

# 知っておきたいキーワード

## ホログラフィ

正会員 高木 康博†

†東京農工大学 大学院 共生科学技術研究院

"Holography" by Yasuhiro Takaki (Institute of Symbiotic Science and Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo)

キーワード：ホログラフィ，立体映像，空間光変調器，イメージセンサ

### ホログラフィとは

ホログラフィは立体像を記録・表示する技術です(図1)。ホログラフィは、将来の映像技術として古くから注目されていて、SF映画には頻りに登場するのはご存じの通りです。ホログラムは、静止画を表示する立体写真として実用化されていますが、動画表示となると難易度が高い技術です。現在、日本を含む世界各国で、将来のテレビ技術として研究が進められています。

ホログラムと、われわれが普段使っている2次元映像とはどこが違うのでしょうか。まずは、写真技術としてみたときの通常の写真とホログラムの違いについて説明します。



図1 ホログラム写真

(提供：日本大学理工学部吉川研究室)

通常の写真は、図2(a)に示すように、物体で反射された光、あるいは物体から発せられた光をレンズで結像し、像面に得られた光の強度分布をフィルムに記録します。照明には、太陽光や蛍光灯などの通常の光(インコヒーレント光)が用いられます。

ホログラムの記録を図2(b)に示します。ホログラムの記録には、コヒーレント光であるレーザー光が用いられます。コヒーレント光とは、時間的にも空間的にも位相がそろった光で、数学的には振動が無限に続く正弦波で表されます。光の位相が等しい点で作る面を等位相面とか波面と言いますが、ホ

ログラムでは、レーザー光で照明した記録物体から反射された光の波面である物体波を記録し再生します。そのために、参照波と呼ばれるレーザー光をフィルム上で物体波と干渉させます。このとき得られる干渉縞の強度分布をフィルムに記録し現像したものがホログラムです。これを、図2(c)に示すように、再生波と呼ばれる参照波と同一のレーザー光で照明すると、物体波が再生されます。フィルムは光の強度にのみ反応しますので、ホログラムは、波面の位相分布を干渉縞の強度分布に変換してフィルムに記録可能にしていると考えられます。

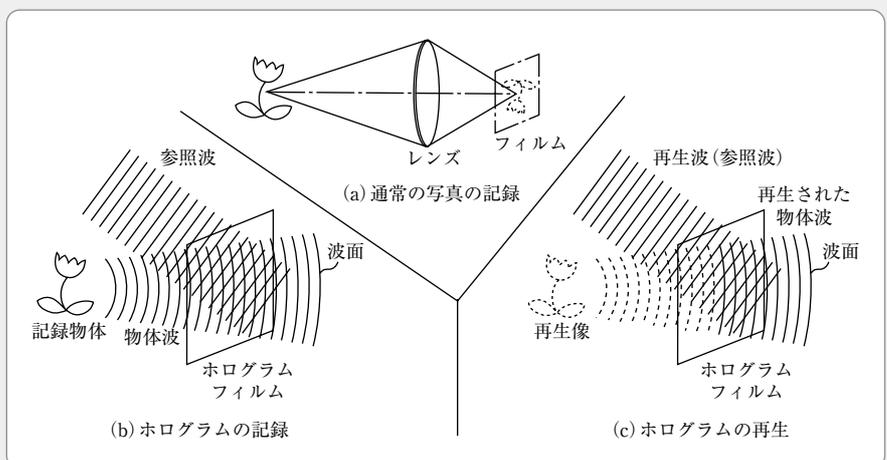


図2 通常の写真とホログラムの比較

### ホログラムの記録・再生の原理

図3 (a) に、ホログラムの記録を示します。光の波面は時間とともに空間を移動していきませんが、一点で見ると物体波と参照波の位相の違いは時間によらず一定です。位相差によって重ね合わせた光の強度が決まります。位相差が $\pi$ の偶数倍の場所(図の●)では強め合い、 $\pi$ の奇数倍の場所(図の○)では弱め合います。このように、物体波と参照波の位相差により光強度の強弱の分布である干渉縞が発生します。

干渉縞の間隔は光の波長オーダーになりますので、ホログラムフィルムには非常に高解像度なフィルムが用いられます。実用的なホログラムの記録には、5,000本/mm程度の解像度が必要であると言われています。

つぎに、図3 (b) にホログラムの再生を示します。再生波として参照波と同一の光を用いて、ホログラムを照明します。フィルムの不透明部分が記録時に強め合いの干渉が生じた部分で、ここで再生波が散乱され、多くの散乱波の重ね合わせで新しい波面が生じます。すなわち、光の回折が起こります。

このとき、 $l+l'$ が光の波長 $\lambda$ と等しくなる方向に進む波面が発生します。この波面は、記録した物体波と同一の波面になります。したがって、物体波が再生されることとなります。

図4に示すように、 $l+l'$ が光の波長 $\lambda$ と等しくなる波面の方向には、参照波(再生波)の進行方向に対して対称な

方向もあります。この波面は、記録した物体波の波面を反転した波面になり、フィルムに対して先ほどの再生像と対称な位置にもう一つの再生像が発生します。これを共役像といいます。

また、フィルムの不透明部分を通して後も、そのまま直進する波面も存在します。これをゼロ次光といいます。

以上のように、ホログラムの再生では、再現された物体波による再生像のほか、共役像とゼロ次光が発生します。これらが再生像に重ならないようにする必要があります。具体的には、物体波と参照波に角度をつけて記録することで、再生像の表示方向とゼロ次光や共役像の表示方向を分離します。

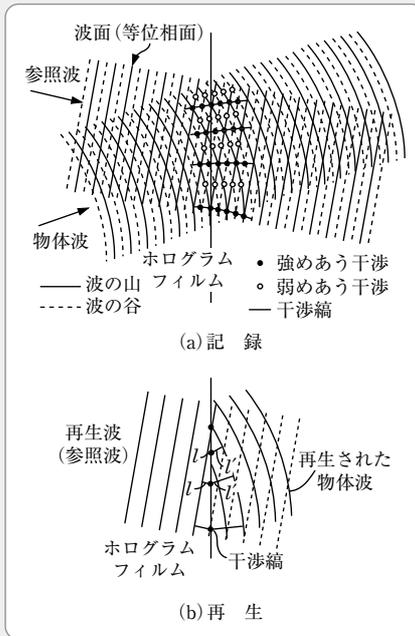


図3 ホログラムの記録・再生

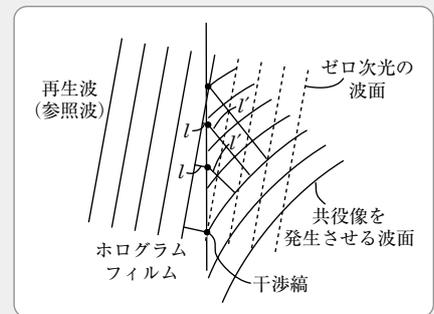


図4 共役像とゼロ次光の発生

### 電子的なホログラム

つぎに、動画表示を行うためにホログラムを電子的に実現することを考えてみましょう。図5に示すように、ホログラムの干渉縞をイメージセンサで記録し、液晶ディスプレイなどの非発光型の表示デバイスに表示しレーザー光で照明します。ホログラフィの分野では、このような表示デバイスを空間光変調器と呼びます。干渉縞の間隔は、波長オーダーになりますから、非常に小さなピクセルピッチを有するイメージセンサと空間光変調器が必要になります。スクリーンサイズを現在の2次元ディスプレイ程度にしようとする、ピクセル数は数十万×数十万と莫大な数になります。また、映像のデータ量も莫大になり、伝送や蓄積も大変になることがわかります。

このように、写真としてのホログラムの原理を、そのまま動画表示に用いることはかなり難しいことがわかります。このため、ホログラムの動画表示を実現するためにさまざまなアイデアが提案されています。

最も有名な方法は、垂直視差を放棄

した水平視差型ホログラムです。この場合、垂直方向には波面を再現する必要がないため、干渉縞の密度は垂直方向に粗くなり、空間光変調器に必要なピクセル数が2乗のオーダーで減少します。ただし、垂直視差がなくなりますので、視点を上下に動かしても

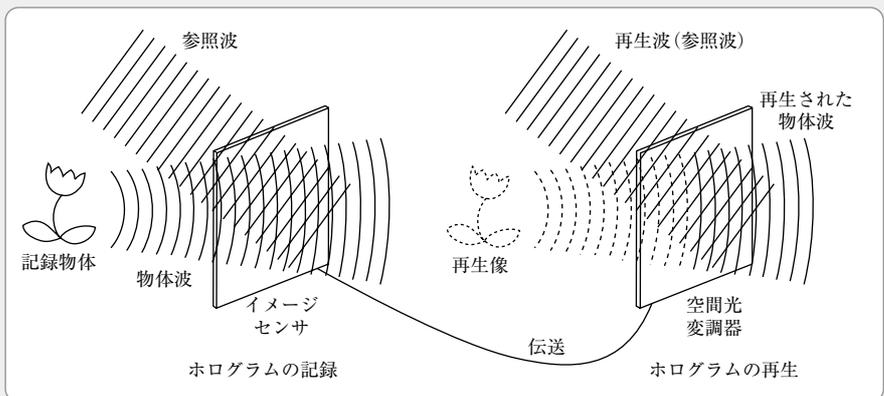


図5 電子的なホログラムの記録・再生

見える画像は同一です。実際、映像を見るときに観察者は視点を左右に頻繁に動かしますが、上下方向の移動は身体の積極的な移動が必要であることを考えると、有効な方法であると言えます。

ただし、水平視差型ホログラムでも、水平方向には非常に小さなピクセルピッチと多くのピクセル数が必要です。この問題を解決した有名な方法に、**図6**に示す音響光学素子を用いた方法があ

ります。音響光学素子とは、透明な結晶に超音波振動子を取り付けたもので、結晶内を超音波が進行することで密度の粗密が生じ、それが屈折率分布を発生します。結晶内での超音波の速度は遅いので、マイクロオーダーの屈折率分布が発生します。超音波光学素子自体の変調長さは短いため、変調した光をミラーで縦横に高速に走査します。そうすると、水平視差型ホログラムが表示できることとなります。

超音波光学素子を用いた方法以外にも、さまざまな動画表示ホログラフィ技術が提案されています。しかし、現在の2次元ディスプレイに取って代わるような性能を有するものは、残念ながら現状では存在しません。表示方式やデバイスの開発など、これからやるべきことが多く残されている分野であると思います。  
(2007年10月5日受付)

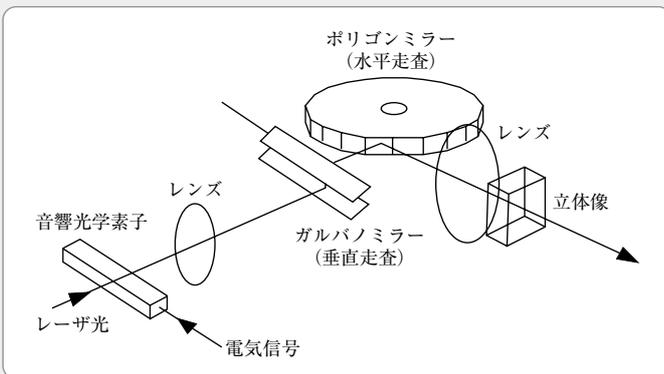


図6 音響光学素子を用いたホログラフィックディスプレイ

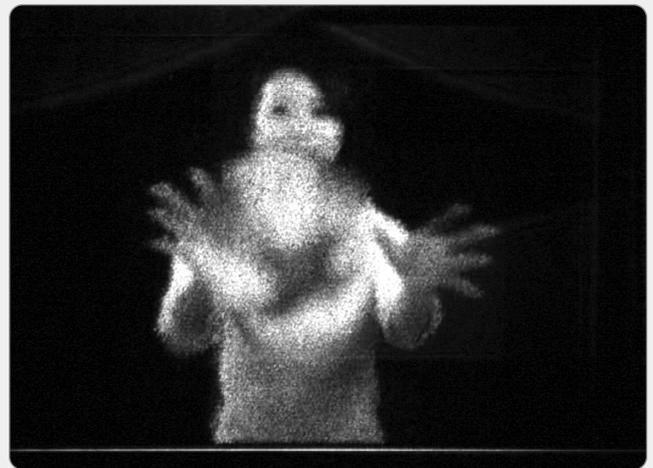


図7 最新の電子的なホログラム動画像  
(提供：情報通信研究機構，NHK放送技術研究所)

### 参考文献

- 1) 沼倉利朗編著：“ホログラフィ”，電子工学進歩シリーズ，コロナ社
- 2) P. St. Hilaire, S.A. Benton, M. Lucente, M.L. Jepsen, J. Kollin, H. Yoshikawa, and J. Underkoffler: "Electronic Display System for Computational Holography", SPIE, 1212, pp.174-182 (1990)



**高木 康博** たかき やすひろ 1986年，早稲田大学理工学部卒業。1988年，早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。1992年，同研究科博士後期課程修了。1991年，同大学助手。1994年，日本大学文理学部専任講師。1998年，同助教授。2000年，東京農工大学工学部助教授（現在，准教授）。主として，立体映像技術に関する研究に従事，博士（工学），正会員。

### キーワード募集中

この企画で解説して欲しいキーワードを会員の皆様から募集します。ホームページ (<http://www.ite.or.jp>) の会員の声より入力可能です。また電子メール ([ite@ite.or.jp](mailto:ite@ite.or.jp))，FAX (03-3432-4675) 等でも受け付けますので，是非，編集部までお寄せください。  
(編集委員会)