6. 画像記録に応用される新現象と将来

6-1 ホログラムメモリーとその応用

NHK 総合技術研究所 竜 岡 静 夫

1. ま え が き

レーザーによってコヒーレンシーの良い光が容易に入手できるようになったので、光の回折、干渉を利用したホログラフイーの技術はいろいろの分野で応用されるようになってきた。ホログラフイーに関する紹介は、いままでも多くの人によってなされてきたので¹⁾、今回は、なるべく別の角度から、この技術の画像メモリーへの応用上の可能性と問題点を述べる。

2. ホログラフイーの特長とその応用

ホログラフイーの特長は、いろいろな表現ができるが(表1)、最大の特長は、光の波面が記録再生できることである。これは3次元的な光の強度分布として立体像を記録できるということだけでなく、像に収束する波面が再生できるので、レンズを用いないでも実像を作ることができる。このため、収差による解像度の低下がなく、回折限界まで高い解像力をうることができるので、高密度記録が可能である。また、1枚の媒体に多数のホログラムを並べて記録し、その一部にだけ参照光を照明して別々の情報を読み出すとき、同じ場所に像を再生することも容易である。

表1 ホログラフイーの特長とその応用

特 長	応 用
波面の記録再生	立体像の記録再生 光学系なしで実像を再生(高密度記録が可能)
冗長性のある記録	ごみきずの影響を受けない記録再生
多重記録	検索性の向上 色ずれのないカラー像の記録再生
調子再現性	中間調のある画像の記録再生
2次元情報処理機能	情報検索、コード変換などの機能メモリーへの応用

¹⁾“6. New Phenomena Applied to Image Recordings and their Expected Future; 6-1 Holographic Memories and its Applications” by Sizuō Tatsuoka (NHK Technical Research Laboratories, Tokyo)

このように、ホログラムは記録媒体であると同時にレンズのような結像系の役割も果しているので、レンズについた小さなごみが結像性能にほとんど影響しないように、ホログラムについたごみやきずにより情報が失われないように利用することができる。

ホログラムに斜めに入射する参照光の方向を変えて異なった情報を記録する方法は、カラー像の記録にも応用されたが、照明の方向によって多重記録されたものの中から任意の情報が読出せるので、情報検索の場合、有利な使い方が考えられる。

ホログラムを記録するとき作られる干渉縞の強度分布の振幅は、記録すべき光の強度の平方根に比例する²⁾。通常の記録材料では、振幅透過率または位相変化が露光した光の強度に比例する部分を利用できるので、回折波の振幅は干渉縞の強度の振幅に比例し、したがって、回折光の強度は記録した光の強度に比例する。さらに記録すべき光と参照光との強度比を小さくすれば、干渉縞の振幅が特性曲線の直線部分から出ないようにすることができるので、ガンマの高い高解像度の記録材料を用いても中間調のある画像の再生が可能である。

回折格子の入射光の方向を変えると回折光の方向が変わるように、ホログラムの参照光の位置を変えると再生像の位置も変化する。再生用参照光源として点光源ではなく別の画像情報を用いると、記録されている画像との相関またはコンボリューションがえられる。また、記録用参照光源として別な画像情報を用いる方法などもあり、機能メモリーとしての応用が考えられている³⁾。

3. 画像記録に用いられているホログラムの形式

ホログラムは、記録する形式によっていくつかの種類に分類されている。Leith と Upatnieks によって始められた off-axis ホログラムでは、参照光を光軸から斜めに入射させることにより、最初 Gabor によって始め

表 2 ホログラムの分類

種 類	物点と記録面との距離	参照点と記録面との距離	特 長
フラウンホーファーホログラム	充分遠い($\gg a^2/\lambda$)*	特に制限はないが、遠いほうがよい	物体の大きさの情報を角度として記録。ホログラムが平行に移動しても像が動かないように構成できる
フーリエ変換ホログラム	同上。ただし、透過型物体の照明光源の像をレンズで記録面に作る。	同上	ホログラムの面積を小さくすることができる
フレネルホログラム	比較的近い($\ll a^2/\lambda$)*	特に制限はない	光学系を用いなくて結像できる
レンズレスフーリエ変換ホログラム	同上	物点と記録面との距離に等しい	必要な空間周波数範囲がせまい。再生倍率を変えても像の劣化が少ない
イメージホログラム	物体の像をレンズで記録面に結像	特に制限はない	白色光大面積光源で再生可能

* a : 物体の大きさ, λ : 波長

られた in-line ホログラムで問題になった再生像の二重像が空間的に分離されて像質が良くなったので、ここでは、この形式だけを考えることにする。

記録媒体と物体および参照光源までの距離による分類は表 2 のようになる。まず回折の問題において、光源と観測点とが回折を生ずる開口から充分遠いときは、2 次以上の項は省略できて、方向余弦 p, q で与えられる方向の光の振幅分布は次のようになり、フラウンホーファ一回折と呼ばれる²⁾。

$$U(p, q) = C \iint_{-\infty}^{\infty} G(\xi, \eta) \exp\{-ik(p\xi + q\eta)\} d\xi d\eta \quad (1)$$

ここに、 $k=2\pi/\lambda$, ξ, η は開口上の座標、 $G(\xi, \eta)$ は瞳関数で、開口上の透過率分布である。開口からの距離が、開口の直径を a としたとき、 a^2/λ より充分大きいというのが条件だが、 $a=10\text{ mm}$, $\lambda=1\text{ }\mu\text{m}$ とすると 100 m が必要になる、実際には、物体をレンズの前側焦点の近傍におくことにより実現している。このような状態で記録するものをフラウンホーファーホログラムという (図 1)。

(1) 式は、 $G(\xi, \eta)$ のフーリエ変換を与えるものであるから、回折光をレンズで収束し、方向の分布を焦点面上の位置の分布に変換して記録したものをフーリエ変換ホログラムという (図 2)。図の (a) は、無限遠の光源からの光の物体によるフラウンホーファ一回折を無限遠で観測していることになるが、収束光による回折光を収束点の近傍で観測する場合もフラウンホーファ一回折で

図 1 フラウンホーファーホログラムの記録

図 2 フーリエ変換ホログラムの記録

あるので²⁾、(b) のような配置でもフーリエ変換ホログラムを記録することができる。

光源と観測点とが開口に近づいて上記の回折の条件を満たせなくなると、2 次の項までとらないと近似が充分でなくなる。この回折をフレネル回折と呼んでいる。この領域でホログラムを記録するには、光学系を用いる必要はない。特に、物体を含み記録材料面に平行な面上に参照光源がある場合は、物体光の波面と参照光の波面の曲率半径がほぼ等しいので、平面波どうして作った干渉縞とほぼ同じものができる。

この配置で記録したものは、レンズレスフーリエ変換ホログラムと呼ばれ、ホログラム面上で物体光と参照光のなす角度が小さいので、干渉縞が細かくなく、低い解像度の感光材料が使用できる。また、倍率を変えて再生しても、像の劣化が少ないという特長がある。この形式は立体像の記録に実用されることが多い。

レンズによって結像された物体の像に参照光を照明すれば、像は干渉縞の集合になる。これはイメージホログラムと呼ばれ、再生像も記録像面上に生じるので、再生光源の位置や波長が変わっても再生像の位置は変わらず良質の像が再生される。

厚い感光材料を用い、3次元的な干渉縞を記録するものを体積ホログラムという。平面ホログラムよりも再生光の指向性が良く、多重度の高い記録ができる。また、リップマン天然色写真のように、再生用照明光のうち特定の波長の光だけを強く再生するので、リップマンホログラムとも呼ばれている。

広い画角の像を再生するときは、光のけられを問題にする必要がある。フレネルホログラムはレンズを用いないから、ホログラムのふちが光学系における瞳の役割を果たすが、レンズを用いるホログラムでは、レンズとホログラムの両方によるけられが問題になる。

ホログラムに記録のときと同じ参照光を照明すると物体波が再生されるが、同時に共役像も現われる。ホログラム直後の波面のスペクトルは、たとえば図3のようにになっている。これは、図の左上に示したようなひろがり W のある物体波 S を、参照波の方向を 45° と 90° 変えて3重に記録し、 S_1 が再生されるように参照波で照明したものである。 R は斜めから照明する参照光を示す。 S' はホログラムを記録するとき、物体の一部からの光と他の部分からの光との干渉によって生じた成分で、2倍の帯域を占める。 S_2 と S_3 とは、元来物体があった方向とは異なった方向に再生され、共役像 S_1^* 、 S_2^* 、 S_3^* は R に対称の位置に生じる。1重に記録するときは、 S_1 と S' が重ならないように干渉縞の空間周波数（参照光の方向）を選ぶ。

多重記録の場合は、干渉縞の方向を選べば、他の信号と重ならないで記録し、クロストークなしに再生することができる。しかし実際は、記録材料の非直線性のため高調波や和と差の周波数のスペクトル成分が生じ、その帯域は高調波の次数倍だけ大きいので、それぞれの成分は大きくないとはいっても、空間周波数領域にあまり余裕があるわけではない。

図3 再生時のホログラム直後の波面の空間周波数スペクトル
(左上に示したスペクトルを持つ物体を3重に記録し、 S_1 を再生したもの)

なお、この2次元的なスペクトルの分布は、本特集4-4で説明のあった Carrier Frequency Photography の場合でもほとんど同じであって、ただ S' が干渉のためひろがることなく、 S と同じ形をしているだけである。

このように、ホログラムは記録材料の解像力できる能力の全体を利用しているわけではないが、上述したように光学系の収差の影響を受けないので高密度記録に利用することができる。

4. 記録すべき画像情報とメモリーの例

ホログラムの持つ3次元情報の記録能力を多数の2次元画像の記録に利用する方法がいろいろ試みられている。記録すべき画像情報は大きく2つに分けられる(表3)。

第1は、時間的に連続した画像情報であって、従来の

表3 画像情報の分類とホログラムの応用

画像情報	媒体の形式	従来の方法	ホログラムによる方法	有利な点	問題点
I. 時間的に連続した画像情報	長尺フィルム	映画フィルム	ホロテープ(RCA) (ホログラフィー映画 ⁴⁾)	ごみ、きずの影響なし 再生速度連続可変 複製が安価	マスターを作るのに手間がかかる 音の記録に有利な点はない
		(VTR)*	—	—	早い空間変調器がない 消去可能材料の性能が不足 プロセッシングに手間がかかる
II. 多数の独立した画像情報	円板	(ビデオディスク)*	—	—	時間的に変化する信号の記録はむずかしい
			ホログラフィック複字発生器(RCA ⁵⁾ , 通研)	ごみ、きずの影響なし	
	円筒	自動写真機	—	—	
	シート	マイクロフイッシュ	ホログラフィックマイクロフイッシュ ⁶⁾	光学系の解像度低下なし	スペckルノイズ(スクリーンを動かして除去)
			画像情報ホログラムメモリー ⁷⁾	アクセス時間が短い 中間調が再生可能	良質の空間変調器がない

* テレビ信号で記録

録画技術の対象になるものである。これを記録するには、元に戻ったり、任意の部分から再生するようなことは考えなくてよいから、映画フィルムのような長尺の記録材料を用いることができる。最近、円板状のビデオディスクが現われたが、ホログラムではこれに相当するものはない。

第2は、多数の独立した画像情報であって、マイクロフィッシュのような記録方法の対象になるもので、早いアクセスタイムで検索できることが要求される。この記録には高速で回転する円板や円筒とシート状の記録材料が用いられている。これから読出すには、回転円板や円筒では適当なタイミングの光パルスを加える方法、シートメモリーではシートを2次元的に移動したり、光ビームを偏向して所望のホログラムを照明する方法がある。

第1の画像情報を記録した例として、ホログラフィー映画⁴⁾があるが、これは立体像の記録が目的であった。最も実用的なものは RCA 社のホロテープ（セレクトビジョンとも呼ばれた）であって、これについても解説が多い¹⁵⁾ので詳細は省略するが、ホログラムの持つ冗長性を利用して、ごみやきずの影響をうけないようにした点、フラウンホーファーホログラムを用いてテープが移動しても再生像が動かないことを利用してテープの送り速度を任意にした点、そしてLPレコードのようにプレスで複製する技術を利用して安いコピーを作った点など特長が多い。しかし、複製用マスターは、テレビ信号をフィルムにキネレコし、感度の遅いフォトレジストに1コマずつ記録して凹凸のホログラムとし、これにメッキすることによって作っているの、手間がかかるのが問題であろう。また、音声情報は溝をきって録音したということは、まだ問題のあることを示している。なお、VTRのようにリアルタイムのテレビ信号を記録するホログラムは開発されていない。これを可能にするためには、記録材料の可逆性と処理性を向上させ、電気信号を光の分布に変換する空間変調器を開発しなければならない。

第2の画像信号を記録するホログラムのうち、写真植字機などのように読出したあとに速度の遅い機械系がついているものは、アクセス時間はそんなに早い必要はないので、円板や円筒を回転させるものを利用できる。このときは、ごみやきずの影響をうけないということが利点になる。光学系による解像度低下の影響をうけない点を利用して、高密度のマイクロフィッシュを作った例もあるが⁶⁾、これはシートの移動によって検索を行なっている。アクセス時間を短くするには、計算機用に開発されたデジタルなホログラムメモリー⁹⁾のように、ホログラムの結像性を利用し、1枚のシートに多数のサブホ

ログラムを並べて記録し、光偏向器によって読出しビームが1枚のサブホログラムだけを照明するようにして、共通の光検出器アレイで読出す技術を用いるのがよい。

中間調を含んだアナログな画像情報を記録する方法⁷⁾もあるが、デジタルな記録方法でも $10^5 \sim 10^6$ bit/mm² の記録密度に達することができるので⁸⁾、利用の可能性もある。

現在のカラーテレビ信号では、ベースバンド帯域を 4.5 MHz、標準化周波数を 10.8 MHz に選ぶのが一般的である。1標本当り 7 bit 必要なので、1秒間の情報を記録するには 80 Mbit 必要になる。デジタルなホログラムメモリーでは 10~100 sec 程度の連続したテレビ信号は可能ではあるが、第1の目的には少し足りないようである。

表3のほか、体積ホログラムに多数の情報を記録した例もあるが、記録材料の問題が残っているので省略した。また、多重記録の特長を生かした例¹⁰⁾もあるが、テレビ系で実用化するまでの問題も少なくないので省略した。

また、機能メモリーについても、表には示さなかったが2、3の試作が行なわれている¹¹⁾。それぞれ特長があるが、画像情報の処理に関しても実用までは距離があるので、ここでは省略する。

5. 記録再生に必要な素子

テレビ信号をホログラムに記録するためには、1つの画像に変換し、これをコヒーレント光で照明する必要がある。これには、いわゆる空間変調器やインコヒーレント・コヒーレント変換素子が必要になってくる。

たとえば、電気光学効果を示す結晶をターゲットとし、電子ビームによって画像のパターンを描いて、透明電極との間の電位差によって光の強度変調を行なう空間変調器（図4）や、液晶と光伝導膜を重ねて両側から透明電極をつけ、インコヒーレントな紫外光によって結像した光学像（CRTの像でもよい）により部分的に導電状態として液晶に加わる電圧を変化させ、液晶による散乱を空間的に変調するインコヒーレント・コヒーレント変換素子（図5）¹²⁾がある。

図4 DKDP ターゲットを用いた空間変調器

図5 液晶を用いたインコヒーレント・コヒーレント変換素子を用いたホログラムの記録

図6 電気光学スイッチを用いたデジタル光偏向器

リアルタイムにテレビ信号を記録するためには、これらの動作時間が短いことが必要だが、現状では不満が残っている。また、第2種の情報を記録するためには、少なくともマイクロフィルム用カメラ程度の手軽に使える装置を開発しなければならない。

記録材料に関しては、高解像力、高感度、高処理性が望まれるのは当然だが、消去して再び記録できる材料への要望が強い。サーモプラスチックパネル¹³⁾が利用されることが多いが、寿命の点で問題がある。このほか、ハロゲン化銀を含んだフォトクロミックガラスやスピロピランのような有機物を塗布したフィルム、希土類元素をドープした CaF_2 のような結晶の開発も行なわれているが、感度が低く、まだ広く用いられていない。

再生像をテレビ信号に変換する検出器としては、ビジコンカメラを用いていることが多いが、検出器の性能に対して強い要望が出るまでに至っていないのが現状である。

光ビームを偏向して、1枚の光メモリーの中のサブホログラムを読み出す方式では、性能の良い光偏向器が必要である。速度が遅くてよければ、ガルバノメーターのような機械的な偏向器でよいが、1 ms 程度のアクセスタ

図7 音響光学効果を用いた光偏向器

図8 プリズムアレイ型偏向器

イムとするためには、電気光学スイッチ ($A_1, A_2, \dots$) と複屈折プリズム ($B_1, B_2, \dots$) を重ねたデジタル偏向器 (図6)、音響光学効果によるブラッグ反射の角度を超音波の周期によって変える (アナログ) 偏向器 (図7) などが用いられている。前者は素子の数が多いので後者が用いられることが多いが、最近では電気光学結晶に三角形の電極をつけ、場所によって位相遅れの量を変えて、透過光の波面をのこぎり状にすることによって、ほとんどすべての光を1方向に偏向する素子も作られている (図8)¹⁴⁾。

6. む す び

ホログラムを直接画像メモリーに利用しようとする試みはいろいろ行なわれたが、レーザーの不安定性、大がかりな記録設備、記録材料の低感度と非可逆性、空間変調素子の開発の遅れ、再生像のスペックルなど、問題点がすべて解決されたわけではない。今後は材料素子などの基礎技術を改良して実用化をはかっていく一方、機能メモリーなどの新しい分野を開拓していくことが必要であろう。

〔参 考 文 献〕

- 1) たとえば、笠原正: ホログラムによる画像表示の諸問題, テレビ誌, 26, 11 (1972) 983
- 2) M. Born, E. Wolf: Principles of Optics, Pergamon Press, New York (1965)
- 3) 辻内順平: レーザー光を用いた情報処理, 信学誌, 54, 8 (1971) 1084 および 54, 9 (1971) 1276
- 4) A. D. Jacobson, V. Evtuhov, J. K. Neeland: Motion Picture Holography, Appl. Phys. Lett., 14, 4 (1969) 120
- 5) W. F. Heagerty: Ideographic Composing Machine, Appl. Opt., 9, 10 (1970) 2291

特 集 □ 画像メモリー

- 6) D. H. McMahon: Holographic Ultrafiche, Appl. Opt., 11, 4 (1972) 798
- 7) 角田義人, 武田康嗣: ホログラフィックな高密度画像情報記憶, 信学論誌, 56-C, 5 (1973) 299
- 8) 武田康嗣: ホログラムメモリの情報記憶密度, 信学論誌, 56-C, (1973) 213
- 9) 山岸一雄: 大容量光メモリ装置, 昭 47 年電気四学会連大予, 953
- 10) 竜岡静夫: カラーイメージホログラフィー, NHK 月報, 14, 10 (1971) 448
竜岡静夫: イメージホログラムによる静止画像の多重記録, NHK 月報, 16, 1 (1973) 11
- 11) 斎藤富士郎, 三田順英: ホロタブレット, 昭 47 年電気四学会連大予, 961
- 溝淵清夫, 南正名, 星野功, 森昌文, 斎藤勉: 画像情報検索装置, 昭 47 年電気四学会連大予, 965
- 森川滝太郎: ホログラフィによる文字読取装置, 昭 47 年電気四学会連大予, 973
- 12) 鳥居康弘, 角 正雄: 液晶を用いたホログラム用入力パターン表示, 光学, 1, 3 (1972) 135
- 13) L. H. Lin, H. L. Beauchamp: Write-Read-Erase in Situ Optical Memory Using Thermoplastic Holograms, Appl. Opt., 9, 9 (1970) 2088
- 14) 二宮佑一: 電気光学プリズムアレイ光偏向器, 信学論誌, 56-C, 6 (1973) 345
- 15) 稲津稔: 最近のビデオパッケージ技術の動向, テレビ誌, 25, 1 (1971) 2

特 集 画像メモリー

6-2 半 導 体 メ モ リ ー

工業技術院電子技術総合研究所 垂 井 康 夫
小 宮 祥 男
坂 本 統 徳

1. ま え が き

撮像管は映像装置の心臓部であり、画質はほとんどの部分の良し悪しで決定されるといってよい。したがって放送用などでは、非常な高品質なものを必要とするが、今後の VTR、テレビ電話や OCR などのパターン認識装置の実用化などを考えると、超小型で信頼性の高いものを安価に生産できることが要求される。これらの目的のため、高感度の光導電材料を持つ撮像管などが開発されてきた。また半導体技術の進歩により、大規模な集積化が可能となった結果、ターゲットに Si を用いた Si ビジコンが Bell や NHK などから発表され、撮像管も半固体化の時代に入った。

しかし、これらの撮像管は真空中で電子ビームを走査させるために、真空容器を必要とし、小型化、軽量化、長寿命化、高信頼性には限度があり、画像のひずみや、2次電子によるトラブルなどで、正確な位置指定には困難さがある。また高電圧を必要とするため、現在ほとんど固体化されている周辺機器とのマッチングに問題がある。

これらの問題点を解決するものとして、完全固体化の撮像デバイスの実現が望まれている。最近では特に、

CCD (Charge-Coupled Semiconductor Device) などの機能デバイスの出現によって、その撮像デバイスへの応用が積極的に研究されている。

ここでは、画像用半導体メモリーを広義に解釈して、画像情報を一時的にでも蓄積するデバイスを含めて、これらの固体撮像デバイスの研究開発の動向と、将来への可能性を持つその他の半導体の光メモリー現象について述べる。

2. XY アドレス式撮像デバイス

XY アドレス式撮像デバイスの基本的なモデルは、図 1 のようなマトリックス状に配列した光電変換素子を、X 軸、Y 軸のスイッチを選択して ON, OFF することによって走査するものである。光電変換素子としては、CdS や Si を基板としたバイポーラ、MOS トランジスタなどが開発されている。

図 2 に MOS トランジスタの絵素の原理的構成を示す。動作原理は普通の MOS トランジスタと同じであるが、この場合はソースの p 拡散領域が電氣的に浮いており、基板との間の pn 接合をフォトダイオードとして使用する。ゲートに負の選択パルス電圧が加わるとドレインからソースに電流が流れて、フォトダイオードの接合容量に電荷が蓄積される。ゲート電圧が OFF になると、この電荷は蓄積されたままになっているが、もしこのとき光入力があると、フォトダイオードに電子、正孔

"6-2 Semiconductor Memories" by Yasuo Tarui, Yoshio Komiya and Tsunenori Sakamoto (Electrotechnical Laboratory, Agency of Industrial Science & Technology, Ministry of International Trade & Industry, Tokyo)