資 料

ホログラフィ[†]

—基礎と照明への応用—

正会員 加屋野 洋*

1. はじめに

ホログラフィは、1948年に Gober によって考案された波面再生法 (Wavefront Reconstruction) と呼ばれる技術である。Gober は電子線による物体の回折波とバックグラウンド波とを重ね合わせ、物体の回折波の振幅と位相を干渉縞パターンとして写真に記録し、これを光波で照明し光学像として物体を再生した。しかしながら、当時はコヒーレント性の良い光源がなかったためにこのホログラフィは発展しなかった。

1960 年ごろからレーザが開発され、コヒーレントな光源が使えるようになり、1962 年には Leith らが 2 光束法によるレーザホログラフィを発表した。この研究は今日のホログラフィの基礎を作ったと言える。一方、1962 年に Denisjuk は Leith らとは異なった形のホログラフィを発表した。そして Gober, Leith および Denisjuk ら以後のホログラフィの発展は目覚ましいものがあり、立体ディスプレイ、計測、光情報処理など多方面への研究が盛んに行なわれている。

2. ホログラフィの数学的記述^{1)~3)}

ホログラフィは物体光の波面の振幅と位相の情報を記録してホログラムを作成することである。ホログラムの材料となる一般的な記録 (感光) 材料は光の強度に感度をもつので、物体光のもつ振幅と位相の情報を光の強度分布に変換して記録する必要がある。このため物体光と参照光を記録材料上で重ね合わせて干渉縞をつくり、その強度分布を記録する。図 1 において、物体 O から記録材料 H に達する物体光の複素振幅を $a(x, y)$ 、これと参照光の複素振幅を $A(x, y)$ で表すと、

$$a(x, y) = a(x, y) \exp[-j\phi(x, y)] \cdots \cdots (1)$$

$$A(x, y) = A(x, y) \exp[-j\psi(x, y)] \cdots \cdots (2)$$

となる。 $a(x, y)$ と $A(x, y)$ により生じる干渉縞の強度分布 $I(x, y)$ は次のようになる。

$$I(x, y) = |A(x, y)|^2 + |a(x, y)|^2 + 2A(x, y)a(x, y)\cos\{\psi(x, y) - \phi(x, y)\} \cdots \cdots (3)$$

式(3)の 1, 2 項はそれぞれ参照光及び物体光の強度に等

図 1 ホログラフィの記録と再生

しく、その和 $|A|^2 + |a|^2$ はこの干渉縞の平均強度を表している。3 項は物体光と参照光の振幅と位相の情報を含んでおり、干渉縞の強度変化を示している。この干渉縞の強度 $I(x, y)$ を記録材料 H に記録し、ホログラムを作成する。

参照光の強度 $|A|^2$ が一定であるとし、露光・現像後のホログラムの振幅透過率を $t(x, y)$ 、再生光を $B(x, y)$ とすると、ホログラムからの再生波面は次のようになる。

$$B(x, y) t(x, y) = t_0 B + k a a^* B + k A^* B a + k A B a^* \cdots (4)$$

ここで、 t_0, k は定数である。いま、再生光 B が一定であるとする、式(4)の 1, 2 項は再生光 B が t_0 及び $k a a^* = k |a|^2$ の減衰を受けて透過する光をそれぞれ表わしている。3 項は物体光と全く同じ波面 a に $k A^* B$ (減衰) の係数がかかっているだけで物体光の再生である。これは物体と同じ像をホログラム後方に虚像として結像していることになり、あたかも物体から波面が伝搬してくるような光を表わしている。4 項は物体光と複素共役な光 a^* が $k A B$ の変化を受けて透過した光を表わしている。

このような原理に基づいて、いろいろな形のホログラフィが発表されているが、新しい分野への応用が注目されている計算機合成ホログラフィについて述べる。

† Horography — Basic concepts and application for lighting —

* 山梨大学理学部 Hiroshi Kayano

〒753 山梨市吉田 1677 - 1

3. 計算機合成ホログラフィ^{1), 2)}

上で述べたようにホログラムは物体光と参照光との干渉縞の記録であるので、物体光や参照光の振幅と位相がわかれば、計算機を用いて両光波の重ね合わせによる干渉縞の強度を計算し、それをプロッターなどを用いて図化し、ホログラムを合成することが可能である。このようにして作成されたホログラムを計算機合成ホログラムと言う。このホログラムは人為的に任意の波面が簡単に作成できるなど他のホログラムにない特徴がある。

計算機合成ホログラムは一般にセルに開口を開け、その形及び位置を変化させることによってホログラム自身の複素振幅透過率を調整する。しかし、このセルの開口の作成には大きく分けて3つの種類のものがある。①開口の面積と位置の両方を変化させるもの、②開口の面積を変化させ位置は変化させないもの、③開口の面積は変化させず位置を変化させるものがある。①の方法としてはLohmann⁴⁾のホログラムがある。このホログラムは各セル中に各々1個の方形の開口を設け、その開口の形や位置で複素振幅を与える方法である。この方法はホログラムの作成は比較的容易であるが回折効率が悪いことである。②の方法はLee⁵⁾のホログラムに代表されるものであって、複素振幅透過率をそれぞれ4個の開口によって表現する方法である。利点としては開口の重なりがない点が挙げられるが、計算が①と比較すると面倒である。③の方法としてはHuseh-Sawchuk⁶⁾の2位相ホログラム(Double Phase Hologram, DPH)がある。この方法は開口の大きさが常に一定であるために①、②と比較すると回折効率は良いがパリティノイズが発生する。計算機合成ホログラムを光情報処理^{1), 3)}や光通信⁷⁾などに応用する場合にはできるだけ回折効率が良くノイズがないことが要求される。したがって、パリティノイズが低減できれば③のホログラムが最も有望である。

Huseh-SawchukのDPHは図2に示すように、1つのセルを2つのサブセルに分け、そのサブセルの半分の面積をもつ開口を開け、その2つの開口の複素振幅のベクトルの和によってそのセルの複素振幅を得る方法である。すなわち、ホログラム面上の1つのサンプル点の複素振幅

図2 DPHの1セル

(a) DPHの原板(物体: 文字F)

(b)再生像(計算機シミュレーション)

図3 DPHとその再生像

$A \exp(j\theta)$ を、

$$A \exp(j\theta) = 1/2 \exp[j(\theta + \psi)] + 1/2 \exp[j(\theta - \psi)] \quad (5)$$

$$\psi = \cos^{-1} A \quad (6)$$

と表わすと、式(5)、(6)より開口の位置 d_1 、 d_2 は、

$$d_1 = d(\theta + 2)/2\pi \quad (7)$$

$$d_2 = d(\theta - \psi)/2\pi \quad (8)$$

となり、開口の位置でそのセルの複素振幅を表わすことができる。この方法は開口の面積を大きく取れるため回折効率の良いホログラムを作成することが可能である。

一方、Huseh-SawchukのDPHは式(5)に示すように2つのベクトルの和によって目的の複素振幅を表わすためパリティノイズが発生する。このパリティノイズを低減するために、Huseh-Sawchukは1つのセルを4、8、16、…のサブセルに分割する方法を提案している。さらに簡単で有効な方法として、3つのサブセルに分割する方法⁸⁾なども提案されている。図3はDPH及びその再生像(計算機シミュレーション)の1例を示したものである。

ホログラフィは物体とホログラムの位置関係によって2種類に分けることができる。物体からホログラムまでの距離が近いときは物体光はフレネル回折波であるのでフレネルホログラフィという。これとは逆に、物体がホログラムから無限遠にあるときには物体光はフラウンホーファ回折波であるのでフラウンホーファホログラフィという。しか

し、無限遠におくことは実際には不可能で、フーリエ変換レンズによりその焦点面にホログラムを作成する。この場合のホログラムをフーリエ変換ホログラムと言い、計算機合成ホログラフィで良く用いられる。フーリエ変換ホログラムはフーリエ面に強い光がスパイク状に分布する。このスペクトル強度の大きい部分にダイナミックレンジをあわせるとスペクトル強度の小さな部分はダイナミックレンジから外れてしまい線形的な記録が行えない。逆もまた同様である。このような非線形的記録は、再生時に大幅な像劣化と回折効率の低下をもたらすことになる。したがって、フーリエ変換ホログラムは強度分布を均一化するためにランダム位相を付加する方法が用いられているが、この方法は再生像にスペックル状のノイズを発生する。スペックルノイズの発生をおさえる方法として周期的な位相や球面波位相⁹⁾を付加する方法が提案されている。

再生効率がよく、極めて明るい再生像を得ることのできる一種の計算機合成ホログラムとしてキノフォーム¹⁰⁾がある。ホログラムが物体光及び参照光の振幅と位相を記録材料にしたものであるのに対し、キノフォームは波面の複素振幅のうち振幅成分を一定であるとみなして、位相情報のみを計算し、この位相成分を厚さの変化に変換して記録材料に記録した一種の位相板である。キノフォームの大きな特徴は位相条件が整合した理想的なキノフォームでは入射光のエネルギーのほとんど全てが像再生に寄与し、光の利用効率が極めて高い点である。このような特徴を生かしてホログラムレンズや多機能レンズなどの研究が盛んに行われている。

4. ホログラフィの照明への応用

ホログラフィの照明への応用として Holographic Window¹¹⁾がある。図4は Brown 大学で行われたモデル実験の Holographic Windows の原理を示したものである。窓は単なるガラス板ではなく、図のようなホログラフィック回折構造 (Holographic Diffraction Structure, HDS) をもつ Holographic Window が取り付けられ、窓から入射した光は HDS で上向に回折して室の奥の方まで伝わる。

HDS を用いたこのモデル実験では普通の透明な窓ガラスを用いた場合に比べて2倍以上の明るさが室の奥の方でも得られ、太陽の高度には拘らず机上の明るさを30-230%改善することができた。一方、夏の高い太陽光線のために設計された HDS で冬の低い太陽光線をどのように有効に捉えるか、朝早くから夕方遅くまでの受光角をどのように広げのかなど検討すべき問題もある。しかし、室内に効率良く光を取込むために太陽の動きを自動追跡する反射鏡のような装置を用いるとコストが高くなるのに対して、HDS は低コストで大量生産が可能であるなど多くの利点をもっている。

HDS はほとんど透明であるが、回折格子であるため HDS を透過した光 (太陽光) は色のついた光 (虹色) に分散する。アトリエやロビーなどで色のついた光を必要と

図4 Holographic Windows の原理図

する場合があれば現在のホログラフィ技術でも使用可能である。しかし、色のついた光はオフィスの照明などには不適當である。照明には一般的に白色光が必要であり、白色光の HDS の研究・開発が待たれる。

5. おわりに

現在、ホログラフィについての基礎研究や応用研究が盛んに行なわれている。しかし、ホログラフィとその周辺技術はまだ揺籃期にあり、基礎研究を積み重ねなければならない。また解決しなければならない問題も山積しているが、ホログラフィが光エレクトロニクス分野において重要な新技術であることは明らかである。さらに、このホログラフィ技術は将来にかぎらない発展を秘めており、各種の産業分野で大きな役割を果たすことが期待される。

参考文献

- (1) 辻内順平、村田和美：光学情報処理、朝倉書店 (昭49)
- (2) 大越孝敬：ホログラフィ、電子通信学会 (昭52)
- (3) 辻内、一岡、峯本：光情報処理、オーム社 (平成)
- (4) Lomann, A. W. and Paris D. P.: Binary Fraunhofer holograms generated by computer, *Appl. Opt.*, **6**, 10 (1967) 1739
- (5) Lee, W. H.: Sampled Fourier-transform hologram generated by computer, *Appl. Opt.*, **9**, 3 (1970) 639
- (6) Hsueh, K. and Sawchuk, A. A.: Computer-generated double-phase holograms, *Appl. Opt.*, **17**, 24 (1978) 3874
- (7) Wakabayashi, K., Yoshikawa, M. and Kayano, H.: Excitation of selective multiplex mode of graded-index optical fibers by holographic filter, *Trans. IEICE*, **E71**, 2 (1988) 125
- (8) 広川、吉川、加屋野：計算機合成2位相ホログラムのバリエーションノイズの低減、電子情報通信学会論文誌C-1, Vol. **J72-C-1**, No. 1 (1989) p. 39
- (9) 田嶋、吉川、加屋野：球面波位相板による計算機合成ホログラムの再生像におけるスペックルノイズの改善、電子情報通信学会論文誌C, Vol. **J74-C**, No. 4 (1988) p. 584
- (10) Lesem J. P., Hirsch P. and Jordan J. A.: The Kinoform: A new wavefront reconstruction device, *IBM J. Res. Develop.*, **13**, 3 (1969) 160
- (11) Morton S.: Holographic Windows, *Popular Science*, **236**, 2 (1990) 80

(受付1991年11月5日)