専門講座：三次元画像表示

III. ホログラフィによる三次元画像表示

桑 山 哲 郎 (キヤノン株式会社研究開発本部)

1. はじめに

光を波としてとらえ、その強度と位相を記録・再生する技術として、ホログラフィが D. Gabor によって発明されたのは 1947 年である。その後、1962 年にレーザを光源とした実用的なホログラフィが E. Leith と J. Upatnieks により発明され、今年で 30 年になる。

ホログラフィのいろいろな応用分野の中で、三次元画像表示はかなり特殊な分野ということができる。工学の分野の研究者にとっては、情報処理、メモリー、光素子そして計測といった分野が中心課題であり、ディスプレイの領域は工学からはみ出す部分が大きい。一方、一般の人にとっては、三次元画像の表示こそがホログラフィへの興味の糸口であり、強い興味を抱く反面、技術的にホログラフィに属さないものをホログラフィと誤解している場合もある⁽¹⁾。

いずれにしても、ホログラフィックディスプレイの分野外の方からの質問は知識や興味の中心も様々であり、応対に苦慮することもあったが、最近適切な書物^{(2)~(4)}も揃って説明も以前よりは容易になってきた。私自身、ホログラフィックディスプレイ研究グループ*の運営に加わり、そしてカルチャースクールでのホログラフィアート講座⁽⁵⁾の運営を手伝う間に、この技術のどんな点が理解しにくく、また説明が必要であるかをある程度つかめるようになってきたように思われる。

本解説では、まず三次元画像表示を実現するための基本的な事柄を説明し、レーザを光源とするホログラムについて説明する。次に白色光で観察可能なホログラムについての解説を行う。非専門家向けの解説を元

にし、できるだけ図で直感的に理解できるような解説を試みた。

2. 三次元画像の表示

三次元画像の表示に用いられる技術は多岐にわたるが、ホログラフィ技術との直接的なかわりは以下の 2 点だけを理解しておけば良い。

2.1 光の進行方向の記録と再生

図 1 は、写真とホログラフィを対比し、説明している図である⁽³⁾⁽⁶⁾。図 1 (a) は、空間中に配置された点

図 1 写真とホログラフィの対比

Tutorial Series: Three Dimensional Imaging Techniques.
III. Three Dimensional Imaging Using Holography Technology.
By Tetsuro Kuwayama (Canon Inc. R&D, Headquarters)
キーワード: レーザ, 光学, 画像, 表示

* ホログラフィック・ディスプレイ研究会事務局: 千葉大学工学部
画像工学科 岡田勝行(〒263 千葉市稲毛区弥生町 1-33 ☎ 043
-251-1111 内線 2874)

物体 Q を考え、これを大口径のレンズで点 S に結像している状態を表わしている。点 S を含む面 I に写真フィルムを置いて撮影すると、ピントの合った点像が得られる。このフィルムがスライド用のリバーサルフィルムであれば、現像後の画面には暗い背景に明るい小さな点が見えるはずである。一方、撮影時に II 面にフィルムを置くと、光は円形に広がり、いわゆるピンボケ像となる。図 1 (b) は、このピンボケ写真を見ているときの光学配置で、眼のピントを調節すると網膜上には円板の像ができる。図 1 (c) は、光の進行方向が完全に記録・再生されるような記録方式を用いたときの様子を表わしている。眼のピントを表示面より奥に調節することにより、網膜上には点物体の像ができる。このように光の進行方向が記録できると、記録面から離れた位置に画像を記録・表示することが可能となる。これを実現するにはいくつかの方法があるが、ホログラフィにおいては、この記録・再生は光の干渉と回折を用いて実現される。

2.2 左右の眼への異なった画像の表示

三次元画像の表示においてもう一つの重要な技術要素として、左右の眼への異なった画像の表示がある。図 2 はこれを模式的に表わしたものである。光の進行方向を特定の方向に設定できることから、同一平面上に画像を多重に記録・表示することが可能となる。左眼と右眼には別の画像が表示されている。ステレオ写真の鑑賞では、接眼レンズあるいは偏光メガネを通して左右それぞれの画像をそれぞれの眼で分離して観察する。これに対してホログラフィの技術では、空間中に「のぞき窓」を作り出すことができ、メガネをかける必要がなくなる。この方法は、いろいろな方向から撮影した写真を合成する場合や、コンピュータグラフィックス画像などで非実在物の画像を表示するのに利用することができる。

図 2 左右の眼への異なった画像の表示
(瞳の結像)

3. 光の干渉と回折

レーザ光を光源として使用することにより、光の進行方向の記録と再生を自動的に実現することができる。まず、光の干渉について説明する。白色光は多数の波長（周波数）の光波の重ね合わせであるが、これに対しレーザ光は単色性が非常に良く、ほぼ正弦波と考えることができる。いま、レーザからの光を二つに分け、再び重ね合わせることを考える。重ね合わせた二つの光の位相が同位相の場合には、波の山と山、谷と谷が重なり合い、合成された波の振幅はそれぞれの波の 2 倍になる。光の強度は振幅の 2 乗に比例するため、合成された光の強度は各々の光の強度の 4 倍になる。一方、逆位相の場合には、二つの波は打ち消し合い、和は 0 となる。この位相関係は、ある観測点までレーザ光源から二つの光の通過する道のり（光路長）で定まり、光路長の差が波長の整数倍のときには同位相となる。ホログラフィの記録時に、記録材料（感光材料）上のそれぞれの点で位相差が変化し、この結果、空間的に分布した明暗の縞（干渉縞）が記録される。

図 3 は、点物体をホログラムに記録している場合の光学配置を示している。レーザからの光は二つに分けられ、一方の光は直接ホログラム記録材料に入射する。これを参照波と呼ぶ。図では、この参照波は記録面に垂直に入射する平行光としている。一方、分割された他方の光は物体を照明する光として用いられる。点物体に入射した光は反射され、球面に広がる波として記録面に入射する。複雑な三次元物体が被写体の場合にも、多数の球面波の重ね合わせとして取り扱うことができる。図 3 (b) は、ホログラム記録材料の上に作り出される明暗の縞を、実際の本数から大幅に（約 1/10,000 に）間引いて表わしたものである。物体からの光が記録面の垂直方向となす角度を θ 、干渉縞のピッチ（暗い縞の間隔）を P 、光の波長を λ とすると、

図 3 点物体のホログラフィ記録

次式の関係が成立する。

$$\sin \theta = \lambda_1 / P \dots\dots\dots (1)$$

波長 $0.6328 \mu\text{m}$ (赤色) のヘリウム・ネオンレーザを光源として用い、角度 θ が 45° のときには、ピッチ P は $0.895 \mu\text{m}$ となり、 1mm の中に $1,100$ 本の干渉縞が作り出されることになる。

この干渉縞は、高い解像力をもった銀塩感光材料に記録され、現像されて明暗の透過率分布となる。現像の結果得られたものをホログラムと呼ぶ。図4は、ホログラムを波長 λ_2 の平行光で照明している状態を示している。すべての波に共通した性質であるが、周期的な構造をもった物体（回折格子）に光波が入射すると回折光を生じ、所定の複数の方向（これを回折の次数と呼ぶ）に進む光が作り出される。格子のピッチを P 、一次回折光の進行方向を ϕ とすると、次式の関係が成立する。

$$\sin \phi = \lambda_2 / P \dots\dots\dots (2)$$

(1)式と(2)式を比較してすぐにわかるように、ホログラム照明時の波長 λ_2 を撮影時の波長 λ_1 と一致さ

図4 ホログラムの再生

せると、角度 ϕ は角度 θ に一致する。すなわち、記録（撮影）時の光の進行方向が再生時にはそのまま再現されることとなる。図1の説明で「光の進行方向が記録し、再現できる」ことを仮定したが、レーザを光源として干渉縞を記録し、得られたホログラムを同一波長の光で照明する操作で、これは自動的に実現される。図4において、ホログラム上の各点での一次回折光は空間中の点 S' から発散する光に進行方向と一致し、ちょうどこの点に点物体が置かれているように見える。

4. レーザ再生ホログラム

三次元物体のホログラムの撮影配置の一例を図5⁽⁷⁾に示す。撮影光学装置全体は、除震台の上に置かれた頑丈な定盤の上に配置される。レーザからの光はハーフミラーにより二つに分けられる。参照光は顕微鏡対物レンズで広げられて直接記録材料に入射する。他方の光は物体を照明し、物体から拡散反射された光は記録材料に入射して参照光と干渉する。現像処理後のホログラムを同一の配置で参照光だけで照明すると、元の物体が置かれていた位置に、完全な三次元画像が表示される。

ホログラフィでは、前述したように大変微細な干渉縞を記録することが必要であり、露光時間中には光の波長以下の動きしか許されない。このため被写体および撮影装置には金属などの剛性の高い素材を用いるのが望ましい。このレーザ再生ホログラムをカラー化するにはいろいろな方法がある。最もわかりやすいのは、赤・緑・青の3原色のレーザを同時に用いる方法である。3本のレーザをダイクロイックミラーなどで光軸を揃えて合成し、この波長域全体に感度をもつ記

図5 レーザ再生ホログラムの撮影光学系

録材料を使用することにより、フルカラーの三次元画像の記録・再生が実現できる。

5. 白色光再生ホログラム

ホログラムを用いて三次元画像の表示を行うにあたり、光源として電球などの白色光源が使用できれば用途を大幅に広げることができる。ところが、ホログラムをそのまま白色光源で照明したのでは、何が写っているのかわからなくなってしまう。これは、光の波長による回折方向の変化（分散）による。(2)式に表わすように、光の回折する角度は照明光の波長にほぼ比例する。可視光の波長範囲はおよそ $0.4\mu\text{m}$ から $0.7\mu\text{m}$ であり、この結果、一次回折光の進行方向は広い角度に広がってしまう。

白色光源でも良く見えるホログラムは、

- ① ホログラム画像を形成する光の波長広がり、適当な方法で制限し単色化する。
 - ② 再生画像をできるだけホログラム面に近づけ、ボケ量を減らす。
- の二つを同時に行うことで実現される。以下に、代表的な二つの方式を紹介する。

5.1 レインボーホログラム

光を当てる方向により、赤・緑・青などいろいろな色に見えることからこの呼び名がある。このホログラムは、通常2段階の撮影手順で作られ出される。図6はレインボーホログラムの第1段階の撮影光学配置を示しているが、これはレーザ再生ホログラムと同一である。最終的に得られるホログラムに広い視域（観察可能な領域）を確保するため、横に長いホログラムをまず撮影するのが特徴である。次に、図7の光学配置で第2のホログラムを撮影する。このとき、最初に撮影された第1のホログラムは数mm程度のスリットで上下方向の実効的寸法を制限する。またホログラム記録材料は、物体の実像が生じる位置の近傍に配置する。図8は、このようにして撮影されたレインボーホ

図6 レインボーホログラムの撮影(I)

図7 レインボーホログラムの撮影(II)

図8 レインボーホログラムの再生（観察）

ログラムを観察している光学配置である。このとき、図7で使用したスリットの像がホログラムにより結像され、観察者の顔の上には虹に似た色の帯が生じる。このレインボーホログラムの観察では、観察者の瞳が画像の波長広がりを制限するスリットの役割をし、単色化が達成される。

このレインボーホログラムは、印刷技術で大量複製が可能なることから、入場券、記念乗車券からクレジットカードの偽造防止マーク、そして記念発行の紙幣にまで大量に使用されている。

5.2 リップマンホログラム

このホログラムは、ホログラフィ記録材料の厚さ方向に干渉縞を記録し、得られた回折格子のブラッグ回折の特性によって反射回折光を狭い波長幅に制限するものである。図9は、「デニッシュ法」と呼ばれる最も単純な撮影光学配置を表わしたものである。レーザからの光は顕微鏡対物レンズを通して広げられ、直接記録材料に入射する。一方、被写体は記録材料の直後に置かれる。記録材料を透過した光は物体照明光となる。物体から拡散反射された光は記録材料内で参照光と干渉し、干渉縞を作り出す。図10は、得られたり

図9 リップマンホログラムの撮影装置

図10 リップマンホログラムの再生（観察）

リップマンホログラムを白色光で照明し、再生像を観察している光学配置である。ホログラムの上の部分には、物体から上に拡散反射された波面に対応した干渉縞が記録されていて、回折格子は入射する白色光から単色の光を取り出すとともに、元の光の進行方向に対応する方向に光を回折する。一方、ホログラムの下の部分からは、下から見た物体の画像が再生される。

6. 合成ホログラム・計算機ホログラム

これまで紹介したホログラムでは、実際の三次元物体にレーザー光を照射し、撮影を行っていた。ところが三次元画像表示では、日中屋外に置かれている大きな物体など、レーザー光で撮影困難な物体をホログラムにしたいという要求が多数ある。このためには、物体を多数の方向から撮影し、これをレーザー光を用いてホログラムに焼き込む方法が開発されている。この分野にもいくつかの方式が開発されているが、ここではその一つとして、マルチプレックスホログラムの作製方法

を紹介する。

図11は撮影から再生（観察）までの手順を簡略に表わしたものである⁽¹⁰⁾。被写体は回転テーブルの上に置かれ、35 mm 映画カメラで白黒フィルムに撮影される。現像処理後のポジフィルムは図11(b)に示す光学系で1コマずつ縦に細長い領域にホログラム撮影される。代表的な撮影コマ数は、1回転360°に対して1,440コマである。最初の撮影は、通常の写真撮影に用いられる照明光は何でも使用可能であり、またある程度の被写体の動きも許容できる。図11(c)は、マルチプレックスホログラムを観察している光学配置である。円筒の中心に配置された白色光源でホログラムは照明され、この光源からの光はホログラム面から適当な距離に集光される。細いスリットのホログラムからの回折光が左眼・右眼それぞれに対する画像を作り出す。この結果、円筒の内部に動く立体画像が観察される。マルチプレックスホログラムの画像は、1枚の画像の中に観察方向と撮影時刻の異なった画像が含まれていて⁽¹⁰⁾わかりにくくなっている。

このほかにも多くの種類のホログラムの合成法が開発されている。合成の元になる画像は写真以外にもコンピュータグラフィックス画像やTV画像でもよく、また第1段階の写真撮影に換えて液晶空間光変調器を用いる研究も進展している。また、ホログラム上の格子の形状を直接計算し、表示を行う計算機ホログラムの技術開発も進められているが、これらに関してはそれぞれの文献を参照されたい。

7. おわりに

以上、三次元画像表示に用いられる各種のホログラフ技術を紹介した。

三次元画像の技術解説にあたり、いつも痛感するのは、必要な情報を的確に伝達することの難しさである。実際の三次元画像を前にして初めて、特定の事柄の指摘が可能になる場合もたびたびある。この解説では少しでも理解を深めていただくため、できるだけ実物を想定できるような図版を選択したつもりである。

(a) 映画フィルムへの撮影

(b) ホログラムの合成

(c) マルチプレックスホログラムの再生（観察）

図11 マルチプレックスホログラムの撮影から観察まで

より理解を深めるには、多数のホログラフィ作品を注意深く鑑賞することが役に立つ。更に深く理解するには、自分自身の手でホログラムの撮影を行うのが最良の方法であり、ぜひお勧めする次第である。

(平成4年4月28日受付)

文 献

- (1) 桑山：「立体映像とホログラフィ」，テレビジョン学会技術報告 12, 29, OPT'88-8, p.1 (昭53-7)
- (2) 中島・花野：ディスプレイホログラフィーハンドブック (昭60) 暁印書館
- (3) 本田：ホログラフィーのはなし (昭62) 日刊工業新聞社
- (4) 辻内，編著：ホログラフィックディスプレイ (平2) 産業図書
- (5) 塩崎：「ホログラフィ・アートスクールを運営して」，写真工業 通巻497号，p.60 (平2-9)
- (6) 桑山：「ディスプレイ用ホログラムの制作方法(6)——干渉縞の記録と光の回折」，同上，通巻488号，p.106 (平1-12)
- (7) 勝間：「ディスプレイ用ホログラムの制作方法(2)——レーザー再生ホログラムの撮影光学系」，同上，通巻484号，p.90 (平1-8)

- (8) 桑山：「レインボーホログラムの基礎」，同上，通巻500号，p.101 (平2-12)
- (9) 勝間：「ディスプレイ用ホログラムの制作方法(1)——リップマンホログラム」，同上，通巻483号，p.102 (平1-7)
- (10) 桑山：「マルチプレックスホログラムの起源」，光学，12, 109 (昭58)

桑 山 哲 郎

昭和26年生。48年東京工業大学機械物理工学科卒業。50年同大学院修士課程(機械物理工学)修了。同年キヤノン株式会社入社。中央研究所において物理光学を応用した光学素子・装置の研究開発を担当。現在、キヤノン株式会社研究開発本部技術標準課課長。千葉大学工学部画像工学科(画像技術史)非常勤講師。日本写真学会，応用物理学会，精密工学会，日本光学会，SPIE 会員。