



実時間ホログラム技術の現状と動向

本田 捷夫

千葉大学工学部画像工学科 〒263 千葉市稲毛区弥生町 1-33

(1994年6月7日受理)

Trends of Real-Time Holographic Technology

Toshio HONDA

Image Science Department, Faculty of Engineering, Chiba University,
1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263

1. はじめに

光領域のホログラフィ技術は、従来の光源に比べてはるかにコヒーレンス度が高いレーザーが開発・販売され、Leith, Upatneaks による空間搬送波を参照光とする、いわゆる off-axis 型ホログラムの発明 (1961) によりホログラム記録材料、像再生特性、応用等、多岐にわたる分野で研究がなされてきた。

応用分野について見れば、次のような分野を中心に研究開発が進められた。

1. 干渉計測応用 (ホログラフィ干渉)
2. 光学素子 (holographic optical element; HOE)
3. 光情報処理 (光演算, 光インタ・コネクション, ホログラム・メモリ等)
4. 立体像表示

1980年代の半ばまでは、写真フィルムのように、現像処理プロセスが必要であり、一度しか使えないホログラム感光材料を用いるのが主であった。

レーザーを用いた干渉光学系により、ホログラム記録のための露光を行い、そのままの状態での現像処理を行ういわゆる *in-situ* ホログラム感材の一つとしてサーモプラスチック・ホログラム感材の研究・開発が行われた。この感材は主に実時間干渉計測用として開発されたが、速度があまり要求されない光情報処理用としても研究され、現在も続けられている¹⁾。

この解説のタイトルである「実時間 (リアルタイム) ホログラム」の定義を、ここでは「書き込み後直ちに読み出しが可能であり、さらにある時間間隔で書き換え可

能なホログラム」と定義する。リアルタイムの定義は、そのリアルタイム性の目的によって異なるが、ここではこの時間間隔を0.1秒以下とする。0.1秒は、人が見て (人の目の応答速度を基準として) その動きが一応スムーズに観察できる最大時間間隔である。そしてここでは、「ダイナミック・ホログラム」をリアルタイム・ホログラムと同義語として用いることにする。

近年、立体動画像表示、光情報処理の分野で、このダイナミック・ホログラムを用いる萌芽の研究がいくつか行われている。ここではこの二つの分野における研究の現状を主に応用面より見て紹介する。

2. 立体動画像表示への応用

1960年代の終り頃にホログラフィ技術を立体テレビに使おうという研究が始められたが、その当時は伝送のための帯域幅の問題、およびダイナミック・ホログラムのデバイスの問題により中断された。しかし、この10数年間に、光ファイバによる伝送チャンネルが大容量になったこと、高速・大容量のデータ処理がコンピュータの発展により可能になったこと、および使えるかも知れないと思われるデバイスも開発されてきたため、再度この分野の研究が始められた。

立体テレビ等実物体の離れた場所での立体像表示にホログラフィ技術を使う場合は、ホログラムを形成する細かい光強度分布を2次的に検出し、時系列信号として送信する必要がある。一方、3次元CAD (computer aided design) システムで、特に乗用車などのデザインが重要視される分野での立体像表示を設計者が対話的に

行うシステムの立体像表示部に使う目的も考えられている。以下に、これらの目的で研究されている現状を表示のためのホログラムデバイスにより分類して、紹介する。

2.1 超音波光変調器を用いる方法

この立体動画像表示研究の再スタートになったのが、レインボウ・ホログラムの発明者であり現在 MIT メディア研究所の教授である Benton のグループの研究である。彼らは、ダイナミック・ホログラムによる立体動画像表示技術を、前述後者の3次元 CAD システムで設計者と対話できる表示部に使うことを想定している。

実時間ホログラム・パターンの発生部としては超音波光変調デバイス (acousto optical modulator; 略して AOM) を用い、画像にするために垂直方向へはガルバノ・ミラーでレーザー光を垂直方向に走査し、ホログラムが AOM 内を超音波の速度で走っていくのを止めるため、および AOM の開口長さを等価的に広げるために、ポリゴンミラーを用いて実現した²⁾。この概略を図1に示す。最近では18個のAOMを並列駆動し、水平方向もガルバノミラーを使うことにより、表示像サイズが10cm立方程度で視域角30°程度の立体像を秒30フレーム程度で実現している³⁾。

ホログラムとして書き込むデータ(一種のCGHパターン)の計算は、パラレルマシンを用いて高速に行っている。現在の動画の速度はこのCGHパターンの計算速度で制限されているとのことである。

2.2 電気信号駆動の液晶パネルを用いる方法

ホログラムにより、立体動画像表示を目的としたもう一つのアプローチとして、液晶デバイスを用いる方法が試みられている。この液晶パネルは液晶テレビに代表さ

れるいわゆる電子アドレス方式の空間光変調器である。

駆動する信号の違いによって二つの方式が研究されている。

その1は、参照光と干渉させた干渉縞パターン(光強度分布)を液晶に書き込み、その回折光成分により所望の光波面を実現する方法である⁴⁾。普通の感光材料を用いたディスプレイホログラムでは、物体光波面と数十度の角度をなす球面波等の整った参照光波面をホログラム記録面に入射させる。その場合、干渉縞の間隔は1 μm 以下になる。しかし、現在入手可能な電子アドレス型の液晶パネルは、画素ピッチが数十 μm であるので、物体光と参照光のなす角度を1度以下と非常に小さくしなければならず、その結果、表示される像に大きな制限が生じてしまう。

その2は、物体光波面の位相分布をそのまま実現しようとする方法である。これはキノフォームと呼ばれる。厳密にはホログラムとは異なるが、類似しているのでここで紹介する。このキノフォームは従来はフォト・レジスト等で実現されていた。即ちこれはキノフォームのダイナミック版である。複雑な物体を表示する場合には、物体光波面の位相分布だけでなく、振幅分布も同時に実現する方法も試みられている⁵⁾。このキノフォーム(+振幅分布変調)の場合には、角度をつけて入射させる参照光による空間搬送波は不要であるので、液晶パネルに要求される画素ピッチの要求はホログラムに比して少し楽である。

しかし、ホログラム用感材に比べて、その分解能、ホログラムサイズははるかに劣っており、この方式が将来どの程度進展するかは、このパネルが将来どの程度まで微細画素化、大画面化できるかに依っている。

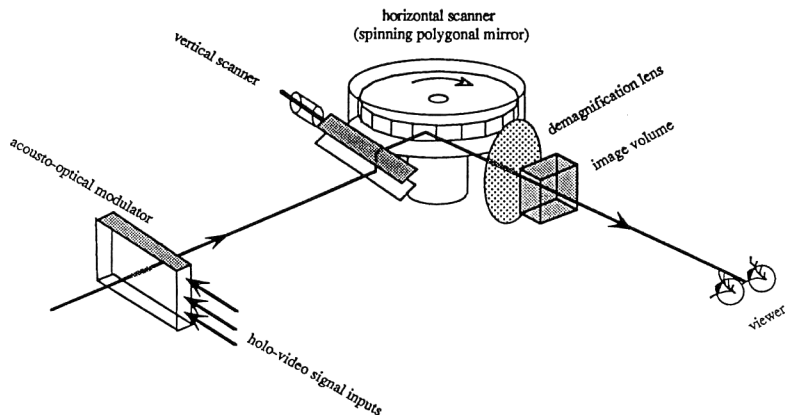


図1 MITのグループが最初に実現したAOMをダイナミック・ホログラムとして用いた立体像表示ホログラフィック・ビデオの光学系

微小画素化、大画面化への異なるアプローチとして、新しい液晶デバイスの研究が報告されているが、これについては、「光学」のこの号の「最近の技術から」(佐藤甲癸氏)の項で紹介されているので、そちらを参照されたい。

空間光変調素子としての液晶デバイスの、特に位相変調特性についてはいくつか報告されている^{6,7)}。位相変調パネルの場合、位相変調特性の変化は、位相ホログラムの場合には単に回折効率の変化に影響するのみであるが、キノフォームの場合には表示される像そのものに大きく影響する。

3. 光情報処理への応用

ダイナミック・ホログラフィ技術が使われる可能性のある光情報処理には、大きく分けて、①光演算、②光メモリ、③光インタコネクション、④光スイッチング、があり、それぞれの分野で研究が進められている。

最近主に、材料に関して研究が活発に行われているフォトリフラクティブ材料による位相共役 (phase conjugation) の大部分はダイナミック・ホログラムと見なすことができる⁸⁾。日本光学会でも、'93年に「位相共役・光波ミキシング研究グループ」が発足し活動している⁹⁾。また最近、NTT 基礎研究所でも大容量の可能性のあるホログラム・メモリも開発されている¹⁰⁾。

しかしここでは、入手可能でシステム化しやすい液晶パネルをダイナミック・ホログラムとして用いるアナログ光演算に限定して紹介する。

使われる液晶としては、電子書き込み方式と光書き込み方式とがある。立体像表示で使われる液晶パネルは、

その目的からいってほとんどが電子書き込み方式であるが、光演算では、光書き込み方式が主に使われる。まず光書き込み方式の液晶パネルについて簡単に述べ、その後応用について述べる。

3.1 光書き込み型液晶パネル

光書き込み型の液晶パネルの構造、特性について簡単に紹介する。

その断面構造は図2に示すようになっており、書き込み光と読み出し光は逆方向より入れる。即ち反射回折光が再生光波面となる。

液晶として、①最も一般的に使われているツイステッド・ネマティック配向させたもの、②ネマティック液晶を平行配向させたもの¹¹⁾ (ホモジニアス配向とも呼ばれる)、③強透電性液晶を使ったもの¹²⁾がある。

このパネルの空間分解能は構成によって異なるが、数十~200 line pair/mm 程度である。またパネルの大きさは、10~20 mm 直径程度のものが入手可能である。

①の場合には偏光ホログラムになり、②の場合には位相ホログラム、③の場合にはバイナリ・位相ホログラムになる。

3.2 高速パターン・マッチングへの応用

コヒーレント光演算を用いる画像のパターン・マッチング手法としては、マッチド・フィルタリングとジョイント・フーリエ変換法がある¹³⁾。それぞれの方法で、ダイナミック・ホログラムデバイスを使うことを念頭に置いた応用研究が報告されている。それらの現状および将来展望について簡単に紹介する。

3.2.1 マッチド・フィルタリングのダイナミック化 画像パターン・マッチングをコヒーレント光で行う方

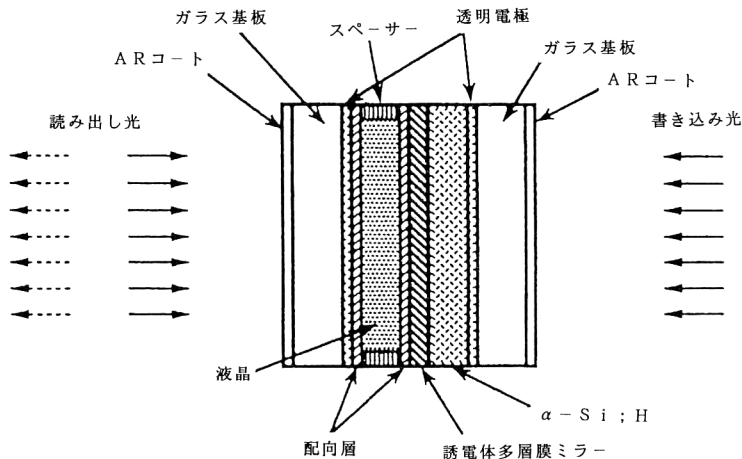


図2 光書き込み型 SLM の構成断面図の一例

法の一つに Vander Lugt が提案した方法があり、これはマッチド・フィルタリングと呼ばれ、フィルタとして使うホログラムはマッチド・フィルタと呼ばれる。

マッチド・フィルタリングの原理は2次元振幅透過率分布 $f(x, y)$ の2次元フーリエ変換面で平行参照光とともにホログラムを記録する (図3 (a))。そしてこのホログラムを、記録時の物体光を別の2次元振幅透過率分布 $g(x, y)$ の2次元フーリエ変換の光波面で照明する (図3 (b))。そして、そのホログラムからの+1次再生光波面を凸レンズにより再度2次元フーリエ (逆)変換すると、そのレンズの像焦点面で、 $f(x, y)$ と $g(x, y)$ の次式に示す2次元相関関数 $R(x', y')$ に比例する複素振幅分布が得られる。

$$R(x', y') = f(x, y)g^*(x-x', y-y')dx dy$$

即ち、上記平面では、 $|R(x', y')|^2$ に比例する光強度分布が得られる。これは「実面での相関演算は、フーリエ変換面では積演算で表される」という数学の性質を利用したものである。

この時、 $f(x, y)$ 、 $g(x, y)$ が画像の強度分布である場

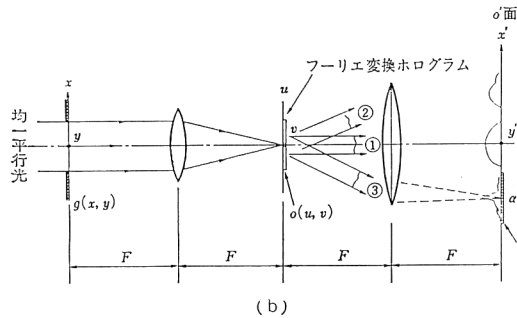
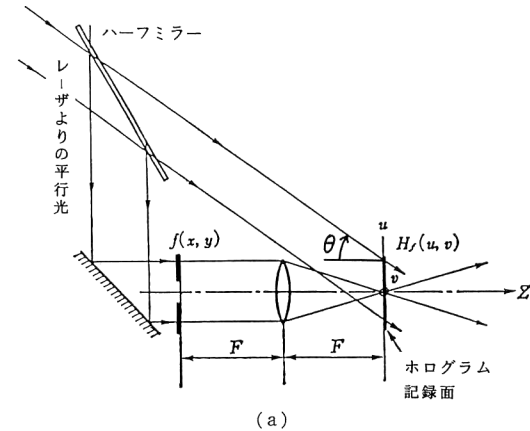


図3 マッチド・フィルタリングを実現する光学系 (a)フィルタの記録光学系, (b)マッチド・フィルタリング演算を実現する光学系

合には、それぞれは非負の関数であるので、その相関値ピークの S/N を高くするためには、ホログラムの回折効率の非線形特性を利用してフィルタとして零空間周波数成分 (直流成分) を含む低空間周波数域をカットする特性をもたせることが必要である。

この画像のマッチド・フィルタリングは局所パターン・マッチングに有効である。画像の局所パターン・マッチングとは、図4に示す画像1のある小さい部分 (局所) に対応する部分が画像2のどこにあるかを決定することである。ここでは、画像1の局所パターンを参照パターンと呼ぶ。

ある画面の中で、参照パターン (特定の物体パターン) の位置を高速に決定したい場合がある。この時、特定のパターンが同じ形、大きさ、姿勢であれば、マッチド・フィルタであるホログラムは書き換える必要はないが、それ以外の場合にはこのホログラム・フィルタをその変化に応じて書き換えていかなければならない。

例えば、ある特定の物体を追って行く場合には、一般には参照パターンは変わっていく。それを検出し、そのフィルタを高速で作ることができれば、時間的に変化する物体の追尾が可能になる。参照パターンの高速切り出しが実現できれば、応用が広がっていくと思われる。

3.2.2 ジョイント・フーリエ変換によるダイナミック・パターン・マッチング

これもパターンマッチングの応用の一つである。マッチングの比較をしたい二つの画像パターンを同一面内で平行に位置ずらせておき、それをレンズによりフーリエ変換してその変換面で重ね、そこでの干渉縞パターンを記録し、それを読み出すことにより相関演算を実現する方法である。これは普通はホログラムとは呼ばれていないが、コヒーレントな二つの光波面を重ね合わせて生じる干渉縞の強度分布を記録するので、ホログラムとみなすこともできる。

それを指紋の照合に適応した例を紹介する¹⁴⁾。この光

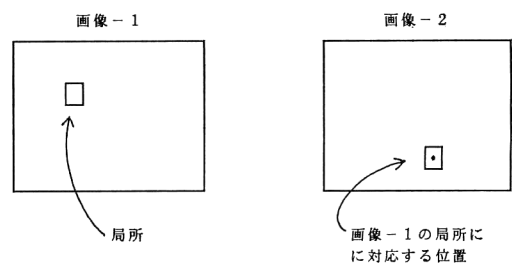


図4 局所パターン・マッチングの説明図

学系で予め登録されている約 100 個の指紋パターンの中に当人の該当する指紋パターンがあるかないかの照合を行うシステムである。

その全体の光学系を図 5 に示す。液晶による透過型電子書き込み SLM にまず当人の指紋パターンを写し、それを光書き込み型の SLM の上半面に投影する。下半面には参照パターンを次々と表示していく。そして両方の (joint) フーリエ変換をして重ねたパターンを 3.1 項で述べた構造を持つ液晶ダイナミック・ホログラムに記録し、裏面より平行光で照明する。そして、そのホログラムより回折再生される光波面をフーリエ変換すれば、その複素振幅分布は指紋パターンと参照指紋パターンの相互相関演算結果を表す。即ちこの面の強度分布のピーク値が大きく、広がり小さいほどパターンの類似度が高いことを意味する。この場合はその分布の位置はほとんど同じであるので、その部分で検出される 2 次元光強度分布の簡単な解析により類似度に対応する評価値を高速で得ることができる。

このようにパターン・マッチングを指紋の照合に適応するのは一つの実用的によい所へ着眼した例であろう。その理由は、指紋パターンは一般にそのスペクトルが高周波成分を多く含み、相関演算によって一致、不一致が非常に敏感にでる特性を持っているからである。指紋の一致不一致は本人の同定 (本人が確かにその人であるこ

とを確認すること) のために非常に重要な手法であると認識されつつある。そのため、電子的に行う手法も多く研究・開発されており、実用的にはそれらのシステムとの競合になると思われる。

いずれにしても、実用的立場からはパターン・マッチングをどのような手法で行うかは問題ではなく、その性能 (正確さ・早さ)、システムの使いやすさ、大きさ、消費電力、値段などのトータルな評価により採用されるかどうかが決まることは常に認識しておく必要がある。

3.3 ホログラフィック電子顕微鏡でのリアルタイム再生と処理

これは科学技術庁の創造科学プロジェクトの一つである「外村ホログラフィック電子顕微鏡プロジェクト」で行われた研究の一部である^{15,16)}。

パターンマッチングとは異なり、電子書き込み型の液晶パネルが使われる。キャリア空間周波数の比較的低い干渉縞パターンよりなるイメージ型の電子線ホログラムの光学的再生・処理をビデオ・レイトで行う例である。その概略を図 6 に示す。

特殊な電子顕微鏡によるホログラム像をビデオカメラで撮り、そのビデオ信号で液晶パネルを駆動する。このビデオ信号で駆動される液晶パネルは一種の光領域のホログラムと考えることができる。ただし、生じている干渉縞は粗いので、ビデオカメラとそのビデオ信号で駆動

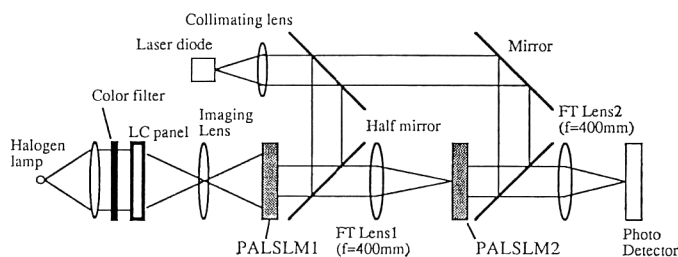


図 5 ジョイント・フーリエ変換を用いた指紋同定システムの光学構成図¹⁴⁾

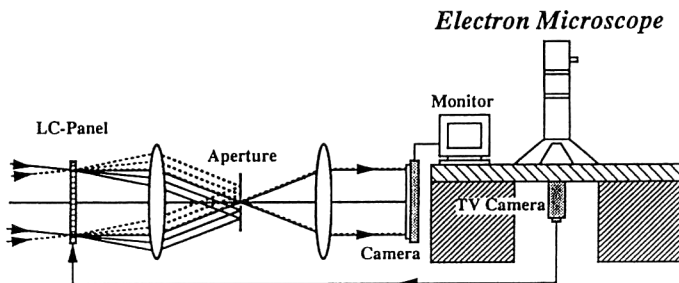


図 6 ホログラフィック電子顕微鏡で像再生・処理をリアルタイムで行う部分の光学演算部¹⁵⁾

される液晶パネルも普通の解像力があればよい。

このホログラムを少し角度の異なる二つの平行光で照明し、凸レンズによるフーリエ変換面で必要な成分だけを通すフィルタリングを行い、再度レンズによりフーリエ変換を行う。その面にイメージ・センサーをおき、モニターテレビで観察する。このようにすれば物体の磁力線などの変化がビデオ・レイトで観察できる。ビデオプロジェクタ等で使われている液晶パネルを巧みに使ったダイナミック・フィルタリングの優れた一例である。

4. おわりに

ダイナミック・ホログラムの使用目的として立体動画像表示と、液晶パネルをホログラムとして用いたアナログ光演算の研究の現状を簡単に紹介した。立体同画像表示はまだ研究がスタートしたばかりであり、これからどのように展開していくのか不明であるが、たいへん興味深い。光演算についてはアナログ演算であるが、演算あるいは適応の対象を限定することにより、トータル性能比較で電子演算より優れる可能性を示している。このような分野が今後増えていくものと思われる。

文 献

- 1) 例えば, H. Suzuki and A. Ono: "Holographic optical image processing using a thermoplastic photographic plate," *Proc. SPIE*, **2176** (1994) 312-315.
- 2) P. St. Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente, M. L. Jepsen, J. Kollin, H. Yoshikawa and J. Underkoffer: "Electronic display system for computational display," *Proc. SPIE*, **1212** (1990) 174-182.
- 3) S. A. Benton: "The second generation of the MIT holographic video system," *Proc. of TAO 1-st Int. Symp. on 3-D Image Commun. Technol.*, (1993) pp. s-3-1, 1-6.
- 4) N. Hashimoto, S. Morokawa and K. Kitamura: "Real-time holography using high-resolution LCTV SLM," *Proc. SPIE*, **1461** (1991) 291-302.
- 5) J. Amako and T. Sonehara: "Kinoform using an electrically controlled birefringent liquid-crystal spatial light modulator," *Appl. Opt.*, **30** (1991) 4622-4628.
- 6) 例えば, 阿須間宏明, 榎 学農, 本田捷夫, 大山永昭: "液晶パネルの位相変調特性", *光学*, **20** (1991) 98-102.
- 7) 今井 浩, 山口雅弘, 本田捷夫, 大山永昭: "TN 液晶パネルの円偏光位相変調特性", *光学*, **21** (1992) 550-554.
- 8) 例えば, 左貝潤一: "はじめての人への位相共役光学—基礎から最前線まで—", *応用物理*, **62** (1993) 567-574.
- 9) "位相共役・光波ミキシング研究グループ発足のお知らせ", *光学*, **22** (1993) 522.
- 10) "新技術「映像の缶詰」結晶に 100 時間分", *読売新聞*, 1994年 5月 25日朝刊.
- 11) "PAL-SLM (液晶空間光変調器), X 5641 シリーズ", 浜松ホトニクス(株)カタログ, APR/93.
- 12) 黒川隆志: "液晶空間光変調器", *光学*, **22** (1993) 469-470.
- 13) 例えば, 谷田貝豊彦: "光情報処理におけるフーリエ変換", *光学*, **21** (1992) 392-399.
- 14) 豊田晴義, 吉田成浩, 向坂直久, 小林祐二, 原 勉: "位相変調型空間光変調器を用いた光相関システム", *光学*, **23** (1994) 315-320.
- 15) J. Chen, T. Hirayama, G. Lai, T. Tanji, K. Ishizuka and A. Tonomura: "Video-rate electron-holographic interference microscopy using a liquid crystal panel," *Meeting Digest of Topical Meeting of ICO (Kyoto, Japan)* (1994) p. 103.
- 16) G. Lai: "Advances in electron interferometry," *SPIE's Working Group Newsletter—Holography*, (June 1994) p. 7.