

解説

ホログラフィック・ディスプレイの最近の動向

本田 捷 夫

東京工業大学工学部像情報工学研究施設 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

(1992年6月1日受理)

Recent Researches of Holographic 3-D Display

Toshio HONDA

Imaging Science and Engineering Laboratory, Tokyo Institute of Technology,
4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227

1. はじめに

ホログラフィを立体像表示に使用しようとする試みおよび技術開発は、リースとウパトニクスによる空間搬送波を用いた光ホログラフィ法の発明以来多くなされてきた。その技術は『立体像表示』がどのような目的で使われるのかということを明確には意識しないで、すなわちニーズ(needs)指向ではなく、シーズ(seeds)的研究として行われてきた。

しかし、近年コンピュータを中心とする情報関連システムの高能力化により、大量のデータ処理が行えるようになり、その一つとして、空間3次元データ(いわゆる3次元画像)を扱うようになってきた。それに伴って「その結果を立体像として表示したい」というニーズもでてきた。

ここでは、まず、このようなニーズに応えられる可能性のあるホログラフィ技術であるホログラフィック・ステレオグラムについて、その原理をまず簡単に述べ、次にその最近の研究について紹介する。そして、その関連として研究が始められているエレクトロ・ホログラフィ技術の研究の現状について紹介する。

2. ホログラフィック・ステレオグラム

立体像として表示したい被写体にレーザー光を照射しホログラムとして直接記録する方法に対し、観察位置が少しずつ異なる多数枚の普通の写真を撮り、この写真列をもとにして、1枚のホログラムを合成する方法を「ホログラフィック・ステレオグラム(holographic stereo-

gram, 以後は HS と略)」と言う。

この方法に必要な入力データは、後述するように、「観察位置の異なる多数枚の普通の画像データ列」であるので、この画像データが得られれば、どのような物体でも立体像として表示できる。

直接記録ホログラムと比べて、HSの作成は以下に述べるように工程が多いが、この方法を用いれば、直接ホログラムとして記録できない物体もHSの手法により立体像として表示できる。

この手法がうまく使える具体的適応分野としては次のような分野がある。

1. CAD(computer aided design)で設計した、現実には存在しない架空物体の表示
2. コンピュータ等で画像処理を行った像の表示
3. 可視光像以外の像の表示

一例として、CADで設計した物体をHSで表示する場合の概念図を図1に示す。CADでは、設計した物体の形状は、3次元空間座標列で与えられるので、それをもとにして、3次元コンピュータ・グラフィックスの手法を用いて、同図(a)の点列の位置より観察されるであろう普通の画像列を作成する。この画像列が得られれば、後述のように、一枚のホログラム(HS)を合成することにより、同図(b)に示すように、設計した物体の立体像を表示・観察することができる。

2.1 HSの原理

最も基本的な直接記録ホログラムであるフレネル・ホログラムからの再生像と同じ像を表示するHS(レーザー再生平面型、倍率は1)について説明する。

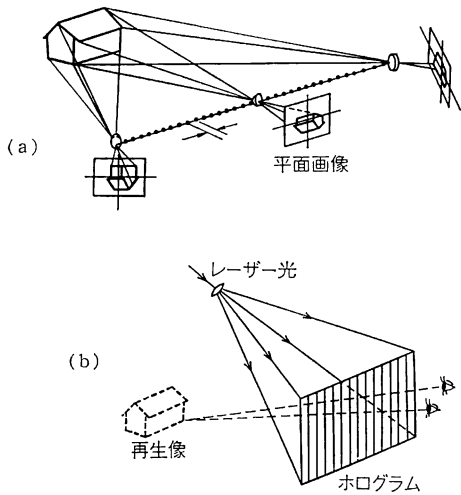


図 1 CAD システムにおける HS を用いた立体像表示
 (a) CAD システムによる原画像作成の概念図, (b) 設計物の HS による立体像表示.

2.1.1 HS の作製

まず立体表示したい物体の平面写真列を図 2 (a) に示すように次々と狭い間隔で撮っていく。この時、カメラの画面の中心をある定めた物体のほぼ中心点に一致させ、被写界深度は深くする。普通の写真フィルムはネガであるので、映画フィルムと同じようにネガよりポジを作製する。

次にこのポジの 1 コマを同図 (b) に示す光学系でホログラムとして露光する。すなわち、写真の 1 コマを透過拡散スクリーンにレーザー光照明で投影する。この時の投影像の大きさは被写体と同じ (すなわち写真記録が $1/m$ 倍であれば、投影倍率は m 倍) とする。そしてスクリーンとホログラム記録面との距離は原画撮影時の被写体とカメラとの距離 (図 2 (a) の l) とする。

ホログラムとしての記録は、普通のホログラムと同じように、斜め方向より参照光を加える。その時ホログラム記録面の直前に、小さい穴 (開口) があいた遮光板を置き、写真の 1 コマ (これを原面と呼ぶ) に対しては、その開口部のみを、ホログラムとして露光する。この開口部の位置は、この原面写真のそのコマの撮影位置とする。それぞれの原面はホログラムを記録する微小位置と 1 対 1 に対応させる。原面記録のカメラの位置の平面がホログラム記録面に対応する。この露光は、原面を 1 コマずつ精度良くコマ送りすること、およびホログラム記録面直前の開口を 2 次元的に動かしていく必要があり、この作成には手間と時間がかかる。一つ一つの小さいホ

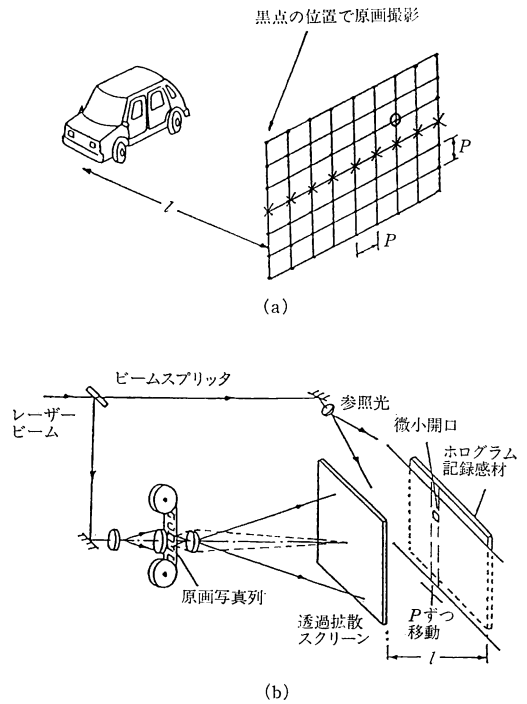


図 2 HS の作成原理
 (a) 原画撮影, (b) HS の合成光学系.

ログラムを要素ホログラムと呼ぶ。

このようにして、全面にわたって、露光したホログラム感材を普通のホログラムと同じように現像・漂白処理する。このようにして作られたホログラムを HS と呼ぶ。

2.1.2 HS からの像再生と観察

像再生は普通のフレネル・ホログラムと同じように、記録時の参照光源位置よりレーザー光で照明する。この照明により、それぞれの要素ホログラムからは、拡散スクリーンに投影された実物大の平面像が再生される。同時に多くの平面画像が再生されるホログラムを人が両目で観察すると、どのような像として観察されるかを次に述べる。

まず、観察者がホログラムに顔をくっつけて、再生像を観察する場合は、図 3 (a) に示すように、左右それぞれの目で観察される像は拡散スクリーンの位置に表示される平面画像であるが、左右で視差のある画像を見ることになる。その結果ステレオ写真の原理で、観察者にはスクリーン位置の前後に膨らんだ立体像として見える。両目をホログラムに沿って水平・垂直方向に動かしていくと、それに応じて立体像を見る位置が移動していく。要素ホログラムの間隔を 1mm 程度とすることにより、

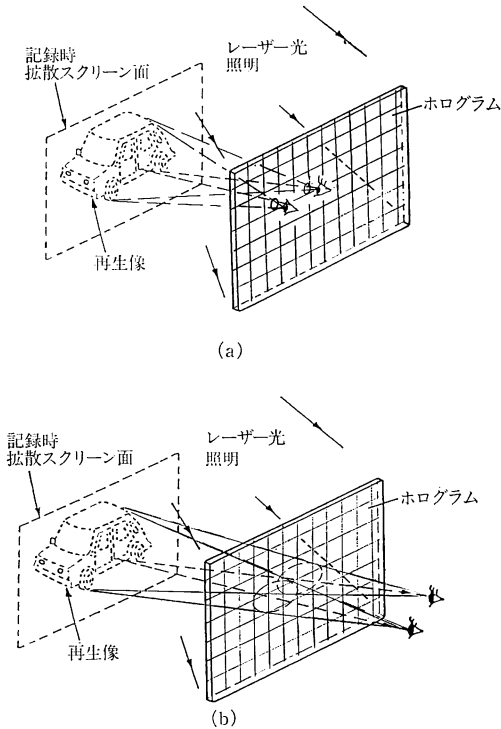


図3 HSよりの立体像の観察
(a)目を近づけて見る場合、(b)HSから離れて見る場合。

全く自然な立体像を表示することができる。

次に、ホログラム面から離れて、再生像を観察する場合には、図3(b)に示すように、左右それぞれの目で観察される像は、一つの要素ホログラムからの再生像ではなく、いくつかの要素ホログラムから再生される像を部分的に接続して見ることになる。それぞれの要素ホログラムからの再生像のどの部分が観察されるかは、観察者の目の位置によって異なるが、「ホログラムは基本的に、記録された光線束を再現する」ことを考えれば、納得されるであろう。もちろんこうなるためには、要素ホログラムの間隔が狭いことが必要である。光線束を逆トレースすることにより、実物体をその位置に目を置いて観察されるであろう像と同じ像が、このホログラムを通して観察されることがわかる。

目の瞳孔(通常 $2\sim 5\text{mm}\phi$)より原画を撮る間隔(および要素ホログラムの間隔)を狭くとれば、不連続性は認識されず、直接記録ホログラムと区別できない再生像が観察される。

厳密にはアオリ補正をかけなければ歪が発生するが、像を記録・観察する角度範囲が真ん中より $\pm 15^\circ$ 程度以下では、アオリ補正を加えなくても観察される像の3次

元的歪は無視できる程度である。

以上の説明では、実物大の像を表示する場合について述べたが、すべての寸法を拡大あるいは縮小することにより、3次的に全く歪のない拡大あるいは縮小された立体像をHSにより表示することができる。

2次的に要素ホログラムを記録していくことは、原画枚数、ホログラム露光時間の点より大変であるので、普通のHSでは、立体視に重要でない垂直方向に関しては、ある一定の高さのみの原画(図2(a)の×××のみから撮った画像)を使用し、ホログラムの合成では小さい矩形開口を同図(b)の破線で示すように垂直方向に長いスリット開口にする。このようにすることにより工程および合成時間は大幅に短縮される。このレーザー再生型HSをレインボウ・タイプにして白色再生用にする場合には、必然的に垂直方向の視差はなくなる。

このようにして合成されるHSは、被写体を直接レーザーで照明して露光する「直接記録ホログラム」とは基本的には異なりホログラム作成までの工程が多く作製にも時間を要するが、このHSの手法により、表示できる像の範囲を大きく広げることができる。HSを作成するために本質的なことは、『観察点の異なる多数枚の平面画像列が入手できる』ことである。

2.2 HS技術の最近の研究

ここではHS技術について近年行われている研究を簡単に紹介する。

2.2.1 シネフィルム・レス化

前節の原理で述べたように、原画の記録間隔を狭くすると、原画の枚数が、数千~数万コマと非常に多くなる。このように多くなると原画を記録し、レーザー光で照明するための原画フィルムは映画のように長尺フィルムとなり、その現像処理を含めた取り扱いが、ネックになる。

この原画フィルムのビデオシステムへの置き換えがHSの今後の展開のために不可欠である。ビデオ化のために重要なデバイスは、レーザー光照明でシネフィルムの役割を電子的に行う空間光変調器(SLM)である。これが実現されれば、計算機で原画を作成する場合、作成された原画を次々とホログラムとして露光していけるので、合成時間の短縮につながる。われわれはこの目的のために、液晶パネルを用いることを提案、実験している¹⁾。

2.2.2 1-ステップ化

ディスプレイを目的としたホログラムの照明は、その明るさ、取扱いやすさ、値段の点より、レーザーではな

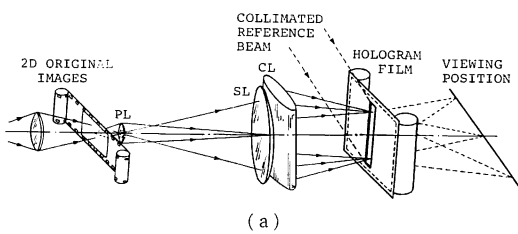
く普通の照明用の小さい白色光源で行われることが望ましい。そのために、レインボウ・ホログラム、リップマン・ホログラムが開発された。これらのホログラムでは再生像のボケを小さくするために、再生される像がホログラム面を中心に前後に膨らむように作られる²⁾。これをイメージ・タイプのホログラムと呼ぶ。

前節で述べた HS はレーザーで照明され、その再生像はホログラム面の奥に観察されるいわゆるフレネル・タイプであるが、これをイメージ・タイプにするためには、このレーザー再生 HS から実像を再生し、図 2 (b) のスクリーン位置で再度ホログラムを記録するいわゆる 2-ステップ法が用いられている。

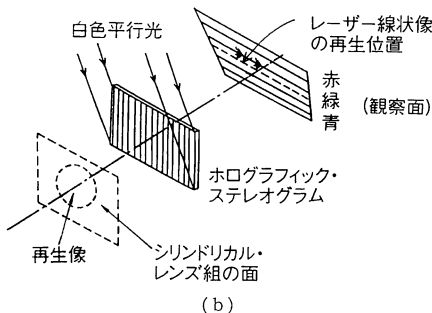
芸術作品ならばこの方法で問題ないが、種々の応用のためには、完全自動で最後の白色光再生ホログラムが作成できることが重要である。その方向に沿って行われている研究を次に簡単に紹介する。

1) 1-ステップ化のための合成光学系³⁾

レインボウ・タイプの 1-ステップ HS の作成は、図 2 (b) に示した光学系を変更することにより実現される。その光学系を図 4 (a) に示す。図 2 (b) との変更点は、透過拡散スクリーンを次に述べるレンズ系に変えることである。すなわち、レーザー光を垂直方向に長い線状に絞るパワーの大きいシリンダリカル・レンズ (図 4 (a) の CL) およびより遠くの位置に水平方向に長い線状に絞るパワーの小さいレンズ (同 SL) に変えることである。



(a)



(b)

図 4 白色光再生 1-step HS
(a)合成光学系, (b)再生の様子.

この光学系による 1-ステップ HS を白色光照明した場合の像再生の様子を図 4 (b) に示す。この図よりわかるように、観察者より見た場合再生像がホログラム面の後方に観察されるのでイメージ・ホログラムとはならない。その結果ボケが少し大きくなる。

2) イメージ・タイプのホログラムのための画像処理

図 4 (a) と同じ合成光学系を使って、像をホログラム面をはさんで前後に膨らむようにするためには、原面に次に述べるような画像処理をほどこせば良い。

詳細は、文献³⁾にゆずるが、一言で言うと「水平方向に関してホログラム面で原画を記録した場合に得られるであろう画像を作れば良い」ということである。このためには、図 5 に示すように、原画のそれぞれを垂直方向に細長い短冊状にわけ、原画のそれぞれの部分をあわせて、1枚の原画を作ればよい。この図では、模式的に数コマを使うように示してあるが、実際は 100 コマ以上を使わなければならない。このようにして得られる原画は、普通の写真撮影では得られない奇妙な画像列となるが、この原画列を図 4 (a) の光学系を用いてホログラムの記録を行うと、図 4 (b) で観察される像をホログラム面をはさんで前後に膨らんで見せる位置に再生像を表示することができる。

2.2.3 HS による大きい再生像の表示

図 4 (a) の光学系を用いて、1-ステップでレインボウ・タイプの HS を作成する場合、水平方向の像の広がり角はレーザー光を垂直方向に長い線に絞り込むシリンダリカル・レンズ (同図の CL) のパワー (開口数) によって制限を受け、垂直方向の像の大きさは、二つのレンズ (同図の SL と CL) の垂直方向の長さによって制限される。

この両方を同時に大きくするレンズは大変であり、現在では垂直方向の像の最大の高さは 20 cm 程度である。被写体によっては、実物大で表示したいという要求もあ

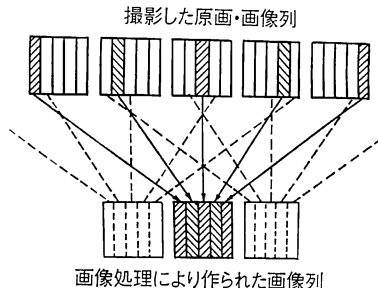


図 5 イメージタイプにするための画像処理の概念図

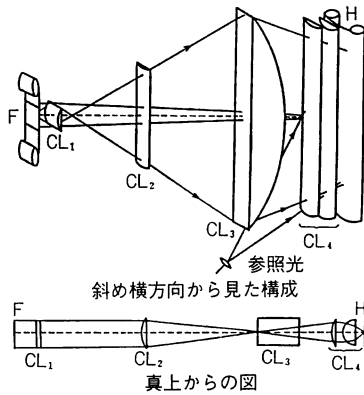


図 6 大きい像を表示できる HS の合成光学系

る。このために投影光学系を極端なアナモルフィック系(水平方向と垂直方向で横倍率が異なる投影光学系)を用いて垂直方向の像の高さを大きくする光学系が開発されている。この概略を図6に示す⁴⁾。

現在のところ、高さ 30 cm 程度の像の表示が実現されているが、さらに高い像へ発展させることも、それほど困難ではない。

2.2.4 より正確な3次元形状の立体表示 HS

これまで、白色光再生タイプの HS として、レインボウ・タイプについて述べてきた。このタイプは前述したように必然的に垂直方向の視差はなくなる。その結果、ホログラム面からある一定の距離(図2の l) 離れた位置でのある高さから再生像を見た時のみ、歪のない立体像が観察される。その高さ、距離以外の位置より再生像を見ると観察される立体像は正確な3次元形状から歪んで見える。

垂直方向にも視差を持つリップマン・タイプの HS にすれば、この歪をなくし、どこから見ても正確な3次元形状を立体表示することができる。

2.2.2 の2)で述べた画像処理を垂直方向にも広げることにより、1-ステップでリップマン・タイプの HS を作成することができる⁵⁾。この場合には線状の露光ではなく小さい点で2次元的につきつきとホログラム露光をしていかなければならない。水平方向視差のみの HS に比べて、このための画像処理、露光時間は長くなるが、将来的には、コンピュータの高速化、メモリの増大等により短時間合成が可能になると思われる。

3. エレクトロ・ホログラフィ

像を表示する目的で、ホログラム面のレーザー光強度分布パターンを時系列信号である電気信号として検出、

伝送あるいは表示デバイスを駆動する方式を「エレクトロ・ホログラフィ」と呼ぶことにする。

ここではそれらの技術の現状を簡単に紹介し、さらに、この技術の今後の動向について述べる。

3.1 エレクトロ・ホログラフィ技術の研究の現状

ここ1~2年、超音波光変調器(acousto-optic modulator, 略して AOM), 液晶パネル等の、光の時・空間的な光強度変調素子あるいはレーザー光等のコヒーレント光の位相変調素子を用いたホログラフィの研究報告がいくつかなされている。これらの方法は現時点では、立体像として表示・観察することが困難であったり、一人がやっと観察できる程度であったりであるが、将来的には前記デバイスの発展と相まって大きい立体像を複数人が同時に観察できるように発展していく可能性を持っている。

3.1.1 直接方式

これは従来の感光材料を用いて行われている干渉縞の記録を高画素数の CCD カメラで行い、そのビデオ信号で高画素点数の液晶ディスプレイ・パネルを駆動し、そのパネルにレーザー光を当てて、元の像を再生する方法である。シチズン(株)⁶⁾、湘南工大⁷⁾、で行われている。

シチズンでの例を図7に示す。この方法では CCD カメラおよび液晶パネルの全画素数が少なく、また画素間隔が粗いので参照光角度が 1° 程度しかとれていない。そのため再生では、レンズを入れその像側焦点面にストップを置くことにより参照光をカットしている。

3.1.2 超音波光変調器を用いる方式⁸⁾

現在のところ、直接立体像が観察できる唯一の方法である。この方式は、MIT のベントンのグループが開発している。彼はレインボウ・ホログラムの発明者であ

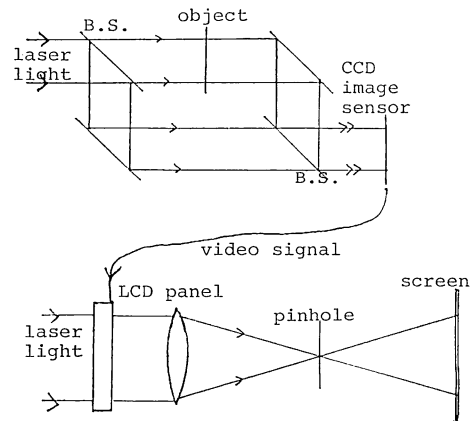


図 7 シチズン(株)で提案しているビデオ・ホログラフィ・システムの概念図

り、これは立体像としてのデータ量低減のために垂直方向の観察位置を固定している。

このエレクトロ・ホログラフィもこの方式を用いている。水平方向に対しては、長い AOM (ドライブ周波数は 50~100 MHz) でレーザー光を (時) 空間変調しており、垂直方向に対しては、ガルバノミラーで走査している。AOM では超音波の進行に伴って光波面が流れる (約 700 m/s)。これを止めるためにポリゴンミラーを用いている。このシステムの概略を図 8 (a) に、AOM 等の駆動信号フローチャートを同図 (b) に示す。

このシステムは CAD 等で設計された架空物体の立体像表示を考えているので、AOM を駆動するホログラム信号は超高速パラレル・コンピュータ (コネクション・マシン) で計算された CGH (computer generated hologram) 信号である。

現在、像表示可能な体積は 3 cm 立方程度であり、視域角も (レンズを入れても) 数度程度であるが、AOM の改良・複数使用によりさらに大きいカラーの立体像表示に取り組んでいる⁹⁾。

3.1.3 キノフォーム (kinoforn) による方法

この方法は基本的にはホログラムによる方法とは異なるが、類似点が多いのでここで紹介する。ホログラムは物体光波面 (位相分布) の再現のために参照光波面との

干渉による光強度分布の記録および変調であるが、物体光波面の位相分布そのものを実現し、光波面を実現するのがキノフォームである。

これを電子的な制御で実現できる可能性のあるデバイスとして 3.1.1 で述べた液晶パネルがある。3.1.1 では twisted nematic (TN) 液晶を偏光板をはさんでレーザー光強度空間変調器として用いているが、ここでは TN 液晶あるいはホモジニアス配向液晶の複屈折性を利用して、光波位相空間変調素子として用いる。その引加電圧-位相変化量の特性の一例を図 9 に示す¹⁰⁾。

このような特性を持つ高画素数・小画素ピッチの液晶パネルがあれば、ビデオ信号駆動によるキノフォームすなわち立体像の表示が可能になる。この研究はセイコー・エプソン (株) 等によって行われている¹¹⁾。

現在のパネルでは画素数・画素ピッチの問題より、これも 3.1.1 と同じように凸レンズによる波面変換特性を利用しているが、参照光による空間キャリアを必要としない分だけホログラムより画素数・画素ピッチの点で有利である。

3.2 エレクトロ・ホログラフィ技術の研究動向

3.1 で、現在試みられているエレクトロ・ホログラフィあるいはエレクトロ・キノフォーム技術を簡単に紹介した。これらの方法は、原理的にはその表示デバイスの応答速度で動画立体像を表示することが可能である。

動画立体像の表示対象としては、

- ① 現実のシーン
- ② CAD による仮想物体

がある。そして、ホログラフィの手法で立体像を表示する方法としては、

- a. 光波面を検出または計算する方法
- b. 第 2 節で述べた HS による方法

がある。

この分類によると、3.1.1 の方法は①-a の組合せで

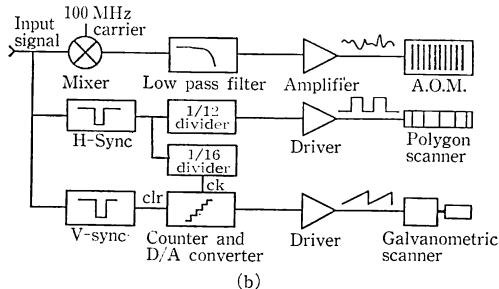
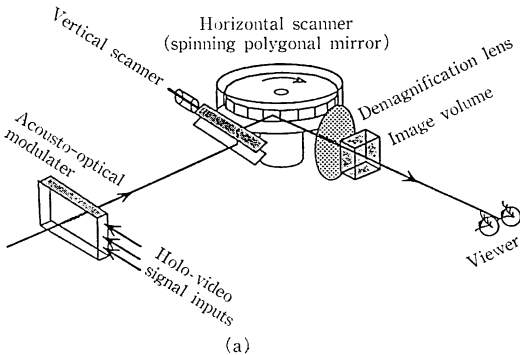


図 8 MIT におけるビデオ・ホログラフィ・システム (a) 全体の概念図, (b) 信号の流れ図。

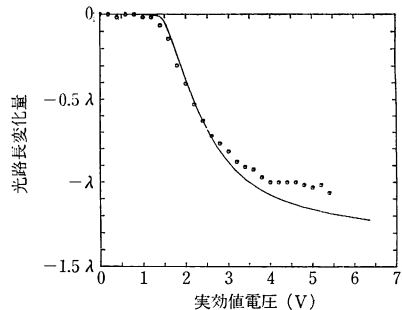


図 9 ホモジニアス配向液晶パネルの引加電圧 (実効値)-位相変調特性

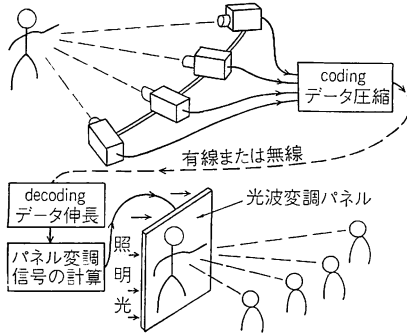


図 10 ホログラフィック・ステレオグラムの原理に基づく立体テレビ方式の概念図

あり、3.1.2 および 3.1.3 の方法は ②-a の組合せである。

現実のシーンを立体像表示することを目的とする場合には、普通のディスプレイ・ホログラムのようにレーザーでそのシーンを照明し、干渉縞パターンを検出し、表示デバイスにそのパターンの変調を加える方法はかなり困難であると思われる。その理由は検出器および表示デバイスの空間分解能が非常に高くまた広い面積を必要とするからである。

以上のことを考えると CAD で設計した架空物体の立体像表示等は別として、表示のためのもとの画像データは、異なる複数（多数）方向よりテレビ・カメラで画像として取り込み、ホログラフィック・ステレオグラムあるいはキノフォームの原理に基づくステレオグラムの方式を電子的に実現する方法が一つの方向だと思われる。その概念図を図 10 に示す。

“はじめに”で述べたように 3 次元構造を理解するための一つの有力な方法は立体像表示であるので、この立

体像表示は将来重要な技術になることは確かである。ただし、この分野の研究はまだ揺らん期にあり、種々の提案、デバイスの開発が勇気をもって進められるべきであると思われる。

文 献

- 1) T. Honda, M. Yamaguchi, D. Kang, K. Shimura, J. Tsujiuchi and N. Ohyama: "Printing of holographic stereogram using liquid-crystal TV," Proc. SPIE, **1051** (1989) 186.
- 2) 例えば、本田捷夫：ホログラフィのなはし（日刊工業新聞社，1987）p. 111.
- 3) 康 徳寛，本田捷夫：“ホログラフィック・ステレオグラムによる立体像表示のための画像処理”，光技術コンタクト，**28**, No. 8 (1990) 19.
- 4) 志村 啓，本田捷夫，山口雅浩，大山永昭：“マルチプレックス・ホログラム再生像の拡大”，光学，**20** (1991) 169.
- 5) M. Yamaguchi, N. Ohyama and T. Honda: "Holographic three-dimensional printer: new method," Appl. Opt., **31** (1992) 217.
- 6) N. Hashimoto, S. Morokawa and K. Kitamura: "Real-time holography using the high-resolution LCTV-SLM," Proc. SPIE, **1461**, Practical Holography 5 (1991) 291.
- 7) 佐藤甲癸，ほか：“ホログラフィ・テレビジョンへ向けての基礎実験（Ⅱ）”，テレビジョン学会年次大会予稿集 (1991) p. 229.
- 8) P. Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente, M. L. Jepsen, J. Kollin, H. Yoshikawa and J. Underkoffler: "Electronic display system for computational holography," Proc. SPIE, **1212** (1990) 174.
- 9) P. Hilaire, S. Benton, M. Lucente, J. Underkoffler and H. Yoshikawa: "Real-time holographic display: Improvements using a multichannel acousto-optic modulator and holographic optical elements," Proc. SPIE, **1461** (1991) 254.
- 10) 阿須間宏明，盧 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.
- 11) 尼子 淳，曾根原富雄：“液晶空間光変調器によるキノフォームの記録と再生”，光学，**21** (1992) 155.