慮した記憶密度はそれほど高くなく、さらに光偏向装置等の周辺装置が十分完成されておらず、強引に作り上げても期待されたほどの記憶密度を実現できず、その上コストが高く、他のメモリに太刀打ちできなかったために写真感光材料を用いた大容量光メモリは実現され得なかったとすることができる。

写真感光材料を用いたビット・バイ・ビット記録による光メモリの研究報告はAFIPS(American Federation of Information Proces-

6,7,9,) sing Societies) の1966年のFJCCの論文集に載ったものが
ほぼその最後であり、ビット・バイ・ビット記録による光メモリの研究は
フोटクロミック感光材料^{4,11)}や強磁性体¹²⁻¹⁴⁾を用いた消去できる
タイプのものに移っていった。

このようにビット・バイ・ビット記録の低冗長性および周辺装置の未完
成さのために写真感光材料を用いた安価で記憶密度の高い光メモリを実現
できなかった光メモリの研究者にとって1962年から1964年にかけての
LeithとUpatnieks¹⁵⁻¹⁷⁾によるホログラフィ技術の飛躍的發展はこ
の上もない朗報であった。

ホログラフィの理論および特性はその発明者であるGaborの一連の論
文¹⁸⁻²⁰⁾およびRogersの論文^{21, 22)}によって1950年頃には殆
どわかっていたのであるが、当時のゴヒーレンスの悪い光源を用いて解像
力のあまり高くない写真感光材料に記録されたホログラムからの共軛像の
重なった貧弱な再生像からはホログラフィが画期的な光学技術であるとは
認識されず、極く一部の研究者の興味を引いたに過ぎなかった。しかし
LeithとUpatnieksが折から発展してきたレーザー光と高解像力乾
板、さらに軸はずし(off-axis)の参照波を用いることによって得た再
生像は共軛像が見事に分離され、鮮明であったので、光学関係の研究者の
みならず、情報処理関係の研究者にも感銘を与え、ホログラフィの持つ数
々の特長、特に結像性能、高冗長記録性および多重記録性があらためて認
識され、ホログラフィはビット・バイ・ビット記録に替わる情報記録手段
として期待されるようになった。

本論文の目的は、以上に述べたような背景のもとに、この時点で実現可
能と考えられるホログラム・メモリ(ホログラフィを用いた光メモリ)を
提案し、その光学的性質を明らかにすると共に、製作するにあたって生じ
るホログラフィ技術上の問題を解決し、応用装置を開発すること、および
長期目標のために磁気あるいはICメモリでは実現が難しい機能を有する
ホログラム・メモリを提案し、その可能性を確かめること、を目標として

行なった研究について述べることである。

ホログラムが光メモリ素子として有望であることは莫然とわかっていても、その具体的なモデルの提案はかなり難しい問題であった。ホログラムメモリに関する最初の報告は1966年にIBM Technical Disclosure Bulletinに掲載されたVilols²³⁾の提案であるが、その内容は具体性に欠け、不完全なものであった。1967年に入ると、Carson Laboratories やRCAにおいてもホログラム・メモリの研究が行なわれているというニュース²⁴⁾が報ぜられたが、いずれも具体的なものではなかった。

著者は1967年3月頃暗中模索のうちに多重記録によりホログラム・メモリを製作する方法を考え出した。²⁵⁾ その方法については第2章に詳述するが、簡単に述べると次の通りである。全ての情報をそれぞれ感光材料のどの場所に記録するかをあらかじめ決定した後、各情報の同番目のビットの状態に応じて透明、不透明を前記の記録場所に割り当てたデータ・マスクを製作し、各データ・マスク毎に参照光の方向を変えつつ、データマスクの像と参照光の干渉縞を次々と多重露光により感光材料に記録する。その結果、感光材料面は多数の区画(これを微小ホログラムと呼ぶことにする)に分割され、各区画はその番地に対応した情報を記録している。したがって露光の回数はデータ・マスクの数に等しい。

著者が多重記録によるホログラム・メモリ(以下、多重記録ホログラムメモリと呼ぶことにする)を考え出してから3ヶ月後に、Bell Telephone Laboratories のAndersonら²⁶⁾がページ・アドレス方式の考え方を導入したホログラム・メモリをIEEE Conference on Laser Engineering and Applications(CLEA)において発表した。

ページ・アドレス方式によるホログラム・メモリ(以下、ホログラム・ページ・メモリと呼ぶことにする)の原理は次の通りである。個々の情報を構成するデジタル信号を平面的に並べ、“1”の状態のビットに対しては透明、“0”の状態ビットに対しては不透明を対応させてページと呼ば

れるデータ・マスクを作り，このデータ・マスクのフーリエ変換像と参照光の干渉縞を感光材料に記録場所を変えながら順々に記録することによって直径 1 mm 程度の微小ホログラムがマトリックス状に並んだメモリ板を製作する。読み出しにおいては，まず希望の情報を含んでいる微小ホログラムを細いレーザー光で照明して 1 ページ分のマトリックス状点像を再生し，各点像の状態が“1”か“0”かをマトリックス状に配列した光検出器（1 ページ分のビット数と同数）で検出するが，その際光検出器は再生点像のなかの希望の部分のみを選択検出するように制御される。

この方式の利点はページ構成をとって 1 微小ホログラムに含まれるビット数を多くしたことにより，同記憶容量の場合には，微小ホログラムの数を少なくでき，さらに微小ホログラムを大きくできるので，分解能の低い光偏向器が使用でき，ホログラムの冗長度も高くなって，感光材料の傷により情報の失なわれる度合が減ることである。

Anderson らはこの方式によれば， 10^8 ビットの記憶容量を比較的容易に実現しうることを示し，この時点ですでに 10^6 ビットの記憶容量を達成したので，その後多くの研究者により追試が行なわれ，²⁷⁻³⁰）単にホログラム・メモリと言えば，ホログラム・ページ・メモリを指すほどになった。

しかし著者にはホログラム・ページ・メモリの発表当初よりその実用化の前途は遠いことが予想された。その第一の理由は，高密度記録を達成するためにデータ・マスクのフーリエ変換像を参照光と干渉させて記録することが要求されているが，フーリエ変換像の 0 次光の強度があまりにも強いことである。したがって，参照光の強度を 0 次光の強度とほぼ等しくしてホログラムを作ると，再生像は非常に暗く，光検出器による検出にかなりの負担がかかり，逆に参照光の強度を 1 次光の強度とほぼ等しくすると 0 次光附近の濃度が高くなりすぎ，干渉縞が忠実に記録されない。干渉縞が忠実に記録されなければ再生像には当然欠陥，例えば強度の極端に低い点像や形がくずれて拡がった点像が生じる。これは信号対雑音比 (S/N)

を重視する光メモリにとって重大な問題である。

第二に、記録密度を高くするために通常フーリエ変換像のうち0次と1次回折光だけを記録しているので、このホログラムからの再生像は当然シャープではない。これも S/N を低下させる原因になる。

第三に、ホログラムの面積を小さくすれば、当然記録の冗長度は低くなり、感光材料にあるピンホールなどの欠陥が再生像の S/N を低下させる。

第四に、光検出器の数が1ページ分の点像の数だけ必要であるが、光検出器の集積化技術はまだ十分には完成されていない。また再生像と光検出器の位置合わせも数が多いだけに難しい。恐らく読み出し光のわずかなふれ、ホログラフィ結像の収差が誤動作の原因となろう。

第五に、用途を特に限定しない大容量メモリの場合には、大容量ということだけでなく、消去・再書き込みもできることが使用者からは当然の機能として要求されるが、当時消去できる感光材料としてはフォトクロミック材料が一般に知られていた程度であり、消去・再記録できる感光材料で実用に堪え得るものがなかった。

したがって、デモンストレーションのために多数のビット像を再生するホログラム・ページ・メモリ板を作るとは比較的簡単にできても、信号対雑音比の向上が難しく、実用化には相当の困難が供なうものと予想された。

一方、著者が提案した多重記録ホログラム・メモリは、第2章において詳述するように、実質的には球面波に近い波と平面波による単純格子縞の重ね合わせであり、しかも微小ホログラムは読み出し光を幾つかの方向へ回折しさえすればよいので、従来の写真感光材料を用いて十分実用的な信号対雑音比を得ることができる。そこで著者は多重記録ホログラム・メモリの研究および長期目標として特殊機能を有するメモリの基礎研究の続行を決定した。

果たせるかなホログラム・ページ・メモリが発表されて以来、消去・再書き込み可能な感光材料の研究が非常に盛んになり、フォトクロミック材料、³¹⁻³³⁾ MnBiなどの強磁性体、³⁴⁻³⁸⁾ LiNbO₃などの強誘電体結晶³⁹⁾,

サーモプラスチック・フィルム⁴⁰⁾等がホログラム・メモリ用材料として相次いで発表された。しかし比較的感度の高いものはホログラムの回折効率が低く，回折効率の高いものは感度が低く，サーモプラスチック・フィルムのように感度，回折効率共に比較的優れているものは電極の構造が複雑で高密度記録が難しいといった具合で，まだ実用に甚えられそうなものがないのが現状である。さらにホログラム・ページ・メモリでは，データ・マスクのフーリエ変換像を記録しているため，インターモジュレーション・ノイズや散乱光によるノイズが生じ易く⁴¹⁾高い信号対雑音比を得るのが困難である。これらの欠点のため現在までに試作されたホログラム・ページ・メモリ・システムは実験室用試作の域を出ず，その高密度記録性に未練を残しながらも，スローダウンの傾向にある。勿論有用な感光材料が開発されれば，大容量ホログラム・ページ・メモリが実用化される可能性は十分にあり，サーモプラスチック・フィルムの性能向上の研究などは地道に行なわれている。また Optical Data Systems のホロスキャン・システム⁴²⁾のように用途を限定し，読み出し専用にすることによって成功している例もある。

一方，著者の多重記録ホログラム・メモリは書き込むべき情報があらかじめわかっているなければならず，多重記録の数に限度があり，任意の部分の書き換えができないという欠点を有してはいるが，記録すべき情報の数が多く，かつ各情報を構成するビットの数が少ない場合には，記録時間が短かくて済み，インターモジュレーション・ノイズも殆ど問題にならないという利点を有しているため，コンピュータに手書き図形を入力する図形入力装置における位置情報のエンコーダとして適していることが見出され，その後順調に発展し，製品化の段階にまで到達した。

以上ホログラム・メモリの研究開始時の背景および多重記録によるホログラム・メモリの提案と研究経過をホログラム・メモリの主流と一般に受けとられているホログラム・ページ・メモリの原理，長短，実用性についての簡単な記述を織り込みながら述べて来た。第2章以下には多重記録ホログラム・メモリの有用性と製作方法の詳細，光学的性質と問題点およびその改善方法，図形入力装置等の応用装置および，以上の記述では殆ど触れなかったが，長期目標として他の方法では実現が難しい機能を有するホ

プログラム・メモリの提案とその基礎実験について述べる。各章の概要は次の通りである。

第2章では多重記録ホログラム・メモリについて述べる。すなわち、まず多重記録ホログラム・メモリの有用性を明らかにするために、ホログラム・メモリを用いた図形入力装置の原理およびこの目的のホログラム・メモリとして多重記録ホログラム・メモリが適している理由を述べ、次に多重記録ホログラム・メモリ板の製作方法について詳述する。この製作方法におけるキーポイントはデータ・マスクの設計とイメージ・ホログラムの形成にあり、読み出し時に再生像として使用されるのはデータ・マスクの像ではなく、記録時の結像レンズの焦面に作られる物体光点のフーリエ変換像である。したがって、このフーリエ変換像の拡がりがありすぎると再生像が光検出器をはみ出し、隣りの検出器にノイズとして働く恐れがある。さらに光メモリにおいてはあるビットに対応する再生像はメモリ板上のどの場所から再生されようとほぼ同じ強度で、かつ同じ光検出器に当たらなければならないが、実際にはホログラフィ結像の収差のために再生点像のおどり(dancing)を生じ、再生像強度も多重記録ホログラム個有の特性や体積ホログラム効果のために変化する。これらの問題について解析と実験を行なった結果、フーリエ変換像の大きさは実効的には十分小さいこと、再生点像はガウス領域(1次近似)で取り扱う限り読み出し光がメモリ板上を動いても不動であること、再生点像のおどりは受光面積の広い太陽電池を用いれば十分カバーできる程度で実用上支障ないこと、再生像の強度変化もなるべくうすい感光材料を使用し、多重露光における各露光量を調節すれば実用上差支えないことがわかった。

第3章では、多重記録ホログラム・メモリを応用した図形入力装置および漢字入力装置について述べる。両装置は名称、機能、用途こそ異なるが、その動作原理および構成要素は殆ど同じである。そこでまず図形入力装置についてその設計方針およびその方針に沿った光源、レーザー光を伝送するためのライトガイド、レーザー光をホログラム・メモリ板に照射するためのライトペン、ライトペンを操るためのリンク機構と再生像を検出するため

の光検出装置の設計について述べ、その後各試作装置の性能および仕様を述べる。なお、本章で述べる研究の成果は共同研究者の努力に負うところ大であるが、著者の研究の結実した姿でもあるので敢て一章をもうけた次第である。

最後に第4章では、長期目標として他の方法では実現が難しい検索機能を有するホログラム・メモリの提案を行ない、その原理、記憶密度および基礎実験の結果について述べる。検索機能を有するメモリ、すなわち連想メモリは情報検索に威力を発揮するメモリであるが、磁気あるいはICにより大容量のものを作るとは非常に困難である。このような連想メモリもホログラフィを応用すれば、少なくとも理論的には容易に実現することができる。したがって、現在は大容量化を計るための有効な感光材料が無いためにすぐに実用化することは出来ないが、将来有望な課題であると考えている。

以上の結果、多重記録ホログラム・メモリは十分実用に堪え得るものであり、それを応用した図形入力装置と漢字入力装置も共に競合装置に対して優位性を持ち、十分実用に供し得ることおよびホログラム連想メモリ板は、平面ホログラムを用いて作れば現在の技術で製作可能であるが、記憶密度が小さいので、テープ・システムを用いた情報検索に向いていること、体積ホログラムを用いたホログラム連想メモリの実現のためには体積ホログラムに適した記録材料の開発が必要であることが明きらかった。

第 2 章 多重記録ホログラム・メモリ

2.1 はじめに

ホログラフィは情報の高冗長記録性，多重記録性等従来の光学技術に比べると情報処理に適した性質を有している。そこで，緒論で述べたように，ホログラフィを応用した情報処理の研究の第一段階として，現在の技術で実現できるホログラム・メモリを製作することを企図し，多重記録によりホログラム・メモリを製作する方法，すなわち全ての情報をそれぞれ感光材料のどの場所に記録するかをあらかじめ決定した後，各情報の同番目のビットの状態に応じて透明，不透明を前記の記録場所に割り当てたデータマスクを製作し，各データ・マスク毎に参照光の方向を変えつつ，データマスクの像と参照光の干渉により生じる干渉縞を次々と多重露光により感光材料に記録することによって，それぞれの番地に対応した情報を記憶している多数の微小ホログラムより成るホログラム・メモリ板を製作する方法を提案して，この方法で製作したホログラム・メモリを多重記録ホログラム・メモリと呼ぶことにした。

多重記録ホログラム・メモリ板は，後で詳述するように，実質的には球面波に近い波と平面波による単純格子の重ね合わせであり，しかも微小ホログラムは読み出し光を幾つかの方向へ回折しさえすればよいので，従来のホログラフィ用感光材料を用いて十分実用的な信号対雑音比を得ることができ，ホログラム・ページ・メモリに比べると，はるかに実用に堪えるものを製作し易い。

しかし，多重記録ホログラム・メモリは多重記録の数に限度があり，1微小ホログラムから再生される点像の数はせいぜい100ぐらいで，その記録法からして必然的に読み出し専用であるため，その用途が問題である。製作が容易で，よい信号対雑音比が得られても，用途がなければ役には立たない。

この問題を解決したのが図形入力装置への応用である。図形入力装置⁴³⁾は手書き図形を単純に時々刻々コンピュータに入力するための装置で，デ

ータ・タブレットと呼ばれ、小型のコンピュータにも使用できることからかなりの需要が予測され、すでにグラフィコン・タブレット（紙面の下にはられた導体メッシュとペンの容量結合によりペン先の座標を検出している）やグラフ・ペン・システム（ペンの先端から発せられる超音波を数個所に設けたマイクロフォンで受け、超音波の到達時間の異いからペン先の座標を検出している）が市販されている。この図形入力装置を、安価な読み出し専用のホログラム・メモリを用いれば、かなり安価に製作できると考えた訳である。

かくして多重記録ホログラム・メモリの用途が開けたので、その本格的な研究を行ない、図形入力装置およびそれを転用した漢字入力装置を試作した結果、図形入力装置として初志を一応満足しており、さらに漢字入力装置として一層有用なことが判明した。

本章では上記の研究のうち、多重記録ホログラム・メモリ板について述べる。すなわち、まず多重記録ホログラム・メモリの有用性を明らかにするために、ホログラム・メモリを用いた図形入力装置の原理およびこの目的のホログラム・メモリとして多重記録ホログラム・メモリが適している理由を第2.2節で述べ、次に第2.3節で多重記録ホログラム・メモリ板の製作方法を詳述し、第2.4節で多重記録ホログラム・メモリ板から再生される点像に対するデータ・マスクのフーリエ変換像の拡がりの影響および再生点像のおどりと体積ホログラム効果による強度変化について解析を行ない、第2.5節で実験結果との比較を行なう。

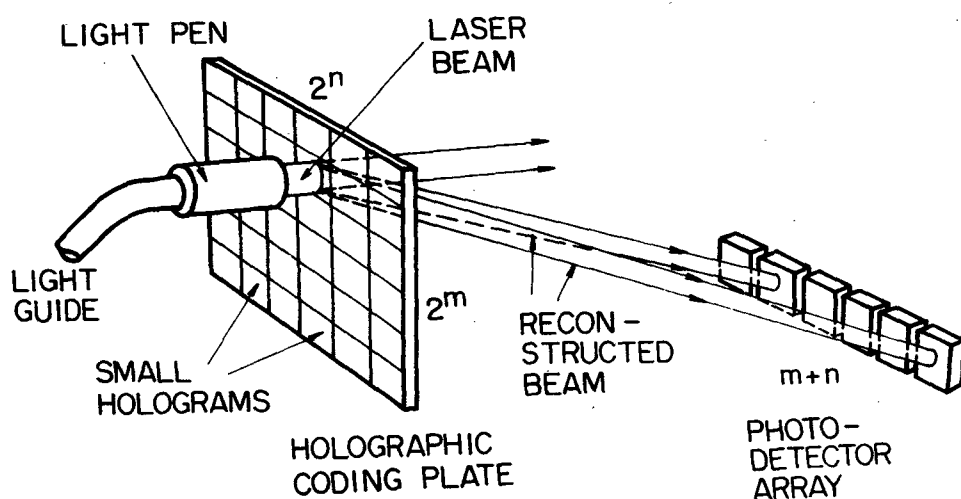
2.2 ホログラム・メモリを用いた図形入力装置の原理 (44-47)

通常のホログラム・メモリにおいては、ホログラム・メモリ板の或る番地に在る微小ホログラムはその番地に記録されている情報を読み出すために読み出し光によって照明される。すなわちまず番地を指定して、それから情報が読み出される。これがメモリの通常の使われ方であるが、別の見方をすれば次のような使い方もできる。

ホログラム・メモリ板上の任意の場所を読み出し光で照明して、再生像

から逆に照明された場所の番地を知ることにもできる。すなわち、ホログラム・メモリ板をその板上の照明位置の位置情報をコード化するためのエレメントとして使うことができる。これがホログラム・メモリを用いた図形入力装置の原理であり、本論文では以後この目的で使用するホログラム・メモリ板をホログラム・コード板と呼ぶことにする。

ホログラム・コード板を用いた図形入力装置の基本構成を第2・1図に示す。ホログラム・コード板はマトリックス状に配列された $2^m \times 2^n$ 個の微小ホログラムより成り、各微小ホログラムはそれ自身の位置情報を $(m+n)$ ビットのコードによって記録している。ライトペンはレーザー光を導く光ガイドの先端に取り付けられており、ライトペンから出射したレーザー光が微小ホログラムを次々に照明するにつれてライトペンの位置座標が最大 $(m+n)$ 個の再生点像として読み出される。この点像を $(m+n)$ 個の光検出器で検出して電気信号に変換すると、直ちに $(m+n)$ ビットのデジタル信号が得られるから、これをコンピュータに入力すれば、ライトペンがホログラム・コード板上で描く図形が刻々とコンピュータに入力される。



第2・1図 ホログラム・コード板(ホログラム・メモリ板)を用いた
図形入力装置の基本構成。

こゝで注意すべきことは、ライトペンの位置が一つの微小ホログラムの内部で動いても常に同一の信号が得られることである。すなわちホログラム・コード板は位置座標のコード化ばかりでなく、空間の量子化の機能も果している。

次にホログラム・コード板として多重記録ホログラム・メモリ板が適している理由について述べる。ホログラム・コード板をホログラム・ページメモリと同じ方法で作ることは勿論不可能ではない。しかしその場合 $2^m \times 2^n$ 回の露光をしなければならない。図形入力装置においては $2^m, 2^n$ は共に $128 (=2^7)$ 以上であるから、 $2^m \times 2^n$ というのは大変な数である。一方、多重記録ホログラム・メモリの場合には露光回数はデータマスクの数、すなわち情報を構成するビットの数に等しいから、 $2^m \times 2^n$ の番地を有するホログラム・コード板を作るためには $(m+n)$ 回の露光でよい。 $2^m = 2^n = 128$ の場合にはわずかに $m+n=14$ である。これがホログラム・コード板として多重記録ホログラム・メモリが適している第一の理由である。

次に、これは多重記録ホログラム・メモリでも良い理由と言った方がよいが、ホログラム・コード板においては書き込むべき情報はあらかじめわかっているし、いったん書き込めば後から書き直す必要もない。

さらに、多重記録ホログラム・メモリにおいてはデータ・マスクのイメージ・ホログラムの重ね合わせによって微小ホログラムを形成しているので、微小ホログラムの大きさは必要に応じて $0.1\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ 位から数 $\text{mm} \times$ 数 mm まで容易に変えることができるし、或る番地の情報はその番地の微小ホログラム内のどの部分にも一様に記録されており、読み出し光が微小ホログラムの内部で動いても同じ再生像がほぼ同じ強度で得られる。これはホログラム・メモリ板を図形入力装置に用いる場合には当然備えていなければならない性質である。

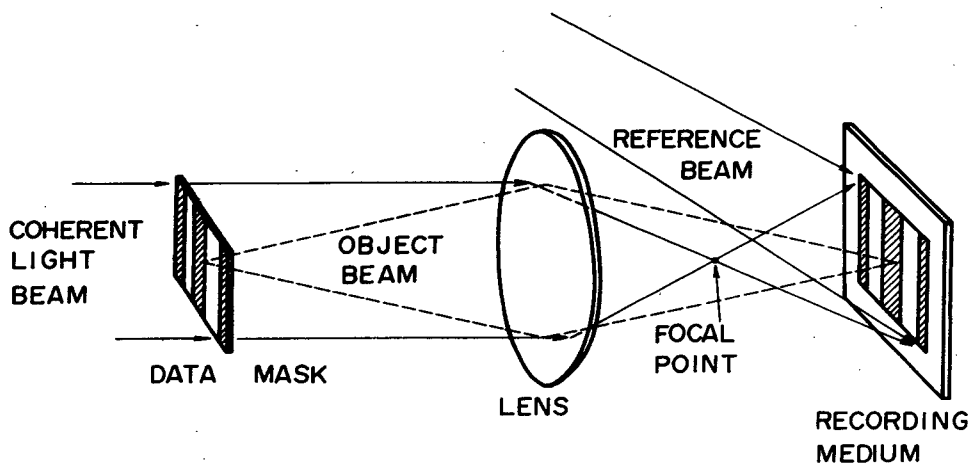
このように多重記録ホログラム・メモリ板は図形入力装置用ホログラムメモリ板として極めて適している。

2.3 多重記録ホログラム・メモリ板の製作方法

25, 44, 45, 47, 48)

多重記録ホログラム・メモリ板の製作方法については緒論で極く簡単に述べたが、本節において詳述する。

第2.2図は多重記録ホログラム・メモリ板を製作するための基本的な光学配置を示したものである。データ・マスクによって変調されたコヒーレント光（物体光）は結像レンズによって一旦その焦点に収束された後、感光材料面上にデータ・マスクの像を結ぶ。この像が各データ・マスクに固有の角度で感光材料に入射する参照光と干渉して干渉縞を形成する。すなわち、この光学配置によって作られるホログラムはデータ・マスクのイメージ・ホログラムであり、その重ね合わせによって微小ホログラムを形成している。これが次に述べるようにこの製作方法の特徴の一つである。



第2.2図 多重記録ホログラム・メモリ板を製作するための基本的な光学配置。

データ・マスクの像が感光材料面を分割して微小ホログラムを形成しているので、第2.2節で述べたように、或る番地の情報はその番地の微小ホログラム内のどの部分にも一様に記録されており、読み出し光が微小ホロ

グラム内部で動いても同じ再生像がほぼ同じ強度で再生されるし、微小ホログラムの大きさも必要に応じて容易に変えることができる。さらに、結像レンズの焦点における物体光点の拡がりは、第2.4節で述べるように、十分小さいので、物体光は結像レンズの焦点にある点光源から発散する球面波と考えることができる。読み出し時に再生像として使用されるのはこの点光源の実像である。

多重記録ホログラム・メモリ板の製作方法におけるもう一つの特徴はデータ・マスクの設計にある。ホログラム・メモリ板上の $2^m \times 2^n$ 個の点を区別するために必要なデータ・マスクの数は $(m+n)$ 枚であり、その各々は、一般的に言うと、下に示すような仕方で透明部分と不透明部分を含んでいる。すなわち $(k, 1)$ 位置の位置情報を $(b_1(k,1), b_2(k,1), \dots, b_{m+n}(k,1))$ ($b_j(k,1)=0$ 又は 1) で表わすとする、 i 番目のビットに対応するデータ・マスク M_i は

$$M_i = \begin{pmatrix} b_i(1,1) & b_i(1,2) & \dots & b_i(1,2^n) \\ b_i(2,1) & b_i(2,2) & \dots & b_i(2,2^n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_i(2^m,1) & b_i(2^m,2) & \dots & b_i(2^m,2^n) \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

で表わされる透明部分 ($b_i(k,1)=1$) と不透明部分 ($b_i(k,1)=0$) とからなる。

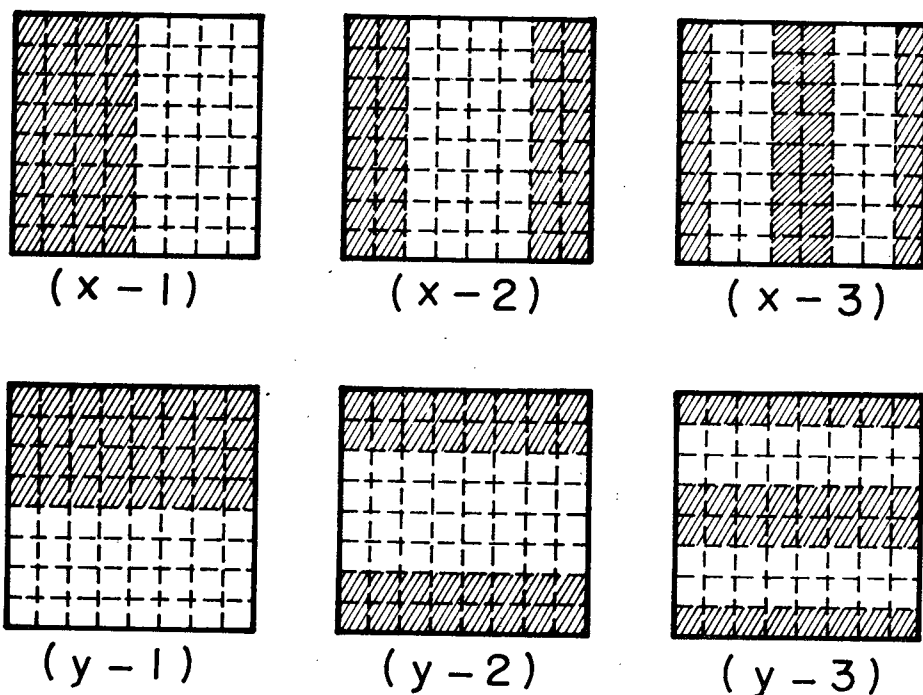
例として、64個の微小ホログラムを有するホログラム・コード板を作るためのデータ・マスクの設計について述べる。この場合、メモリ板が $x-y$ 面上にあるとすると、データ・マスクは透明、不透明が x 方向に変化

するものと y 方向に変化するものとに分けて設計する方が便利である。したがって各データ・マスクは8個の短冊状の部分より成り、8個の位置情報はそれぞれ第2・1表に示すように3ビットでコード化されるから、第2・1表の左欄、中欄、右欄の8ビットより成るデータ・マスクを作れば、第2・3図に示すような6枚のデータマスクが得られる。これらのマスクはマスク($x-1$)が第1ビット用、マスク($x-2$)が第2ビット用、マスク($y-1$)が第4ビットという具合に使用される。

第2・1表において各位置はグレイコード(相隣るコードが1ビットし

第2・1表 3ビットより成るコード

位 置	グレイ・コード		
1	0	0	0
2	0	0	1
3	0	1	1
4	0	1	0
5	1	1	0
6	1	1	1
7	1	0	1
8	1	0	0



第2・3図 64個の微小ホログラムを有するホログラム・メモリ板を多重記録により作る場合のデータ・マスク。斜線部分が不透明である。

か違ってないコード)によってコード化されているが、これは次に述べるような理由のためである。ホログラム・メモリ板を図形入力装置に用いた場合、読み出し光は微小ホログラムの内部ばかりでなく相隣る微小ホログラムの境界をも照明する。その結果、二つないし四つの像が同時に再生され、それらが検出面上で加え合わされる。したがって、2進コードを使うと、加え合わされた信号は照明位置から遠く離れた位置を示す恐れがある。一方、グレー・コードを使えば、加え合わされた信号は必ず相隣る位置のどれかを示しているから、読み出しの誤りが最少になる。

以上多重記録ホログラム・メモリ板を製作するための光学配置およびデータ・マスクの設計について述べた。次に記録の手順について述べる。

まず、第1ビットに相当するデータ・マスクの像と第1ビットに固有の角度を有する参照光とにより生じる干渉縞を感光材料に記録する。これで全ての位置の第1ビットの情報が同時に記録される。次に、第2ビットに相当するデータ・マスクの像と第2ビットに固有の角度を有する参照光とにより生じる干渉縞を同じ感光材料に重ね合わせて記録する。以下同様にこの操作を $(m+n)$ 回続ければ全ての情報の記録が完了する。記録が完了すれば、後は通常のホログラムの製作と同様に、現像、定着、漂白等の処理を行なうことによってホログラム・メモリ板ができる。

多重記録ホログラム・メモリ板の上を読み出し光が動いた時、再生像がそれぞれ各ビットに対応した定点に生じることは定性的には次のように説明することができる。

多重記録ホログラム・メモリ板は、上に述べたように、点光源から発散する球面波と参照光としての平面波との干渉縞を多数記録したものであると考えられるから、太い平行光束で照明して実像を再生すると、それぞれ参照光の方向に対応した位置にデータ・マスクの数と同数の点像を形成する。したがって、多重記録ホログラム・メモリ板を細い読み出し光で走査した時も、読み出し光の方向が一定であるならば、再生像は必ずそれぞれ各ビットに対応した実像位置(定点)に生じる。

しかし実際にはホログラムの収差のために再生点像はある範囲内ではつく。この再生点像のおどりの問題については第2.4節で解析を行ない、第2.5節で実験結果との比較を行なう。

2.4 多重記録ホログラム・メモリ板の光学的性質の解析

ホログラム・メモリにおいては、或るビットに対応する再生像は、メモリ板上のどの場所から再生されようと、そのビットに対応した定点に生じなければならない。そこで通常、ホログラム・メモリ板からの読み出しは記録時の参照光と反対の方向からホログラム・メモリ板を照明することによって行なわれている。何故なら、厚みのある感光材料に記録したホログラムから像を再生する場合、収差のない明かるい実像が再生されるのはホログラムが記録時の参照光に共軛な光によって照明される時だけだからである。^{49, 50)}しかし、多重記録ホログラム・メモリ板の場合、上記の読み出し条件は次に述べるように満たすことができない。

多重記録ホログラム・メモリ板の製作においては第2.3節で述べたように多数の参照光が用いられている。したがって、ある任意の参照光に対して反対の方向からメモリ板を照明すると、読み出し光の方向は他の参照光に反対の方向とは一致しない。この不一致は当然再生点像の強度の違いを生じ、さらに収差による再生点像のおどりを引き起こす。

再生された点像の強度だけについて言うならば、物体光の伝播方向に近い方向からメモリ板を照明した時にも明かるい実像が再生される。しかしこの場合にも、物体光が球面波であるので、読み出し光は物体光の極く一部分としかその方向が一致せず、そのためにメモリ板上の場所の違いによる再生点像の強度変化を生じる。勿論この場合には再生点像のおどりは先に述べた場合よりも大きいことが予想される。

さらに多重記録ホログラム・メモリの場合、再生時に使用される像はデータ・マスクの像ではなく、記録時の結像レンズの焦面に収束された物体光点の像である。したがって、この物体光点の拡がりがあり大き

いと、再生像が光検出器をはみ出し、隣りの検出器にノイズとして働く恐れがある。

そこで本節では、まず結像レンズの焦面における物体光点の拡がりについて解析を行ない、次に多重記録ホログラム・メモリ板の結像特性および体積ホログラム効果による再生像の強度変化について解析を行なう。

2.4.1 結像レンズの焦面における物体光点の拡がり⁴⁸⁾

多重記録ホログラム・メモリ板から再生される像のうち、使用されるのはデータ・マスクの像ではなく、記録時の結像レンズの焦面に収束された物体光点の像である。したがって、この物体光点の拡がりがありすぎると再生像が光検出器をはみ出し、隣りの検出器にノイズとして働く恐れがある。そこで結像レンズの焦面における物体光点の拡がりについて解析を行なう。

第2.2図からわかるように結像レンズの焦面における物体光点の拡がりとはデータ・マスクのフーリエ変換像の拡がりと同じ。また本節の目的のためには $(m+n)$ 枚のデータ・マスクのうち空間周波数の最も高いものについて考えればよい。そのようなマスクにおいては、スリットは、第2.3図のマスク $(x-3)$ やマスク $(y-3)$ に見られるように、スリット幅の2倍の周期で平行に並んでいる。

N 本のスリットより成るデータ・マスクのフーリエ変換像の強度分布は次式によって与えられる。⁵¹⁾

$$\frac{I(x)}{I(0)} = \left\{ \frac{\sin(2\pi N s x / \lambda f)}{\sin(2\pi s x / \lambda f)} \right\}^2 \left\{ \frac{\sin(\pi s x / \lambda f)}{\pi s x / \lambda f} \right\}^2 \quad (2.2)$$

ただし、 $I(0)$ は $x=0$ の時の強度、 f は結像レンズの焦点距離、 λ はコヒーレント光の波長、 s はスリット幅である。

$I(x)/I(0)$ は $x=0$ および $x=\pm(2p-1)\lambda f/2s$ の点でピークを持ち、 $x=\pm q\lambda f/2Ns$ の点で0になる。ただし、 p は正の整数、

q は $q=(2p-1)N$ を除いた正の整数である。

さて、ピークの強度は p が増すにつれて急速に小さくなるので、この論文の目的のためには、フーリエ変換像の拡がりとして回析像の中心から1次のピークが0になる点までの距離の2倍をとれば十分である。したがって、結像レンズの焦面における物体光点の拡がり D_x は次式により見積ることができる。

$$D_x = (N+1) \lambda f / N s \quad (2.3)$$

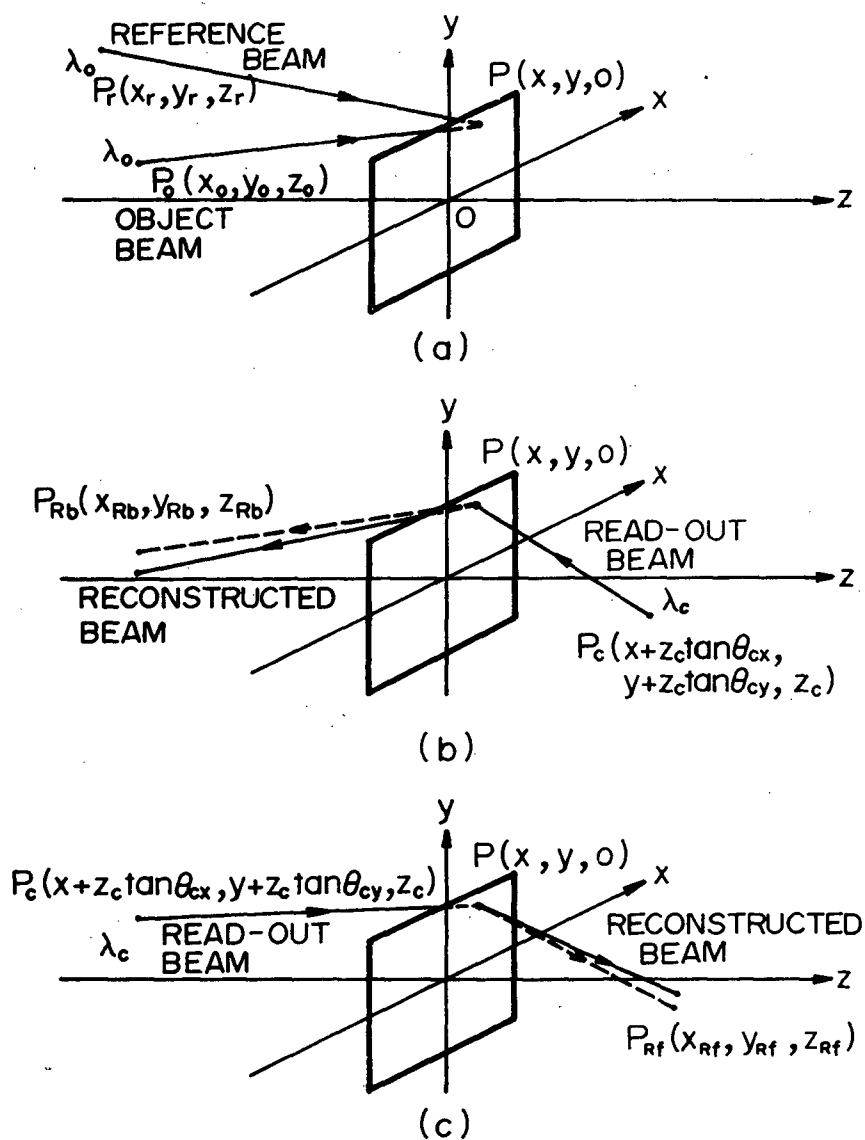
例として、 $N=100$, $f=500\text{mm}$, $s=0.5\text{mm}$, $\lambda=0.63 \times 10^{-3}\text{mm}$ の場合を計算すると、 D_x は約 0.64mm となり、物体光点の拡がりはいさいことがわかる。第2.5節で述べるように再生点像の拡がりはいむしろ読み出し光ビームの直径に大きく依存することが実験により確かめられた。

2.4.2 ガウス領域における再生点像の不動性^{48, 52)}

ホログラフィ結像の一般的な取り扱いはい Meier⁵³⁾ によって行なわれているが、多重記録ホログラム・メモリ板の場合には読み出し光がメモリ板上を動くという特殊性があるので、Meier が導出した式はそのままでは多重記録ホログラム・メモリ板にあてはまらない。そこで Meier に従いながら多重記録ホログラム・メモリ板の結像特性を解析する。

本節の目的のためには物体光や参照光の強さは問題ではなく、これらの波面の位相が意味を持っているので、本節では各波面の位相のみを取り扱うことにする。

第2.4(a)図に示すように、感光材料(ホログラム)の中心に原点、その面内に x, y 軸をとり、物体光点 P_0 の座標を (x_0, y_0, z_0) 、物体光の波長を λ_0 とすると、感光材料面上の点 $P(x, y, 0)$ における物体波面の原点に相対的な位相 $\phi_0(x, y)$ は次式によって与えられる。



第 2・4 図 多重記録ホログラム・メモリ板の記録および読み出しにおける座標関係。(a) 多重記録ホログラム・メモリ板の記録。(b) メモリ板を後側(右側)から照明した場合の読み出し。(c) メモリ板を前側(左側)から照明した場合の読み出し。

$$\begin{aligned}
\phi_0(x, y) = & (2\pi/\lambda_0) \left[\frac{1}{2} z_0^{-1} (x^2 + y^2 - 2xx_0 - 2yy_0) \right. \\
& - \frac{1}{8} z_0^{-3} (x^4 + y^4 + 2x^2y^2 - 4x^3x_0 - 4y^3y_0 \\
& - 4x^2yy_0 - 4xy^2x_0 + 6x^2x_0^2 + 6y^2y_0^2 \\
& + 2x^2y_0^2 + 2y^2x_0^2 + 8xyx_0y_0 - 4xx_0^3 \\
& - 4yy_0^3 - 4xx_0y_0^2 - 4yx_0^2y_0) \\
& \left. + \text{高次の項} \right] \quad (2.4)
\end{aligned}$$

点 $P(x, y, 0)$ における参照波面の原点に相対的な位相 $\phi_r(x, y)$ も同様に表わすことができる。しかし読み出し光（波長 λ_c ）は一定の入射角を保ってホログラム面上を動くので、点 $P(x, y, 0)$ における読み出し光波面の原点に相対的な波面 $\phi_c(x, y)$ を表わすには、(2.4) 式の λ_0, z_0, x_0, y_0 を λ_c, z_c

$$\begin{aligned}
x_c &= x + z_c \tan \theta_{cx} \\
y_c &= y + z_c \tan \theta_{cy}
\end{aligned} \quad , \quad \} \quad (2.5)$$

で置き換える必要がある。ただし、 θ_{cx}, θ_{cy} はそれぞれ読み出し光の進行方向が z 軸となす角の x 成分および y 成分である。結局 $\phi_c(x, y)$ は次のように表わされる。

$$\begin{aligned}
\phi_c(x, y) = & (2\pi/\lambda_c) \left[\frac{1}{2} z_c^{-1} (-x^2 - y^2 - 2xz_c \tan \theta_{cx} - 2yz_c \tan \theta_{cy}) \right. \\
& + \frac{1}{8} z_c^{-3} (x^4 + y^4 + 2x^2y^2 + 4x^3z_c \tan \theta_{cx} \\
& + 4y^3z_c \tan \theta_{cy} + 4x^2yz_c \tan \theta_{cy} + 4xy^2z_c \tan \theta_{cx} \\
& + 6x^2z_c^2 \tan^2 \theta_{cx} + 6y^2z_c^2 \tan^2 \theta_{cy} + 2x^2z_c^2 \tan^2 \theta_{cy} \\
& + 2y^2z_c^2 \tan^2 \theta_{cx} + 8xyz_c^2 \tan \theta_{cx} \cdot \tan \theta_{cy} \\
& + 4xz_c^3 \tan^3 \theta_{cx} + 4yz_c^3 \tan^3 \theta_{cy} \\
& + 4xz_c^3 \tan \theta_{cx} \cdot \tan^2 \theta_{cy} + 4yz_c^3 \tan^2 \theta_{cx} \cdot \tan \theta_{cy}) \\
& \left. + \text{高次の項} \right] \quad (2.6)
\end{aligned}$$

これらの各波面の位相を加え合わせると再生波面の位相（原点に相対的な位相）が得られる。第2・4(b)図に示すようにホログラムを後側（右側）から照明する時に実像を形成する再生波面のホログラム面上における位相を ϕ_{Rb} であらわし、第2・4(c)図に示すようにホログラムを前側（左側）から照明する時に実像を形成する再生波面のホログラム面上における位相を ϕ_{Rf} であらわすと ϕ_{Rb} 、 ϕ_{Rf} はそれぞれ次のようにあらわすことができる。

$$\left. \begin{aligned} \phi_{Rb} &= \phi_c + \phi_o - \phi_r \\ \phi_{Rf} &= \phi_c - \phi_o + \phi_r \end{aligned} \right\} \quad (2 \cdot 7)$$

我々の第一の目的は多重記録ホログラム・メモリ板を細い光ビームで走査した時に参照光のある方向に対応する再生点像は、メモリ板上の位置に関係せず、必ず定点に生じることを示すことである。したがって、まず ϕ_{Rb} 、 ϕ_{Rf} の1次の項、すなわちガウス領域における結像について考えることにしよう。

位相 ϕ_{Rb} の1次の項は次式によって与えられる。

$$\begin{aligned} \phi_{Rb}^{(1)} &= \frac{2\pi}{\lambda_c} \frac{1}{2} \left\{ (x^2 + y^2) \left(-\frac{1}{z_c} + \frac{\mu}{z_o} - \frac{\mu}{z_r} \right) \right. \\ &\quad \left. - 2x \left(\tan \theta_{cx} + \frac{\mu x_o}{z_o} - \frac{\mu x_r}{z_r} \right) - 2y \left(\tan \theta_{cy} + \frac{\mu y_o}{z_o} - \frac{\mu y_r}{z_r} \right) \right\} \quad (2 \cdot 8) \end{aligned}$$

ただし $\mu = \lambda_c / \lambda_o$ である。

一方再生された波面の1次近似における中心の座標を (x_{Rb}, y_{Rb}, z_{Rb}) であらわすと、 $\phi_{Rb}^{(1)}$ は

$$\phi_{Rb}^{(1)} = \frac{2\pi}{\lambda_c} \frac{1}{2} \frac{x^2 + y^2 - 2xx_{Rb} - 2yy_{Rb}}{z_{Rb}} \quad (2 \cdot 9)$$

と書くことができるから，(2・8)式と(2・9)式を比較することによって z_{Rb} , x_{Rb} , y_{Rb} は次のように求まる。

$$\left. \begin{aligned} z_{Rb} &= - \frac{z_c z_o z_r}{z_o z_r - \mu z_c z_r + \mu z_c z_o} \\ x_{Rb} &= - \frac{z_c z_o z_r \tan \theta_{cx} + \mu x_o z_c z_r - \mu x_r z_c z_o}{z_o z_r - \mu z_c z_r + \mu z_c z_o} \\ y_{Rb} &= - \frac{z_c z_o z_r \tan \theta_{cy} + \mu y_o z_c z_r - \mu y_r z_c z_o}{z_o z_r - \mu z_c z_r + \mu z_c z_o} \end{aligned} \right\} (2 \cdot 10)$$

同様にして，ホログラムを前側から照明した時の1次近似における再生像点の位置座標 (x_{Rf} , y_{Rf} , z_{Rf}) は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} z_{Rf} &= - \frac{z_c z_o z_r}{z_o z_r + \mu z_c z_r - \mu z_c z_o} \\ x_{Rf} &= - \frac{z_c z_o z_r \tan \theta_{cx} - \mu x_o z_c z_r + \mu x_r z_c z_o}{z_o z_r + \mu z_c z_r - \mu z_c z_o} \\ y_{Rf} &= - \frac{z_c z_o z_r \tan \theta_{cy} - \mu y_o z_c z_r + \mu y_r z_c z_o}{z_o z_r + \mu z_c z_r - \mu z_c z_o} \end{aligned} \right\} (2 \cdot 11)$$

(2・10)式あるいは(2・11)式より， z_c , θ_{cx} , θ_{cy} が一定であるならば，1次近似における再生像点は定点であることがわかる。したがって，ガウス領域内で像を再生する限り，多重記録ホログラム・メモリ板上

を読み出し光が動いても、読み出し光の伝播方向が一定であれば、或るビットに対応する再生点像は不動である。

2.4.3 再生点像のおどり (3次近似における再生像の収差) 48,52)

上に述べた再生点像の不動性は1次近似の範囲で成り立つことであって、実際にはホログラフィ結像の収差のために再生点像の位置は微小ホログラムの位置によってわずかながら動きまわる、すなわちおどりを示す。そこで次に3次収差による再生点像のおどりについて解析を行なう。

ホログラム面上の点Pにおける再生波面の位相 ϕ_R と1次近似における再生波面の位相 $\phi_R^{(1)}$ との差を $\Delta\phi$ とすると、 $\Delta\phi$ は

$$\left. \begin{aligned} \Delta\phi_b &= \phi_{Rb} - \phi_{Rb}^{(1)} \\ \Delta\phi_f &= \phi_{Rf}^{(1)} - \phi_{Rf} \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

と書き表わされる。ただし、添字bはホログラムを後側から照明したことを示し、添字fは前側から照明したことを示す。

したがって、3次近似における波面収差Wは次式によって与えられる。

$$W = \frac{1}{8} (x^2 + y^2)^2 S \quad \text{球面収差}$$

$$+ \frac{1}{2} (x^3 + xy^2) C_x + \frac{1}{2} (x^2 y + y^3) C_y \quad \text{コマ収差}$$

$$+ \frac{1}{2} x^2 A_x + \frac{1}{2} y^2 A_y + xy A_{xy} \quad \text{非点収差}$$

$$+ \frac{1}{4} (x^2 + y^2) F \quad \text{像面彎曲}$$

$$+ \frac{1}{2} x D_x + \frac{1}{2} y D_y \quad \text{歪曲収差} \quad (2.13)$$

ただし,

$$S = \left(\mp \frac{1}{z_c} + \frac{\mu}{z_o} - \frac{\mu}{z_r} \right)^3 \pm \frac{1}{z_c^3} - \frac{\mu}{z_o^3} + \frac{\mu}{z_r^3} \quad (2.14)$$

$$C_x = \left(\mp \tan \theta_{cx} - \frac{\mu x_o}{z_o} + \frac{\mu x_r}{z_r} \right) \left(\pm \frac{1}{z_c} - \frac{\mu}{z_o} + \frac{\mu}{z_r} \right)^2 \pm \frac{\tan \theta_{cx}}{z_c^2} + \frac{\mu x_o}{z_o^3} - \frac{\mu x_r}{z_r^3} \quad (2.15)$$

$$C_y = \left(\mp \tan \theta_{cy} - \frac{\mu y_o}{z_o} + \frac{\mu y_r}{z_r} \right) \left(\pm \frac{1}{z_c} - \frac{\mu}{z_o} + \frac{\mu}{z_r} \right)^2 \pm \frac{\tan \theta_{cy}}{z_c^2} + \frac{\mu y_o}{z_o^3} - \frac{\mu y_r}{z_r^3} \quad (2.16)$$

$$A_x = \left(\pm \tan \theta_{cx} + \frac{\mu x_o}{z_o} - \frac{\mu x_r}{z_r} \right)^2 \left(\mp \frac{1}{z_c} + \frac{\mu}{z_o} - \frac{\mu}{z_r} \right) \pm \frac{\tan^2 \theta_{cx}}{z_c} - \frac{\mu x_o^2}{z_o^3} + \frac{\mu x_r^2}{z_r^3} \quad (2.17)$$

$$A_y = \left(\pm \tan \theta_{cy} + \frac{\mu y_o}{z_o} - \frac{\mu y_r}{z_r} \right)^2 \left(\mp \frac{1}{z_c} + \frac{\mu}{z_o} - \frac{\mu}{z_r} \right) \pm \frac{\tan^2 \theta_{cy}}{z_c} - \frac{\mu y_o^2}{z_o^3} + \frac{\mu y_r^2}{z_r^3} \quad (2.18)$$

$$A_{xy} = \left(\pm \tan \theta_{cx} + \frac{\mu x_o}{z_o} - \frac{\mu x_r}{z_r} \right) \left(\pm \tan \theta_{cy} + \frac{\mu y_o}{z_o} - \frac{\mu y_r}{z_r} \right) \left(\mp \frac{1}{z_c} + \frac{\mu}{z_o} - \frac{\mu}{z_r} \right)$$

$$\pm \frac{\tan \theta_{cx} \cdot \tan \theta_{cy}}{z_c} - \frac{\mu x_o y_o}{z_o} + \frac{\mu x_r y_r}{z_r^3} \quad (2.19)$$

$$F = A_x + A_y \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned}
 D_x = & (\mp \tan \theta_{cx} - \frac{\mu x_o}{z_o} + \frac{\mu x_r}{z_r}) \{ (\pm \tan \theta_{cx} + \frac{\mu x_o}{z_o} - \frac{\mu x_r}{z_r})^2 \\
 & + (\pm \tan \theta_{cy} + \frac{\mu y_o}{z_o} - \frac{\mu y_r}{z_r})^2 \} \pm \tan \theta_{cx} (\tan^2 \theta_{cx} + \tan^2 \theta_{cy}) \\
 & + \frac{\mu x_o (x_o^2 + y_o^2)}{z_o^3} - \frac{\mu x_r (x_r^2 + y_r^2)}{z_r^3} \quad (2.21)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_y = & (\mp \tan \theta_{cy} - \frac{\mu y_o}{z_o} + \frac{\mu y_r}{z_r}) \{ (\pm \tan \theta_{cx} + \frac{\mu x_o}{z_o} - \frac{\mu x_r}{z_r})^2 \\
 & + (\pm \tan \theta_{cy} + \frac{\mu y_o}{z_o} - \frac{\mu y_r}{z_r})^2 \} \pm \tan \theta_{cy} (\tan^2 \theta_{cx} + \tan^2 \theta_{cy}) \\
 & + \frac{\mu y_o (x_o^2 + y_o^2)}{z_o^3} - \frac{\mu y_r (x_r^2 + y_r^2)}{z_r^3} \quad (2.22)
 \end{aligned}$$

ただし複号の上側は後側から照明した場合を示し、下側は前側から照明した場合を示している。

さて波面収差 W は次式によって近似的に光線収差 (ray aberration) $\Delta x, \Delta y$ に変換することができる。⁵⁴⁾

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta x &= \frac{R}{n_i} \frac{\partial W}{\partial x} \\
 \Delta y &= \frac{R}{n_i} \frac{\partial W}{\partial y}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

ただし， R は座標の原点から 1 次近似における再生点像の位置までの距離， n_i は像空間の屈折率である。(2.23) 式に (2.13) 式を代入して整理すると， Δx ， Δy は次のようにあらわされる。

$$\Delta x = \frac{R}{n_i} \left\{ \frac{1}{2} x (x^2 + y^2) S + \frac{1}{2} (3x^2 + y^2) C_x + x y C_y \right. \\ \left. + x A_x + y A_{xy} + \frac{1}{2} x F + \frac{1}{2} D_x \right\} \quad (2.24)$$

$$\Delta y = \frac{R}{n_i} \left\{ \frac{1}{2} y (x^2 + y^2) S + x y C_x + \frac{1}{2} (x^2 + 3y^2) C_y \right. \\ \left. + y A_y + x A_{xy} + \frac{1}{2} y F + \frac{1}{2} D_y \right\} \quad (2.25)$$

ただし， S ， C_x ， C_y ， A_x ， A_y ， A_{xy} ， F ， D_x ， D_y は (2.14) 式から (2.22) 式に与えられている。

これらの式から読み出し光が多重記録プログラム・メモリ板上を動いた時の再生点像のおどりの量を知ることができる。再生点像のおどりの計算例は後で第 2.13 図および第 2.14 図に次の二つの場合について実験結果と共に示すことにする。すなわち第 2.13 図には $x_0 = y_0 = 0$ ， $z_0 = -205\text{mm}$ ， $\theta_{rx} = -17^\circ \sim 17^\circ$ ， $\theta_{ry} = -16.3^\circ$ という条件で記録したプログラムを $\theta_{cx} = \pi$ ， $\theta_{cy} = \pi - 16.3^\circ$ という入射角を有する細いビームで照明した場合の再生像のおどりを示し，第 2.14 図には同じプログラムを $\theta_{cx} = \theta_{cy} = 0$ という入射角を有する細い光ビームで照明した場合の再生像のおどりを示す。ただし， θ_{rx} ， θ_{ry} はそれぞれ参照光として用いられた平行光が z 軸となす角の x 成分および y 成分である。さらに第 2.13 図では実験結果と較べるために歪曲収差を示す項， $\frac{1}{2} x D_x + \frac{1}{2} y D_y$ は省かれている (プログラム

が $\theta_{ox} = \theta_{oy} = 0$ という入射角を有する光ビームによって照明された時は D_x と D_y は 0 になる。したがって、第 2・14 図では、 $\delta x = \Delta x$, $\delta y = \Delta y$ である)。

2.4.4 体積ホログラム効果による再生点像の強度変化^{48,52)}

体積ホログラム効果による再生点像の強度変化について Leith らの理論⁵⁰⁾に基づいて解析を行なう。

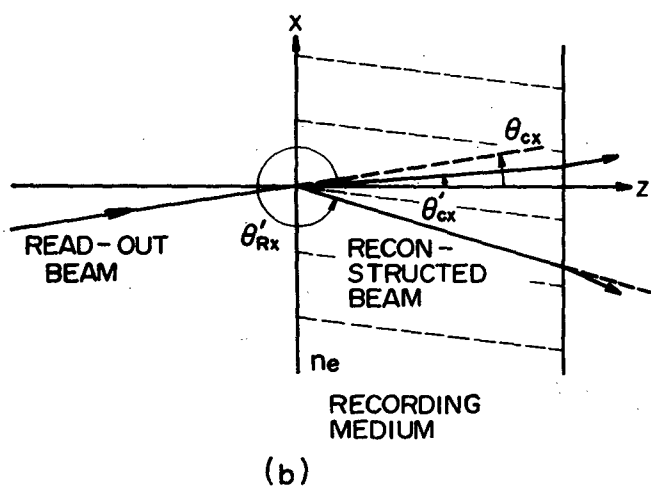
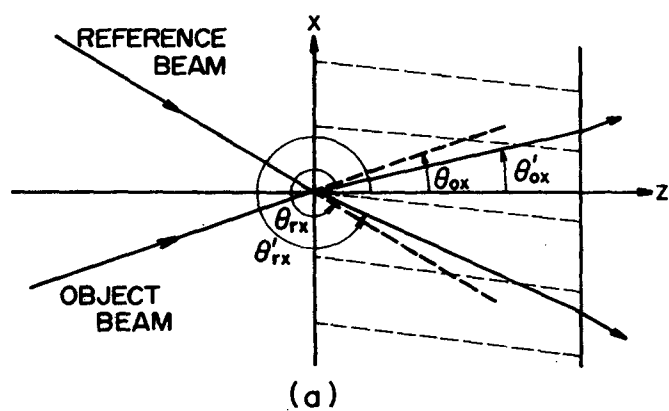
まず干渉縞の強度が第 2・4 図の x 方向に変化する場合について議論を進めることにする。

第 2・5 図に示すように、感光材料内において、物体光が z 軸となす角の x 成分を θ'_{ox} , 参照光が z 軸となす角の x 成分を θ'_{rx} , 読み出し光が z 軸となす角の x 成分を θ'_{cx} , 再生光が z 軸となす角の x 成分を θ'_{Rx} とすると、実像を形成する再生波の強度 I は次式によって与えられる。⁵⁰⁾

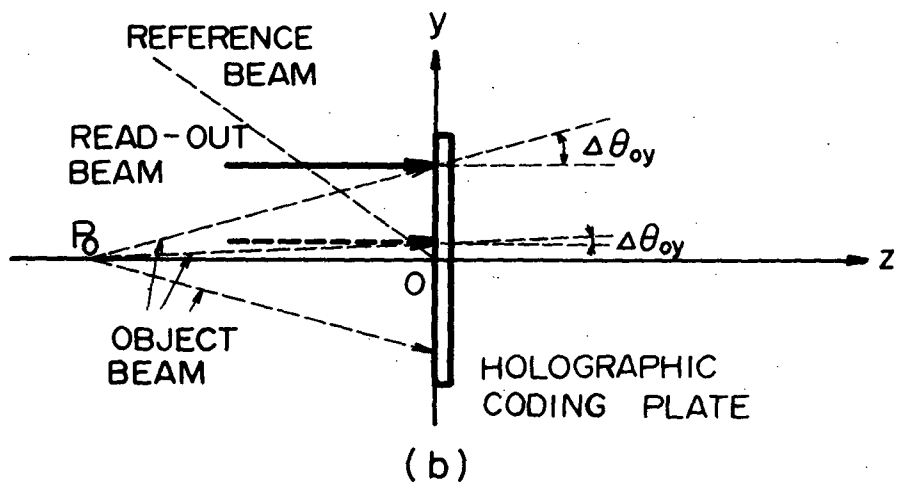
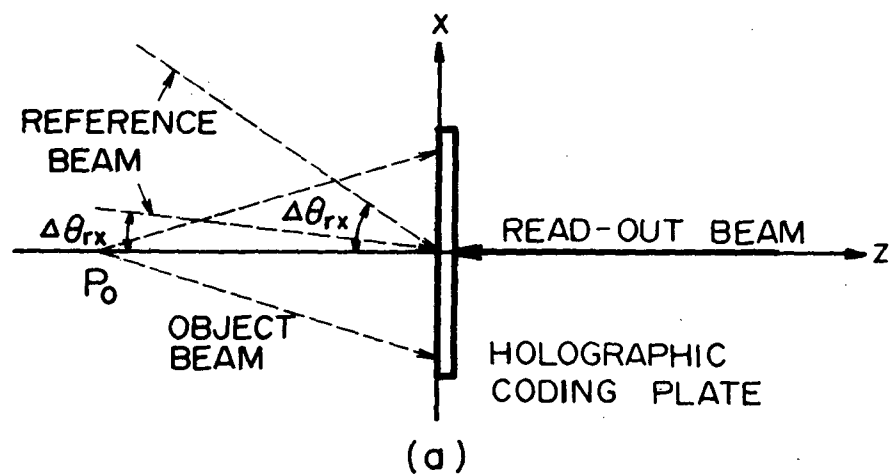
$$I = K \sec^2 \theta'_{Rx} \operatorname{sinc}^2 \left\{ \frac{\pi L}{\lambda'_c \cos \theta'_{Rx}} [\mu \cos(\theta'_{Rx} - \theta'_{rx}) - \mu \cos(\theta'_{rx} - \theta'_{ox}) + \cos(\theta'_{Rx} - \theta'_{cx}) - 1] \right\} \quad (2.26)$$

ただし L は感光材料の厚さ, λ'_c は感光材料中における読み出し光の波長, K は比例定数である。この式から, $\mu = 1$ の時 (記録と読み出しに同じ波長の光が使われた時), (1) $\theta'_{cx} = \theta'_{rx} + \pi$ および $\theta'_{Rx} = \theta'_{ox} + \pi$, (2) $\theta'_{cx} = \theta'_{ox}$ および $\theta'_{Rx} = \theta'_{rx}$ という二通りの条件のいずれかが満足されるならば, 実像を形成する回折波の強度は最も強くなることがわかる。

しかし, 多重記録ホログラム・メモリ板の場合には, すでに述べたように上記の条件は必ずしも満足されない。すなわち, ある任意の参照光の反対の方向からメモリ板を照明した時には, 第 2・6 (a) 図に示すように, 読み出し光の方向は他の参照波に反対の方向とは一致せず, この不一致が再生点像間の強度変化を生じる。ここで注意すべきことは, 再生点像間の強度変



第 2・5 図 体積ホログラムの記録と読み出し。
 プライムのついてゐる角度は感光材料内の値を示し、プライムのついていない角度は空気中の値を示している。(a) 記録過程、(b) 読み出し過程。



第 2・6 図 多重記録ホログラム・メモリ板から像を読み出す場合の読み出し光の方向の、再生像が最も強くなる方向からのずれ。(a) 任意の参照光に反対の方向からメモリ板を照明した場合、(b) 物体光の伝播方向に近い方向からメモリ板を照明した場合。

化はメモリ板のどの部分においても同等に起る，すなわちあるビットに対する再生点像の強度は読み出し光がメモリ板上を動いても変化しないことである。

一方，物体光の伝播方向に近い方向からメモリ板を照明した時には，第2・6(b)図に示すように，読み出し光は物体光の極く一部分としかその方向が一致せず，そのためにメモリ板上の位置の違いによる再生点像の強度変化を生じる。ここで注意すべきことは，この場合には，位置の違いによる再生点像の強度変化は同じ位置から再生される全ての点像に対して同等に生じる，すなわち再生点像間の強度変化は起らないことである。

したがって，前者の場合には，再生点像間の強度変化のみを議論すれば十分である。 μ はほぼ1に等しい，すなわち記録用と読み出し用のコヒーレント光の波長がほぼ等しいとすると， θ'_{ox} , θ'_{rx} は次のように書くことができる。

$$\left. \begin{aligned} \theta'_{ox} &= \theta'_{rx} + \pi + \Delta\theta'_{rx} \\ \theta'_{rx} &= \theta'_{ox} + \pi + \Delta\theta'_{ox} \end{aligned} \right\} (2.27)$$

$\Delta\theta'_{rx}$, $\Delta\theta'_{ox}$ が十分小さいとすると，(2.26)式は次のような近似式に書き換えることができる。

$$\frac{I_{xb}}{I_{xb \max}} = \text{sinc}^2 \left\{ \frac{\pi L}{\lambda'_c} \right. \\ \left. \times \frac{(\mu-1)[1-\cos(\theta'_{rx}-\theta'_{ox})] - \sin(\theta'_{rx}-\theta'_{ox})\sin\Delta\theta'_{rx}}{\cos\theta'_{ox}} \right\} \\ (2.28)$$

$I_{xb} = I_{xb \max}$ となるのは

$$\sin 4\theta'_{rx} = \frac{(\mu-1)[1-\cos(\theta'_{rx}-\theta'_{ox})]}{\sin(\theta'_{rx}-\theta'_{ox})} \quad (2.29)$$

の時である。

同様に、後者の場合には、読み出し光がメモリ板の上を動いた時の或るビットに対応する再生点像の強度変化だけを議論すれば良い。 μ はほぼ1に等しいとすると、 θ'_{ox} 、 θ'_{Rx} は今度は次のように書くことができる。

$$\left. \begin{aligned} \theta'_{cx} &= \theta'_{ox} + 4\theta'_{ox} \\ \theta'_{Rx} &= \theta'_{rx} + 4\theta'_{rx} \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

したがって、 $4\theta'_{ox}$ 、 $4\theta'_{rx}$ が十分小さいとすると、(2.26)式は次のように書き換えることができる。

$$\frac{I_{xf}}{I_{xf \max}} = \text{sinc}^2 \left\{ \frac{\pi L}{\lambda'_c} \times \frac{(\mu-1)[1-\cos(\theta'_{rx}-\theta'_{ox})] + \sin(\theta'_{rx}-\theta'_{ox}) \sin 4\theta'_{ox}}{\cos \theta'_{rx}} \right\} \quad (2.31)$$

$I_{xf} = I_{xf \max}$ となるのは

$$\sin 4\theta'_{ox} = \frac{(\mu-1)[1-\cos(\theta'_{rx}-\theta'_{ox})]}{\sin(\theta'_{rx}-\theta'_{ox})} \quad (2.32)$$

の時である。

ところで $\theta'_{ox}, \theta'_{rx}, 4\theta'_{ox}, 4\theta'_{rx}, \lambda'_c$ は感光材料の内部における値であるから、理論と実験の比較を行なうためには、(2.28)式および(2.29)式を $\theta'_{ox}, \theta'_{rx}, 4\theta'_{ox}, 4\theta'_{rx}, \lambda'_c$ の空気中における値 $\theta_{ox}, \theta_{rx}, 4\theta_{ox}, 4\theta_{rx}, \lambda_c$ を用いて書き直す必要がある。感光材料の屈折率を n_e とすると、感光材料内における角度や波長の値と空気中の値との間には

$$n_e \sin \theta' = \sin \theta \quad (2.33)$$

および

$$\lambda'_c = \lambda_c / n_e \quad (2.34)$$

の関係があるから、これらの関係を用い、さらに式があまりに複雑になるのをさけるため $\mu = 1$ として、(2.28)式、(2.31)式を書き直すとそれぞれ次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{I_{xb}}{I_{xb \max}} &= \text{sinc}^2 \left\{ \frac{\pi L \cos \theta_{rx}}{\lambda_c} \right. \\ &\times \left\{ \frac{\sin \theta_{rx}}{(n_e^2 - \sin^2 \theta_{rx})^{1/2}} - \frac{\sin \theta_{ox}}{(n_e^2 - \sin^2 \theta_{ox})^{1/2}} \right\} \sin 4\theta_{rx} \left. \right\} \end{aligned} \quad (2.35)$$

$$\frac{I_{xf}}{I_{xf \max}} = \text{sinc}^2 \left\{ \frac{\pi L \cos \theta_{ox}}{\lambda_c} \right. \\ \left. \times \left\{ \frac{\sin \theta_{rx}}{(n_e^2 - \sin^2 \theta_{rx})^{1/2}} - \frac{\sin \theta_{ox}}{(n_e^2 - \sin^2 \theta_{ox})^{1/2}} \right\} \sin 4 \theta_{ox} \right\}$$

(2.36)

干渉縞の強度が y 方向に変化する場合の再生点像の強度変化 $I_{yf}/I_{yf \max}$ をあらわす式も同様にして導き出すことができる。したがって、干渉縞の強度が x-y 面内の任意の方向に変化する場合の再生点像の強度変化は次式によって与えられる。

$$\frac{I}{I_{\max}} = \frac{I_x}{I_{x \max}} \cdot \frac{I_y}{I_{y \max}} \quad (2.37)$$

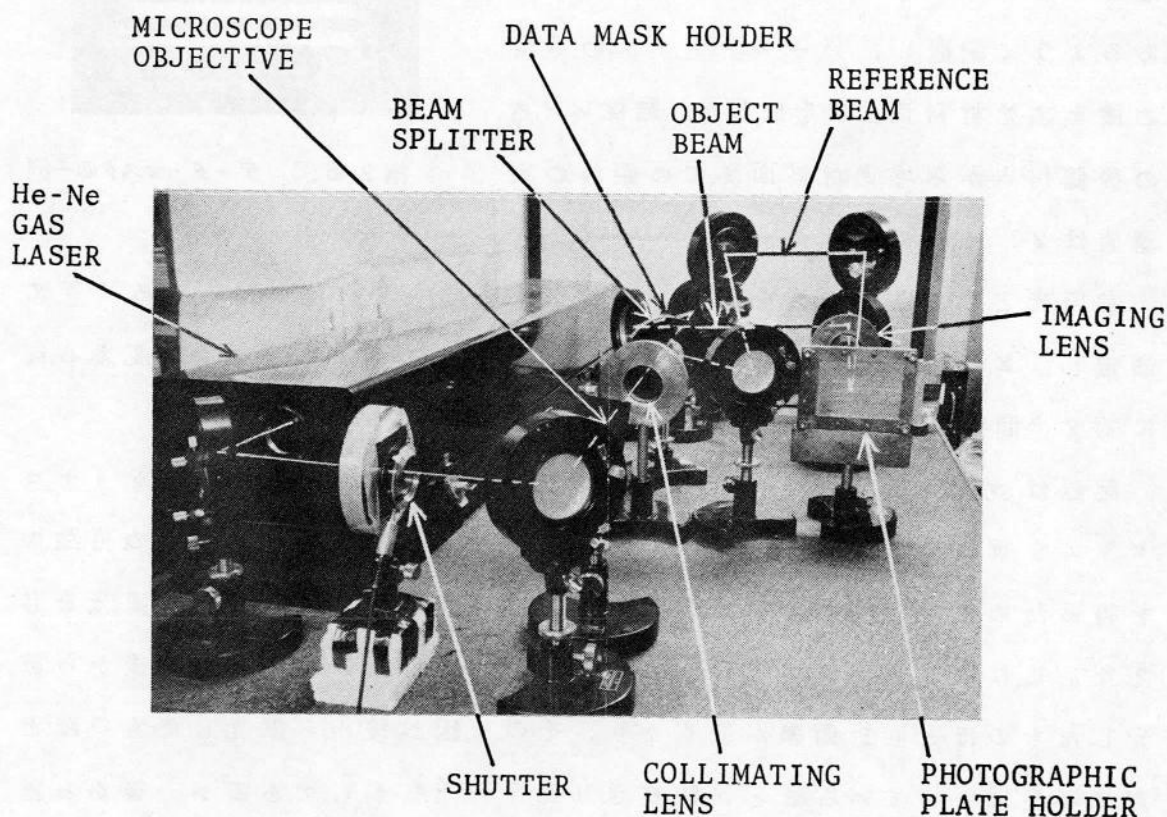
再生点像の強度変化の計算例は後で第 2.15 図および第 2.16 図に次の二つの場合について実験結果と共に示すことにする。すなわち第 2.15 図には、 $\lambda_o = \lambda_c = 6328 \text{ \AA}$ 、 $x_o = y_o = 0$ 、 $z_o = -205 \text{ mm}$ 、 $\theta_{rx} = -17^\circ \sim 17^\circ$ 、 $\theta_{ry} = -16.3^\circ$ という条件でコダック 649-F 乾板〔定着後、 $L = 13.5 \mu\text{m}$ (文献 50)〕に記録したホログラムを $\theta_{cx} = \pi$ 、 $\theta_{cy} = \pi - 16.3^\circ$ という入射角を有する細い光ビームで照明した場合の再生像の強度変化を示し、第 2.16 図には同じホログラムを $\theta_{cx} = \theta_{cy} = 0$ という入射角を有する細い光ビームで照明した場合の再生像の強度変化を示す。

2.5 実験結果と考察 ^{48,52)}

再生像のおどりと強度変化について前節の理論に基づいて求めた計算値と実験結果との比較を行なったところ，理論と実験のかなり良い一致が得られた。そこで本節では，まず多重記録ホログラム・メモリ板の製作について述べ，次に再生像のおどりと強度変化を測定するための実験方法および実験結果について述べる。

2.5.1 多重記録ホログラム・メモリ板の製作

多重記録ホログラム・メモリ板の実験的製作に用いられた装置の写真を第2・7図に示す。レーザー装置(He-Neレーザー)より出射した光は顕微



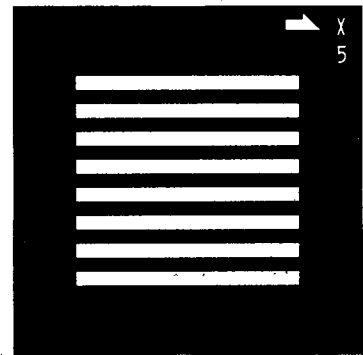
第2・7図 多重記録ホログラム・メモリ板の実験的製作に用いられた装置。参照光の方向は右上の反射鏡の移動と回転により変えられる。

鏡対物レンズとコリメーティング・レンズによって直径約 55 mm の平行光にされた後、ビーム・スプリッタによって二方向に分けられ、一方はデータ・マスク照明用（物体光）として、他方は参照光として用いられる。

データ・マスクは 128×128 位置用のもので、グレー・コードに従って描いたパターンをモリブデン薄板にフォトエッチングすることによって製作された。データ・マスクの有効画面の大きさは $32\text{ mm} \times 32\text{ mm}$ 、最も細いスリットの幅は 5.5 mm である。データ・マスクの一例の写真を第 2.8 図に示す。

結像レンズの焦点距離は公称 200 mm である。

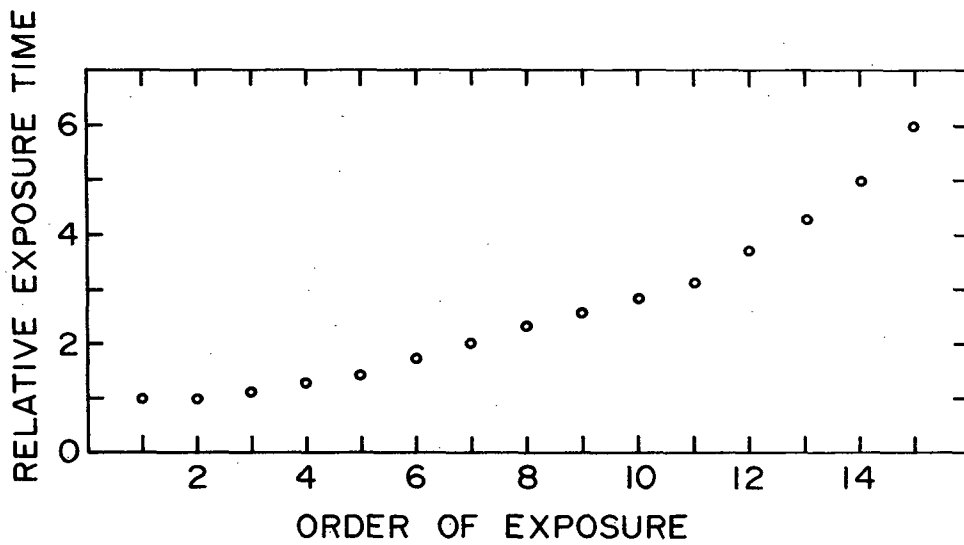
データ・マスク、結像レンズ、感光材料はそれぞれの中心が実質的には一直線上にあるように配置し、データ・マスクの等倍の像を感光材料面上に形成した。結像レンズの後側焦点から感光材料面までの距離の実測値は 205 mm であった。



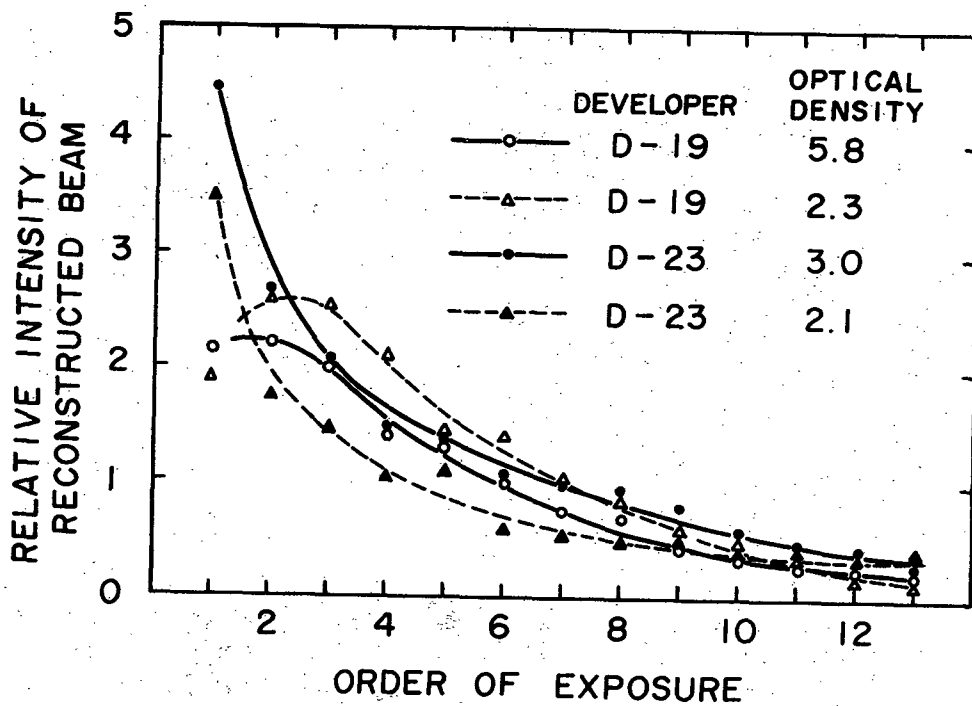
第 2.8 図 データ・マスクの一例

参照光としては平面波を用い、その伝播方向を Y 方向には -16.3° に固定し、 X 方向には -16.4° から 12.4° までデータ・マスクを変える毎に約 2° 間隔で変えた。

記録はコダック 649-F 乾板に次にとデータ・マスクのイメージ・ホログラムを重ね合わせることによって行なったが、ほぼ等しい強度の再生像を得るために後から露光するものほど第 2.9 図に示すように多い露光を与えた。これは各露光量を等しくすると第 2.10 図に示すように後から露光したものほど回折効率が低くなり、その原因が後から露光したものほど露光不足になっていることが観察された^{5,56)} からであるが、後から露光したものほど露光不足になる理由については現在研究中である。第 2.9 図に示すような具合に後から露光するものほど多い露光量を与えた結果、後に第 2.16 図に示すように、完全ではないが、均一な露光量を与えた場



第 2・9 図 露光の順番による再生像強度変化を補償するために用いた露光の順番と露光時間の関係。

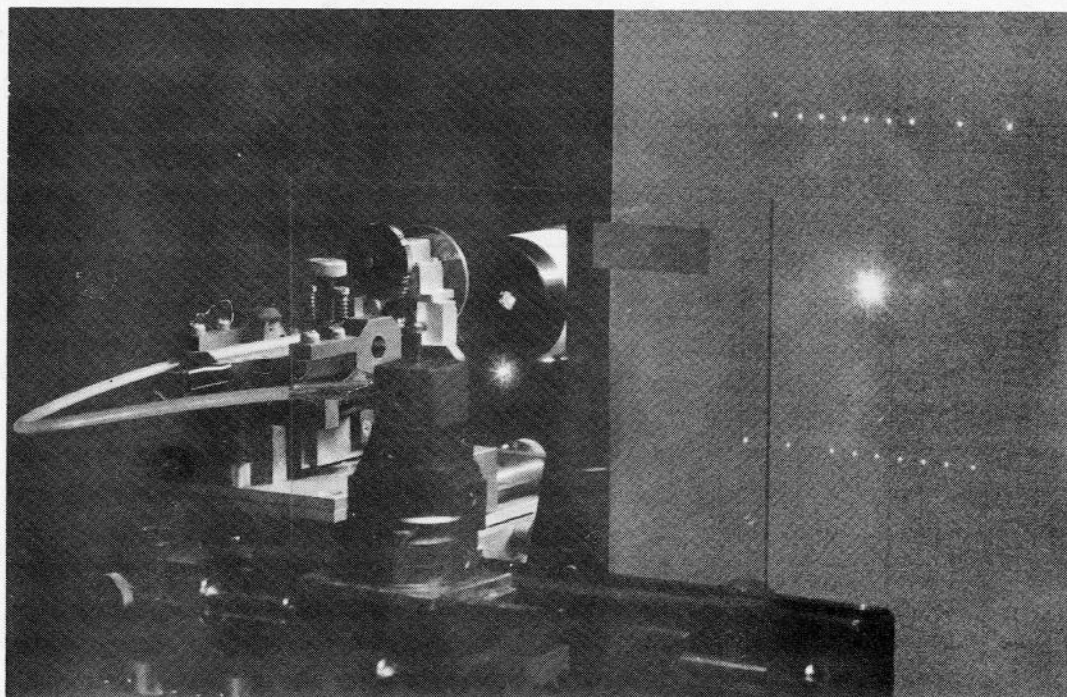


第 2・10 図 多重記録ホログラムの製作時に各露光の露光量を均一にした場合の露光の順番と再生像強度の関係。各ホログラムはフェリシアン化カリウムの 3% 水溶液で漂白されている。なお光学濃度は漂白前の値である。

合に比べるとはるかに回折効率を均一化させることができた。

露光が終った乾板はD-23現像液で現像，フジフィックスで定着し，水洗した後，フェリシアン化カリウムの3%水溶液に浸して漂白した。

第2・11図は上記のようにして製作した多重記録ホログラム・メモリ板を板上で約 $150\mu\text{m}$ の直径(ビーム・ウェイスト)を有する光ビーム($6328\text{\AA}$)で照明した場合の再生点像の写真である。点像の直径の測定値は約 2mm であった。この値は，多重記録ホログラム・メモリ板を実効的にはレンズであると考え，Kogelnikの理論⁵⁷⁾を用いて，メモリ板上のビーム・ウェイストの値から焦面における点像の拡がりを出した値(1.1mm)⁵⁸⁾と比較すると，倍近く大きい，メモリ板上の $150\mu\text{m}$ という値，点像の直径の測定値共にそう厳密な値ではないから，まずまずの一致である。すなわち再生点像の拡がりは読み出し光ビームの直径に大きく



第2・11図 多重記録ホログラム・メモリ板を板上で約 $150\mu\text{m}$ のビーム・ウェイストを有する光ビーム($6328\text{\AA}$)で照明した場合の再生点像の写真。

依存しているから，多重記録ホログラム・メモリ板製作時の物体光点の拡がりはそれほど問題にする必要はなく，十分小さいと考えておいても良いと言いうことができる。信号対雑音比の測定値も相隣る点像の比較では20 dB以上あり，再先点像の大きさは問題ないことがわかった。

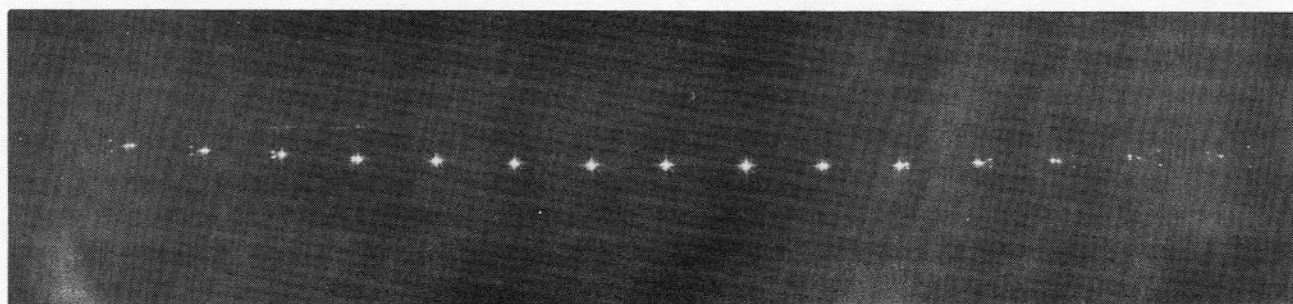
2.5.2 再生点像のおどり

再生点像のおどりを測定するために，データ・マスクを用いずに15回の多重露光により多重露光ホログラムを製作した。したがってこのホログラムからはそのどの位置を照明しても15個の点像が再生される。

再生点像のおどりの測定は次のようにして行なった。まず，32mm×32mmの大きさの黒紙を用意し，その中心と $x = \pm 1.5 \text{ mm}$ ， $y = \pm 1.5 \text{ mm}$ に相当する四隅の位置に1mm×1mmの大きさの四角い孔をあけ，この黒紙をその5個の孔がホログラムの中心と四隅とに丁度一致するようにホログラムに貼りつけ，このホログラムの全面を直径50mmのレーザー光で照明した。したがって，ホログラムの中心と $x = \pm 1.5 \text{ mm}$ ， $y = \pm 1.5 \text{ mm}$ に相当する四隅の位置から同時に5種類の再生点像が得られるから，これらの再生点像をポロライド55P/Nフィルムに記録し，このフィルム面上でホログラムの中心から再生された点像からホログラムの四隅から再生された各点像までの距離のx成分 δx およびy成分 δy を各ビットについて測定した。

ポロライド55P/Nフィルムに記録した再生点像の写真を第2.12図に示す。(a)はホログラムを $\theta_{rx} = 0$ なる参照光の方向の逆方向から照明した場合（以後この場合を“逆方向照明”と呼ぶことにする）の再生像であり，(b)はホログラムをその面に垂直に前側から照明した場合（以後この場合を“前側垂直照明”と呼ぶことにする）の再生像である。

第2.13図および第2.14図はそれぞれ第2.12図の写真から測定した δx ， δy の値を(2.24)式および(2.25)式を用いて計算した理論曲線と共に示したものである。図に見られるように，理論曲線は実験結果とよく一致している。したがって，再生点像のおどりの量を(2.24)式



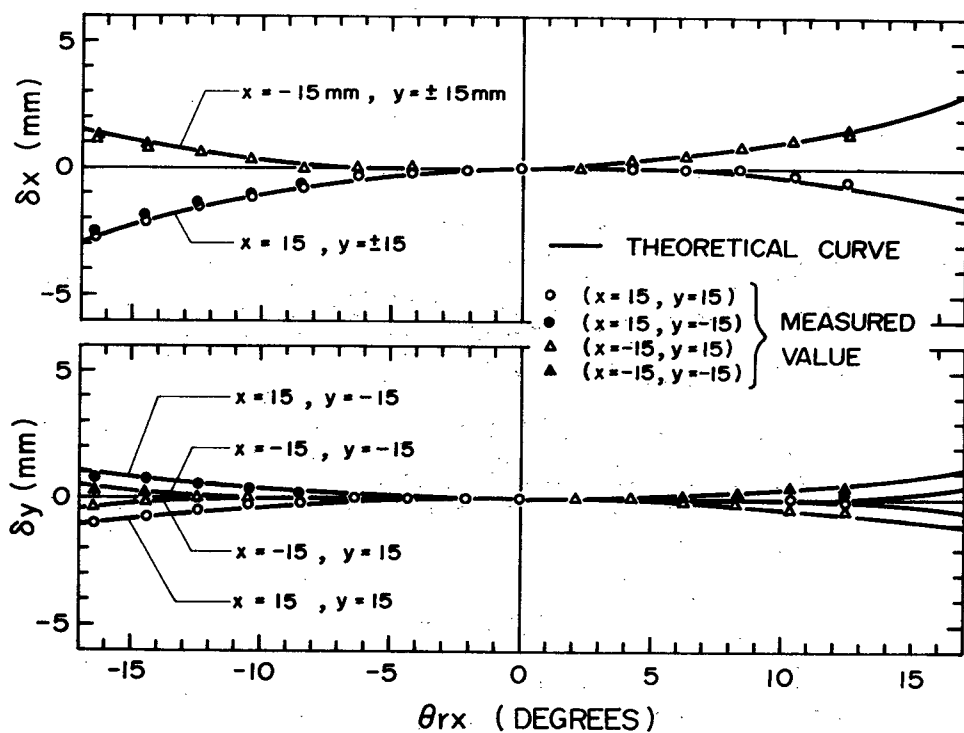
(a)



(b)

第2・12図 多重記録ホログラムの中心および四隅から再生された点像。

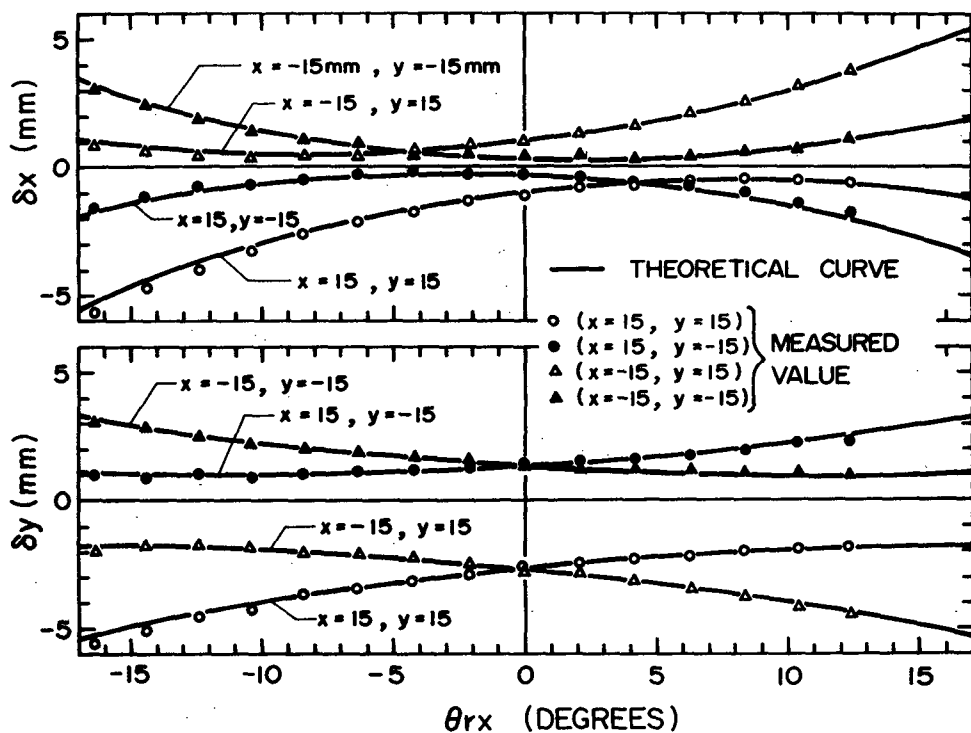
(a) ホログラムを $\theta_{rx} = 0$ なる参照光の方向の逆方向から照明した場合，(b) ホログラムをその面に垂直に前側から照明した場合。



第 2・13 図 ホログラムを逆方向照明した場合のホログラムの四隅から再生された各点像の位置のホログラムの中心から再生された点像の位置からのかたよりの量。測定値は第 2・1 2 (a) 図の写真から測定した値であり，理論曲線は (2・2 4) 式および第 (2・2 5) 式において歪曲収差を示す項を除外して計算したものである。また各パラメータは次の通りである。

$$x_o = y_o = 0, \quad z_o = -205 \text{ mm}, \quad \theta_{ry} = -16.3^\circ,$$

$$\theta_{cx} = \pi, \quad \theta_{cy} = \pi - 16.3^\circ.$$



第 2・14 図 ホログラムを前側垂直照明した場合のホログラムの四隅から再生された各点像の位置のホログラムの中心から再生された点像の位置からのかたよりの量。測定値は第 2・12 (b) 図の写真から測定した値であり，理論曲線は (2・2 4) 式および (2・2 5) 式を用いて計算したものである。また各パラメータは次の通りである。

$$x_o = y_o = 0, \quad z_o = -205 \text{ mm}, \quad \theta_{ry} = -16.3^\circ, \quad \theta_{cx} = \theta_{cy} = 0.$$

および (2.2 5) 式を用いて正確に知ることができる。

第 2.13 図と第 2.14 図の比較から明らかなように、再生点像のおどりはホログラムを逆方向照明した場合より前側垂直照明した場合の方が大きい。しかし多重記録ホログラム・メモリ板を実際に使用する場合、前側垂直照明の方が、読み出し光を射出する装置とメモリ板の間の間隔が多少変わっても読み出し光の方向が変わらない限り誤読み出しのもとにはならない、等の理由から読み出し光を射出する装置の構造が簡単でよいという利点を有している。したがって実用装置においては、再生点像のおどりを太陽電池のように受光面積の大きい光検出器を用いておぎない、前側垂直照明を使う方がよい。

再生点像のおどりを小さく押えたい場合には勿論逆方向照明を使うべきである。この場合には第 2.1 2 (a) 図に見られるように、歪曲収差が生じるが、歪曲収差は光検出器を適当に配列することによって容易に補償できるので、たいして問題ではない。

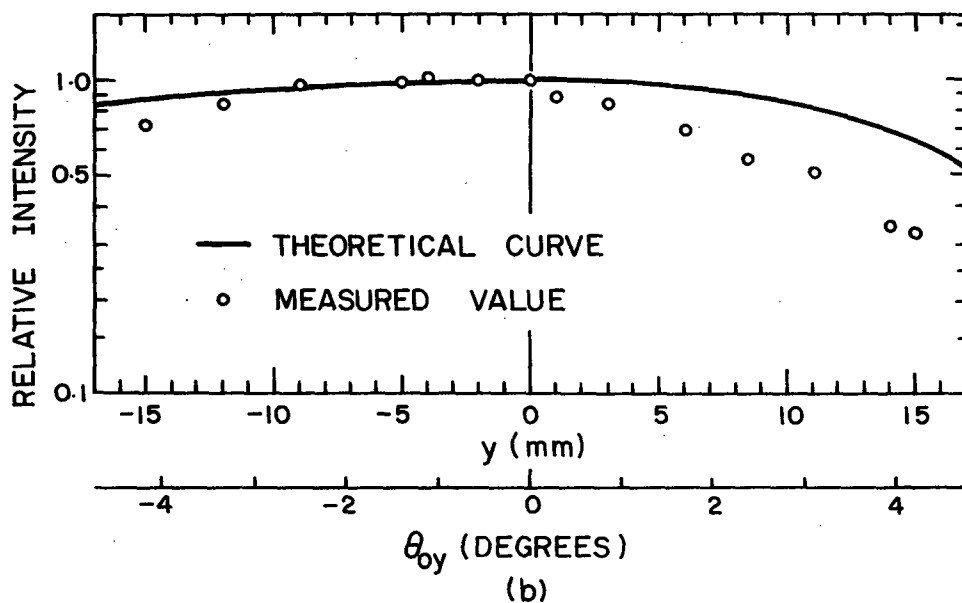
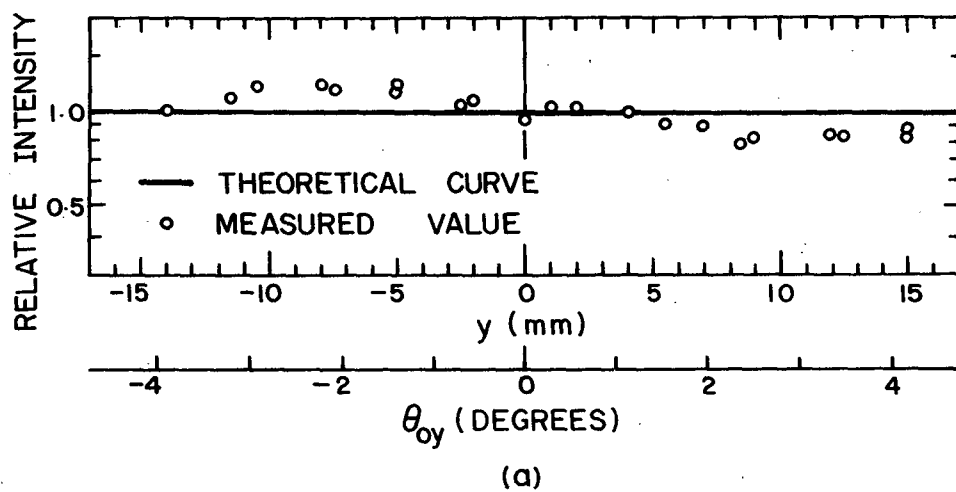
2.5.3 再生点像の強度変化

多重記録ホログラム・メモリ板から再生される点像強度の体積ホログラム効果による不均一性は次の二つの場合について考える必要がある。一つはメモリ板を走査した時の或るビットに対する再生点像の強度変化であり、もう一つはメモリ板のある位置から同時に再生される点像間の強度の違いである。

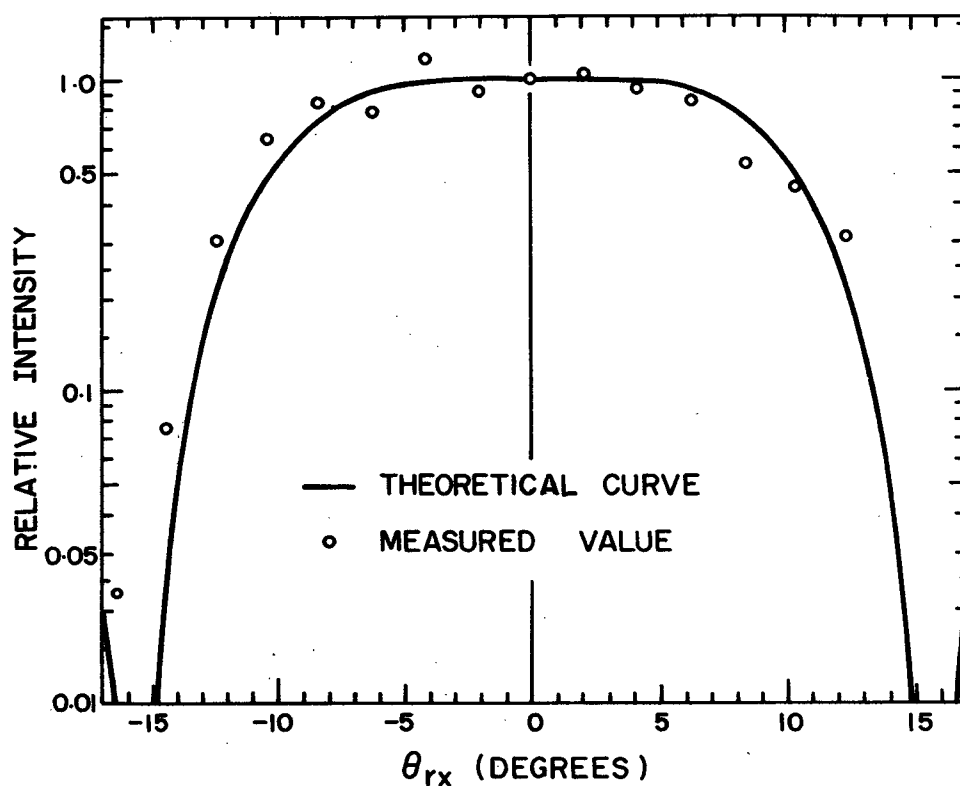
再生点像強度の不均一性の測定は次のようにして行なった。ホログラムは再生点像のおどりの測定に使用したものを再び使用した。このホログラムを直径約 1 mm のレーザー光で照明し、再生点像の強度を光電子増倍管を用いて測定した。

測定結果を (2.3 5) 式および (2.3 6) 式を用いて計算した結果と共に第 2.1 5 図および第 2.16 図に示す。

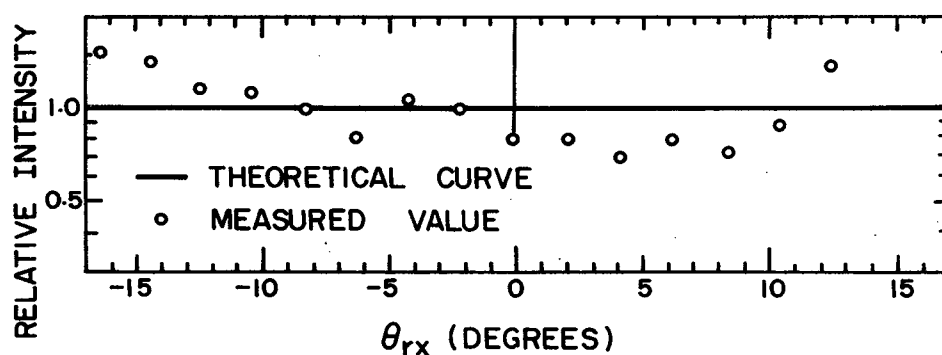
第 2.1 5 図は細い光ビームが第 2.4 図の y 軸に沿ってホログラムを走査した時の $\theta_{rx} = 0$ なる参照光に対する再生点像の強度変化を示したもので、



第 2・15 図 ホログラムの $x = 0$ の位置を直径約 1 mm のレーザー光ビームで y 方向に走査した時の $\theta_{rx} = 0$ なる参照光に対応する再生点像の強度変化。(a)ホログラムを逆方向照明した場合, (b)ホログラムを前側垂直照明した場合。各パラメータは次の通りである。 $\lambda_o = \lambda_c = 6328 \text{ \AA}$, $n_e = 1.52$, $L = 13.5 \mu\text{m}$, $\theta_{ox} = 0$, $\theta_{ry} = 16.3^\circ$ 。



(a)



(b)

第 2・16 図 ホログラムの中心を直径約 1 mm のレーザー光ビームで照明した時の再生点像間の強度変化。(a)ホログラムを逆方向照明した場合, (b)ホログラムを前側垂直照明した場合。各パラメータは次の通りである。 $\lambda_o = \lambda_c = 6328 \text{ \AA}$, $n_e = 1.52$, $L = 13.5 \mu\text{m}$, $\theta_{ox} = \theta_{oy} = 0$, $\theta_{ry} = 16.3^\circ$ 。

(a)はホログラムを逆方向照明した場合、(b)は前側垂直照明した場合である。第2・15(b)図において測定値が理論曲線から大きくずれているのは $4\theta_{ox}$ が(2・36)式で近似できる範囲を越えて変化しているためであり、また I/I_{max} のピークがy軸の負の方にシフトしているのは写真乳剤の空間周波数応答特性が一定でないことおよび写真乳剤層の収縮のためであると考えられる。

第2・16図は細い光ビームでホログラムの中心を照明した場合の再生点像間の強度変化を示したもので、(a)はホログラムを逆方向照明した場合、(b)は前側垂直照明した場合である。再生点像の強度がふらついているのは再生点像強度の均一化を計るために用いた第2・9図の補償曲線が完全でなかったためであり、また第2・16(a)図において測定値が理論曲線から端の方で多くずれているのはやはり $4\theta_{rx}$ が(2・35)式で近似できる範囲を越えて変化しているためであると考えられる。

第2・15図と第2・16図を比較すると次のことを言うことができる。再生点像の強度変化はホログラムを前側照明した場合よりも逆方向照明した場合の方が大きい。特に逆方向照明の場合には、再生点像の強度は、 θ_{rx} がある値〔第2・16(a)図では約 10° 〕を越えると、 θ_{rx} の増加につれて急速に弱くなる。したがって、再生点像のおどりを小さくするためにホログラムを逆方向照明する場合には、体積ホログラム効果を少なくするために、できるだけ乳剤層のうすい感光材料を使用すべきである。この意味で、コダック649-F乾板(定着後の乳剤層の厚さ：約 $1.3.5\mu m$)よりもアグファ・ゲバルト・シエンシア8E75乾板〔乳剤層の厚さ：約 $7\mu m$ (文献59)〕の方が多重記録ホログラム・メモリ板を製作するための記録材料として適していると言うことができる。

2.6 結び

ホログラムを用いた光メモリの一実施例として提案した多重記録ホログラム・メモリについて、まずその有用性を明らかにするためにホログラムメモリを用いた図形入力装置の利点、原理およびこの目的のホログラム・

メモリとして多重記録ホログラム・メモリが適している理由とその製作方法を述べ、次に多重記録ホログラム・メモリ板から再生される点像の拡がり、おどりと強度変化について解析を行ない、実験結果との比較を行った。その結果次のようなことが判明した。

- (1) 記録時に結像レンズの焦面に作られるデータ・マスクのフーリエ変換像の大きさは実効的には十分小さく、再生点像の大きさに由々しい影響は与えない。
- (2) 多重記録ホログラム・メモリ板から再生される点像はガウス領域（1次近似）で取り扱う限り、読み出し光がメモリ板上を動いても不動である。
- (3) 多重記録ホログラム・メモリ板から再生される点像のおどりを3次近似で解析し、実験結果と比較したところ、計算値と実験値がよく一致した。
- (4) 多重記録ホログラムから再生される像の強度は後から露光したものほど弱くなるので、後から露光するものほど多い露光量を与えることによって再生像の強度をかなり均一にすることができた。
- (5) 体積ホログラム効果による再生点像の強度変化について解析を行ない、実験結果と比較したところ、計算値と実験値は比較的よく一致した。
- (6) 多重記録ホログラム・メモリ板から再生される点像のおどりと強度変化に関する上記解析と実験の結果から、読み出し光ビームをメモリ板に前側より垂直に当てて読み出した場合には、再生点像のおどりは比較的大きいが、強度変化は少なく、メモリ板を参照光と逆方向から照明した場合には、再生点像のおどりは小さいが、再生点像強度はかなり変化する。
- (7) メモリ板を前側から垂直に照明した場合でも、受光面積の広い太陽電池を用いれば再生点像を確実に検出できる。
- (8) 以上の結論として、実用に堪える多重記録ホログラム・メモリ板を製作することは十分可能で、多重記録ホログラム・メモリ板が図形入力装置用メモリなど番地数が多く、一番地当りのビット数が少ないメモリには極めて適していることが確認できた。

第3章 多重記録ホログラム・メモリを応用した入力装置

3.1 はじめに

前章では、多重記録ホログラム・メモリの有用性、多重記録ホログラム・メモリ板の製作方法および光学的問題について検討を加えた結果、多重記録ホログラム・メモリを図形入力装置の位置情報エンコーダとして使用する場合には、多重記録ホログラム・メモリの欠点（書き込むべき情報があらかじめわかっていなければならない、多重記録の数に限度があり、任意の部分の書き換えができない）が欠点とならず、一方長所（製作が容易で、記録時間が短かく、よい信号対雑音比が得られる）の方はそのまま大きな利点になること、および多重記録ホログラム・メモリ板から再生される点像のおどりと強度変化は共に実用には支障ない程度の大きさであることが確認できた。

本章では多重記録ホログラム・メモリの応用について述べる。多重記録ホログラム・メモリの応用の一つは、すでに幾度も述べたように、手書き図形をコンピュータに入力するための図形入力装置であり、図形入力装置における多重記録ホログラム・メモリ板（本論文では、この場合の多重記録メモリ板をホログラム・コード板と呼んでいる）の機能は、第2.2節において述べたように、2次元面の量子化とその各部分の位置情報コードの記録であった。ホログラム・コード板のこの機能はキーボードのように多数のアイテムの中から一つを選択する装置（指示選択装置）、特に現在需要が日々高まっている漢字入力装置にも応用することができる。⁶⁰⁾

漢字入力装置は、和文をコンピュータに入力し、処理する場合には、必要欠くべからざるものである。しかるに従来の漢字入力装置は、多数の不規則に並べられた文字キーから文字を選んでキーをたたくという動作を伴うので、操作に熟練を要し、またキー・インした文字が同時には印字されないため、正しく入力できたかどうかを確認できないという欠点があった。

そこで著者らは多重記録ホログラム・メモリを応用した漢字入力装置を製作することを企図し、まず図形入力装置と殆ど同じ構成で、記入面の代

わりに漢字やかなを配列した文字板を置き、文字盤上の任意の文字を指すと、多重記録ホログラム・メモリ板上のその文字に対応する位置からその文字のコードが発生する漢字入力装置（指示型漢字入力装置）⁶¹⁾を試作し、さらにそれを小型邦文タイプライタと組み合わせてキーをたたくと文字が印字されると同時にその文字のコードが電気信号としてコンピュータに入力される漢字入力装置（邦文タイプライタ付漢字入力装置）⁶²⁾を試作した。

ところで、これらの試作装置がホログラム・メモリ板の研究のみによって完成されたものでないことは勿論である。各装置を完成させるためにはホログラム・メモリ板の他に、メモリ板を照明するためのライトペンの研究、レーザー装置からライトペンにレーザー光を送る方法の研究、ライトペンを希望通り動かす方法の研究、再生光の検出方法の研究が必要であり、しかもこれらの研究は一定の方針に沿って行なわれなければならない。

したがって本章では、まず多重記録ホログラム・メモリを用いた図形入力装置の大まかな設計方針とその方針に基づいた主要構成部品（ホログラム・コード板は除く）の設計を第3.2節で述べ、その後に試作した図形入力装置、指示型漢字入力装置および邦文タイプライタ付漢字入力装置の構成と性能をそれぞれ第3.3節、第3.4節および第3.5節で述べる。

3.2 図形入力装置の設計方針と主要構成部品の設計

多重記録ホログラム・メモリを用いた図形入力装置を設計するにあたって決めた大まかな方針は、“持ち運びができるようにコンパクトであり、描いた図形が即座に見れ、ハード・コピーが即座に得られること”であった。

この方針を達成するために、図形入力装置の構成部品の中で、ホログラム・コード板以外に特に意を払ったのは、細い読み出し光の発生装置とその移動手段であった。これらの設計および再生光検出装置の設計を以下に述べる。

(1) 光源

ホログラム・コード板上の微小面積を集中的に照明し，その上再生点像がなるべく拡がらないようにするためにはレーザー光を用いるのが最も良いが，さらにこの装置のようにレーザー装置をコンピュータの入力装置の一部分品として筐体内におさめる場合には，小型で，取り扱いが簡単で，発熱量が少なく，安価で，寿命が長いことが要求される。そこで著者らは光源として日本電気(株)製の GLG-2004 型 He-Ne レーザーを使用した。このレーザー装置は内部ミラー型で共振器の調整が全く不要であるため取り扱いが簡単で，その上出力もサイズの割には 1 mW 以上と大きい。

(2) ライトガイドとライトペン

レーザー装置から射出されたレーザー光を画面上のペンの動きに応じてホログラム・コード板に入射させるために，レーザー光をホログラム・コード板まで導くためのライトガイドおよびライトガイドにより伝送されたレーザー光を定められた角度でホログラム・コード板に入射させるためのライトペンが必要であり，ライトペンがホログラム・コード板上を動く時，ライトペンの位置の如何にかかわらず，レーザー光は確実にライトペンに伝送され，かつライトペンの動きはスムーズでなければならない。この要求を満足させるために著者らはライトガイドとして集束性光学繊維(セルフォック)⁶³⁾を使用した。

集束性光学繊維は屈折率 n_s が半径方向に変化する光学繊維で，光軸上の屈折率を n_{s0} ，光軸からの距離を r_s とすると，屈折率 n_s は次式であらわされる。

$$n_s = n_{s0} (1 - h r_s^2 / 2) \quad (3.1)$$

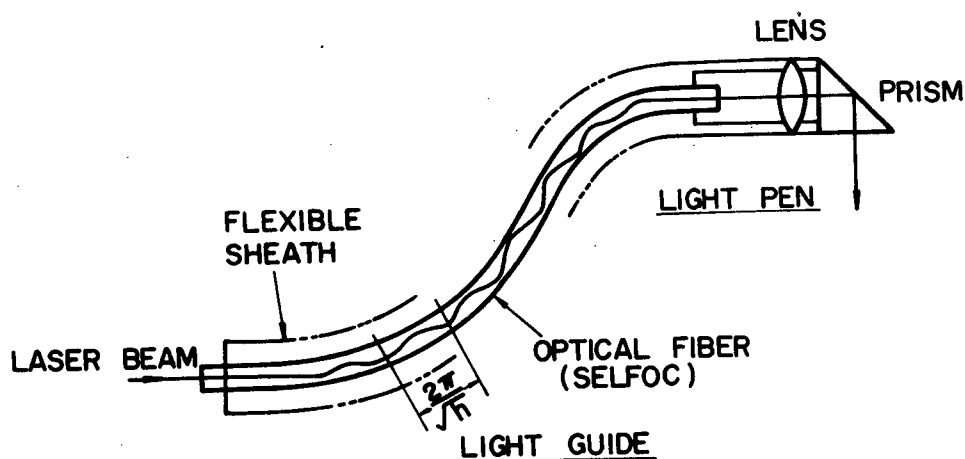
ただし， h は定数である。したがって，集束性光学繊維はクラッド型の光学繊維に比べると，次の様な特徴を有している。

(i) 結像性能を有している。

- (ii) レーザー光を伝送する際，バンド幅の制限や波形の変形がない。
- (iii) 伝送損失が少なく，入射光の偏光面を保存する。
- (iv) 開口の小さいレンズや焦点距離が非常に短いレンズを作ることができる。
- (v) 径が細く，柔軟性に富む。

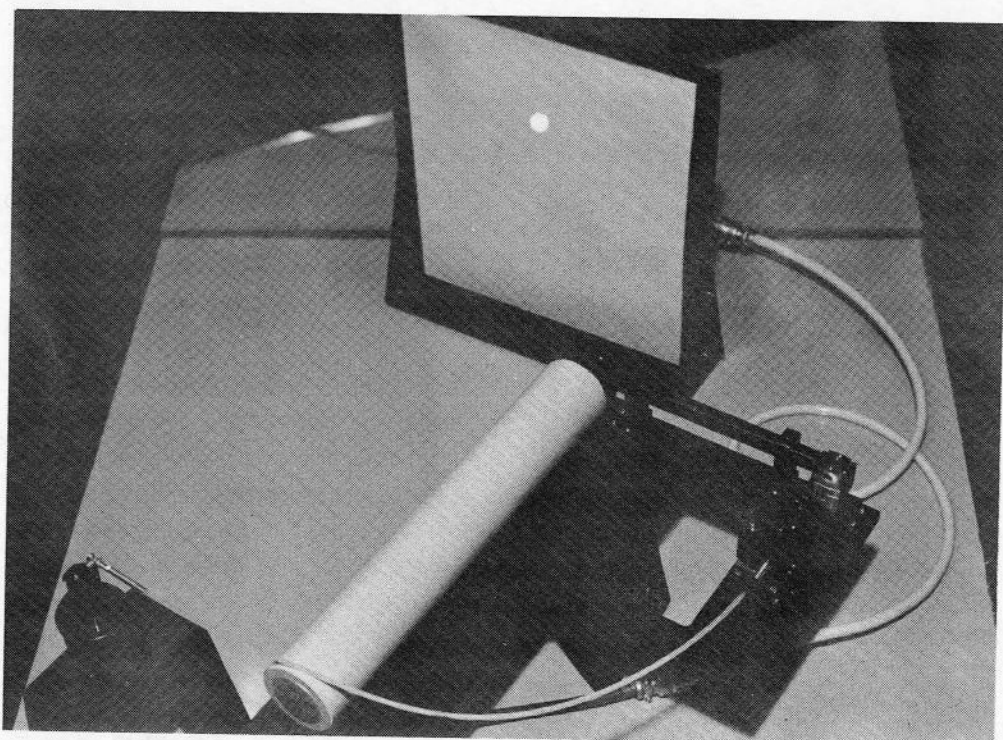
ライトガイドとして集束性光学繊維を用い，その一端に，集束性光学繊維から出射したレーザー光をコリメートするためのレンズおよびコリメートされたレーザー光の方向を 90° 曲げるためのプリズムから成るライトペンを付けて一体化した装置の構造を第3・1図に示す。ライトガイドとして用いた集束性光学繊維の直径は 0.2 mm ，長さは 50 cm である。レンズの焦点距離は 6.5 mm であり，したがってこのレンズにより平行化されたレーザー光のビーム・ウエイストは約 $100\text{ }\mu\text{m}$ である。

第3・1図のライトガイドにレーザー光($6328\text{ }\text{\AA}$)を通した時の透過損失は 0.3 dB 以下で，ライトペンより射出されたレーザー光のモード・パターンは第3・2図に示すように殆んど変形を受けず，ライトガイドを曲率半径が 10 cm 以下になるまで折り曲げても，モード・パターンそのものには



第3・1図 ライトペンとライトガイドの構造。

顕著な変化は見られなかった。しかし曲率半径をあまり小さくすると、ライトペンより出射するレーザー光の方向が若干ながら変化するので、試作装置はライトガイドの曲りの曲率半径が20cm以下にならないように設計された。



第3・2図　ライトペンから出射したレーザー光のモード・パターン。

(3) リンク機構

ライトペンをホログラム・コード板上で動かす手段の選択決定は簡単なようで意外に難しい問題であった。最も簡単な手段はライトペン自体にスタイラスをつけて、直接ホログラム・コード板上に入力すべき図形を画く方法であるが、この方法だと、ハード・コピーを取ることおよび室光の遮断が困難であると考えられた。この他色々な方法が提案されたが、結局リンク機構を用いることにした。リンクを用いると、ペンの動きが拘束されるという欠点が生じるが、ペンと

ライトペンを分離できるためハード・コピーが容易に得られ、しかもペンの動きを縮小もしくは拡大してライトペンに伝達できるという利点がある。

リンクの構造は一般に用いられているパンタグラフと同じであるが、ペンを使い易くするため、ペンとリンクの連結は上下方向には可憐であるプラスチックを介して行なった。その結果ペンを斜めにしてもよく、リンクを用いたことの不便はかなり取り除かれ、ペンおよびライトペンの動きもスムーズであった。

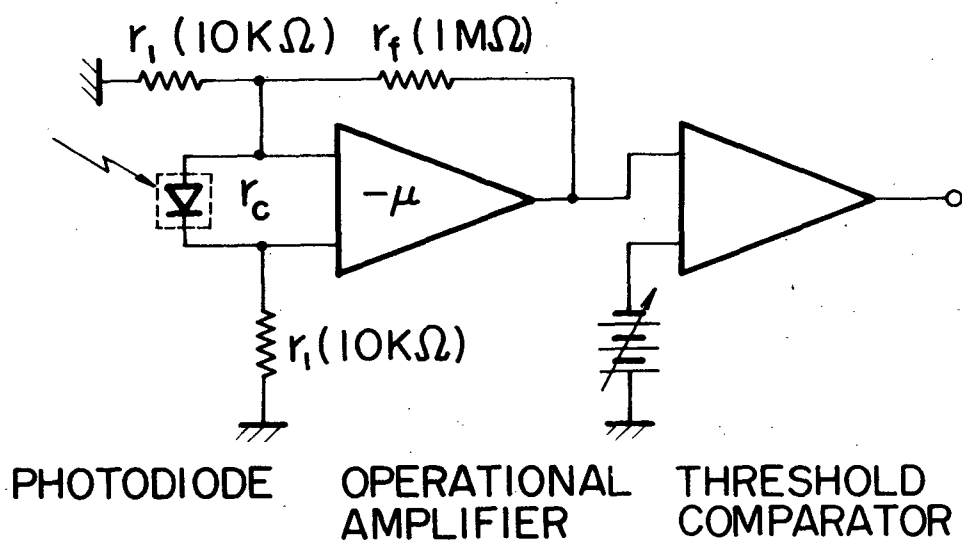
(4) 光検出器と増幅器

ホログラム・コード板から再生される点像は、ライトペンから出射したレーザー光の方向の変化および第2.4節で述べたホログラフィ結像の収差のために定点に像を結ばず、わずかではあるが動き回る。この再生点像の移動をカバーするために大面積を有する光検出器を用いる必要がある。大面積を有する光検出器としては太陽電池とレンズ付きフォトダイオードとが考えられるが、後者は再生像を完全にとらえるように調整するのが困難である。そこで著者らは6mm×13mmの大きさの太陽電池を光検出器として使用した。

この結果わずかに動き回る再生点像を確実にとらえるという問題は解決できたが、大面積の太陽電池は (i)内部抵抗が小さく、その温度による変化が20℃で約50KΩ、50℃で約10KΩと非常に大きい、(ii)静電容量が約30,000pFと大きい、等の特性を持つので、従来の増幅形式では、(i)増幅器の利得の変化、(ii)増幅器の出力レベルのドリフト、(iii)周波数特性の低下、等を生じやすい。

そこで上記の問題点を解決するためのセンス増幅器として第3.3図に示すような回路形式を採用した。⁶⁴⁾ この回路形式において、信号レベルが50%に低下しても十分なマージンが取れるようにセンス増幅器の利得を設定するため、帰還抵抗 r_f の値として1MΩを選んだ。増幅器の出力 e_o は演算増幅器が理想的な場合次式によってあらわされる。

$$e_o = \frac{-(2r_f + r_1)i_1}{1 + [1 + (2r_1 r_f + r_1^2 + r_o r_f) / r_o r_1] / \mu_a} \quad (3.2)$$



第 3.3 図 センス増幅器の回路図。

ただし， r_1 は外部抵抗値， i_λ は短路電流値， r_c は内部抵抗値， μ_a は利得である。

(3.2) 式において，

$$\mu_a \gg \frac{2r_1r_f + r_1^2 + r_cr_f}{r_cr_1} \quad (3.3)$$

のときは (3.2) 式は

$$e_o = -(2r_f + r_1) i_\lambda \quad (3.4)$$

とあらわすことができる。したがって， μ_a が十分大きい場合には，出力 e_o は太陽電池の内部抵抗 r_c に無関係になる。同様に出力レベルのドリフトも演算増幅器のみに依存する。

センス増幅器の温度特性を測定したところ， 20°C から 50°C への温度変化に対して，出力の変化は約 50 mV であり，計算値とよく一致した。また，このセンス増幅器の周波数特性は $20 \text{ Hz} \sim 1 \text{ KHz}$ の範囲ではほぼ

フラットであり、これは図形入力装置用としては十分な値である。

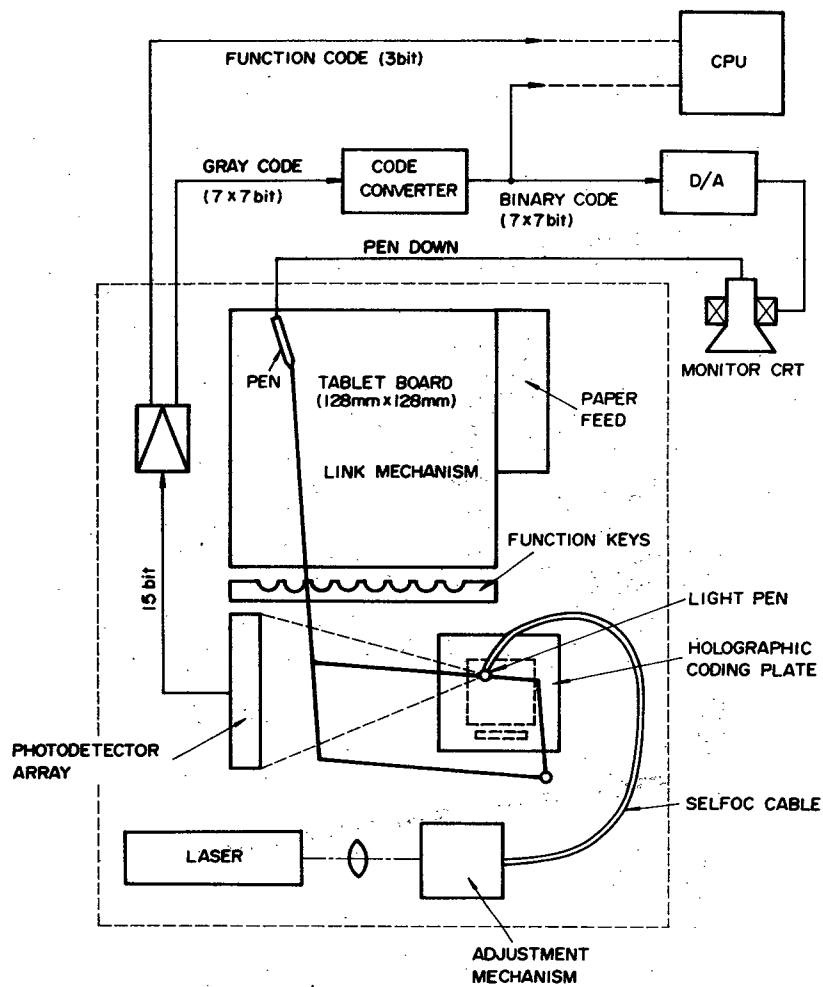
3.3 試作図形入力装置の構成、性能と仕様^{4,5,6,66)}

ホログラム・メモリ板を用いた図形入力装置の原理についてはすでに第2.2節において述べたので、本節では試作した図形入力装置の構成、性能および仕様について述べる。

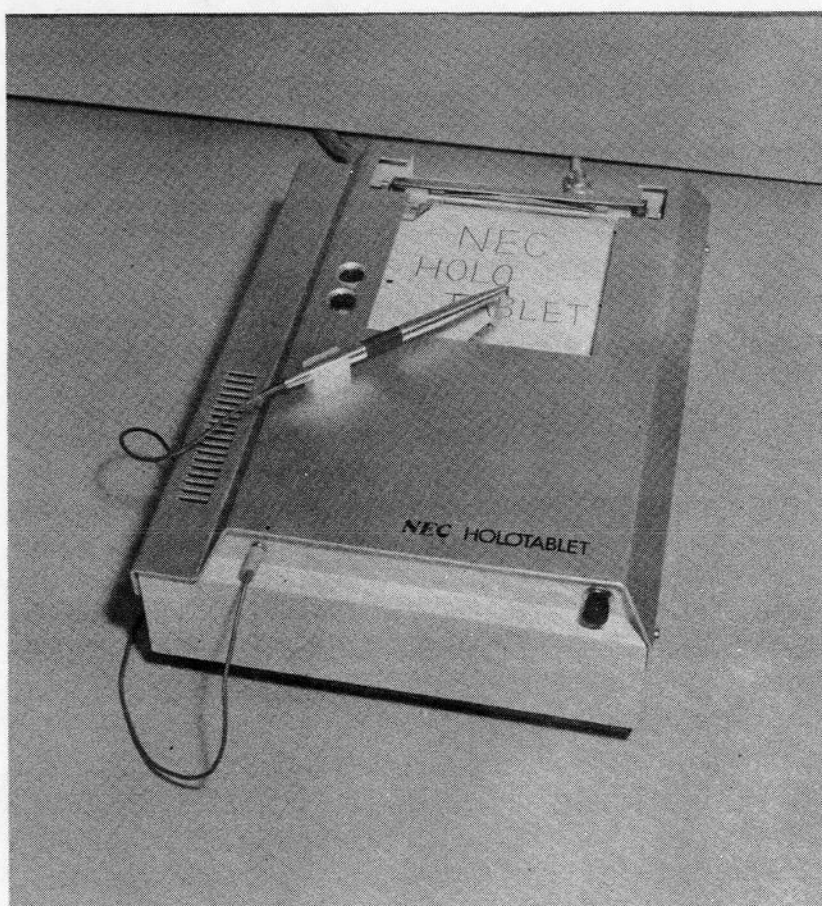
3.3.1 構成

試作した図形入力装置の構成を第3.4図に示す。画面（記入面）上のペンの動きはリンク機構により4分の1に縮小されてライトペンに伝えられる。レーザー光（ $6328\text{ \AA}$ ）はHe-Neレーザー装置からセルフオック光ガイドを介してライトペンの先端に送られ、ホログラム・コード板に一定角度で入射する。ホログラム・コード板の有効サイズは $32\text{ mm} \times 32\text{ mm}$ で、この中に $0.25\text{ mm} \times 0.25\text{ mm}$ の大きさの微小ホログラムが 128×128 個記録されており、各微小ホログラムにはその所在位置情報がx座標として7ビット、y座標として7ビットおよびファンクション・コードと区別するための座標コード指定用として1ビットの計15ビットでコード化されて記録されている。ホログラム・コード板に入射した読み出し光ビームは照明した微小ホログラムに記録されている情報にしたがって回折され、各ビットに対応した太陽電池の上に点像を結ぶ。したがってペンで画面に図形を描けば、その図形に応じた座標コードが太陽電池アレーから出力される。なお、ファンクション・キーはコンピュータに各種の指令を与えるために使用されるもので、ペンをファンクション・キー上に置けばファンクション・コードが出力される。

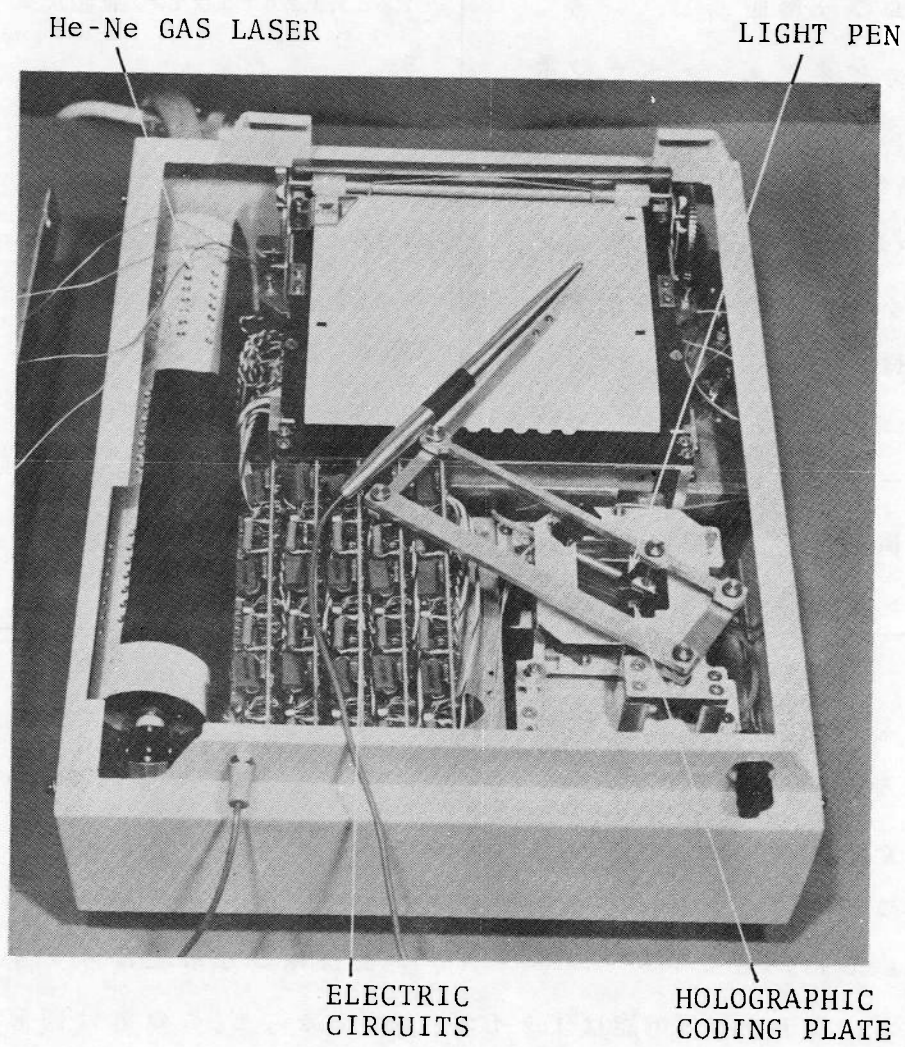
第3.5図は試作装置の外観写真、第3.6図は同装置の内部写真で、第3.4図において点線で囲んだ部分が含まれている。



第 3.4 図 試作図形入力装置の構成。



第 3.5 図 試作した図形入力装置の外観写真。



第 3・6 図 試作した図形入力装置の内部の写真。

3.3.2 性能と仕様

試作した図形入力装置の性能と仕様を第3.1表に示す。

第3.1表 試作した図形入力装置の性能と仕様

画面の大きさ	128mm×128mm
画面の分解能	128×128(1ライン/mm)
ファンクション・キーの数	8
トランスファ・レート	10 ³ 点/秒以上
ホログラム・コード板の大きさ	32mm×32mm
ホログラム・コード板の分解能	128×128(4ライン/mm)
微小ホログラムの大きさ	0.25mm×0.25mm
1微小ホログラム当りのビット数	15ビット
光源	GLG-2004型He-Neレーザー
レーザー光伝送体	集束型光学繊維(セルフオック)
光検出器	太陽電池(6mm×13mm)
リンク機構による縮小率	1/4

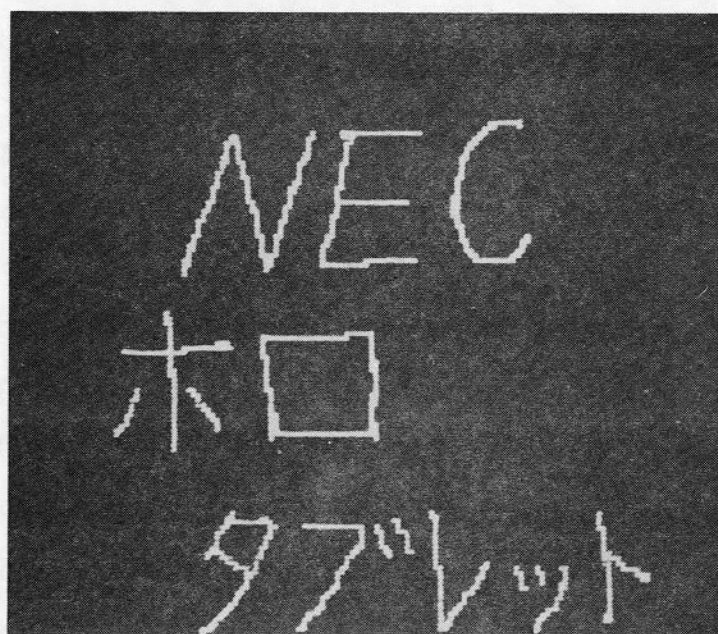
表に見られるように、試作装置に用いたホログラム・コード板の大きさは32mm×32mmであった。一方、図形を画く場合、画面の大きさは少なくとも10cm×10cmは必要である。そこでリンク機構を用いて、画面上のペンの動きを4分の1に縮小してライトペンに伝える方法が用いられた。したがってホログラム・コード板自体の分解能は4ライン/mmであるが、画面上の分解能は1ライン/mmとなった。この値は図形入力装置としては不足であるが、これは技術的限界によるものではなく、ホログラム・コード板のサイズを大きくし、またホログラム・コード板自体の分解能をあげることによって、画面上で4ライン/mm程度の分解能は十分可能であり、現在ホログラム製作装置の大型化およびホログラム・コード板自体の分解能向上の研究を行っている。

リンク機構の使用のもう一つの目的はハード・コピーの取得の容易化であったが、本試作装置においてはペンとしてボールペンを用いて画面に置いた紙に図形を画くことにより、図形の入力と同時にハード・コピーも極めて容易に得られる。

一方、リンクを用いたことによるペンの動き阻害の問題はリンクとペンをプラスチックを介して結合したことにより大幅に軽減でき、ペンの動きは十分軽く、スムーズであった。しかし心理的抑圧のあることは否めない。

試作した図形入力装置の動作は非常に安定で、環境が変化しても殆ど誤動作しなかった。

第3.7図は試作装置からの出力信号をモニタ用CRTに表示したものの写真である。パターンの線がぎくしゃくして見えるのはグレー・コードを用いているためである。この写真からしても図形入力装置としては少なくともこの4倍ぐらいの解像力が必要である。



第3.7図 試作した図形入力装置からの出力信号をモニタ用のCRTに表示したモニタ例の写真。

試作した図形入力装置の特徴は次の通りである。

- (i) ペンの位置座標がホログラム・コード板により直接デジタル信号に変換されるので、電気回路が簡単である。
- (ii) ホログラム・コード板は複製ができるので、量産が容易である。
- (iii) 以上の結果として、低価格化が期待できる。

3.4 指示型漢字入力装置⁶¹⁾

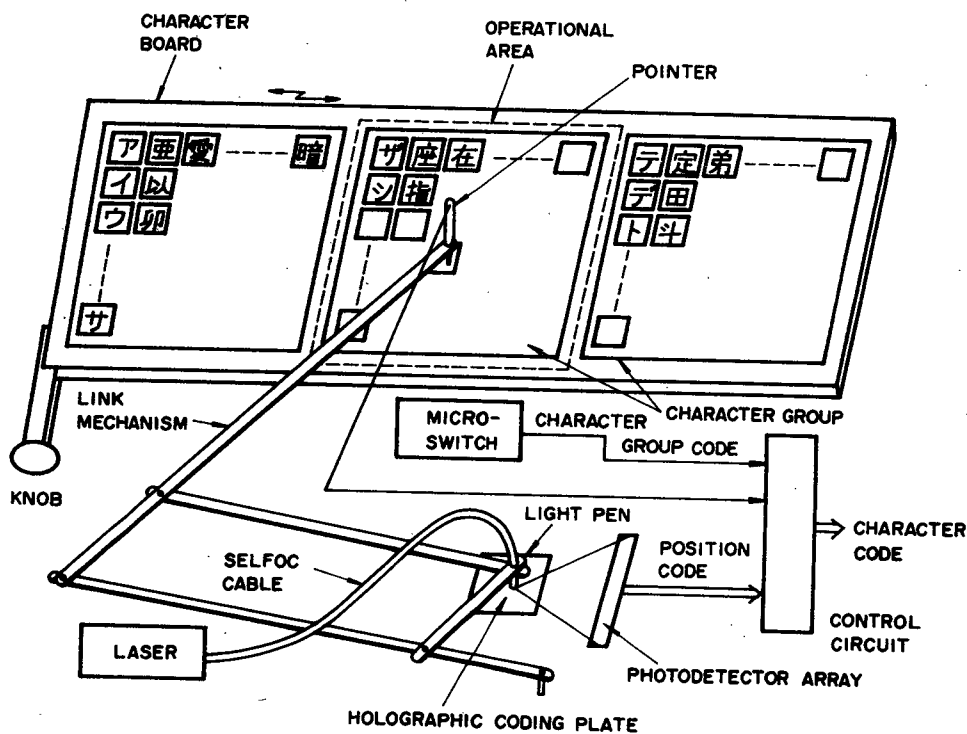
第3.1節で述べたように、コンピュータの利用技術の発展にともない、漢字入力装置の重要性が増しているにもかかわらず、現在の漢字入力装置は高価な上に操作が面倒なのであまり普及していない。そこで、ホログラム・コード板の2次元面を量子化し、その各部分の情報をコード化するという機能を応用した安価で操作の容易な漢字入力装置の製作が提案され、その第一段階として文字をスタイラスで指示する指示型漢字入力装置を試作した。

指示型漢字入力装置の構造は基本的には図形入力装置と同じで、画面が文字盤に置き換わっているだけである。しかし、機能的には幾つかの点で違っている。例えば、図形入力装置の場合には、ライトペンは画面上のペンの動きに相似して動けばよく、画面上のある位置とそれに対応する微小ホログラムの位置関係はそれほど厳密でなくても良かったが、漢字入力装置の場合には、スタイラスが文字盤上のある文字を指せば、ライトペンは確実にその文字に対応する微小ホログラムのみを指さなければならず、隣接する微小ホログラムの境いを照明してはならない。したがって、漢字入力装置に使用するリンクおよびホログラム・コード板の寸法精度は図形入力装置に使うものの精度よりも高くなければならない。その代わり漢字入力装置の場合には、隣接する微小ホログラムの境界から情報を読み出すことはないから、グレー・コードを用いる必要はなく、漢字を任意のコードでコード化すればよい。

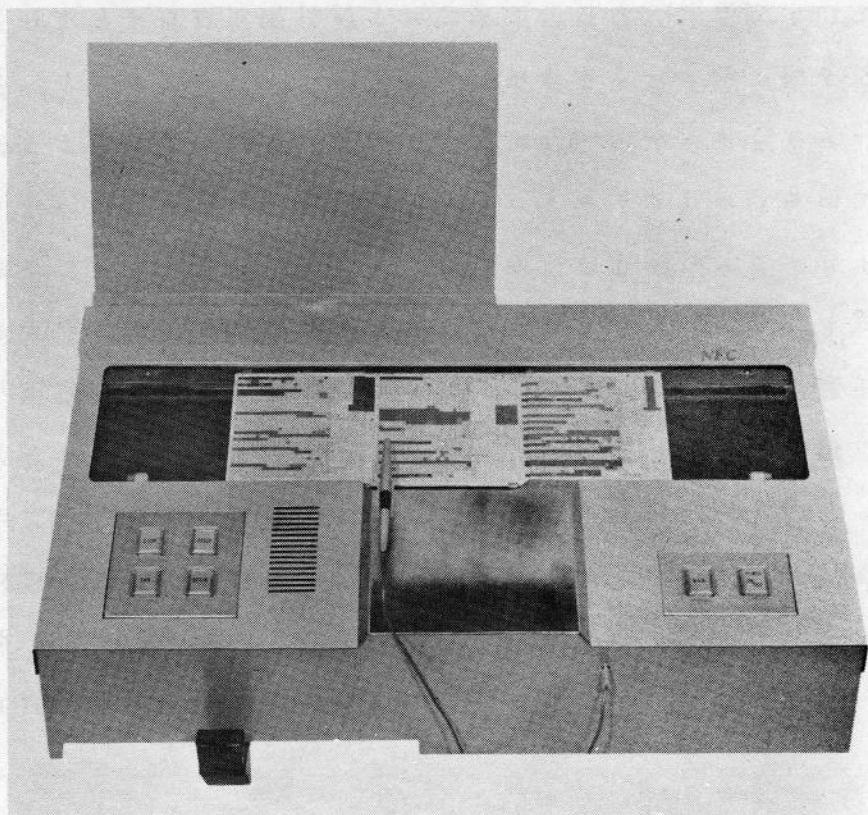
本節では、このような点に考慮を払って試作した指示型図形入力装置の構成、性能および仕様について述べる。

3. 4. 1 試作指示型漢字入力装置の構成

試作した指示型漢字入力装置の構成および外観写真をそれぞれ第3・8図および第3・9図に示す。文字盤は三つの文字グループより成り、各文字グループはマトリックス状に4mmピッチで並べられた32×32個の文字より成っている。ホログラム・コード板は図形入力装置に用いたものと同様に微小ホログラムの所在位置の位置コードを記録したものであり、その有効サイズも32mm×32mmであるが、微小ホログラムの大きさは、指示器で任意の文字を指せばライトペンがその文字に対応する微小ホログラムのみを照明することを確実にするために、1mm×1mmと大きくなっている。このため、微小ホログラムの数は32×32個と1文字グループ分しかないが、微小ホログラムの数の不足は次に述べるように文字盤の移動による文字グループの選択によりカバーされている。すなわち、まず入力したい文字を含む文字グループをハンドルにより文字選択領域にセッ



第3・8図 試作した指示型漢字入力装置の構成。



第3.9図 試作した指示型漢字入力装置の外観写真。

とし、その後入力すべき文字を指示器で指示する。どの文字グループが文字選択領域にセットされているかはマイクロスイッチで検出され、2ビットの文字グループ・コードが出力される。ホログラム・コード板から再生される点像は図形入力装置の場合と同様に太陽電池アレーで検出され、10ビットの文字位置コードが出力される。文字グループ・コードと文字位置コードは制御回路で組み合わせられ、個々の文字をあらわす12ビットの文字コードとして出力される。

なお、第3.8図には示されていないが、文字盤は指示器が文字の中央を指すようにガイド孔を有する透明なプラスチック板で覆われている。

3. 4. 2 指作指示型漢字入力装置の性能と仕様

試作した指示型漢字入力装置の性能と仕様を第3・2表に示す。

試作装置の動作は非常に安定で、環境が変化しても全く誤動作しなかった。

第3・2表 試作した指示型漢字入力装置の性能と仕様

文字数	最大3072文字
文字コード	12ビット
ホログラム・コード板の大きさ	32mm×32mm
微小ホログラムの数	32×32個
微小ホログラムの大きさ	1mm×1mm
1微小ホログラム当りのビット数	10ビット
光源	GLG-2004型He-Neレーザー
レーザー光伝送体	集束型光学繊維（セルフオック）
光検出器	太陽電池（6mm×13mm）
リンク機構による縮小率	1/4

試作した指示型漢字入力装置の特徴は次の通りである。

- (i) キーボード式に比べて安価である。
- (ii) 文字の配列を自由に選べ、文字盤も小形にできる。
- (iii) キーボード式に比べて文字の選択が容易である。

3. 5 邦文タイプライタ付漢字入力装置⁶²⁾

従来の漢字入力装置は高価で、操作が難しく、その上入力した文字をモニターするためには別に表示装置や漢字プリンターを必要とするという欠点があった。このうち前二者については指示型漢字入力装置において解決されているが、さらに第3番目の欠点も解決するために指示型漢字入力装

置と小型邦文タイプライタを組み合わせた邦文タイプライタ付漢字入力装置が提案された。

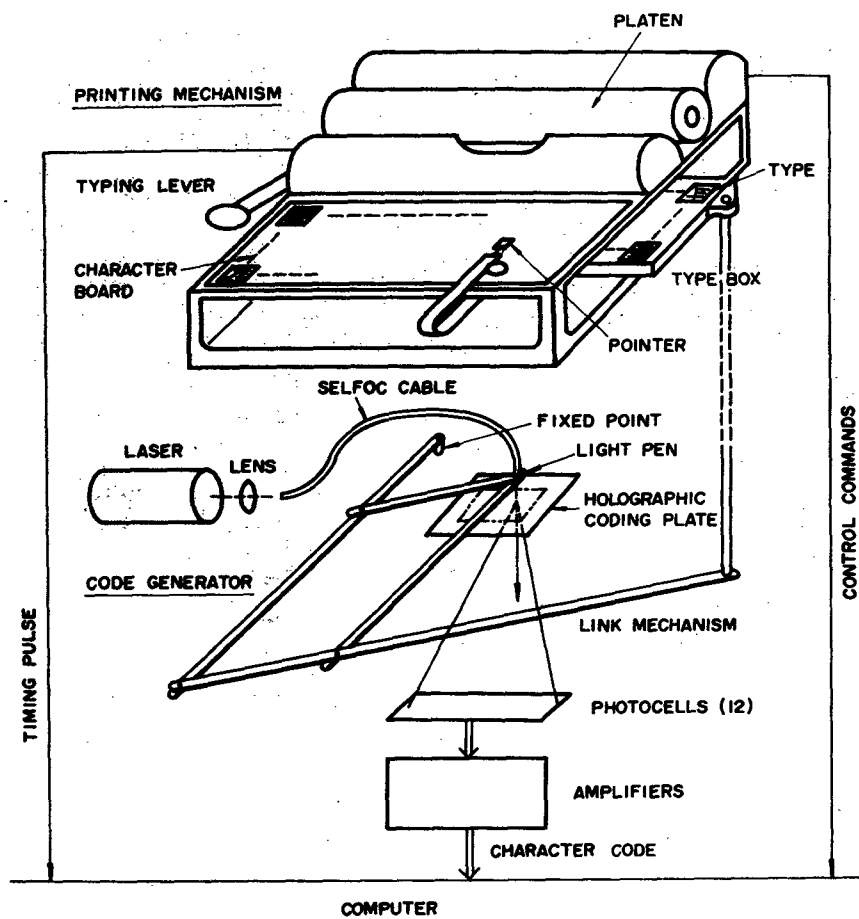
邦文タイプライタ付漢字入力装置の原理は次の通りである。小型邦文タイプライタは文字盤、左右前後に移動し得る活字庫および印字機構からなり、活字庫に付けられているポインタ（文字指示器）で文字盤上の文字を選択指示すると、その文字の活字が印字機構の下に位置付けられるので、その時に印字レバーを押すと、印字機構はその活字を取り出して印字する。したがって、文字を印字するときの活字庫の位置は各文字に固有であるから、指示型漢字入力装置の指示器を小型邦文タイプライタのポインタか活字庫に連結しておけば、ポインタで文字を指示した時、その文字の活字が印字機構の下に位置付けされると共にライトペンもその文字に対応する微小ホログラムの上に位置付けされているので、印字と同時に文字コードも発生される。

指示型漢字入力装置を邦文タイプライタと組み合わせることにより図形入力装置や指示型漢字入力装置の場合にあったペンや指示器にリンクが連結されていることに対する心理的抵抗が無くなることもホログラフィ応用装置の普及という点で大きな利点である。

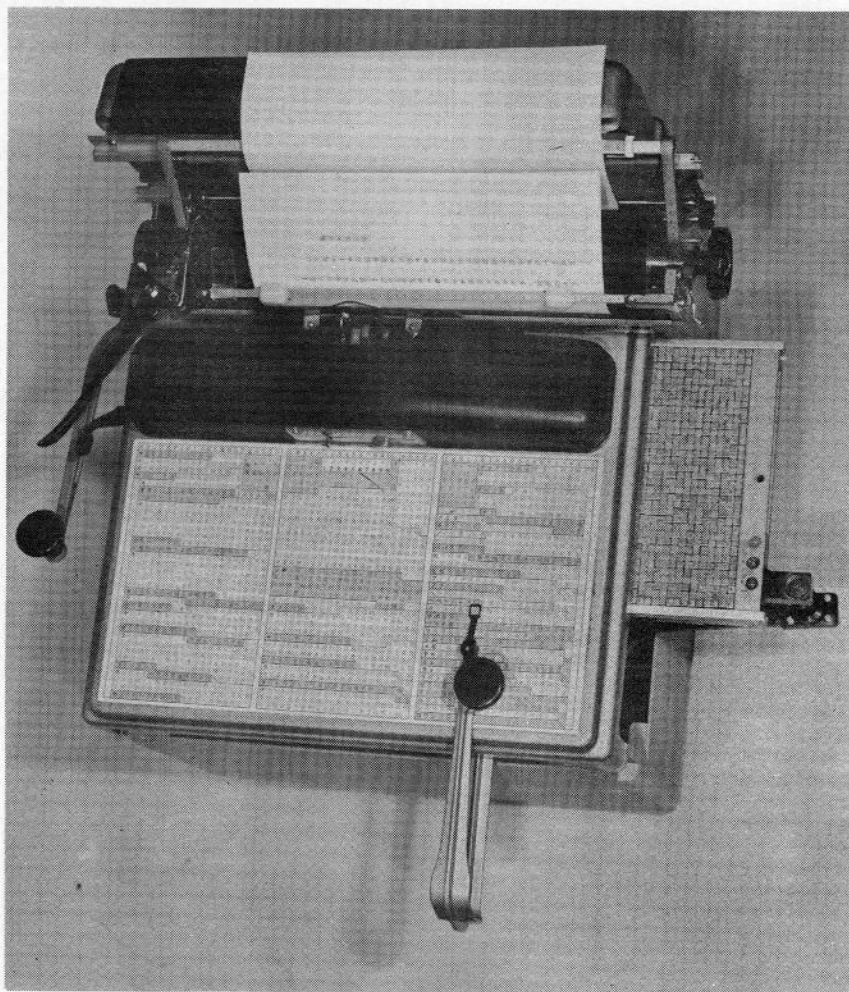
本節では上記のような原理や考え方により試作した邦文タイプライタ付漢字入力装置の構成、性能および仕様について述べる。

3. 5. 1 試作邦文タイプライタ付漢字入力装置の構成

試作した邦文タイプライタ付漢字入力装置の構成および外観写真をそれぞれ第3・10図および第3・11図に示す。小型邦文タイプライタとして日本タイプライタ社製のSH280D型邦文タイプライタを使用し、その活字庫の一部を加工して活字庫とライトペンを連動させるためのパンタグラフ・リンクを取り付けた。ホログラム・コード板の有効サイズは29 mm × 21 mmで、この中に0.6 mm × 0.6 mmの微小ホログラムが65 × 35個（文字盤のデッド・スペースのため、有効な微小ホログラムの数は



第 3・10 図 試作した邦文タイプライタ付漢字入力装置
の構成。



第 3・11 図 試作した邦文タイプライタ付漢字入力装置の外観
写真。

63×35個)含まれており、各微小ホログラムには文字コードが12ビットで記録されている。

この装置においては、パンタグラフ・リンクをはじめ、ホログラム・コード板、レーザー装置等の光学部品は全て小型邦文タイプライタの下に置かれているので、外観的には小型邦文タイプライタしか見えない。また、文字コードをコンピュータに入力したり、紙テープ・パンチャーに出力するための信号やスペース、バック・スペース、改行などのコントロール・コマンドはタイプライタの各操作に応じて出力されるようになっている。

3.5.2 試作邦文タイプライタ付漢字入力装置の性能と仕様

試作した邦文タイプライタ付漢字入力装置の性能と仕様を第3.3表に示す。小型邦文タイプライタの操作はライトペンが連動していることを感じさせないぐらいにスムーズであり、動作も非常に安定で、環境が変化しても全く誤動作しなかった。

第3.3表 試作した邦文タイプライタ付漢字入力装置の性能と仕様

文字数	2205字
文字の種類	漢字，かな，英数字，記号
文字コード	12ビット
ホログラム・コード板の大きさ	39mm×21mm
微小ホログラムの数	63×35個*
微小ホログラムの大きさ	0.6×0.6mm
1微小ホログラム当りのビット数	12ビット
光源	GLG-2004型He-Neレーザー
レーザー光伝送体	集束性光学繊維(セルフオック)
光検出器	太陽電池(6mm×13mm)
リンク機構による縮小率	1/7.5
タイプライタ	SH280D型邦文タイプライタ
コントロール・コマンド	スペース，バック・スペース，改行

*39mm×21mmの面積の中には0.6mm×0.6mmの微小ホログラムを65×35個収容できるが、文字盤にデッド・スペースがあるため63×35個の微小ホログラムが使用されている。

試作した邦文タイプライタ付漢字入力装置の特徴は次の通りである。

- (i) 入力した文字の確認用印字モニタが取れる。
- (ii) 複雑な電気回路や機構を必要としない。
- (iii) ホログラム・コード板の交換により文字コードの変換が容易にできる。
- (iv) 文字選択が容易である。

3.6 結 び

多重記録ホログラム・メモリ板（ホログラム・コード板）を用いた図形入力装置の設計方針と主要構成部品の設計について述べ、図形入力装置を試作し、さらにホログラム・コード板の2次元面の量子化とその各部分の情報のコード化という機能が指示選択装置にも適していることから、図形入力装置を転用した指示型漢字入力装置および邦文タイプライタ付漢字入力装置の試作を行なった。その結果次のようなことが判明した。

- (1) レーザー光を伝送するためのライトガイドとして集束性光学繊維（セルフロック）を用いることによって、レーザー光をそのモードを損なうことなく伝送することができる。
- (2) 図形入力装置において、画面上のペンの動きをライトペンに伝えるにはリンク機構を用いるのが、ハード・コピーが容易にとれ、画面とホログラム・コード板のサイズに選択の余地が生じるという点で実用的である。リンクの動きは予想以上にスムーズで、リンクを用いたことによる実用上の不便は殆どなかった。
- (3) ホログラム・コード板から再生される点像のおどりは太陽電池を用いれば十分にカバーでき、再生点像のおどりのために誤動作を生じることは無かった。
- (4) ホログラム・コード板を図形入力装置に応用する場合は、ホログラムコード板の分解能は 500×500 （画面が $12\text{cm} \times 12\text{cm}$ で4ライン/mm）以上必要である。
- (5) ホログラム・コード板を漢字入力装置に応用する場合には、微小ホログラムの数は3000程度でよく、漢字入力装置用ホログラム・コード板

の方が図形入力装置用より製作し易い。しかも漢字入力装置の方がホログラム・コード板の特性を活用でき、その上需要が多いにもかかわらず競合機種が少ないので、ホログラム・コード板の応用として有望である。

(6) 図形入力装置を小型邦文タイプライタと組み合わせた邦文タイプライタ付漢字入力装置においては、リンクを用いることに対する心理的抵抗も全く無くなり、使用者に受け入れられやすい形でホログラムを用いることができる。

(7) 以上の結論として、多重記録ホログラム・メモリを用いた各試作装置はそれぞれ競合装置に対して優位性を持ち、特に邦文タイプライタ付漢字入力装置はホログラムを用いたことによる制約を全く使用者に与えないところまで至っているので、十分実用に供し得るものであると断言することができる。

第 4 章 ホログラム連想メモリ

4.1 はじめに

かつて情報の量がそう多くなかった時代には、情報量は文明発達度の尺度と言われていたが、現今のように情報がはんらんしてくると情報の洪水にいかに対処するかが今後の社会発展の重要な問題と考えられるようになって来た。このような社会的要請に答えるために現在色々な種類の情報検索システムの開発が進められているが、どの情報検索システムにおいても共通して備えていなければならない性能は検索の速さである。検索速度を早くするには、大量の情報を蓄積していて、その中から、番地を指定することなく、必要な情報に関連した情報を入力するだけで必要な情報が瞬時にして検索できる連想メモリ (associative memory) を用いるのが最も良いことは古くから知られている。⁶⁷⁾しかし従来報告されている磁気を用いた連想メモリはハードウェアが非常に複雑であり、大容量のものを作るのが困難で、勿論装置の価格も高く、極く限られた用途にしか使用できなかった。そこで著者らはホログラフィを応用した大容量連想メモリを提案し、その基礎的な実験を行なった。

ホログラフィを応用した連想メモリ (ホログラム連想メモリ) は第 2 章および第 3 章で述べた多重記録ホログラム・メモリとその応用装置に比べるとはるかに技術的に難しく、その完成にはかなり長期に亘る研究が必要であるが、完成すれば、従来の連想メモリに比べると記憶容量がはるかに大きく、ハードウェアが簡単であり、検索を瞬間的に行ない得る可能性も有している。

そこで、研究はまだ半ばにも達していないが、その基本原理と基礎的な実験の結果について本章で述べることにする。まず第 4.2 節で連想メモリの基本的な動作とホログラフィが連想メモリの製作に適している理由について述べ、次に第 4.3 節でホログラム連想メモリの原理を平面ホログラムを用いた場合と体積ホログラムを用いた場合について述べると共に各場合について記憶密度の見積りを行ない、第 4.4 節で平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリの実験室モデルの実験結果および体積ホログラムを

用いたホログラム連想メモリにおいて感光材料として写真乳剤を用いた場合に生じる乳剤収縮の矯正に関する実験の結果について述べる。

4.2 連想メモリとホログラフィの情報変換作用⁶⁸⁾

連想メモリの基本動作は必要な情報に関連した情報を入力することによって必要な情報の所在場所(番地)を見出す検索動作とその番地から必要な情報を読み出す読み出し動作である。この二つの動作の中で連想メモリの機能としてより重要なのは言うまでもなく検索動作であり、検索動作を行なうには、理論的には、検索信号(検索を行なうための入力信号)と被検索信号(検索に供される信号そのもの、あるいは記憶情報の検索を容易にするために設けられたキーワードのような信号)の相対応するビット間のエクスクルーシブ・オア(EXCLUSIVE-OR), すなわち式 $X_i = A_i \bar{B}_i + \bar{A}_i B_i$ (A_i : 情報 A の i 番目のビット, B_i : 情報 B の i 番目のビット, $\bar{A}_i$: A_i の補信号, $\bar{B}_i$: B_i の補信号) における X_i の全ビットについての和が“1”になるか“0”になるかを調べればよい(和が“0”になった場合に検索信号と被検索信号とは一致している)。しかしエクスクルーシブ・オアを全ビットについて瞬間的に行ない、その和を出力するハードウェアを実際に作ることは決して容易なことではなかった。

ところが、Gabor⁶⁹⁾ によって指摘されたホログラフィの情報変換作用は、次に説明するように、一種の検索動作であり、ホログラフィを応用した連想メモリの可能性を示唆している。

ホログラムを製作するために記録面上で重ねられる2本のコヒーレント光ビームを

$$A(x, y) = a(x, y) \exp[j\phi_a(x, y)] \quad (4.1)$$

$$B(x, y) = b(x, y) \exp[j\{\phi_b(x, y) + \psi_b(x, y)\}] \quad (4.2)$$

と表わすことにする。ただし $a(x, y)$, $b(x, y)$ は記録面上の点 (x, y) における各コヒーレント光ビームの振幅, $\phi_a(x, y)$, $\phi_b(x, y)$ は同点における各ビームの位相であり, $\psi_b(x, y)$ は光ビーム $B(x, y)$ が光ビーム $A(x, y)$ に対してある角度をなしているために生じる位相のずれを表わす項である。ここで大切なことは両光ビーム共に空間変調を受けており, 物体光, 参照光という区別がないことである。

コヒーレント光ビーム $A(x, y)$ と $B(x, y)$ が干渉して生じる合成波の強度 I は

$$\begin{aligned} I &= [A(x, y) + B(x, y)]^2 \\ &= a(x, y)^2 + b(x, y)^2 \\ &\quad + a(x, y)b(x, y)\exp[j\{\phi_b(x, y) + \psi_b(x, y) - \phi_a(x, y)\}] \\ &\quad + a(x, y)b(x, y)\exp[-j\{\phi_b(x, y) + \psi_b(x, y) - \phi_a(x, y)\}] \end{aligned} \quad (4.3)$$

で表わされ, これを感光材料に記録したものがホログラムである。このホログラムをコヒーレント光ビーム $C(x, y) = c(x, y)\exp[j\{\phi_c(x, y) + \psi_c(x, y)\}]$ で照明すると, ホログラムによって回折された光は次式で表わされるような分布 D_1 を持つと考えることができる。

$$\begin{aligned} D_1 &\propto \{a^2 + b^2 + ab\exp[j(\phi_b + \psi_b - \phi_a)] \\ &\quad + ab\exp[-j(\phi_b + \psi_b - \phi_a)]\} \times c\exp[j(\phi_c + \psi_c)] \\ &= c(a^2 + b^2)\exp[j(\phi_c + \psi_c)] \\ &\quad + abc\exp[j(\phi_b + \phi_c - \phi_a + \psi_b + \psi_c)] \\ &\quad + abc\exp[-j(\phi_b - \phi_c - \phi_a + \psi_b - \psi_c)] \end{aligned} \quad (4.4)$$

ただし, 簡単のために $a(x, y) = a$ 等の簡略化を行なった。(4.4)式の第1項は0次の回折光をあらわし, 第2, 第3項が1次の回折光を表わしている。

さて、光ビーム $C(x, y)$ が光ビーム $A(x, y)$ に等しい、すなわち $c(x, y) = a(x, y)$, $\phi_a(x, y) = \phi_c(x, y)$, $\psi_c(x, y) = 0$ の場合には、(4.4) 式は

$$\begin{aligned} D_i \propto & a(a^2 + b^2) \exp(j\phi_a) \\ & + a^2 b \exp\{j(\phi_b + \psi_b)\} \\ & + a^2 b \exp\{-j(\phi_b - 2\phi_a + \psi_b)\} \end{aligned} \quad (4.5)$$

となり、この式の第2項は、振幅 b が $a^2 b$ になっている以外、(4.2) 式と同じである。また、光ビーム $C(x, y)$ が光ビーム $B(x, y)$ に等しい時、(4.4) 式の第3項は、振幅 a が ab^2 になる他は、(4.1) 式と同じになる。すなわち、光ビーム $A(x, y)$ と光ビーム $B(x, y)$ を干渉させて作ったホログラムを光ビーム $A(x, y)$ で照明すると、光ビーム $B(x, y)$ が再生され、光ビーム $B(x, y)$ で照明すると、光ビーム $A(x, y)$ が再生される。これがホログラフィの情報変換作用であるが、例えば、 $A(x, y)$ をある情報信号によって変調された光ビーム、 $B(x, y)$ をその情報の被検索信号によって変調された光ビーム、 $C(x, y)$ を情報検索信号によって変調された光ビームと見なすと、ホログラフィの情報変換作用は検索情報に関係した必要な情報を瞬時的に検索し、読み出す連想メモリの機能と同じであると言える。

このようにホログラムは連想メモリに非常に適した性質を備えている。しかしホログラムを上記のようにしてそのまま連想メモリとして使うことは実際にはできない。何故なら、光ビーム $C(x, y)$ を光ビーム $A(x, y)$ 又は $B(x, y)$ と全く同じ状態でホログラムに入射させることは技術的に非常に困難であるし、その上さらに都合の悪いことには、光ビーム $C(x, y)$ が光ビーム $A(x, y)$ 又は $B(x, y)$ と一致しなくても不完全ながら像が再生されるからである。そこで著者らは上記の様にそれ自身で連想メモリの機能を有するホログラフィにさらに論理的なエクスクルーシブ・オアに基づいた検索動作を導入することによって実用化の可

能性のあるホログラム連想メモリを提案した。^{68,70,71)} その原理については次節において述べる。

4.3 ホログラム連想メモリの原理と記憶密度

ホログラフィに論理的なエクスクルーシブ・オアに基づいた検索動作を導入してホログラム連想メモリを作る場合、ホログラムとして平面ホログラムを用いるか、体積ホログラムを用いるかによって、構成および性能が大分違ったものになる。後に述べるように、体積ホログラムを用いたホログラム連想メモリの方がホログラムの特性をうまく使っているが、現在の技術では製作が容易でない。一方、平面ホログラムを用いた方は、ホログラムの特性をうまく使っているとは言い難いが、現在の技術で十分作ることができる。そこで本節ではまず平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリについてその原理を述べると共に記憶密度の見積りを行ない、次に体積ホログラムを用いたホログラム連想メモリについてその原理を述べ、記憶密度の見積りを行なう。

4.3.1 平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリ

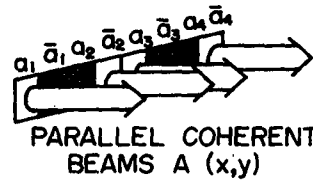
平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリの原理を述べ、記憶密度の見積りを行なう。

4.3.1.1 原理^{68,70,71)}

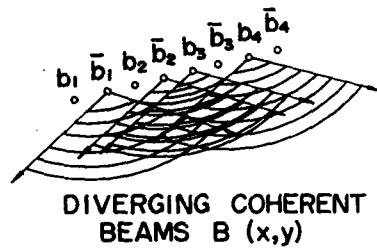
平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリのメモリ板は情報信号によって空間変調されたコヒーレント光ビームとその情報の被検索信号によって空間変調されたコヒーレント光ビームによる2次元の干渉模様を感光材料に記録することによって作られる。その形成方法の説明図を第4.1図に示す。

平行光群 $A(x, y)$ は被検索情報 $A = (A_1, A_2, A_3, \dots, A_u)$ を含み、発散光群 $B(x, y)$ は記憶されるべき情報 $B = (B_1, B_2, B_3, \dots, B_v)$ を含んでいる。ただし、 A_i は情報 A の i 番目のビットを表わし、

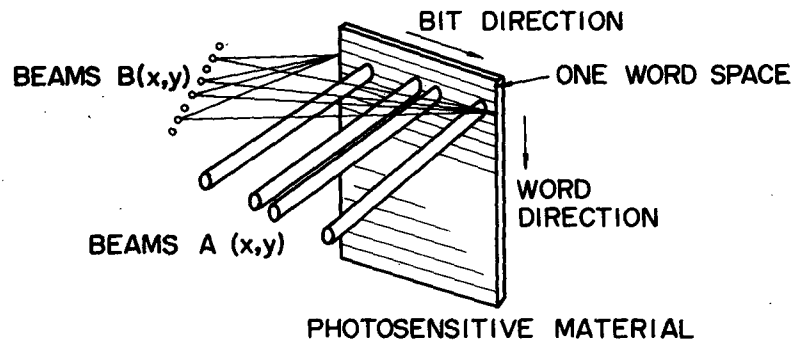
MASK OF INTERROGATED SIGNAL



(a)



(b)



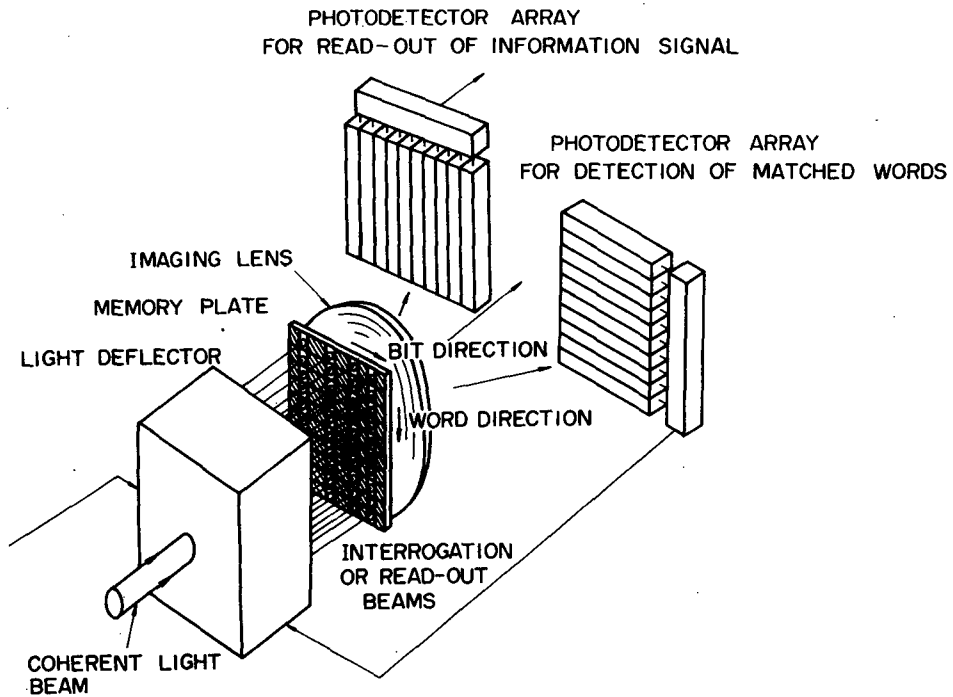
(c)

第4・1図 平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリ板の製作方法の説明図。(a)コヒーレント平行光群 $A(x,y)$ は被検索信号によって変調されている。(b)コヒーレント発散光群 $B(x,y)$ は情報信号によって変調されている。(c)平行光群 $A(x,y)$ と発散光群 $B(x,y)$ による干渉模様はそれぞれ感光材料の語領域に記録される。

B_i は情報 B の i 番目のビットを表わしている。こゝで、光学的論理操作の便宜上、平行光群 $A(x, y)$ はコヒーレント光を分割して作った $2u$ 個の点光源 $a_1, \bar{a}_1, a_2, \bar{a}_2, a_3, \bar{a}_3, \dots, a_u, \bar{a}_u$ から出射し、発散光群 $B(x, y)$ は $2v$ 個の点光源 $b_1, \bar{b}_1, b_2, \bar{b}_2, b_3, \bar{b}_3, \dots, b_v, \bar{b}_v$ から出射するとする。すなわち、情報 A の i 番目のビット A_i は互いに“補”の関係にある真 (true) の点光源 a_i と補 (complement) の点光源 $\bar{a}_i$ の対によってあらわされ、情報 B の i 番目のビット B_i は b_i と $\bar{b}_i$ の対によってあらわされており、コヒーレント光はビットの状態が“1”か“0”かに従って真、補いずれかの点光源から出て来る。例えば、今 (A_1, A_2, A_3, A_4) は $(1, 0, 1, 0)$ 、 (B_1, B_2, B_3, B_4) は $(0, 0, 1, 1)$ であるとする、 $A(x, y)$ は点光源 $a_1, \bar{a}_2, a_3, \bar{a}_4$ から出射して来るコヒーレント平行光群であり、 $B(x, y)$ は点光源 $\bar{b}_1, \bar{b}_2, b_3, b_4$ から出て来るコヒーレント発散光群である。平行光群 $A(x, y)$ と発散光群 $B(x, y)$ による干渉模様を記録して作ったホログラムには、情報 A は語領域にパッチ (patch) のつらなり $a_1, \bar{a}_1, \dots$ として記録され、一方情報 B は各パッチの中に含まれている。したがって、記録された情報は論理的には $a_i \Delta (b_i + \bar{b}_i), \bar{a}_i \Delta (b_i + \bar{b}_i), \dots$ と表現することができる。上記の様にしである情報の記録が終われば、次の情報は、感光材料の位置をシフトさせ、その他は上記と全く同じようにして記録する。この操作を必要な語数と同じ回数くり返せば、記憶すべき情報の書き込みは完了する。

次に検索、読み出しの動作について述べる。第4.2図はホログラム連想メモリ板を検索し、検索信号に一致した語の情報を読み出す装置の原理構成を示したものである。

検索は整合検出 (match detection) ではなく、非整合検出 (mismatch detection) によって行なう。すなわち、検索信号を $C = (C_1, C_2, C_3, \dots, C_u)$ とあらわすことにすると、その補信号 $\bar{C} = (\bar{C}_1, \bar{C}_2, \bar{C}_3, \dots, \bar{C}_u)$ によって空間変調されたコヒーレント光ビーム群 $C(x, y)$ でホログラム・



第4・2図 検索・読み出し装置の原理構成。

メモリ板を照明する。 $C(x, y)$ もまた真, 補の対よりなる点光源群 $c_1, \bar{c}_1, c_2, \bar{c}_2, c_3, \bar{c}_3, \dots, c_u, \bar{c}_u$ より出射するコヒーレント平行光群であり, 点光源 c_i から出射したコヒーレント光ビームは被検索信号の i 番目のビット A_i の真の点光源から出た光によって作られた全てのパッチを同時に照明し, $\bar{c}_i$ から出た光ビームはビット A_i の補の点光源から出た光によって作られた全てのパッチを同時に照明する。また $\bar{c}_i$ の幾つかは検索に関与しないドント・ケア・ビット (DON'T CARE bit) であつてもよく, ドント・ケア・ビットに相当する点光源からは真, 補のいずれから光は出射しない。

さて, $C(x, y)$ は検索信号の補信号によって空間変調されているから, 完全に検索信号と整合した被検索信号の語領域, 言いかえると, 検索信号の補信号と全く一致しない検索信号の語領域, からは情報信号の像は全く再生されない。したがって検索信号に関連した必要な情報は像を全く再生しなかった語領域に記憶されている。

以上の検索動作をより明確にするために例を用いて述べる。先に述べた記録過程の例では、 $A = (1, 0, 1, 0)$ 、 $B = (0, 0, 1, 1)$ であったから、点光源 a_1 、 $\bar{a}_2$ 、 a_3 、 $\bar{a}_4$ に対応するパッチが微小ホログラムになっており、この各微小ホログラムに B 情報が記録されている。さて、検索信号 (C_1, C_2, C_3, C_4) は $(1, X, X, 0)$ (ただし、X はドント・ケア・ビットである) であるとする、検索用平行光ビーム $C(x, y)$ は点光源 $\bar{c}_1$ と c_4 から出て来るが、これらは前記の微小ホログラムのいずれをも照明しないから、B 情報の像は再生されない。かくして検索信号 $C = (1, X, X, 0)$ は情報信号 $B = (0, 0, 1, 1)$ と関係した被検索信号 $A = (1, 0, 1, 0)$ に整合していることがわかる。次に、検索信号が $C = (1, X, 0, X)$ であるとする、検索用平行光ビーム $C(x, y)$ は点光源 $\bar{c}_1$ 、 c_3 から出て来る。この場合には点光源 c_3 から出て来た光が点光源 a_3 に対応する微小ホログラムを照明するので、B 情報 $(0, 0, 1, 1)$ の像が再生される。かくして $C = (1, X, 0, X)$ は被検索信号 A に整合していないことがわかる。

検索光ビームが全ての語を同時に照明している間は、情報信号の再生像は語方向には絶縁されビット方向には共通に結線されている整合検出用光検出器アレーで検出される。上記したように、像を再生しているのは検索信号に非整合の語であり、像を再生しない語が検索信号と整合している。検索動作の結果として、非整合、単一整合、多重整合 (multiple match) の三状態が可能であるが、多重整合の場合には、必要な情報を読み出す前に順序検索技術 (ordered retrieval technique) の手段によって単一整合に変換しておく必要がある。⁷²⁾

検索動作により整合した語の位置が判明すれば、必要な情報の読み出しは整合した語をコヒーレント光ビームで照明することによって行なうことができる。上記の例では、 $(C_1, C_2, C_3, C_4) = (1, X, X, 0)$ は $A = (1, 0, 1, 0)$ と整合していることが判ったから、 $A = (1, 0, 1, 0)$ を含んでいる語をコヒーレント光ビームで照明することによって、記録されていた情報 $B = (0, 0, 1, 1)$ に相当する像がビット方向には絶縁され語方向に共通に結線

されている読み出し用光検出器アレー上に再生される。

上記の原理に基づいて実際にホログラム連想メモリを構成する場合、最も重要でしかも最も難しいのは検索・読み出しに用いる空間光変調器である。そこで検索・読み出し用光変調器について簡単に触れておきたいと思う。

検索動作においては、検索信号の補信号によって空間変調されたコヒーレント光ビーム群で全ての語を同時に照明する必要があるが、検索信号の補信号によるコヒーレント光ビームの分配は次のような方法によって行なうことができる。まず、1本のコヒーレント光をビーム・スプリッタの組み合わせにより $2u$ 本のコヒーレント平行光ビームに分割する。次に $2u$ 本の平行光ビームを $2u$ 個の電気-光学光変調器⁷³⁾を用い、検索信号に従って空間的に変調する。変調された平行光ビームは続いて光偏向器によって語方向に分配される。この目的に使用する光偏向器としては、電気光学結晶を用いた偏光スイッチと複屈折プリズムを用いた偏向器とで構成されたもの⁷⁴⁾が適している。光偏向器に入射したコヒーレント光ビームは偏光スイッチを半波電圧(half-wave voltage)でドライブすると完全に偏向されるから、偏光スイッチを半波電圧の半分でドライブすることによって、入射コヒーレント光ビームを2方向に分けることができる。

読み出しは同装置の全ての光変調器を“1”の状態にセットし、 $2u$ 本のコヒーレント光ビームを整合した語領域に偏向することによって簡単に行なうことができる。

4.3.1.2 記憶密度

平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリ板の記憶密度の見積りを行なう。ただし、ホログラム連想メモリの場合、その記憶密度を単にホログラムの単位面積に記録できるビット数で表わしても意味をなさない。検索信号(あるいは、被検索信号)を構成するビット数はあらかじめ定められるから、検索信号をあらわすのに必要なビット数が与えられた時、単位面積当り何語記録でき、さらに各語領域に何ビットの情報を記録できるかを議論する必要がある。そこでここでは検索信号のビット数が任意の数の

時に，単位面積当りの語数と1語当りに記録できる情報信号ビット数を求めることにする。

点光源から発散した物体光と平行光を干渉させて作ったホログラムから点像を再生する場合に，記録時の点光源の大きさは無限小であり，感光材料の解像力は十分高く，ホログラムの結像にうす肉レンズの理論が当てはまると仮定し，第4.3図に示すようにホログラム（簡単のため円形とする）の直径を d_H ，ホログラム面から像面までの距離を f ，再生像の第一の暗環の直径を d_I ，直径 d_I がホログラムの中心に対してはる角を $2r$ ，読み出し光の波長を λ とすると，うす肉レンズの回折限界の理論^{7.5)}より，

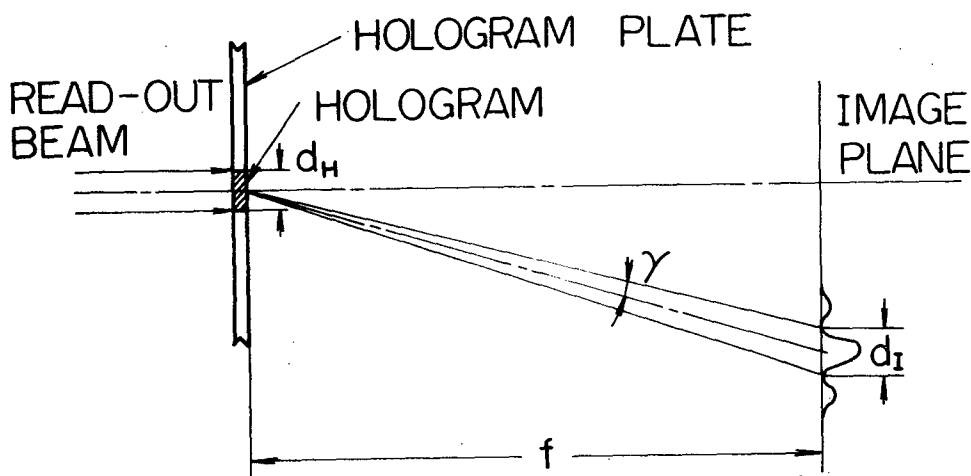
$$\sin r = 1.22 \lambda / d_H \quad (4.6)$$

である。 r は小さい値であるから

$$\tan r \doteq \sin r = 1.22 \lambda / d_H \quad (4.7)$$

とあらわすことができる。ところで

$$\tan r \doteq d_I / 2f \quad (4.8)$$



第4.3図 微小ホログラムによる結像。

であるから、(4.7)と(4.8)より次式が得られる。

$$d_I = 2.44 f \lambda / d_H \quad (4.9)$$

(4.9)式はホログラムの大きさと再生点像の大きさの関係を示している。

さて、平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリ板の場合には微小ホログラムの大きさは必ずしも円形である必要はなく、矩形でも正方形でもよい。まず語方向の大きさについて考えることにする。第4.2図に示した検索・読み出し装置の構造から、微小ホログラムの語方向の長さが再生点像の語方向の長さと等しい時が語方向記録密度が最高になることが推察できる。したがって、微小ホログラムの語方向の長さを d_{HW} 、再生点像の語方向の長さを d_{IW} とすると、 d_{HW} 、 d_{IW} の大きさは(4.9)式より、

$$d_{HW} = d_{IW} = (2.44 f \lambda)^{\frac{1}{2}} \quad (4.10)$$

となる。

次にビット方向の大きさであるが、この場合も微小ホログラムの長さと再生点像の長さが等しい時に記憶密度は最高になる。ただし検索信号のビット数が最低でも M ビットあるならば、その長さは語方向よりも短かくて良い。微小ホログラムのビット方向の長さを d_{Hb} 、再生点像のビット方向の長さを d_{Ib} とすると、 d_{Hb} 、 d_{Ib} の大きさは(4.9)式より、

$$d_{Hb} = d_{Ib} = (2.44 f \lambda / M)^{\frac{1}{2}} \quad (4.11)$$

である。

以上で微小ホログラムと再生点像の大きさが求まったので、単位面積当りの語数と1語当りに記録できるビット数を求めることができる。検索信号のビット数を N_I 、ホログラム・メモリ板の語方向の長さを L_{HW} 、ビッ

ト方向の長さを L_{Hb} 、点像のビット方向の長さを L_{Ib} とすると、記録できる語数 P_w および 1 語当りに記録できるビット数 P_b は次の様になる。

$$\begin{aligned} P_w &= L_{Hw} L_{Hb} / 2 N_I d_{Hw} d_{Hb} \\ &= M^{\frac{1}{2}} L_{Hw} L_{Hb} / 4.88 N_I f \lambda \end{aligned} \quad (4 \cdot 12)$$

$$\begin{aligned} P_b &= L_{Ib} / d_{Ib} \\ &= L_{Ib} / (2.44 f \lambda / M)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (4 \cdot 13)$$

この型のホログラム・メモリ板においては、 $L_{Hb} = L_{Ib}$ であるが、 L_{Ib} はそれがホログラムの中心に対してはる角 $2\omega_b$ の大きさによっても制限される。したがって、 f を一定にしてメモリ板および再生像を無制限に大きくすることはできない。このことを考慮すると、

$$P_b = 2f \tan \omega_b / (2.44 f \lambda / M)^{\frac{1}{2}} \quad (4 \cdot 14)$$

となる。

例として、 $N_I = 64$ ビット、 $M = 4$ ビット、 $f = 20$ cm、 $\lambda = 0.63 \times 10^{-4}$ cm、 $\omega_b = 15^\circ$ の場合について 1 cm² の大きさのホログラム・メモリ板に記録できる P_w 、 P_b を (4・12) 式および (4・14) 式により求めると、 $P_w = 5.1$ 、 $P_b = 386$ となる。すなわち、平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリ板の記憶密度は、この例の場合、 64 検索ビット $\times 5.1$ 語/cm² $\times 386$ ビット/語である。

4.3.2 体積ホログラムを用いたホログラム連想メモリ^{68,76)}

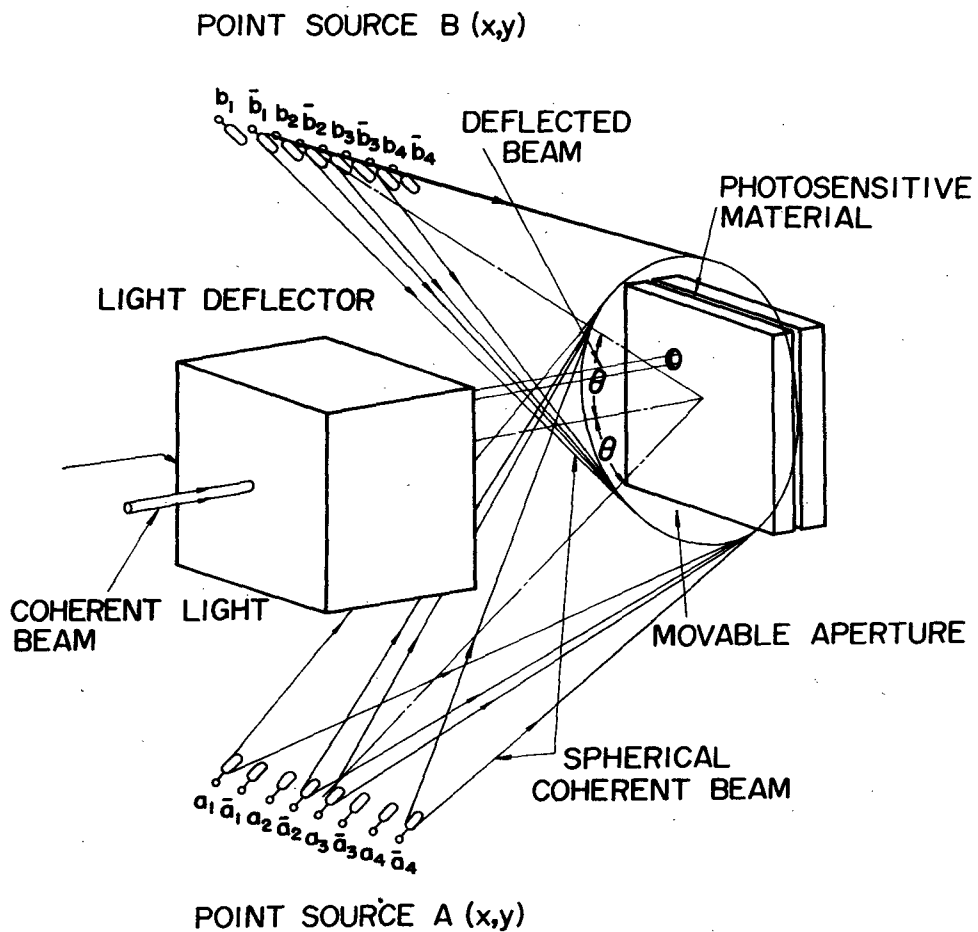
前述したように平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリの記憶密度の代表値は $64 \text{ 検索ビット} \times 5.1 \text{ 語/cm}^2 \times 386 \text{ ビット/語}$ である。この値が情報検索システムには不十分なことは明らかであり、特に 1 cm^2 当りの語数が約 5 語というのは致命的と言えるほど少ない数である。さらに検索・読み出し時に用いる光偏向器の動作も複雑である。そこでこれらの困難を克服するために、体積ホログラムを用いたホログラム連想メモリを研究した。以下にその原理を述べ、記憶密度の見積りを行なう。

4.3.2.1 原理

第 2.4 節で述べた様に厚みのある感光材料に記録したホログラムから再生された実像の強度が最大になるのは、記録時に用いた光と読み出し光の波長が同じで乳剤の収縮がなければ、ホログラムを参照光の反対方向もしくは物体光の方向から照明した時だけであり、読み出し光の方向がこれらの方向からずれるにしたがって再生光強度は低下する。この体積ホログラム効果は第 2.4 節では好ましくないものとして扱い、感光材料の厚さをできるだけうすくすることを考えたが、逆に感光材料の厚さを十分に厚くすると、再生像が得られるのは参照光の方向と物体光の方向とそれぞれに逆の方向からホログラムを照明した時だけ、すなわち読み出し光が干渉縞に対するブラッグの条件を満足した時だけになるから、この効果をうまく使うことによってホログラム連想メモリの記憶密度を大幅に向上させることができる。

体積ホログラムを用いたホログラム連想メモリ板を製作する装置の構成を第 4.4 図に示す。情報 $A = (A_1, A_2, \dots, A_u)$ を運ぶ発散光束群 $A(x, y)$ は $2u$ 個の点光源 $a_1, \bar{a}_1, a_2, \bar{a}_2, \dots, a_u, \bar{a}_u$ から発散する $2u$ 本のコヒーレント球面波である。情報 A の第 i 番目のビット A_i は真の点光源 a_i と補の点光源 $\bar{a}_i$ の対によってあらわされており、ビットの状態が "1" か "0" かに従って真、補いずれかの点光源から光が出て来る。同様に情報 $B = (B_1, B_2, \dots, B_v)$ を運ぶ発散光束群 $B(x, y)$ は 2

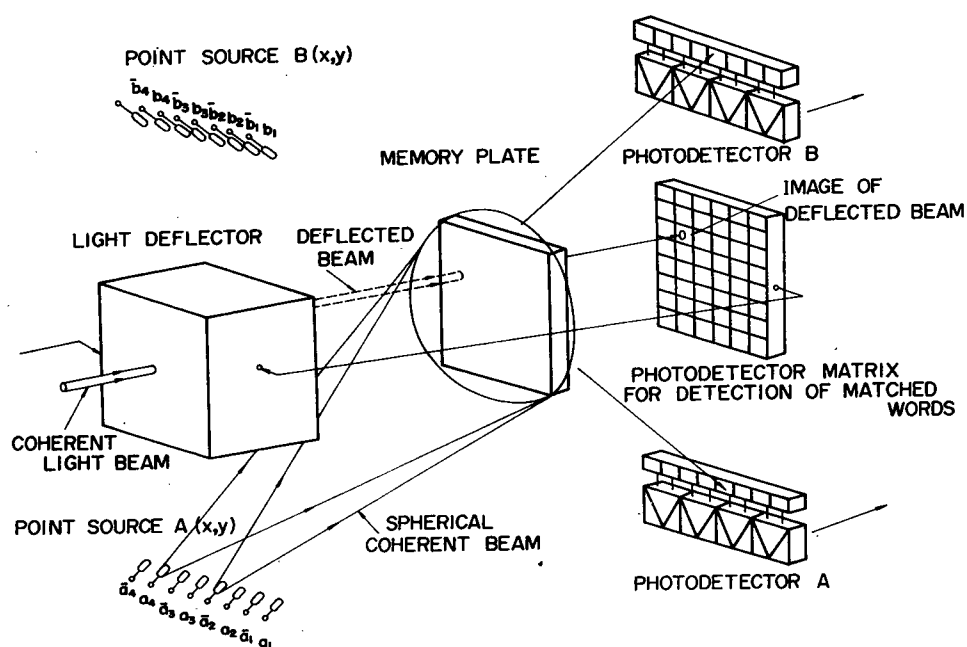
v 個の点光源 $b_1, \bar{b}_1, b_2, \bar{b}_2, \dots, b_v, \bar{b}_v$ から発散する $2v$ 本のコヒーレント球面波であり、第 i 番目のビット B_i の状態によって真、補いずれかの点光源から光が出て来る。 $a_1, \bar{a}_1, \dots, a_u, \bar{a}_u$ の各間の角 τ_A および $b_1, \bar{b}_1, \dots, b_v, \bar{b}_v$ の各間の角 τ_B は、例えば $\bar{a}_1$ から出た光によって a_2 に対応する像が再生されないように感光材料の厚さに応じて適当な大きさに選ばれている。この図の場合、 $A(x, y)$ と $B(x, y)$ は光学的に等価であり、 $A(x, y)$ と $B(x, y)$ のいずれでも検索信号として、あるいは情報信号として用いることができる。さらに



第4・4 図 体積ホログラムを用いたホログラム連想
メモリ板を製作する装置の構成。

もう一つ、第3番目の細いコヒーレント平行光ビームが感光材料の微小部分を照明するように光偏向器によって偏向されている。球面波A、Bと細いコヒーレント平行光ビームとが干渉して形成する干渉縞は感光材料の微小部分に3次元的に記録されて微小ホログラム、すなわち語を形成する。感光材料の前には開孔を有する遮蔽板が置かれており、感光材料の他の部分が露光されるのを防止している。他の信号に対する干渉縞は、細いコヒーレント平行光ビームと開孔を次々と隣の位置にシフトさせながら、同様にして語の数だけ繰り返し露光する。露光が終った感光材料にそれに適した処理をほどこせばホログラム・メモリ板が完成する。

第4.5図は空間的なエクスクループ・オア動作による検索操作の説明図である。情報Aが検索される時、検索信号の補信号をあらわす一群の球面波が点光源 $a_1, \bar{a}_1, \dots, a_u, \bar{a}_u$ から出射され、ホログラム・メモリ板の全面を照明する。ただし、メモリ板は実像を得るために記録時とは逆向きに（水平方向に 180° 回転して）置かれている。検索用発散光のどれか一



第4.5図 体積ホログラムを用いたホログラム連想メモリにおける検索と読み出しのための装置の構成。

つの方向でも干渉縞のブラッグ角と一致するならば，すなわち検索時にコヒーレント球面波を出射している点光源が記録時に使われたものと同じであるならば，細いコヒーレント平行光ビームと情報Bの像が再生される。一方，検索に供された全ての発散光束群に対してある微小ホログラムを構成する干渉縞のブラッグ角のいずれもが一致しなければ，その微小ホログラムからは細いコヒーレント平行光ビームの像が再生されない。すなわち細いコヒーレント平行光ビームの像が再生されないことを認識することによって必要な情報Bが記憶されている位置を見出すことができる。必要な情報Bが記憶されている位置が見出されれば，その位置の微小ホログラムを光偏向器によって制御された細いコヒーレント平行光ビームで照明することによって必要な情報を読み出すことができる。

上記のシステムにおいては $A(x, y)$ と $B(x, y)$ は同じような光学配置により発生されているので，AのかわりにBからの検索も全く同様に行なうことができる。すなわち体積ホログラムを用いたホログラム連想メモリは異なった種類の情報間の相互翻訳機能を有している。

4. 3. 2. 2 記憶密度

体積ホログラムを用いたホログラム連想メモリの記憶密度を平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリの場合と同様に（検索ビット数） $\times$ （ 1cm^2 当りの語数） $\times$ （1語当りのビット数）の形で見積ることにする。

体積ホログラムを用いたホログラム連想メモリにおける検索信号（あるいは，被検索信号）のビット数は，情報Aが被検索情報であるとするとき，点光源 $a_1, \bar{a}_1, \dots, a_u, \bar{a}_u$ の各間の角 τ_A の大きさによって定まる。角 τ_A の大きさは発散光束群 $A(x, y)$ の各々と細いコヒーレント平行光ビームのなす角および感光材料の厚さに依存し，点光源の所在位置によって異なる値であるが，こゝでは簡単のために一定値とし，発散光束群 $A(x, y)$ の各々と細いコヒーレント平行光ビームのなす角の平均値と感光材料の厚さによって定めるものとする。第4.4図に示した様に発散光束群 $A(x, y)$ の平均入射角を θ ，細いコヒーレント平行光ビームの入射角を 0° ，

感光材料の厚さを L とすると，検索光の入射角が $(\theta \pm \tau_A)$ の時に再生光強度が 0 になればよいから，第 2.4 節の (2.26) 式に $\theta'_{rx}=0$ ， $\theta'_{ox}=\theta'$ ， $\theta'_{ox}=\theta' \pm \tau'_A$ ， $\theta'_{Rx}=0$ ， $\mu=1$ ， $\lambda'_c=\lambda'$ ， $I'_x=0$ （ただし θ' ， τ'_A ， λ' はそれぞれ θ ， τ_A ， λ の感光材料中の値）を代入し， $\tau_A \ll 1$ という条件のもとに整理すると次式が得られる。

$$\tau_A = \pm \frac{\lambda (n_e^2 - \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}}{L \sin \theta \cos \theta} \quad (4.15)$$

ただし， n_e は感光材料の屈折率である。したがって，情報 A をあらわす点光源群がマトリックス状に配列されており，その一辺がホログラム板上の一点に対してはる角を $\varnothing$ とすると，検索ビット数 N_I は次式で与えられる。

$$N_I = \frac{L^2 \varnothing^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta}{8 \lambda^2 (n_e^2 - \sin^2 \theta)} \quad (4.16)$$

検索ビット数から感光材料の厚さを決定する場合は (4.16) 式を変形して，

$$L = \frac{2 (2 N_I)^{\frac{1}{2}} \lambda (n_e^2 - \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}}{\varnothing \sin \theta \cos \theta} \quad (4.17)$$

を用いる方が便利である。

次に微小ホログラムの大きさと感光材料の単位面積当りに記録できる数を求める。微小ホログラムの有効径を d_{He} とし，この微小ホログラムから再生される細いコヒーレント平行光ビームの像の直径を d_{Ip} とすると，(4.9) 式より

$$d_{Ip} = 2.44 f \lambda / d_{He} \quad (4.18)$$

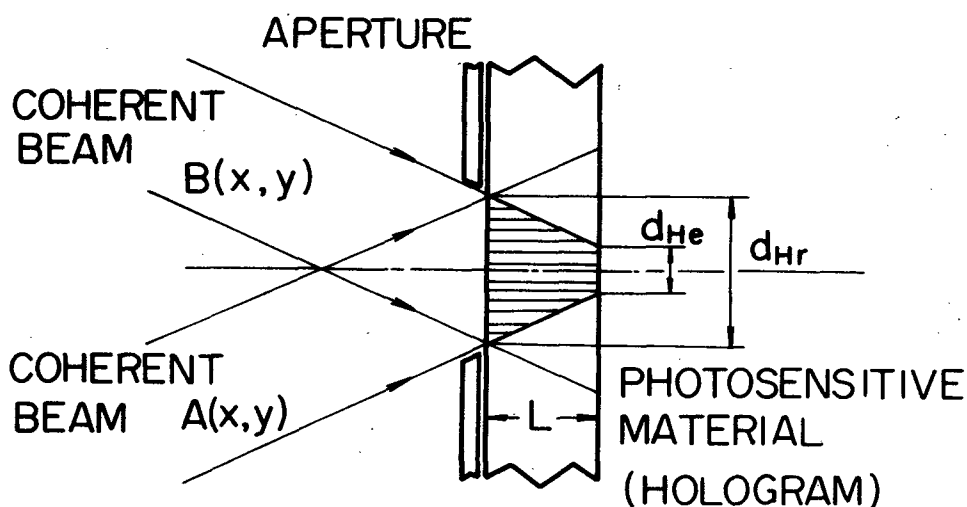
であるが，微小ホログラムの有効径を干渉縞が厚さ方向に完全に記録されている部分の大きさとするとき，微小ホログラムの実際の大きさは第4・6図に示すようになり，その直径 d_{Hr} は次式で与えられる。

$$d_{Hr} = d_{He} + 2L \tan \theta \quad (4.19)$$

記憶密度が最大になるのは，この型のホログラム・メモリの場合には，微小ホログラムの実際の直径 d_{Hr} と細いコヒーレント平行光ビームの像の直径 d_{Ip} が等しくなる時であるから，この条件と(4・18)式を(4・19)式に代入し，得られた方程式を $d_{Hr} > 0$ の条件のもとに解くと，

$$d_{Hr} = d_{Ip} = L \tan \theta + (L^2 \tan^2 \theta + 2.44 f \lambda)^{\frac{1}{2}} \quad (4.20)$$

となる。したがって，ホログラム・メモリ板の縦方向の長さを L_{Hv} ，横方向の長さを L_{Hh} とすると，微小ホログラムの数 P_w は



第4・6図 微小ホログラムの有効径と実際の直径の関係。

$$P_w = L_{Hv} \cdot L_{Hh} / [L \tan \theta + (L^2 \tan^2 \theta + 2.44 f \lambda)^{\frac{1}{2}}]^2 \quad (4.21)$$

である。

1語当りのビット数は、情報Bの方からも検索できるようにすると、当然 N_I であるが、情報Bの方から検索する必要はないとすると、有効径 d_{He} の微小ホログラムより再生される点像の大きさによって定まる。その値は当然 d_{Ip} であるから、点像が正方マトリックス状に配列された再生像の辺の長さが微小ホログラムに対してはる角を 2ω とすると、再生点像の数、すなわち1語当りのビット数 P_b は

$$P_b = 4f^2 \tan^2 \omega / [L \tan \theta + (L^2 \tan^2 \theta + 2.44 f \lambda)^{\frac{1}{2}}]^2 \quad (4.22)$$

となる。

例として、 $N_I = 64$ ビット、 $\lambda = 0.63 \times 10^{-4} \text{cm}$ 、 $n_e = 1.52$ 、 $\Omega = 20^\circ$ ($=0.35$)、 $\theta = 45^\circ$ 、 $f = 20 \text{cm}$ 、 $\omega = 15^\circ$ 、 $L_{Hv} = L_{Hh} = 1 \text{cm}$ の場合について L 、 P_w 、 P_b を (4.17) 式、(4.21) 式および (4.22) 式より求めると、 $L = 1.096 \times 10^{-2} \text{cm}$ 、 $P_w = 220$ 、 $P_b = 25237$ となる。すなわち検索ビット数を64ビットにするためには約 $110 \mu\text{m}$ の厚さの感光材料が必要であり、その時の記憶密度は $64 \text{検索ビット} \times 220 \text{語} / \text{cm}^2 \times 2.5 \times 10^4 \text{ビット} / \text{語}$ である。

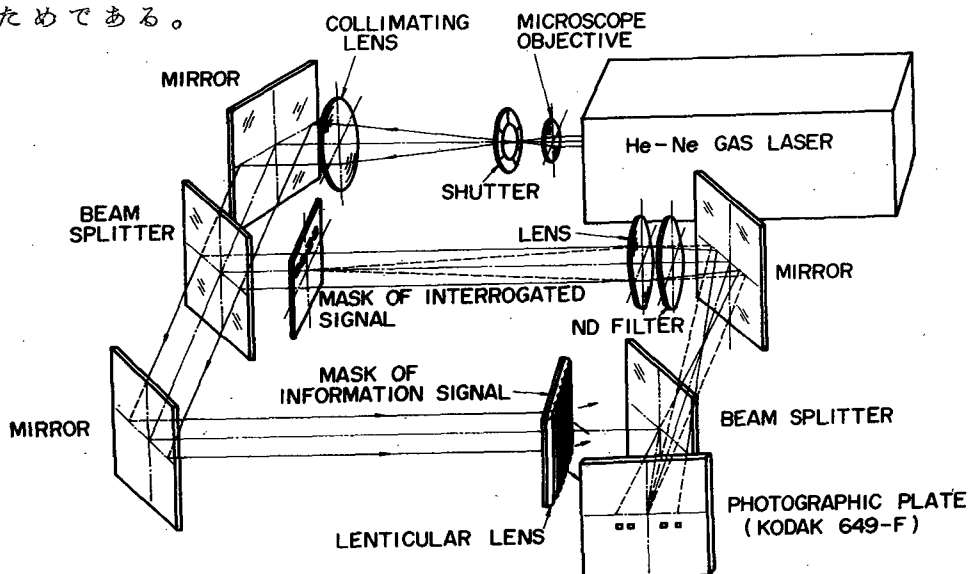
4.4 実験結果と考察

平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリについては、第4.2節で述べた原理に基づいた実験室モデルの実験を行なったが、体積ホログラムを用いたホログラム連想メモリについては、厚い感光材料の入手が困難であったので、実験室モデルの実験を行なうまでには到らず、現像定着処理により収縮した写真乳剤の矯正の実験を行なったに留まった。そこで本節で

は、平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリの実験室モデルの実験と収縮した写真乳剤の矯正の実験の結果について述べ、考察を行なう。

4.4.1 平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリの実験^{68,70,71)}

ホログラム連想メモリ板製作の光学配置を第4.7図に示す。レーザー光を信号（被検索信号と情報信号）にしたがって空間変調するための空間変調器として小さな四角の孔を有する金属マスクを使用している。被検索信号用マスクの後方に置かれているレンズは、被検索信号用マスクを通して回折された光をそのまま乾板にあてると、相隣るビット同志が影響をおよぼしあうので、被検索信号用マスクの等倍の像を乾板上に作るために用いられている。情報信号用マスクの直後に置かれているレンチキューラーレンズは、情報信号用マスクを通過した光を発散させて、情報信号用マスクを通過した光の全体と被検索信号用マスクの個々のビットの像とを干渉させるためのものである。さらにこの光学配置では、レンズの後側焦点から乾板までの距離とレンチキューラー・レンズの後側焦点から乾板までの距離を等しくして、レンズ無しフーリエ変換ホログラム⁷⁷⁾を製作し、同じパターンの像が2個同時に再生できるようにしている。これは、第4.3節で述べたように、検索用と読み出し用と同じパターンの像が2個同時にほしいためである。

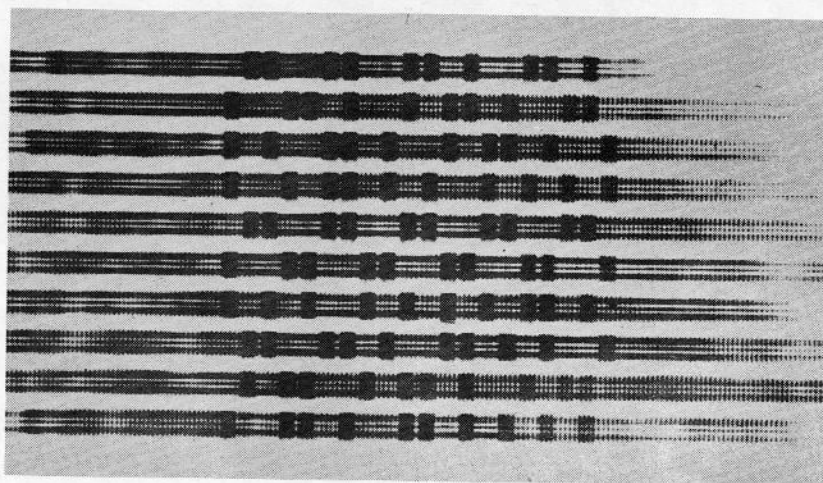


第4.7図 ホログラム連想メモリ板製作の光学配置。

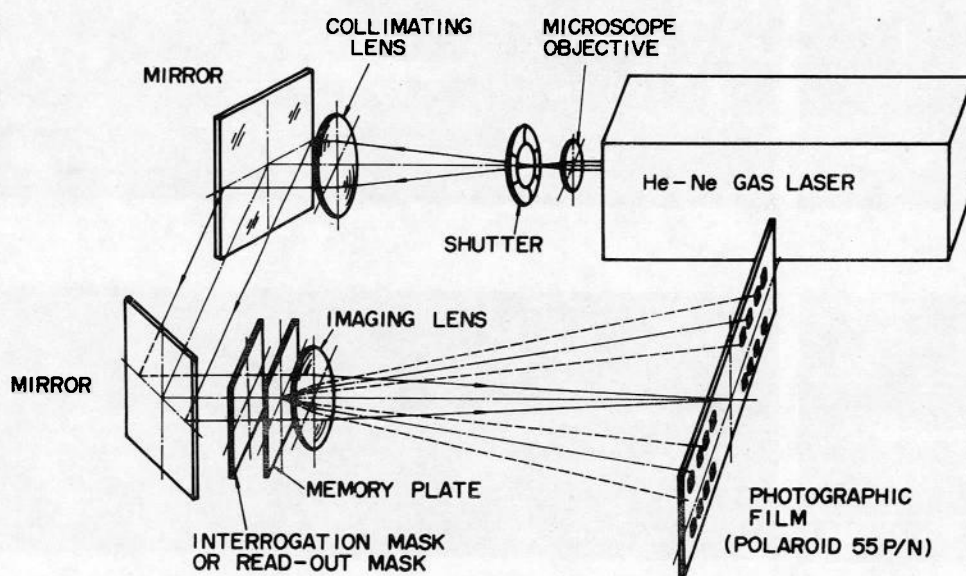
第4・8図は製作されたホログラム連想メモリ板の一例の写真で、このメモリ板はコダック649-F乾板を用いて作られており、大きさは20mm×20mmである。各行はそれぞれ一つの語に相当し、各語の中に被検索信号の各ビットに相当する微小ホログラムがあり、各微小ホログラムにその語に対応する情報の全てが記録されている。このホログラム連想メモリ板の記憶容量は10検索ビット×10語×20情報ビット/語である。

ホログラム連想メモリ板から必要な情報を検索し、読み出すための光学配置を第4・9図に示す。この場合も記録の場合と同様に、検索信号にしたがってレーザー光を空間変調するための空間変調器として金属マスクを用いている。検索用マスクは、被検索信号用マスクの各語を構成するビット（被検索ビット）と検索用マスクとの一致、不一致から希望の語を検出するため、1から数対の語方向に長いスリットと同じ幅の不透明部分および不透明部分どうしの対とから構成されている。スリットと不透明部分の対は検索信号の補信号に対応しており、不透明部分どうしの対はドント・ケア・ビットに対応している。メモリ板は、検索マスクのスリットとそれに対応する被検索ビット（微小ホログラム）とが正確に一致するように、検索マスクの直後に置かれており、検索マスクのスリットと微小ホログラムとが重なった語から1次回折光が生じ、メモリ板の直後に置かれた結像レンズの後側焦点面上に直接透過光をはさんで一对の再生像が得られる。再生像が得られた語は検索信号と不一致の語であり、再生像の出ない語が一致した語である。必要な語の位置がわかれば、その語の領域だけスリットが開いている読み出しマスクを用いて、その語を照明することによって必要な情報が読み出される。

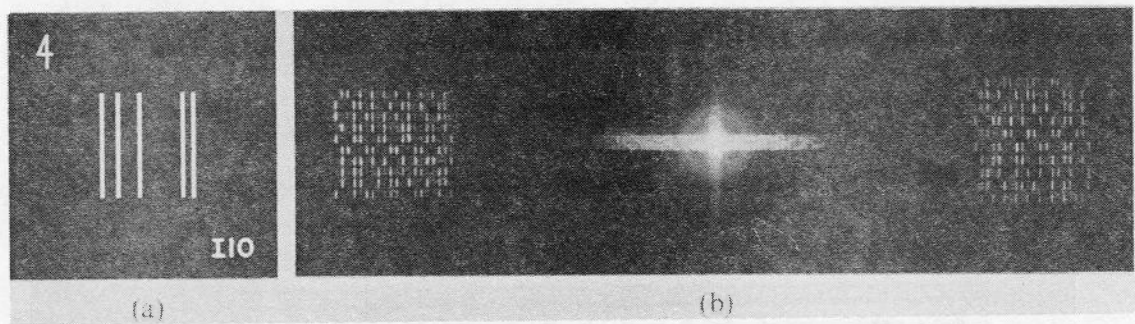
実験結果の三例を使用した検索用マスクや読み出し用マスクと共に第4・10図から第4・12図に示す。第4・10図は不整合の場合の検索結果を示している。(a)は検索に使用されたマスクの写真であり、検索信号の補信号(X, 1, 0, X, 0, X, X, X, 0, 0)を示している。(b)が再生像の写真で二つの再生像のうち右側の像は整合した語の検索に使用され、左側の像は



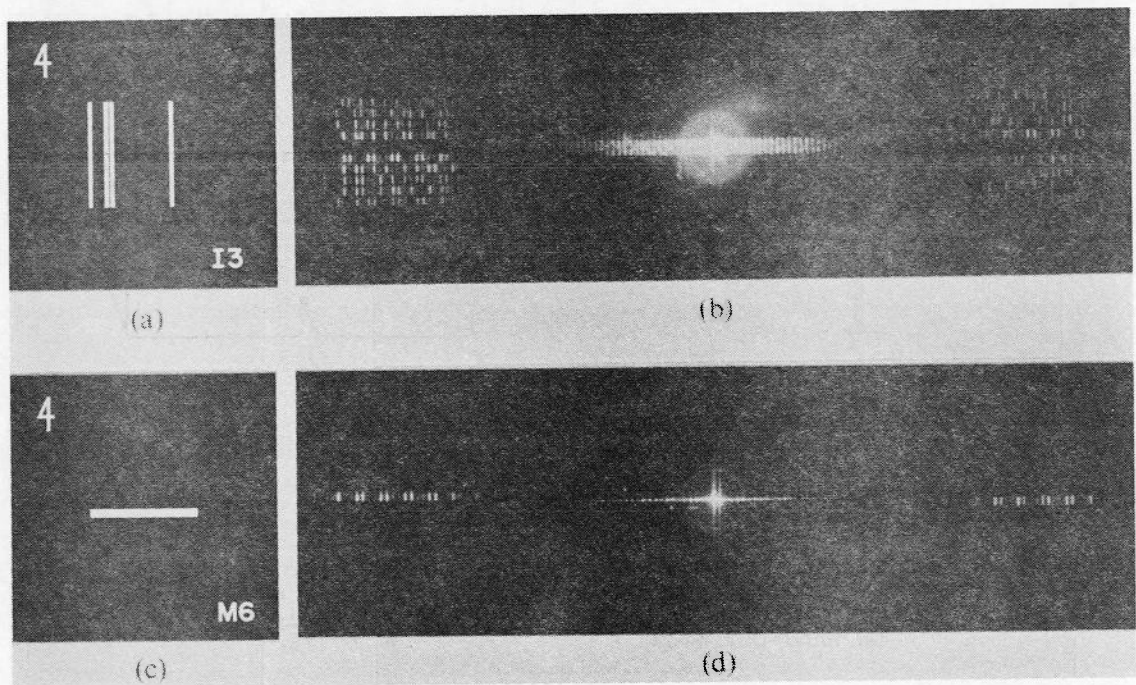
第4・8図 製作されたホログラム連想メモリ板の一例。



第4・9図 ホログラム連想メモリ板から必要な情報を検索し、読み出すための光学配置。



第 4・10 図 不整合の場合の検索結果。(a)検索用マスク。(b)検索用再生像。
整合した語の検索には右側の像が使われ，左側の像は必要な
情報信号を読み出す時に使われる。

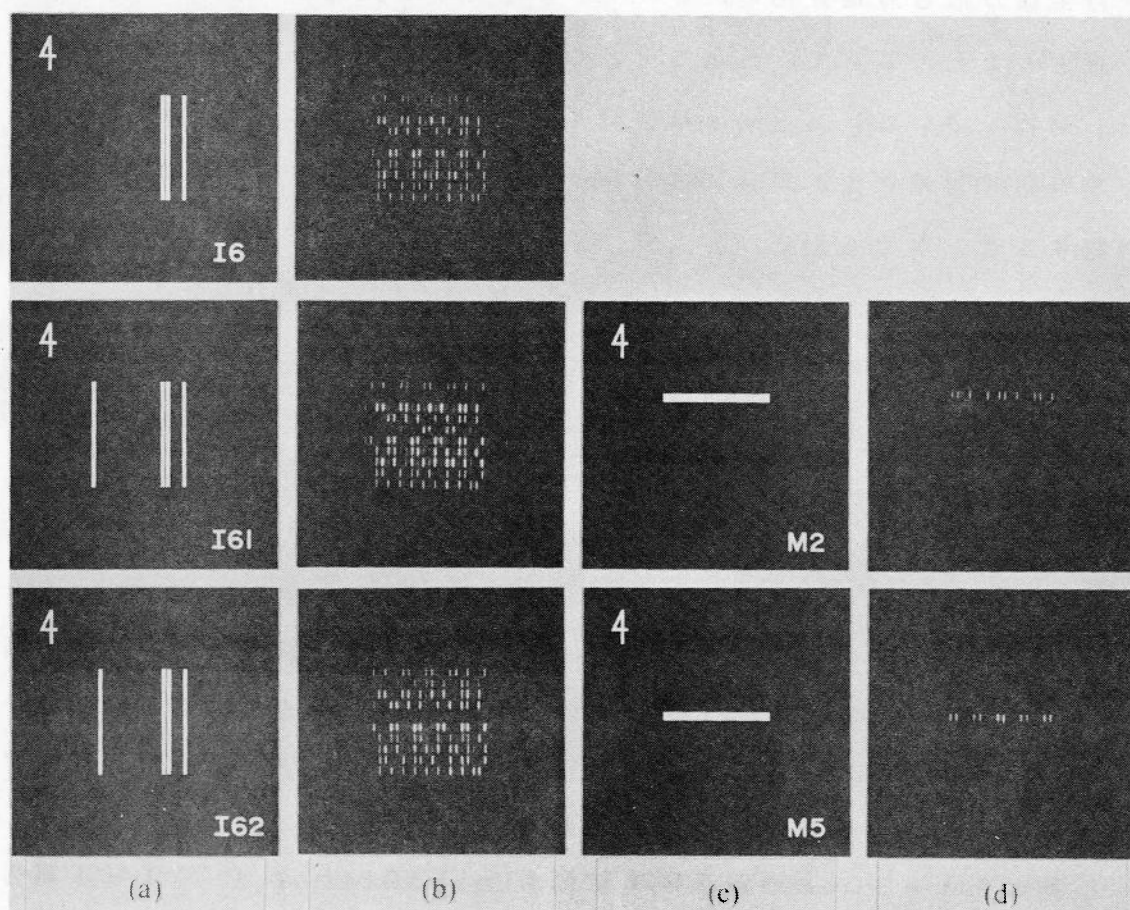


第 4・11 図 単一整合の場合の検索と読み出し。(a)検索用マスク。
(b)検索用再生像。(c)読み出し用マスク。
(d)整合した語から再生された情報信号の像。

必要な情報信号の読み出しに使用された。この写真の場合，情報信号の像が全ての語について再生されているから，検索信号と被検索信号は不一致，すなわち非整合である。

第4・11図は単一整合の場合の検索・読み出しの結果を示している。(b)に示されているように6番目の語の像が再生されていないから，6番目の語だけが(a)に示されている検索マスク(1, 0, 1, X, X, X, X, 0, X, X)に対応する情報を含んでいることがわかる。(a)は(c)に示すマスクを用いて読み出した必要な情報を示している。

第4・12図は多重整合の場合の検索・読み出しの結果を示したものであ



第4・12図 多重整合の場合の検索と順次読み出し法による情報の読み出し。(a)検索用マスク。(b)検索用再生像。(c)読み出し用マスク。(d)整合した語から再生された情報信号の像。

る。(b)の上段の写真に示されているように、2番目と5番目の像が再生されていない。したがって2番目と5番目の両方が(a)の上段の検索用マスク I 6 (X , X , X , X , X , X , 0 , 1 , 0 , X) に相当する情報を含んでいる。この場合には、順次読み出しの手法を用いて、(a)の中段と下段の写真に示すように検索信号のドント・ケア・ビットの数を減らし、多重整合を単一整合に変換する。すなわち、信号 (1 , X , X , X , X , X , 0 , 1 , 0 , X) を表わす検索用マスク I 6 1 から信号 (0 , X , X , X , X , X , 0 , 1 , 0 , X) を表わす検索用マスク I 6 2 を用いることによって単一整合を得ることができる。(d)は相応する情報信号の像を示している。

再生像の信号対雑音比を、ピンホールを有する光電子増倍管で再生像を走査することによって、測定したところ、検索動作で 10 dB 以上、読み出し動作で 13 dB 以上で、ほぼ満足すべき値が得られ、検索動作において高い信号対雑音比が得られるというホログラム連想メモリの潜在能力を確認することができた。

4. 4. 2 収縮した写真乳剤の矯正

写真乳剤を定着して、未感光のハロゲン化銀を除去すると、乳剤は厚さの方向に 10 - 20 % 収縮する。その結果写真乳剤に記録したホログラムも同じ方向に収縮する。写真乳剤の収縮は平面ホログラムの場合にはそれ程問題にならないが、体積ホログラムの場合には再生像の歪のもととなり、読み出し光の方向や波長を変えただけでは、記録時の物体光に含まれていた全ての空間周波数に対してブラック反射の条件を満足させることができず、像の歪を除くことはできない。したがって、収縮の矯正は体積ホログラムの場合には非常に重要な問題である。

収縮したホログラムの矯正の実験は Lin と Lo Bianco⁷⁸⁾ によって報告されたが、コダック 649-F 乾板に記録した光学濃度 2 のホログラムをトリエタノールアミン (CH₂ OHCH₂)₃ N の 6 % 水溶液に浸した時もとの厚さに戻ったことが述べられているだけで、濃度 2 以外のホログラムの矯正や矯正されたホログラムの評価についての報告は皆無である。そこで著者は矯正さ

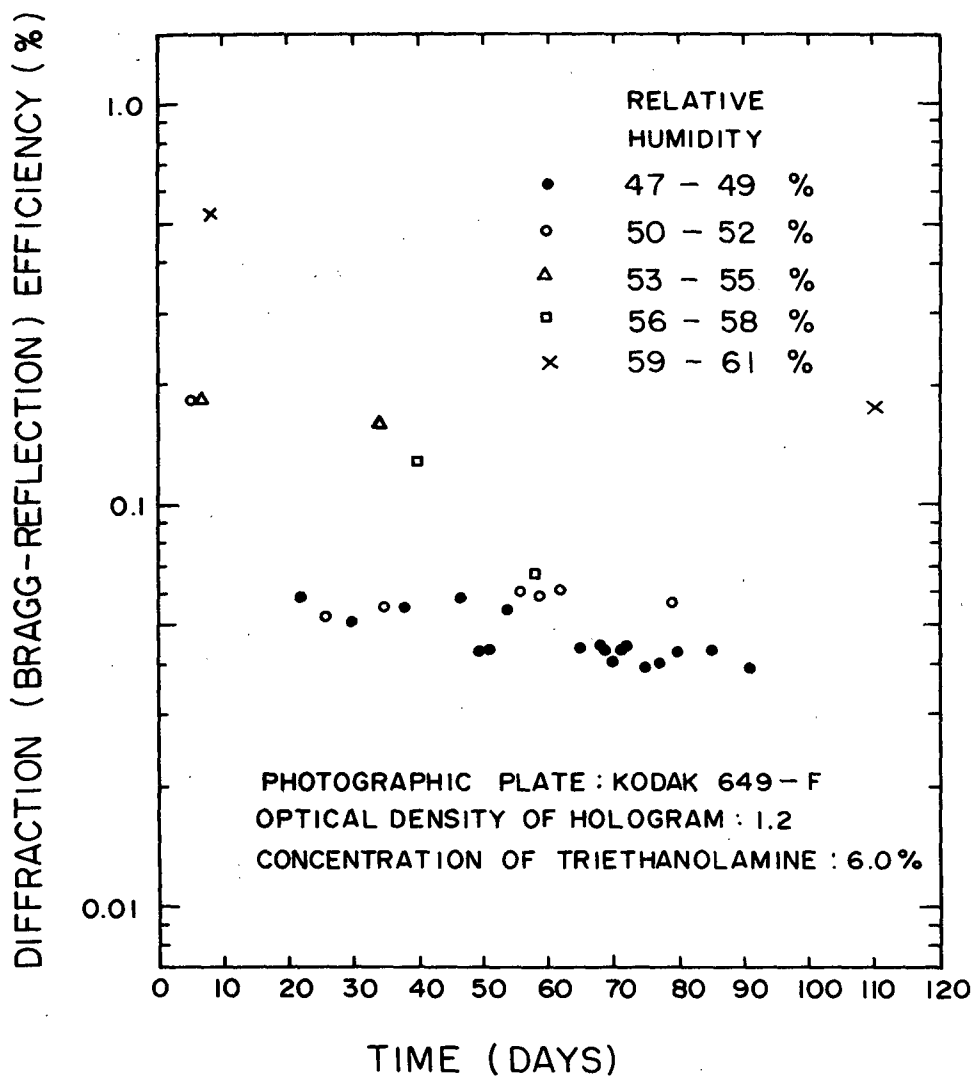
れたホログラムの経時変化，矯正されたホログラムに対する湿度の影響，ホログラムの光学濃度とトリエタノールアミンの最適濃度の関係について実験を行なった。(79, 80)

実験に用いたホログラムはリップマン型のホログラムである。リップマン型ホログラムにおいて，記録時の参照光と同じ光でホログラムを照明した時に最も明かるい再生像，すなわち最も高い回折効率，が得られるのはホログラムが完全に矯正されている場合であり，矯正が不十分であれば，その程度に応じて回折効率が低くなるから，回折効率を矯正の度合いを知るための指標として使うことができる。

実験に用いたリップマン型ホログラムの製作条件および実験方法は次の通りである。コヒーレント光としてHe-Neレーザー光($6328\text{\AA}$)，感光材料としてコダック649-F乾板を使用し，乾板の乳剤側から垂直に入射する物体光としての平行光とガラス側から 33° の入射角で入射する参照光としての平行光とによる干渉縞を乾板に記録することによってリップマン型ホログラムを製作し，このホログラムをトリエタノールアミンの水溶液に10分間浸し，乾燥した後，記録時と全く同じ位置に戻し，記録時の参照光と同じ光で照明して，回折光(ブラッグ反射光)の強度を光電子増倍管で測定した。勿論，物体光の方は遮蔽板で遮断されている。

実験の第1段階として，矯正したホログラムを実際に用いる場合に非常に問題になる回折効率の経時変化を100日以上にわたって測定した。その結果を第4.13図に示す。測定値がかなりばらついているが，これは湿度の違いによるものである。このことを明確に示すために，図には湿度の違いを47-49%の時は黒丸，50-52%の時は白丸という具合に異なった印で示してある。湿度は通常の乾湿球湿度計で測定した。この図からホログラムの回折効率は湿度が一定ならば大して変化しないことがわかる。

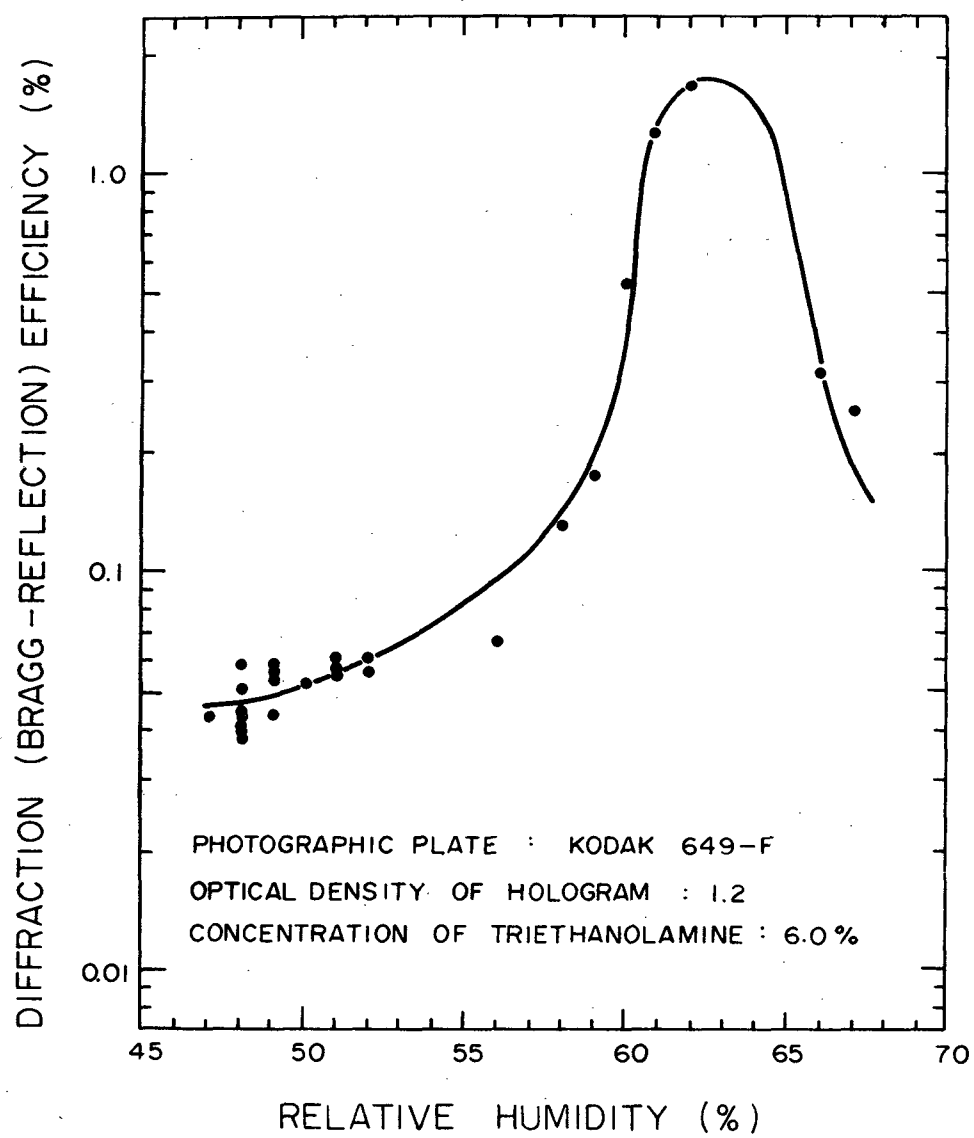
次に，矯正されたホログラムの回折効率に対する湿度の影響を見るために第4.13図のデータをならべ変えて描いたのが第4.14図である。図に見られるように，ホログラムは湿度に対して非常に敏感であるが，この敏感さはトリエタノールアミンを用いたからではなく，ゼラチンの性質によ



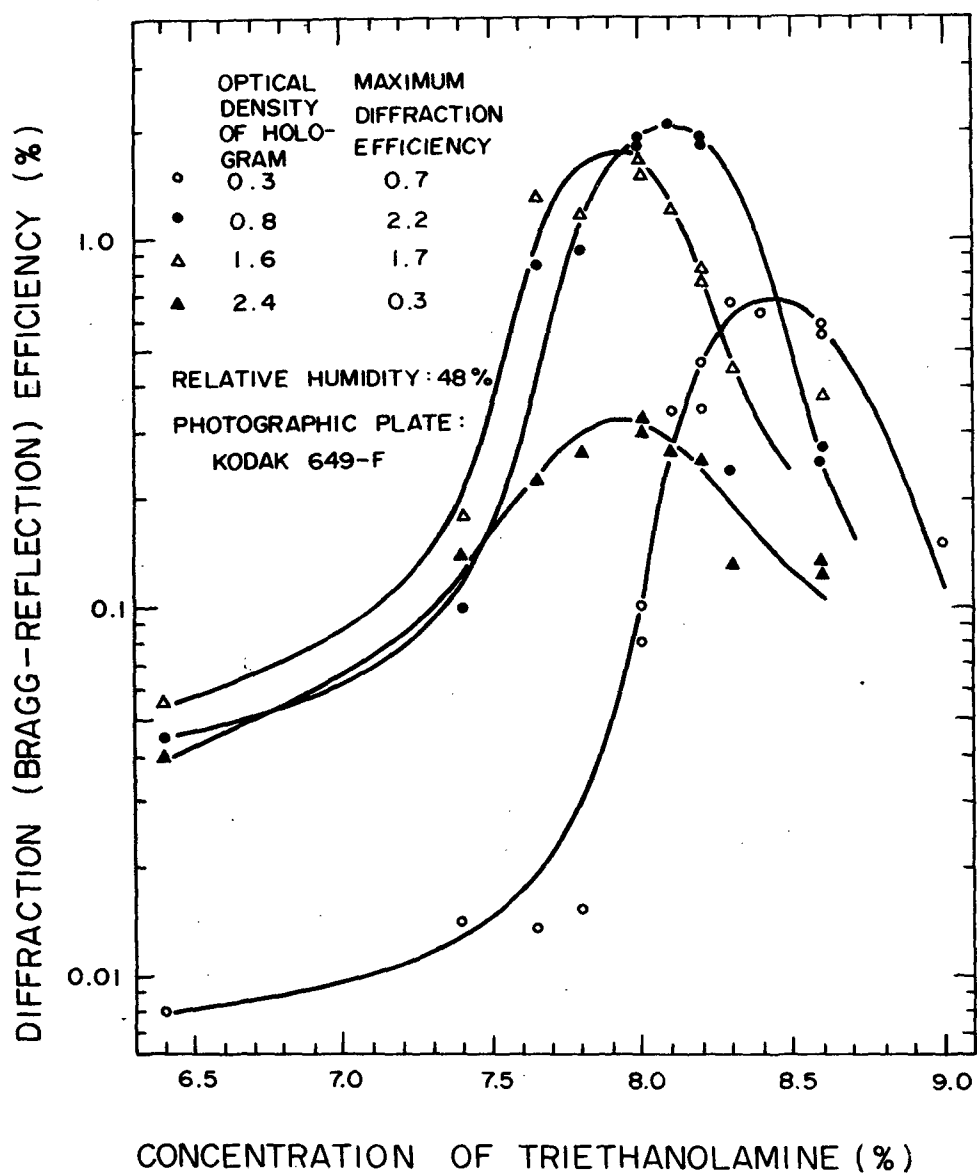
第 4・13 図 トリエタノールアミンで矯正したホログラムの回折効率の経時変化。

るものと考えられる。したがって、乳剤が異なれば、回折効率が最大になる湿度の値も違ってくるものと思われる。

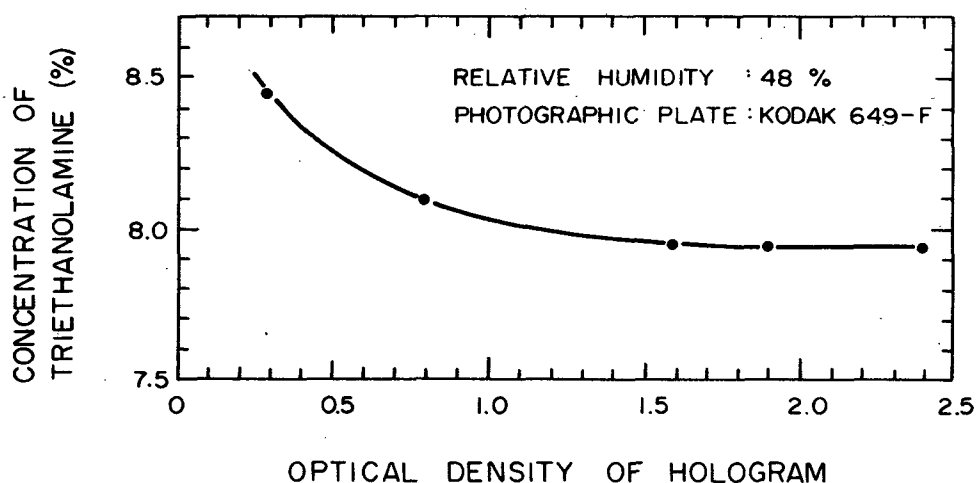
第 4・15 図は湿度が一定の時に各光学濃度のホログラムの回折効率とトリ



第 4・14 図 トリエタノールアミンで矯正されたホログラムの
回折効率に対する湿度の影響。



第 4・15 図 湿度が一定の場合の矯正されたホログラムの回折効率とトリエタノールアミンの濃度の関係。



第4・16図 ホログラムの光学濃度とトリエタノールアミンの最適濃度の関係。

エタノールアミンの濃度の関係を示したものである。

第4・16図はホログラムの光学濃度とトリエタノールアミンの最適濃度の関係を示したもので、この図からホログラムの光学濃度がうすいほど濃いトリエタノールアミン水溶液で処理しなければならないことがわかる。

以上の実験の結果として次の結論が得られる。収縮した写真乳剤はトリエタノールアミンにより矯正でき、経時変化も少ないが、トリエタノールアミン水溶液の濃度はホログラムの光学濃度や記録時および使用時の湿度を考慮して決めなければならない。さらに体積ホログラムの回折効率も湿度に対して非常に敏感であるので、ホログラム・メモリのように高密度記録であり、かつ信号対雑音比のよい再生像を得たい場合には、湿度に対して十分な考慮を払わなければならない。

4.5 結び

磁気やICを使う方法では大容量のものの実現が困難な連想メモリにホログラフィの情報変換作用が非常に適しているが、実際には記録光と読み出し光とが完全に一致しなくても再生像が得られるため、ホログラフィの情報変換作用をそのままに連想メモリとして用いることはできない。そこでホログラフィの情報変換作用にさらに論理的なエクスクルージブ・オアに基づいた検索動作を導入してホログラム連想メモリを構成した。その原理を平面ホログラムを用いた場合と体積ホログラムを用いた場合について述べると共に各場合について記憶密度の見積りを行ない、平面ホログラムを用いた場合については実験室モデルの実験を行ない、体積ホログラムを用いた場合については、写真感光材料を用いて作る場合の写真乳剤の収縮の矯正の実験を行なった。その結果次のようなことが判明した。

- (1) 平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリの記憶密度の代表的な値は64検索ビット $\times$ 5.1語/cm² $\times$ 386ビット/語とかなり少ない。特に単位面積当りの語の数が致命的と言えるほどに少ない。
- (2) 体積ホログラムを用いたホログラム連想メモリは相互翻訳機能を有し、その記憶密度の代表的な値は64検索ビット $\times$ 220語/cm² $\times$ 2.5 $\times$ 10⁴ビット/語と大きい、64検索ビットを達成するために約110 μ mの厚さの感光材料が必要である。
- (3) 平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリ板は写真感光材料を用いてメモリ板を作る限り、現在の技術で作り得る可能性があり、その信号対雑音比も検索動作で10 dB以上、読み出し動作で13 dB以上と満足すべき値が得られ、検索動作において高い信号対雑音比が得られるというホログラム連想メモリの潜在能力を確認することができた。
- (4) 収縮した写真乳剤はトリエタノールアミンにより矯正でき、経時変化も少ないが、トリエタノールアミン水溶液の濃度はホログラムの光学濃度や記録時および使用時の湿度を考慮して決めなければならない。さらに体積ホログラムの回折効率も湿度に非常に敏感であるので、写真乳剤に記録

した体積ホログラムを用いたホログラム連想メモリにおいては、湿度に対して十分な考慮を払わなければならない。

(5) 以上の結論として、平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリはテープ・システム（複数の語を一つのトラック方向に連想的に記録し、一つの行にある語だけを同時に検索するシステム）を用いてスクリーン上にアナログ情報パターンをディスプレイする情報検索データ・バンクのような用途に適していると言える。また、体積ホログラムを用いたホログラム連想メモリは実用化されれば、その独特の機能と高い記憶密度から広い用途に対して有効であるが、現在最も信頼できる写真感光材料は、定着処理によって収縮し、さらに湿度に対して敏感であるので、体積ホログラム用感光材料には適していない。したがって体積ホログラムに適した記録材料の開発が必要である。

第 5 章 総 括

ホログラフィは情報の高冗長記録性，多重記録性，等従来の光学技術に比べると情報処理に適した性質を有している。そこでホログラフィを応用した情報処理，特にメモリの研究を，現在の技術で実現できるものと現在の技術で即実現するのは困難であるにしても実現できれば他の方法では実施困難な機能を有するものについて行なうことを企図し，前者については，多重記録によるホログラム・メモリを提案し，メモリ板から再生される点像の拡がり，おどきおよび体積ホログラム効果による強度変化について解析と実験を行ない，実用に堪える多重記録ホログラム・メモリ板の製作が十分可能なことを確認した。そこで多重記録ホログラム・メモリを応用した図形入力装置および図形入力装置を転用した漢字入力装置の試作を行ない，各応用装置はそれぞれ競合装置に対して優位性を持ち，十分実用に供し得るものであることを確認した。次に，後者については，磁気あるいは IC を用いる方法では大容量のものの製作が難しい連想メモリをホログラフィの情報変換作用に論理的なエクスクルーシブ・オアに基づく検索動作を導入することによって製作することを，平面ホログラムを用いた場合と体積ホログラムを用いた場合について，提案し，各場合について記憶密度の見積りを行なうと共に，平面ホログラムを用いた場合については実験室モデルの実験，体積ホログラムを用いた場合については写真乳剤の収縮の矯正の実験を行ない，平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリは現在の技術で製作可能であるが，記憶密度が小さいので，テーブル・システムを用いた情報検索に適しており，また体積ホログラムを用いたホログラム連想メモリは，記憶密度は大きい，製作が難しく，その実現のためには体積ホログラムに適した記録材料の開発が必要なることを明らかにした。

以下本研究によって得られた成果を総括して記述する。

1. 多重記録ホログラム・メモリについて

- (1) 多重記録によりホログラム・メモリを作る方法，すなわち全ての情報をそれぞれ感光材料のどの場所に記録するかをあらかじめ決定した後，各情報の同番目のビットの状態に応じて透明，不透明を前記の記録場所に割り当てたデータ・マスクを製作し，各データ・マスク毎に参照光の方向を変えつつ，データ・マスクの像と参照光の干渉により生じる干渉縞を次々

と多重露光により感光材料に記録することによってホログラム・メモリ板を製作する方法を提案した。

(2) ホログラム・メモリを用いた図形入力装置の原理，利点およびこの目的のホログラム・メモリとして多重記録ホログラム・メモリが適している理由とこの目的に志向した多重記録ホログラム・メモリ板の製作方法を明らかにした。

(3) 多重記録ホログラム・メモリ板から再生される点像の大きさは読み出し光のメモリ板上における直径に大きく依存しており，記録時に結像レンズの焦面に作られるデータ・マスクのフーリエ変換像の大きさは実効的には十分に小さく，再生点像の大きさに由々しい影響は与えないことを解析により明らかにし，実験により証明した。

(4) 多重記録ホログラム・メモリ板から再生される点像のおどりについて解析と実験を行ない，再生点像はガウス領域（1次近似）で取扱う限り読み出し光がメモリ板上を動いても不動であること，および再生点像のおどりはメモリ板を参照光に逆の方向から照明した場合より前側から垂直に照明した場合の方がかなり大きい，後者の場合でもその量は受光面積の広い太陽電池を用いれば，十分カバーできる程度であり，再生点像のおどりは多重記録ホログラム・メモリ板実用化の障害にはならないことを明らかにした。

(5) 多重記録ホログラム・メモリ板から再生される点像の体積ホログラム効果による強度変化について解析と実験を行ない，体積ホログラム効果による再生点像の強度変化はメモリ板を前側から垂直に照明した場合より参照光に反対の方向から照明した場合の方が大きいことを明らかにした。

(6) 多重記録ホログラムから再生される像の強度は後から露光したもののほど弱くなったので，後から露光するものほど多い露光量を与えることによって再生像強度をかなり均一にすることができた。

(7) 製作した多重記録ホログラム・メモリ板の代表的なものの大きさは $32\text{ mm} \times 32\text{ mm}$ ，分解能は 4 ライン/mm で，1語当りのビット数は 15 ビットであった。

2. 多重記録ホログラム・メモリを応用した入力装置について

(1) 多重記録ホログラム・メモリを応用した図形入力装置の設計方針をたて、その方針に基づいて主要構成部品の設計を行ない、光源としては小型He-Neレーザーを用いるのがよいこと、レーザー装置より出射したレーザー光をメモリ板に入射させるためには集束性光学繊維でレーザー光を伝送し、集束性光学繊維の先端に取り付けたライトペンによりレーザー光の出射方向を調整するのがよいこと、ライトペンを画面上のペンの動きにしたがってメモリ板上で動かす手段としてはリンク機構を用いると、ハード・コピーが容易に取れ、ペンの動きを縮小又は拡大してライトペンに伝達できること、および光検出器として太陽電池を用いると再生像を確実にとらえることはできるが、出力が太陽電池の内部抵抗変化にあまり左右されない増幅器を作る必要があることを明らかにした。

(2) 上記の設計方針に基づき、多重記録ホログラム・メモリ板（ホログラム・コード板）を用いた図形入力装置を設計した。画面上のペンの動きはリンク機構により4分の1に縮小されてライトペンに伝えられた。ホログラム・コード板の大きさは $32\text{ mm} \times 32\text{ mm}$ 、分解能は4ライン/mmであったが、画面の大きさは、使用上の便を考えて、 $128\text{ mm} \times 128\text{ mm}$ にした。したがって画面上の分解能は1ライン/mmになった。リンクの動きは予想以上にスムーズで、リンクを用いたことによる実用上の不便は殆どなかった。

(3) 図形入力装置の画面の代わりに置いた文字盤上の任意の文字を指示器で指すとホログラム・コード板からその文字に対応する文字コードが発生する漢字入力装置（指示型漢字入力装置）を試作した。試作装置の基本構成は図形入力装置の構成と殆ど同じである。ホログラム・コード板の大きさは $32\text{ mm} \times 32\text{ mm}$ で、微小ホログラムの数も 32×32 である。そこで文字盤を三つの文字グループで構成し、まず希望の文字の含まれている文字グループを選択した後、指示器で希望の文字を指示する方法で微小ホログラム数の不足を補った。したがって文字数は最大3072文字である。文字グループの検出はマイクロスイッチで行なった。

(4) 指示型漢字入力装置をさらに小型邦文タイプライタと組み合わせて、

キーをたゞくと文字が印字されると同時にその文字の文字コードが発生する漢字入力装置（邦文タイプライタ付漢字入力装置）を試作した。この装置においてはライトペンが活字庫と連動するようリンクで連絡されているので、使用者にはリンクの存在はわからないため、リンクを用いることに対する心理的抵抗も取り除かれた。試作装置の文字数は2205字であった。このように漢字入力装置に使用される多重記録ホログラム・メモリ板の微小ホログラム数は約3000個でよく、漢字入力装置用ホログラム・メモリ板の方が図形入力装置用ホログラム・メモリ板より製作し易い。しかも漢字入力装置の方が多重記録ホログラム・メモリ板の特性を活用でき、さらに需要が多いにもかかわらず競合機種が少ないので、多重記録ホログラムメモリ板の応用として有望である。

3. ホログラムを用いた連想メモリについて

- (1) ホログラフィの情報変換作用は連想メモリの機能と同じであるが、ホログラフィの情報変換作用をそのまま連想メモリとして使うことは実際にはできないことを明らかにした。
- (2) ホログラフィの情報変換作用にさらに論理的なエクスクループ・オブに基づいた検索動作を導入することによって連想メモリを製作することを平面ホログラムを用いた場合と体積ホログラムを用いた場合について、提案し、その原理を説明すると共に、各場合について記憶密度の見積りを行ない、平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリの記憶密度の代表的な値は64検索ビット $\times$ 5.1語/cm² $\times$ 386ビット/語とかなり小さく、体積ホログラムを用いたホログラム連想メモリは相互翻訳機能を有し、その記憶密度の代表的な値も64検索ビット $\times$ 220語/cm² $\times$ 2.5 $\times$ 10⁴ビット/語と大きい、64検索ビットを達成するためには約110 μ mの厚さの感光材料が必要であることを明らかにした。
- (3) 平面ホログラムを用いたホログラム連想メモリ板は写真感光材料を用いてメモリ板を作る限り、現在の技術で作り得ることを明らかにし、その信号対雑音比も検索動作で10 dB以上、読み出し動作で13 dB以上と

満足すべき値が得られ、検索動作において高い信号対雑音比が得られるというホログラム連想メモリの潜在能力を確認した。

(4) 収縮した写真乳剤はトリエタノールアミンにより矯正でき、経時変化も少ないが、トリエタノールアミン水溶液の濃度はホログラムの光学濃度や記録時および使用時の湿度を考慮して決めなければならず、さらに体積ホログラムの回折効率は湿度に非常に敏感であるので、写真乳剤に記録した体積ホログラムを用いたホログラム連想メモリにおいては、湿度に対して十分な考慮を払う必要があることを明らかにした。

謝

辞

本論文は日本電気株式会社中央研究所において行なった研究成果を大阪大学工学部吉永弘教授，鈴木達朗教授の御指導のもとにまとめたもので，両教授の御指導，御鞭撻がなければ完成し得なかったものであります。両教授に対しここに深甚なる謝意を表する次第であります。また，本研究の遂行ならびに論文の提出を御許可下さった日本電気株式会社染谷勲常務取締役，植之原道行中央研究所長に対し深く感謝致します。

思えば本論文は，故原島治博士，谷崎仁電波応用事業部事業計画室長，伊藤昇司光電技術部長の動機付け，鶴宏無線事業グループ技師長，小沢正義半導体事業部製造部長の御理解により開始したホログラフィの研究が結実したものであります。上記各位に対し心より御礼申し上げます。

本研究の遂行は，植之原道行所長，根本忠雄信頼性品質管理部長，小沢正義部長，内田禎二量子装置研究部長，川路昭電子デバイス企画室専任技師，安藤隆男電子デバイス研究部研究課長，三田順業周辺機器研究部研究課長，斉藤富士郎量子装置研究部研究課長の御指導，御鞭撻ならびに量子装置研究部阪口光人主任，藤原忠史氏，須釜成人氏，小菅和弘氏，周辺機器研究部森脇正博氏の御協力のもとに行なわれました。とくに阪口光人主任との研究計画および研究結果についての討論は有益でありました。上記の方々に対し深く感謝する次第であります。

昭和 4 9 年 5 月

- 1) 元岡達：電子通信学会誌，54(1971)484.
- 2) G.W.King, G.W.Brown and L.N.Ridenour: Proc. IRE, 41(1953)1421.
- 3) T.J.Nelson: Bell Syst. Tech. J., 43(1964)821.
- 4) A.Reich and G.H.Dorion: Optical and Electro-Optical Information Processing (MIT Press, Cambridge, 1965)p.567.
- 5) C.W.Hoover, Jr., R.E.Staehler and R.W.Ketchledge: Bell Syst. Tech. J., 37(1958)1161.
- 6) R.L.Lamberts and G.C.Higgins: AFIPS Conf. Proc. FJCC, 29(1966)729.
- 7) R.K.Jurgen: Electronics, 31, No.45(1958)72.
- 8) S.P.Newberry: AFIPS Conf. Proc. FJCC, 29(1966)717.
- 9) J.D.Kuehler: AFIPS Conf. Proc. FJCC, 29(1966)735.
- 10) C.H.Becker: AFIPS Conf. Proc. FJCC, 29(1966)711.
- 11) S.Herman: Proc. IEEE, 56(1968)329.
- 12) D.O.Smith: Optical and Electro-Optical Information Processing (MIT Press, Cambridge, 1965)p.523.
- 13) D.O.Smith and K.J.Harter: IEEE Trans. Electronic Computers, EC-15(1966)123.
- 14) D.Chen, J.F.Ready and E.Bernal G.: J. Appl. Phys., 39(1968)3916.
- 15) E.N.Leith and J.Upatnieks: J. Opt. Soc. Am., 52(1962)1123.
- 16) E.N.Leith and J.Upatnieks: J. Opt. Soc. Am., 53(1963)1377.
- 17) E.N.Leith and J.Upatnieks: J. Opt. Soc. Am., 54(1964)1295.

- 18) D.Gabor: Nature, 161(1948)777.
- 19) D.Gabor: Proc. Roy. Soc. (London), A197(1949)454.
- 20) D.Gabor: Proc. Roy. Soc. (London), B64 (1951)449.
- 21) G.L.Rogers: Nature, 166(1950)237.
- 22) G.L.Rogers: Proc. Roy. Soc. (Edinburgh), A63(1952) 193.
- 23) V.A.Vitols: IBM Tech. Disclosure Bull., 8(1966) 1581.
- 24) J.B.Brinton, Jr: Microwaves, 6, No.1(1967)10.
- 25) 西田信夫, 阪口光人: 第28回応用物理学会学術講演会予稿集 (1967)p.299.
- 26) L.K.Anderson, S.Brojdo, J.T.LaMacchia and L.H. Lin: IEEE J. Quantum Electron., QE-3 (1967) 245.
- 27) 伊沢達夫, 神山雅英: 第15回応用物理学関係連合講演会予稿集分冊1 (1968)p.162.
- 28) D.H.R.Vilkomerson, R.S.Mezrich and D.I.Bostwick: AFIPS Conf. Proc. FJCC, 33 (1968)1197.
- 29) J.L.Reynolds, T.Y.Tao and R.S.Schools: NEREM Record, 10(1968) 78.
- 30) A.L.Mikhaelyan, V.I.Bobrinev, S.M.Naumov and L. Z.Sokolva: Radio Enging. Electro. Phys., 14 (1969) 95.
- 31) D.R.Bosomworth and H.J.Gerritsen: Appl. Opt., 7 (1968) 95.
- 32) A.L.Mikhaelyan, V.I.Bobrinev, A.P.Aksenchikov, V.V.Shatun and E. Kh.Gulanyan: Soviet Phys.- Doklady, 13 (1969)810.
- 33) J.J.Amodei and D.R.Bosomworth: Appl. Opt., 8 (1969) 2473.

- 34) R. S. Mezrich: Appl. Phys. Letters, 14(1969)132.
- 35) G. Fan, K. Pennington and J. H. Greiner: J. Appl. Phys., 40(1969)974.
- 36) A. J. Kurtzig, R. Wolfe, R. C. LeCraw and J. W. Nielsen: Appl. Phys. Letters, 14(1969)350.
- 37) R. C. LeCraw, R. Wolfe and J. W. Nielsen: Appl. Phys. Letters, 14(1969)352.
- 38) T. C. Lee: Appl. Opt., 11(1972)384.
- 39) F. S. Chen, J. T. LaMacchia and D. B. Fraser: Appl. Phys. Letters, 13(1968)223.
- 40) L. H. Lin and H. L. Beauchamp: Appl. Phys., 9(1970)2088.
- 41) J. Upatnieks and C. Leonard: J. Opt. Soc. Am., 60(1970)297.
- 42) L. Brock: Electronic Design, 20, No. 11(1972)36.
- 43) R. Patton: Electronic Engineer, 28, No. 11(1969)50.
- 44) M. Sakaguchi and N. Nishida: AFIPS Conf. Proc. FJCC, 37(1970)653.
- 45) 西田信夫, 阪口光人, 斉藤富士郎: 昭46年度電子通信学会全国大会論文集(1971)p. S142.
- 46) 阪口光人, 西田信夫, 斉藤富士郎, 森脇正博, 三田順業: 昭46年度電子通信学会全国大会論文集(1971)p. 1179.
- 47) 西田信夫, 阪口光人, 斉藤富士郎: 第18回応用物理学関係連合講演会予稿集分冊1(1971)p. 202.
- 48) N. Nishida, M. Sakaguchi and F. Saito: Appl. Opt., 12(1973)1663.

- 49) R.W.Meier:J.Opt.Soc.Am., 57(1967)895.
- 50) E.N.Leith, A.Kozma, J.Upatnieks, J.Marks and N. Massey:Appl.Opt., 5(1966)1303.
- 51) M.Born and E.Wolf:Principles of Optics(Pergamon, Oxford,1964)p.405.
- 52) 西田信夫, 阪口光人, 斉藤富士郎:第32回応用物理学会講演会予稿集分冊1(1971)p.167.
- 53) R.W.Meier:J.Opt.Soc.Am., 55(1965)987.
- 54) M.Born and E.Wolf:Principles of Optics(Pergamon, Oxford,1964)p206.
- 55) 西田信夫, 阪口光人:第17回応用物理学関係連合講演会予稿集分冊1(1970)p.190.
- 56) N.Nishida and M.Sakaguchi:Appl.Opt., 10(1971)439.
- 57) H.Kogelnik:Bell Syst.Tech.J., 44(1965)455.
- 58) 阪口光人, 西田信夫:昭45年度電気四学会連合大会論文集(1970)p.1890.
- 59) "Scientific Photography," Technical Information, Agfa-Gevaert N.V., Mortsel, Belgium.
- 60) 阪口光人, 森脇正博, 藤原忠史, 西田信夫, 斉藤富士郎, 三田順業:昭和48年度電子通信学会全国大会論文集(1973)p.927.
- 61) 森脇正博, 阪口光人, 西田信夫, 高田武志, 平林勇:昭47年度電子通信学会全国大会論文集(1972)p.1340.
- 62) 森脇正博, 三田順業, 阪口光人, 西田信夫, 藤原忠史, 斉藤富士郎, 菊池喜康:第13回情報処理学会大会論文集(1972)p.329.
- 63) T.Uchida, M.Furukawa, I.Kitano, K.Koizumi and H.Matsumura:IEEE J.Quantum Electron., QE-6(1970)606.
- 64) 森脇正博, 阪口光人, 藤原忠史:昭和48年度電子通信学会全国大会論文集(1973)p.929.

- 65) 森脇正博, 三田順業, 阪口光人, 西田信夫, 齊藤富士郎: 昭46年度電子通信学会全国大会論文集 (1971)p.1179.
- 66) 阪口光人, 森脇正博, 西田信夫, 齊藤富士郎, 三田順業: 第18回応用物理学関係連合講演会予稿集分冊1 (1971)p.203.
- 67) A.G.Hanlon: IEEE Trans. Electronic Computers, EC-15(1966)509.
- 68) M.Sakaguchi, N.Nishida and T.Nemoto: IEEE Trans. Computers, C-19(1970)1174.
- 69) D.Gabor: Nature, 208(1965)422.
- 70) 西田信夫, 阪口光人: 第29回応用物理学学会講演会予稿集分冊1 (1968)p.16.
- 71) 阪口光人, 西田信夫: 昭43年度電子通信学会全国大会論文集分冊5 (1968)p.S15.
- 72) M.H.Lewin: RCA Review, 23(1962)215.
- 73) R.T.Denton, F.S.Chen and A.A.Ballman: J. Appl. Phys., 38(1967)1611.
- 74) W.Kulcke, K.Kosanke, E.Max, M.A.Habegger, T.J.Harris and H.Fleisher: Proc. IEEE, 54(1966)1419.
- 75) M.Born and E.Wolf: Principles of Optics (Pergamon, Oxford, 1964)p.415.
- 76) 西田信夫, 阪口光人: 第30回応用物理学学会講演会予稿集分冊1 (1969)p.16.
- 77) G.W.Stroke: Appl. Phys. Letters, 6(1965) 201.
- 78) L.H.Lin and C.V.LoBianco: Appl. Opt., 6 (1967) 1255.
- 79) 西田信夫: 第16回応用物理学関係連合講演会予稿集分冊4 (1969) p.44.
- 80) N.Nishida: Appl. Opt., 9(1970)238.

論文目録 大阪大学

報告番号・乙第1489号

西田 信夫

主論文 ホログラフィを用いた情報処理に関する研究

(主論文のうち印刷公表したもの)

1. Correction of the Shrinkage of a Photographic Emulsion with Triethanolamine
(収縮した写真乳剤のトリエタノールアミンによる矯正)

Appl. Opt. 9巻 1号

昭和45年1月

1. The Hologram Tablet: A New Graphic Input Device

(ホログラム・タブレット:新しい図形入力装置)

AFIPS Conf. Proc. FJCC 37巻

昭和45年11月

1. A New Associative Memory System Utilizing Holography

(ホログラフィを用いた新しい連想メモリ・システム)

IEEE Trans. Computers C-19巻12号

昭和45年12月

1. Improvement of Nonuniformity of the Reconstructed Beam Intensity from a Multiple-Exposure Hologram
(多重記録ホログラムから再生される光ビーム強度の不均一性の改善)

Appl. Opt. 10巻 2号

昭和46年2月

1. Holographic Coding Plate: a New Application of Holographic Memory
(ホログラム・コード板:ホログラム・メモリの新しい応用)

Appl. Opt. 12巻 7号

昭和48年7月

(主論文のうち未公表のもの)

なし

