ホログラフィ実用技術とその展望*

辻内順平**

Recent Trends of Applications of Holography / Jumpei TSUJIUCHI

Key words: holography, laser, interferometry, 3D image display, optical elements, information processing, security, electron holography, acoustical holography

1. ま え が き

1948年 D. Gabor によって発明されたホログラフィは、1960年代の初め E. N. Leith と J. Upatnieks によってレーザが導入されるに及んで、光の波面が記録・再現できる新しい光技術として注目を浴び、その後極めて多くの研究が行われた。その結果、多くの新しい技術が開発され、バラ色の期待に満ちた前途が予想された。

しかし、現実には期待に反し、実用となった技術は意外に少なく、ホログラフィ産業の成立は幻に終わるようにさえ見えた。これは、新しい技術が既成の技術にとって代わるためには、余程の新機能、高精度、低価格、使いやすさ等のメリットがないと成功しないが、この条件を満たす用途はなかなか見つからなかったことによる。これは、ホログラフィに対する過剰な期待があったことも原因して、ホログラフィに関する研究は衰退し、特に工業界はその開発に意欲を失ったように見えた。

最近になって、この傾向は徐々に変わってきたようである。今までの検討の結果、ホログラフィに対する過剰な期待がなくなったこと、ホログラフィが本当に役に立つ分野がはっきりしてきたこと、ホログラフィを支援する周辺技術、例えば新しい感光材料が進歩したこと、ホログラフィで可能な技術の中で比較的単純で分かりやすいものから実用への検討が始められていることなど、比較的足を地につけた技術開発が進められていることによる。これに伴って、最近ではホログ

ラフィを主題とする国際会議や国際セミナーが増え、そこで議論されるテーマも上に述べた傾向が伺われる。

本稿では、ホログラフィの応用が進んでいる各分野別に、これまでの経過、現状並びに今後の展望について私見を述べたいと思う。それぞれの技術の詳細については、専門家の解説が続くはずなので、そちらをご覧頂きたい。

2. 計 測 技 術

まず、本学会として最も関心の深い分野は計測への応用であろう。ホログラフィによる計測として最もよく使われるものはホログラフィ干渉であって、被測定物体のホログラムを2回撮影し、その間における物体の変化を干渉測定する技術である。したがって、表面が光学的粗面であっても測定が可能であり、従来の干渉測定の対象外の物体、たとえば機械仕上の面とか、紙や木材のようなものにまで適用できるようになった。

ホログラフィ干渉は、粗面物体の変形、振動の測定に利用され、機械工業、音響工業等で重要な測定方法となっている。さらに、呼吸に伴う腹部の変形の測定から腹部の腫瘍の診断に使うとか、鼓膜の振動を測定して耳鼻科の診断に使うなど医学分野での応用も検討されている。

感光材料には、銀塩感材のほかに、サーモプラスチック材料が普及し、現像が容易で、実時間干渉が容易に行われるようになってきた。さらに、計算機との組合せによって、干渉じまの解析が自動的に行われるようになり、測定技術も容易になってきた。

* 原稿受付 平成2年7月18日

** 千葉大学工学部 (千葉市弥生町1-33)

一方、ホログラフィ干渉によく似た測定方法にスペckル干渉という技術がある。これはレーザ光で照明された粗面によって生じるスペckルパターンに参照光を重ねて干渉じまを作り、ホログラフィ干渉と同様に物体の変形の前後にこの干渉じまを撮影し、両者の差または積をとれば、ホログラフィ干渉と全く同じ干渉じまが現れ、測定ができる。これも考え方によっては、Gabor 型ホログラムを使ったホログラフィ干渉とみなすことができ、干渉じまの空間周波数を低くとることができるので、感光材料の代わりに TV カメラが利用でき、最初の干渉じまを撮影してからこれをメモリーに格納し、次いで第 2 回目の撮影を行ってその差をとれば良い。感光材料を使わないので、実用性は著しく向上した。スペckル干渉特有の雑音の多い干渉じまも、計算機処理で測定には差し支えを生じない。

粗面ではない光学的研磨面に対しても、ホログラフィ干渉は重要な技術を提供している。たとえば、非球面の精度測定において、理想的な非球面から反射する波面と全く同じ波面を再生するホログラムを計算機で合成し、両者の干渉によって非球面の製作誤差を測定することができる。

これと似た方法に、正しく作られた歯車の歯面のホログラムを撮影し、この再生波と被測定歯車の歯面から反射した光を干渉させ、被測定歯車の加工精度を測定する方法が提案されている。この場合、歯面の表面の仕上は鏡面ではないため、歯面への入射角を大きくとり、表面の仕上の影響が出ないようにしている。

3. 3次元画像表示技術

ホログラムから再生される像は、目の調節作用を伴うきわめて自然な立体感を示すので、優れた 3 次元画像表示の手段、いわゆる立体写真として使えることは 1960 年代の半ばころから期待されていた。しかし、像の再生にレーザが必要であったり、また撮影対象となる物体の制限が大きく、実用になるためには問題が多すぎた。1960 年代の終わりのころのアメリカの S. Benton によるレインボウホログラムの提案、1960 年代の初めころ提案されていたソ連の Yu. I. Denisjuk による厚い感光材料を使ういわゆる Lippmann ホログラムの再評価によって、ホログラムの白色光再生が可能となり、3 次元像表示の実用化が進んだ。

感光材料の方も、初期に使われていた Kodak 社の分光写真用乾板 649 F にかわって、西ドイツの Agfa-Gevaert 社をはじめとするホログラム専用感光材料の発売、明るい Lippmann ホログラムが作れる重クロ

ム酸ゼラチンの開発、エンボス手法によるレインボウホログラムの大量複製技術の確立などが、ホログラムによる 3 次元像表示の実用化を促進した。

さらに、1970 年代の初め、アメリカの L. Cross が多数の普通写真から合成したレインボウホログラム、いわゆるホログラフィックステレオグラムを開発し、撮影に制限の多かった被写体を大幅に拡張することに成功した。

これらの背景により、現在では多くのホログラムがエンボス技術により複製されて雑誌や書籍の表紙や挿し絵に使われ、またクレジットカードにも添付されて偽造防止の役割も果たしている。また、Lippmann ホログラムやホログラフィックステレオグラムを用いた肖像写真も普及しはじめている。

また、ホログラムによる 3 次元表示と再生像が示す光の美しさを利用して、芸術作品を制作するいわゆるホログラフィ芸術と言われる分野が生まれ、多くのホログラフィアーティストが活躍している。これにともなう、各地にホログラム展示場やギャラリーが作られ、室内外装飾やショウウィンドウのディスプレイなどに進出している。

さらに、X 線透過像、CT、MRI、超音波等の医学用画像からホログラフィックステレオグラムを合成し、医学診断、教育、医用標本の収集に利用する計画も進められている。また、この技術はそのまま、CAD 等の設計データからホログラムを合成し、完成品の外観を 3 次元表示するのにも使うことができる。

4. 光 学 素 子

ホログラムの光の波面を記録する性質は、レンズや鏡などの光学素子として利用できる。この種の応用として最も早く実用になったのは回折格子であって、二つの平面波または球面波で作った干渉じまをフォトレジストに記録し、表面にアルミニウムなどをめっきしたものであって、1970 年代の初めころからフランスの Jovin-Yvon 社によって商品化され、現在までに多くの分光器に搭載されている。最初のころはブレース格子の製作が難しいという欠点があったが、最近では種々の方法でこの欠点がカバーされ、実用性も一段と高まっている。

わが国で早くから開発に着手した技術は、ホログラムによるスキャナである。これは、多くのホログラムを円盤上に配置して回転させ、ホログラムによる回折光の方向を高速で変化させて、微少な光の点で走査を行う装置であって、身近な応用にスーパーマーケットで使われるバーコードリーダーがある。この場合には、

ホログラムの収差を補正して、できるだけ小さい点で走査することが必要であり、計算機によるホログラムの合成、特殊なホログラムの記録法など、興味ある技術が用いられている。

ホログラム光学素子の特徴は、小さく軽いものが多いこと、複数の機能を盛り込めること、容易にかつ安価に複製ができることなど多くの特徴があるが、これらの特性をうまく利用したものにコンパクトディスクのピックアップがある。光導波路のカップリングをホログラムで行う形式のもの、複数の小さなホログラムを瞳にはりつけた光学系を使うものなど、ホログラムの特性が巧みに利用されている。

ホログラム光学素子は、普通のレンズや鏡では不可能な性質を簡単に実現できるという特徴があり、特殊な測定器や、光学系に利用されている。たとえば、光の方向を任意にとることができるビームスプリッタや反射鏡、光の波面を横にずらして干渉させるシアリング干渉計の波面分割素子、物体の多重像を作る結像系等、多くの例を見ることができる。

これまで述べてきた光学素子は、いわゆる薄いホログラムとして製作できることが多く、その欠点の一つに回折効率の低さが挙げられていた。厚いホログラムとして製作すれば回折効率を上げることができるが、複製に手数がかかり、大量生産には向かない。最近になって、フォトリソスト等に深い溝を持った表面レリーフ型のホログラムが高い回折効率を示すことが明らかになり、この性質を利用して複製がしやすく、かつ回折効率の高い素子の実現が期待できるようになってきた。また、この種のホログラムは顕著な偏光依存性を示すことがあり、偏光素子としても興味深い。

最近、注目を集めている光学素子は、ホログラフィックヘッドアップディスプレイ素子である。これは、航空機のパイロットが、外景と計器板とを同時に、同じ視度で、しかもなるべく光の損失を少なくみて見ようという目的で使われる素子であって、従来はパイロットの頭上においたCRTの画面に計器情報を表示し、複雑な光学系と半透明鏡を組み合わせたものが使われていたが、これをホログラムを利用して簡易化しようというものである。現在では、CRTの表示カラーに合わせたLippmannホログラムを1枚か2枚用いて、広い視野と明るい像が得られるシステムが実現され、軍用機などに使われている。これからの動向として、民間機や自動車にも類似の方式を採用することが考えられ、盛んに開発が行われ、既に一部の自動車用のシステムが市場に出始めている。この場合の問題点は、ホログラムの耐久性である。軍用機と違

い、民間機、特に自動車では数年の耐久性が必要であり、この問題の解決が実用への鍵となっている。

5. 情報処理関連技術

情報処理分野におけるホログラフィの応用は、1960年代ホログラフィの発展の初期から、種々の提案が行われてきた。これらは、いわゆるアナログ光情報処理と言われるものであって、フーリエ変換ホログラムを空間周波数フィルタとして利用して、画像の処理を行うホログラフィックフィルタリングである。代表的なものとして、マッチトフィルタ、コード変換、デコンボリューションがあるが、現在ではマッチトフィルタ以外はほとんど使われなくなっている。これは、計算機の機能の向上と普及によるものであって、大型の装置とデリケートな実験技術が要求されるホログラフィックフィルタリングは実用技術にはなり得なかった。マッチトフィルタリングは、ホログラフィの特性を最もよく利用した技術の一つであって、空間光変調器の実用化が進んでいる現在では、唯一有望な技術として存在価値を持っている。たとえば、時計等の工業製品の検査、ICマスクの欠陥検査などに使われた実績がある。

ホログラフィによるメモリーが注目された時期があったが、その後コンパクトディスク等で使われている位相ビット記録方式が優勢になって、現在では特殊用途以外では実用は考えられていない。一方、最近問題となっている連想メモリーを実現する手段として、マッチトフィルタリングを併用したホログラフィックメモリーが、オプティカルコンピューティングの話題となっている。今後が期待される技術である。

もう一つオプティカルコンピューティングで話題となっているものに、光接続がある。これは一言で言えば、コンピュータ内における光通信技術であって、チップ間、ボード間の情報の伝送を自由空間のレーザ光によって行う技術である。この時、レーザ光を分割して、幾つかの微細な光検知器に同時に集光する機能を持つ反射鏡が必要となり、この目的に計算機で合成したホログラフィック光学素子が有望視されている。

6. セキュリティ技術

ホログラフィによる3次元表示のところでも述べたが、レインボウホログラムがクレジットカードに付けられていることはよく知られている。これは、装飾の意味ではなく、カードの偽造防止の役目を果たしている。すなわち、ホログラムの複製は非常に難しく、またたとえできたとしても高価になるため、これを添付

することによって、偽造を防止できるというものである。同様の目的に使われたホログラムは数多く、たとえばオーストラリアの10ドル紙幣、アメリカの25セントの切手などが有名である。そのほかにも、パスポートやビザに添付することを考えている国があり、また時計の偽造防止やビデオテープのダビング防止に使われた例がある。

これらは、一つのホログラムは小さく、安価であるが、多数の需要があるためビジネスとしては興味深い。しかし、最近の傾向としてホログラムの複製技術も進歩して、セキュリティの役割が果たせなくなる心配があり、新しいタイプのホログラム、たとえば計算機で複雑なパターンを直接電子ビーム描画装置などでフォトレジストに記録し、それをオリジナルとしてホログラムを複製するなどの方法が検討されていると聞く。

7. 光以外のホログラフィ技術

もともと、ホログラフィは電子顕微鏡の分解能を改良するために考えられた技術であったが、レーザの出現によっていつの間にか光技術として定着してしまった。しかし、光以外の分野でもホログラフィ技術は、種々の重要な役割を演じている。

電子顕微鏡分野では、本来の目的であった電子顕微鏡レンズの収差補正は、日立製作所基礎研究所のグループによって完成され、さらに続いて電子線干渉計の開発、Aharonov-Bohm 効果の検証という優れた業績が上げられている。

マイクロ波領域のホログラフィ技術は、1960年代の初めからサイドルッキングレーダの画像処理に応用され、1970年代の終わりには実用装置が完成し、アメリカを中心に使われていると聞いている。

音響の分野では、超音波ホログラムが早い時点で開発され、X線に代わる医用画像技術として期待された。しかし、装置の取扱いの難しさ、分解能の不足等の問題があり、他方電子工学的走査方式はコンピュー

タの発展とともにその性能、操作性を高め、現在ではホログラフィによる方法は余り使われていないようである。これとは別に、可聴音波の領域では、音源探索用のホログラフィ技術が開発され、機械工学における一つの試験方法として使われている。

8. む す び

ホログラフィ技術について、その現状の展望を試みた。こうして眺めてみると、ホログラフィ技術は種々の分野で、相当の実用性を発揮しているように見える。しかし、問題がないわけではない。まず、最も切実な問題は、感光材料である。現在、ほとんどの場合、銀塩感光材料が使われているが、これは特性から見ても、また使いやすさから考えても、決して最適な材料とは言えないが、これほど感度が高く、また安定して供給される材料はほかに見あたらない。その他、多くの新しい感光材料が使われ始めているが、まだそれぞれに問題を抱えているものが多い。今後の材料の発展を期待したい。

もう一つは、ホログラフィ技術の面倒さである。すべて電子化、コンピュータ化の時代に、振動を気にしながらホログラムを撮影するという手法はやはり近代的とは言えない。最近、この困難を乗り越える二つの試みが行われ、これからのホログラフィの一面を示唆するという意味で興味深い。ひとつは、わが国の技術研究組合医療福祉機器研究所で開発中の医学用ホログラフィックステレオグラム合成装置であり、ここでは計算機で出力される画像から自動的にホログラムの合成を行うことが計画されている。他の一つは、アメリカのMITで進行中の研究であって、コンピュータからの出力で、実時間ホログラフィックTVを実現しようというものである。前者については、技術的に完全な見通しがたっているが、後者はさらに先を見たこれからの技術である。これらの研究の完成により、ホログラフィがさらに使いやすく、役にたつ技術となるのを期待したい。