

ホログラフィーの発展

—その歴史と応用技術—

辻内 順平

1948年ホログラフィーに関する Gabor の最初の論文¹⁾が発表されてから、今年でちょうど 50 年になる。その当時は、強力なコヒーレント光源を得るのが難しかったため、この技術の最初のスタートは必ずしも順調ではなかったが、1960年にレーザーが発明され、格好の光源が登場するという幸運に恵まれ、その後は飛躍的な研究・開発が続いた。

しかし、原理的な面白さにかかわらず、応用技術の開発は期待されたほど進まず、特に工業界では将来に対する悲観的な見通しが支配して、1970年代の半ば頃から研究開発の撤退が続き、論文発表の数も減少を続けた。この傾向は1980年代になってから見直しが行われ、ホログラフィーの応用分野もはっきりしてきたのと、コンピューター技術などの周辺技術の発展に支えられて、論文数も徐々に回復の兆しが見えるようになった²⁾。

この状態は今日まで持続していて、活発なホログラフィーの研究が続いているように見える。本稿では、ホログラフィーに関する研究開発の歴史を踏まえながら、主な応用技術について最近の動向を概観してみたいと思う。

1. 創成期のホログラフィー

Gabor の論文に先立って、Bragg³⁾ の X 線顕微鏡の研究がある。これは X 線による結晶の far-field pattern (フーリエスペクトル) を写真記録し、これを単色光で照明して第 2 のフラウンホファー回折像を求めれば、結晶の光学像を得られるというものである。このとき、回折像の写真記録のとき位相情報はすべて失われるので、一般には結晶の像ではなく、その自己相関像となる。そこで、結晶のフー

リエスペクトルが実数成分だけとなるような中心対称性のある結晶で、さらに回折像に大きなバイアス成分が伴うようなものを選ぶと、フーリエスペクトルは正の実数となり、第 2 の回折像は近似的に結晶の光学像となる。また、このとき X 線の波長を λ_1 、光の波長を λ_2 とすれば、最終像の倍率は λ_2/λ_1 に比例するので、高い倍率の像が得られて顕微鏡の役割を果たすわけである。

Gabor は当時電子顕微鏡のメーカーに在籍し、電子レンズの収差のために電子顕微鏡の分解能が上がらないという問題を解決するため、収差の伴った像を位相を含めて記録することを考えた。これが可能となると、その像を電子レンズの収差と逆方向の収差をもつ光学レンズで再結像すれば、電子レンズの収差はうち消され分解能は向上するはずである。Gabor は干渉縞によって位相情報が記録できることに着目し、コントラストの低い物体を透過する光 (coherent background) と、物体で回折を受けた光 (物体光) との干渉によってできる干渉縞を記録すれば、物体光の振幅と位相の両方を記録できることを明らかにし、これをホログラムと名付けた。このホログラムに光を当てて回折させれば、物体光と全く同じ複素振幅分布をもつ光が再現できるので、このことを波面再生と呼んだ。

Gabor は、水銀灯にフィルターをかけて得られた準単色光を光源として実験を行ったが、ホログラムで回折した光には ± 1 次の光が混合しているため、再生像には焦点位置の異なる 2 つの像 (直接像と共役像) が重なり合い、鮮明な像が得られなかった⁴⁾。この二重像の欠点を除くために多くの提案が行われたが、いずれも大した効果はなかった。しかし Gabor の方法は、Bragg の X 線顕微鏡を一般化した方法として当時の物理学者の関心を集め、その方向の研究も多数行われたが、成功したものはなかった。

〒132-0025 東京都江戸川区松江 7-27-14-702
E-mail: tsujiuch@air.linkclub.or.jp

2. 光学技術としてのホログラフィー

1960年にレーザーが現れ、強力なコヒーレント光が使えるようになった。1962年にLeithとUpatnieksはホログラフィーに通信理論の考え方を導入する論文⁵⁾を発表し、通信における搬送波理論をホログラフィーに導入して二重像の欠点を除去することを述べた。ついで、1963年にHe-Neレーザーを光源として、この理論に基づく実験を行い、きわめて鮮明な直接像のみの再生像が得られることを示した⁶⁾。

さらに、1964年に同じ著者らは、拡散性の3次元物体を撮影すれば、その再生像はきわめて自然な立体感を示す3次元像となること、また3色のレーザーを使えばカラー物体の撮影・再生も可能であることを報告し、ホログラフィーが新しい光学技術として興味ある存在であることを示した⁷⁾。これ以後は、ホログラムはすべてLeithらの搬送波型となり、Gaborのホログラムはin-line hologramと呼ばれ、光源のコヒーレンスが低いときなど特別な場合にのみ使われるようになった。

ホログラムには、搬送波の間隔に比べて十分大きい厚さをもつ感光材料に記録された厚いホログラムと、薄い感光材料に記録された薄いホログラムがある。厚いホログラムでは、Braggの条件による回折が行われるため、参照光と同じ波長で同じ位置にある光源から同じ入射角で照明する光でのみ再生できるが、薄いホログラムは再生光源の波長、位置、入射角をある程度自由に選択できる。このとき、再生された像の位置、倍率、収差などに関してはChampagne⁸⁾が関係式を明らかにした。

厚いホログラムの場合、再生のための照明光は参照光と同じ性質をもつ光でなければならないが、それはホログラムが無限に厚い場合であって、厚さが有限の場合には多少異なった条件でも再生できる。このような場合の回折効率を定量的に求めるために、Kogelnik⁹⁾はcoupled-wave theoryに基づく計算式を導いた。このとき、計算を容易にするためにいくつかの仮定を設けているので誤差を伴うが、簡単な計算で回折効率を求められるので広く使われている。後に、この仮定を少なくしたり^{10,11)}、あるいはすべての仮定を取り除いた厳密解¹²⁾が求められ、偏光による回折効率の差なども詳しく計算できるようになった。

普通のホログラムは、物体光と参照光を干渉させ、その干渉縞を感光材料に記録して作るが、物体の振幅分布がわかっているならば、ホログラムの構造が計算できる。したがって、この構造を適当なプロッターやプリンターで記録すれば、コンピューターでホログラムを合成できる¹³⁾。このようなホログラムを計算機ホログラム(CGH)といい、種々

の用途に使われているが、特に後述するホログラフィー光学素子を作るための重要な技術となっている。CGHの技術については、Lee編の論文集¹⁴⁾を参照されたい。

1960年代の後半から1970年代の初めにかけては、ホログラフィーの歴史の上で最も重要な時期であった。ほとんどのホログラフィーの応用は、この時期にその最初の論文が発表され、ホログラフィーの基礎はほとんどこの時期に固まったと考えられる。

3. ホログラム記録用感光材料

ホログラムの搬送波の空間周波数は1000本/mm以上のことが多く、それを記録する感光材料にはきわめて高い分解能が要求される。また、ホログラムには濃淡の分布が記録され、再生照明光の振幅が変化して回折が起こる振幅ホログラムと、透明で屈折率または表面の凹凸の分布によって再生照明光の位相が変化して回折の起こる位相ホログラムがあり、これらの区別はほとんど感光材料の種類によって決まる。

ホログラム記録用の感光材料には多くの種類があるが、最もよく使われる材料はハロゲン化銀写真感光材料である。この材料は感度が高く、性能が安定していて、薄いホログラムと厚いホログラムがともに可能であり、現像したままでは振幅ホログラム、漂白すれば位相ホログラムとして使用できる。初期にはKodak 649Fという分光用感光材料が使われ、Agfa-GevaertがHolotestシリーズを製品化してからほとんどこの材料が使われてきたが、1年ほど前に製造中止を決めた。そのほかにも、Ilfordが1990年からHOTEC-Rという材料を市販したが、数年で製造を打ち切った。Kodakは前述の649Fのほかに数種類のホログラム用感光材料を特注品として製造しているが、最近では入手困難となっている。このように、大手の写真感光材料メーカーが相次いでホログラム用の感光材料の製造を止めたり、縮小したりするのは、市場での需要が少なく、製品として成り立たないという理由のようである。最近、ロシア製の新しい感光材料HOLOTRENDとか、ドイツのBB-PAN¹⁵⁾が現れ、コニカが特別の用途に新しい感光材料¹⁶⁾を製造しているので、これらが一般の需要に対して順調に供給されることを期待したい。

ハロゲン化銀以外の感光材料では、薄い位相ホログラム用として、フォトレジスト、サーモプラスチックなどがあり、厚い位相ホログラムには重クロム酸ゼラチンがよく使われるが、最近ではフォトリソマーが注目されている。特殊な材料としては、フォトリフラクティブ結晶が厚い位相ホログラムおよび四波混合の記録素子として利用され、

新しい感光材料にはバクテリオロドプシン、光化学ホールバーニング材料などがある¹⁷⁾。

4. 3次元像ディスプレイ

ホログラフィーの応用のうち、最も興味深く、また他の技術の追従を許さない技術は、3次元像ディスプレイであろう。先に述べたように、ホログラフィーが3次元像のディスプレイに応用できるという提案は、1964年のLeithらの論文⁷⁾が最初である。同じ論文でカラー像の記録再生の可能性についても述べられているので、この時点で3次元ディスプレイの必要条件はすべてそろったことになる。

ホログラフィー以外の3次元像ディスプレイに関しては、多くの方式¹⁸⁾が試みられていたが、ホログラフィーはそのどれとも違い、何らの補助器具なしに立体視の生理的要因である調節、輻輳、両眼視差、ならびに単眼運動視差のすべてを満たし、きわめて自然な立体感が得られるという特徴があった。しかし、ホログラムの撮影や再生にレーザーが必要であったため、この技術の実用に大きな障害となり、白色光で撮影や再生のできるホログラムが開発されるまで待たなければならなかった。

1969年、Benton¹⁹⁾はレインボーホログラムを提案した。これは水平方向の狭いスリットを通った物体光を記録することによって実現できる方法であって、白色光によってきわめて明るい再生像が得られることから、3次元ディスプレイのためのホログラムとして歓迎された。一方、Denisjuk²⁰⁾によって提案された wave photograph は、厚い感光材料の表と裏からそれぞれ物体光、参照光を入射させて撮影するホログラムであって、撮影した光の色でのみ再生が行われるため、白色光でも再生でき、またカラー像の記録も容易であることが知られていた。レインボーホログラムによってホログラムがディスプレイに使われるようになって、wave photograph の価値が再評価され、盛んに使われるようになってきた。このタイプのホログラムはLippmannの天然色写真²¹⁾と似た構造をもっているため、Lippmannホログラム、またはLippmann-Denisjukホログラムといわれている。

レインボーホログラムはすぐれたホログラムであるが、撮影が2段階に分かれるため技術的にやや面倒であった。これを改良するため、撮影を一度で行うための one-step rainbow hologram²²⁾とか、スリットを使わないレインボーホログラム²³⁾などの新しい技術の開発・提案が行われたが、それぞれほかの欠点が伴うため普及しなかった。また、レインボーホログラムは後ろから照明する透過型ホログラムであるため、やや観察しにくいという欠点が指摘されて

いたが、今日ではフォトレジストを使って表面レリーフ型のホログラムとして作り、表面にアルミニウム膜を付けて反射型として使われることが多くなっている。この方式は、大量の複製が容易にできる²⁴⁾というメリットもある。

一方、撮影に関しては、人間や動物など動きやすい被写体に対しては、ルビーやYAGなどのパルスレーザーを用いて撮影する方法が用いられ、いわゆるホログラフィックポートレート²⁵⁾が生まれた。こうして撮影したホログラムは、He-Neレーザーやアルゴンレーザーなどの連続光レーザーで、Lippmann-Denisjukホログラムに変換して観察することが多い。

レーザー光を使わない方式としてインコヒーレントホログラム²⁶⁾という技術があるが、被写体や性能に制限が多く、ディスプレイには使えない。その代わりに、ホログラフィックステレオグラムの技術が開発された。これは、視線方向を少しずつ変えながら撮影した一連の普通写真（これをステレオグラムの原画という）を、特別な光学系によってホログラムに変換したものである。これには多くの種類²⁷⁾があるが、最もよく使われるのは白色光再生円筒型ホログラフィックステレオグラム²⁸⁾であり、最初に実用化に成功した会社²⁹⁾の名前にちなんでマルチプレックスホログラムと呼ばれ、種々の用途に使われている。

3次元ディスプレイとして重要な技術にカラーホログラムがある。最初Leithらが提案した方法⁷⁾は、クロストークが起りやすく実用は難しかった。現在使われている方法には、Lippmann-Denisjukホログラムによる方法³⁰⁾、レインボーホログラムによる方法³¹⁾、および平面型ホログラフィックステレオグラムを用いる方法³²⁾などがある。

カラーホログラムを記録するときの問題は感光材料である。感光材料にはハロゲン化銀が最もよく使われるが、パנקロマティック材料は存在しないので、He-Neレーザー用の赤に感度のある材料と、アルゴンレーザー用の青・緑に感度のある材料を重ねて使用する必要がある。また、Lippmann-Denisjukホログラムの場合、ハロゲン化銀のように水によって膨潤する感光材料を使い、ある程度感光材料を膨潤させた状態でHe-Neレーザーを使って撮影を行い、現像後脱水することによって干渉縞間隔を縮小し、短い波長の光で露光したのと同じ効果を与える方法³³⁾もある。このような方法を用いれば、感光材料の感色性やレーザーの波長を気にすることなく、適正な色表現を得ることが可能である。

3次元ディスプレイは、出版・印刷の分野で3次元イラストや表紙の装飾などに使われるほか、服飾品や室内装飾としても使われている。また、一時は宣伝・広告の媒体と

して注目されたが、必ずしも見やすくないので最近あまり使われなくなった。むしろ、ショーウィンドウの装飾用とか、店舗・ショールームの雰囲気作りのために使われることのほうが多くなっている。ホログラフィー芸術については、本誌の三田村の論文を参照されたい。

工業分野の応用も興味深い。製品の設計段階で完成品の3次元像を見ることができれば、自動車、建築などの分野で有用であり、ホログラフィックステレオグラムがこの目的に使われる。最近、直径0.5 mm程度のドット型Lippmann-Denisjuk ホログラムを多数感光材料に記録して、ホログラムを合成するホログラムプリンター³⁴⁾が開発されたので、コンピューターの周辺機器としてCADのデータからホログラムを合成することができるようになった。

医学分野では、CTやMRIなどの断層画像を3次元表示するのに使われている。たとえば、断層像を1枚のホログラムに多重記録し、これを同時に再生して3次元像を得る方法³⁵⁾、マルチプレックスホログラムに記録する方法³⁶⁾などが使われ、診断、手術計画、手術室における参照用、医学教育などに使う試みが行われている。

5. 動画ホログラフィー

動いている被写体をホログラムに撮影し、動く再生像を得る技術を動画ホログラフィーといい、近年活発な研究が行われている。これには、映画方式とTV方式の2通りの方法があり、どちらも1960年代の中頃から研究が始まっている。

映画については、普通のホログラムの撮影・再生の延長上にある技術であって、1966年Leithら³⁷⁾が参照光の入射角の変化によって多重記録が可能な厚いホログラムを使って実現したのが最初と思われる。その後De Bitetto³⁸⁾がホログラムを記録するフィルムの直前に狭い水平スロットを置いて、1こまずつ動画のホログラムを撮影する方法を提案し、再生時にはこのスロットを通して観察するようになっている。これがその後のホログラフィー映画の標準的方法となり、いくつかの実験が公開された。Aebischerら³⁹⁾、Smigielskiら⁴⁰⁾の装置が代表的なものである。最近ではHiguchiら⁴¹⁾が35 mmのフィルムを用いる方法を提案している。

スクリーンへ投影する方式の映画もいくつか発表されている。これには指向性スクリーンが必要であって、大越ら⁴²⁾はそのために開発した特殊なスクリーンにDe Bitetto方式の映画を投影する方法を試みている。また、角田ら⁴³⁾も同様のスクリーンを用い、水平に並べた多数の小

ホログラムからの投影像を合成して見せる3次元動画を実現している。ロシアのNIKFI⁴⁴⁾ではホログラフィックスクリーンを使う方法を採用し、70 mm幅のフィルムにパルスレーザーで撮影した駒撮りホログラムを連続映写する方法を用いている。

TV方式についても、1965年にLeithら⁴⁵⁾がホログラムを伝送し実時間で再生する方法を提案し、その情報量が当時のTVシステムには桁違いに大きいため伝送は不可能であるが、光通信でも可能となればできるかもしれないと結んでいる。ただし、動画でなければTVで伝送可能なことがEnloeら⁴⁶⁾、Burkhardtら⁴⁷⁾によって確かめられている。

1990年代に入って、新しい方法がMITのBentonら⁴⁸⁾によって提案された。彼らはコンピューターで合成したホログラム信号を変調された超音波として音響光学素子に供給し、その回折によって再生を行う方法を採用し、3次元像の実時間再生の実験を行った。この方法では超音波の進行によってホログラムの搬送波が移動し、したがって再生像も水平に動くので、高速で回転する多面鏡によって動きを止める必要があるが、ともかく3次元動画を再生できた。これが刺激となって、ホログラフィーTVの研究が活発になり、日本では液晶パネルにホログラムを表示する方法の研究⁴⁹⁾が盛んになった。この方法では像の移動はなく、簡単な機構で実現できるという特徴があるが、通常の液晶パネルは電極の空間周波数が低いため搬送波の周波数も低く、大きな像を得ることが難しいという欠点があった。郵政省では、通信・放送機構においてホログラフィーTVの研究を開始し、電極空間周波数の高い液晶パネルを用いて、動画ホログラフィー装置の試作を行った⁵⁰⁾。

ホログラフィーTVは膨大な情報量の伝送が必要であり、光通信を用いたとしても容易ではない。そこで、多眼ステレオ写真を伝送し、特殊な光学系を用いて立体視させる方法が凸版印刷によって開発された。このシステムの主要部分は、曲線格子を組み合わせたgrating imageと呼ばれる画像であって、はじめセキュリティーの目的で提案⁵¹⁾されたが、後にそれを光学素子として用いた3次元表示方法を開発⁵²⁾し、これを多眼ステレオTVに発展⁵³⁾させ、さらにカラー3DTV⁵⁴⁾とした。この方法によれば、多眼ステレオ原画を伝送するだけでよく、ホログラムそのものよりもはるかに少ない情報量でホログラフィックステレオグラムが伝送できることになり、すぐれた方法である。アラバマ大学のKulickらはVLSIチップに直接液晶パネルを取り付けたIC Visionという素子⁵⁵⁾を開発し、これを多数組み合わせるホログラフィーTVを実現する方法⁵⁶⁾を提案

したが、最近では grating image と似た固定格子(ただし直線格子)^{56,57)} を使う方法を用いたカラー 3DTV⁵⁸⁾ について実験を行っている。

6. セキュリティー

ホログラムの複製は難しいので偽造防止の手段としてよく使われている。多くのクレジットカードに反射型のレインボーホログラムが付けられているのは、偽造防止のためである。その他、郵便切手、紙幣、運転免許証、ソフトウェアやビデオテープの包装などに使われ、その用途は広がっている。

しかし、最近ではホログラムの複製技術も向上したので、通常のホログラムではなく、コンピューターで複雑な格子図形を作り、その回折で見る方向によって違った図形が見えるような素子が注目されている。このような素子は OVD (optically variable device)⁵⁹⁾ と呼ばれ、新しい偽造防止の手段として使われ始めている。先に述べた凸版印刷の grating image⁵⁰⁾ などがその例である。

ホログラムのセキュリティーへの応用は、偽造防止に役立つほか、装飾的な効果も大きく種々の分野で採用されている。単価は小さいが数が多いため、ホログラフィーの有望なビジネスとして注目されている。

7. ホログラフィーによる計測

ホログラフィーは計測の分野でも大きな役割を演じている。ホログラフィーによる計測の試みは多数あるが、フーリエ変換による微粒子径の測定、ホログラフィー干渉による計測などが主なテーマである。

微粒子径の測定は、空中に浮遊している霧やエアゾルの粒径分布の測定であって、1964 年の Parrent ら⁶⁰⁾ の論文がおそらく最初のものであったと思われる。これらの微粒子をパルスレーザーで照明して撮影すると、微粒子はフーリエ変換されて、これに回折しない透過光が参照光となって、Gabor 型のホログラムが撮影できる。このホログラムでは、微粒子は円板のフーリエ変換として撮影されているため直接半径が測定できるし、多くの微粒子の分布状況はフレネルホログラムとして撮影されているので、その分布を測定できる。気象光学の研究、飛行場などにおける霧の測定、内燃機関・ロケットエンジンの排気の測定、噴霧器による薬液の散布状況の測定などに多く用いられ、この分野の標準的な測定方法となっている⁶¹⁾。

ホログラムに記録された波面を再生して干渉させて行う測定方法はホログラフィー干渉といい、1965 年 Horman⁶²⁾ がマッハ・ツェンダー干渉計に使う提案をしたのが最初で

ある。翌年、Haines ら⁶³⁾ が報告した物体表面の変形の測定が、事実上ホログラフィー干渉の実用第 1 例と考えてよい。変形測定の場合には、同じ物体を、変形前と変形後にそれぞれ 1 枚ずつのホログラムを撮り、それらの再生光を重ねて干渉させるので、変形によっても表面の微細構造が変わらないとすれば、通常の干渉計では測定の対象とならない光学的粗面も測定できる特徴がある。

3 次元の変形を定量的に測定するためには、参照光⁶⁴⁾ または観察の方向⁶⁵⁾ を 3 方向にとって測定を行う方法が知られている。最近では位相シフト干渉法⁶⁶⁾ によって物体上の各点の変形による位相変化を直接測定する方法が使われるようになり、コンピューターによる自動測定も可能である。また、フォトリフラクティブ結晶を記録材料に使い、これに位相シフト干渉法を適用して大型の物体のホログラフィー干渉測定を行う装置の報告⁶⁷⁾ があり、ホログラムの現像に伴う面倒もなく、コンピューターによる自動測定も可能となるので、これからの工業用の測定装置として注目される。

ホログラフィー干渉では、変形のほか、振動の測定ができる。振動をする物体を振動周期よりずっと長い時間の露光をかけて撮影する時間平均法⁶⁸⁾ があり、振動振幅の分布が干渉縞となって現れる。この際、振幅の大きいところで干渉縞のコントラストが低下するのを防ぐため、振動と同期して 2 個またはそれ以上のパルス光でホログラムを撮影する方法⁶⁹⁾、振動と同期して参照光の位相を変調する方法⁷⁰⁾ などの提案がある。

レーザーで照明された粗面は、位相がランダムに変化する多くの反射光(または透過光)の干渉によって複雑な細かい干渉縞が生じる。これをスペックルといい、観察系の瞳の大きさを変えるとその粗さ(相関距離)が変化する。このようなスペックルに in-line の参照光を干渉させて物体の変形の前後で重ね写しをすると、干渉縞とよく似た縞模様が観察できる。これをスペックル干渉⁷¹⁾ といい、同じ物体をホログラフィー干渉で観察したのと全く同一の干渉縞が生じ、ホログラフィー干渉の代わりに使うことができる。この場合、撮影用カメラのレンズを絞れば、スペックルの相関距離が大きくなって、分解能の低い TV カメラでも撮影できるようになり、さらに干渉縞の解析にデジタル処理を導入しやすい。これを、電子スペックル干渉⁷²⁾ といい、最近工業界ではホログラフィー干渉に代わってよく使われるようになってきた。

ホログラフィー干渉は粗面物体のわずかな変形や振動を測定できるので、これを用いて工業材料の非破壊試験⁷³⁾、応力解析⁷⁴⁾、光弾性測定⁷⁵⁾、音響機器の検査など工業界で

盛んに利用されている。

8. 情報処理への応用

ホログラフィーによる情報処理の最初の成果は、1966年の side-looking radar の情報処理⁷⁶⁾であろう。これは、直進する航空機から斜め下に向けて発射したマイクロ波が地上で反射した後受信された信号と、元の信号との相関を求め、その出力を時間とともにフィルムに記録したものを一種の1次元フレネルホログラムと考へて光学的に再生を行うと、地上の像が得られるというものであった。当時の非力なコンピューターよりはるかに高速で、鮮明な像が得られたので、実用化⁷⁷⁾された。

一方、ホログラムを空間周波数フィルターとして用いて行うアナログ画像処理は、ホログラフィックフィルタリングとして、初期の重要な応用であった。最も早く報告された成果は、1964年の Vander Lugt⁷⁸⁾の光学的相関法である。入力画像の光学的フーリエ変換を行い、そのフーリエスペクトルの位置に被検出画像のフーリエ変換ホログラムを置いて再生を行うと、もし入力画像の中に被検出画像が含まれているときにはその自己相関像が得られ、入力画像の中の位置が表示されるというものであった。

これに引き続いて、フーリエ変換ホログラムを空間周波数フィルターとして使う画像処理が多数提案された。たとえば、不鮮明画像を鮮明化するデコンボリューション⁷⁹⁾とか、画像の特殊な coding/decoding⁸⁰⁾の方法などである。しかし、これらはいずれもアナログの方法であって誤差を伴い、また技術的にも不完全であったため、その後のコンピューターによるデジタル処理に対抗できず、歴史的なものとなってしまった。

ただし、光学的相関処理だけは2次元画像の高速相関技術として生き残り、画像の倍率の変化⁸¹⁾や回転⁸²⁾を補償するような方法が開発された。最近の光コンピューティングの開発においても光学的相関技術が注目されているが、ホログラフィックフィルタリングに代わって、実時間でフーリエ変換ホログラムを記録・再生を行うジョイント・トランスフォーム相関⁸³⁾のほうが有望と思われている。

ホログラムを用いたメモリーは初期には有望な技術と考えられ、コンピューター関連企業での関心も高かった。当時の構想は、ホログラフィック・ページメモリー⁸⁴⁾と呼ばれるものであって、薄いホログラムの上に $M \times N$ の小ホログラムを記録し、各小ホログラムには $m \times n$ のドットを記録し、ドットの明暗で1ビットの情報を表す形式のものが考えられ、全体で $MNmn$ ビットの情報が記録できる。読み出しにはホログラム上の小ホログラムにレーザービー

ムを偏向して当てれば、固定された $m \times n$ の検知器アレイで読みとれるため、動く機構のない高速大容量メモリーが実現できると期待された。

しかし、記憶容量を増すためにホログラムや検知器アレイを大きくすると、光が斜めに入射するため空間的分解能が低下し、情報量が上がらないことが指摘⁸⁵⁾され、またホログラムとして搬送波を含めて記録するよりドット情報を直接記録したほうが有利であるとの判断もあって、この形式のメモリーには終止符が打たれた。代わって、厚いホログラムにページメモリーを多重記録する方法⁸⁶⁾が提案され、最近のフォトリフラクティブ結晶の進歩によって、再びホログラフィックメモリーの研究が活気を取り戻したようである⁸⁷⁾。光学的相関法を取り入れた連想メモリー⁸⁸⁾など、ホログラフィーの特性を活用したメモリーの開発が期待される。また、波長選択性多重記録に適している光化学ホールバーニング材料を用いたメモリーの開発⁸⁹⁾も始まり、今後の成果が期待されている⁹⁰⁾。

ホログラフィックメモリーについては、このほかにも種々の技術が開発され、また記録材料も多岐にわたって検討されている。これらについては、Sincerbox 編の論文集⁹¹⁾が参考になる。

9. ホログラフィー光学素子とその応用

ホログラムに比較的単純な波面を記録し、ホログラムを1種の光学素子として使う用途がある。これを、ホログラフィー光学素子 (HOE) と呼び、特に最近注目されるようになってきた。

ホログラフィー光学素子は、小型軽量で、レンズや鏡などと同じような性質を示すほか、作り方によっては通常の光学素子では実現できない特殊な機能をもたせたり、1つの素子で複数の機能を同時に実現できるような特性をもっている。また、その製作には通常のホログラムと同じような干渉縞の記録によるほか、CGH をリソグラフィ技術で製作してもよく、自由な設計が可能である¹⁴⁾。

最も早くから用いられた HOE は分光用の回折格子であって、1960年代の後半からフランスの Jovin Yvon 社が製品化を行い、実際の分光器に多数搭載されている。機械的に格子を刻む通常の回折格子に比べて大型のものが容易に製作でき、性能も安定しているし、性能に遜色はない⁹²⁾。初期には、特定の波長、入射角で回折効率を上げたブレース格子を作るのが困難であったが、最近ではイオンエッチング⁹³⁾、電子ビーム⁹⁴⁾、レーザー光⁹⁵⁾ リソグラフィなどの技術で問題はなく、今後も引き続き使用されるものと思われる。

HOEの応用としてスキャナーがある。これは数個のHOEを円周に沿って取り付けられた円盤を回転させ、それを透過したレーザー光でスキャンを行うものであって、バーコードリーダー⁹⁶⁾に使われている。また、固定したHOEをバーコードリーダーのウィンドウに固定し、プリズムで走査しているビームを透過させて方向を変え、その結果機械をコンパクト化し、同時に走査範囲を拡大するのに用いられた例⁹⁷⁾もある。光ディスク、CDなどのピックアップ⁹⁸⁾にも、HOEが使われている。

最近の光コンピューティングの分野では、種々の新しいデバイスが開発されているが、HOEとしては光インターコネクタへの応用が注目される。光インターコネクタは通常のデジタルコンピューターで、情報の伝送に光を使う方法である。通常は情報の伝送には電流を使うが、高集積度の半導体デバイスでは、熱雑音が発生したり、隣接回路との間の干渉で伝送速度に限界が生じたりする障害が発生しやすい。そこで、情報の伝送を光で行う、いわばコンピューター内の光通信によって、このような障害を避けようとする試みである。

光インターコネクタには2つの方法があり、1つは自由空間を伝搬する光を使う方法、もう1つは光導波路などの束縛された空間を伝搬する光を使う方法である。自由空間を使う方法では、小型の格子を多数配列したHOEが使われる。1つの小格子に入射した光は、その格子の空間周波数と方向によって、ある方法に偏向して射出し、その方向においた検知器で受光されるが、このときHOEの格子の配列と受光検知器アレイの配列に一定の規則をもたせておけば、これを用いた光ロジック⁹⁹⁾を構成することができる。

束縛された空間内を用いる方法では、平面状の光導波路に複数のHOEを配置し、導波路内を進む光を外に取り出して検知器に焦点を結んだり、外にある光源から出る光を取り込んで、導波路を伝搬するようになっている。これにより、コンピューターの基板上にある信号源から出る光を導波路に取り入れ、必要とする検知器まで導いたり、また複数の検知器に分配したりして、外からのノイズの影響を受けることなく、安定に情報の伝達を行うことができる¹⁰⁰⁾。

最後に、航空機、自動車に用いるヘッドアップディスプレイがある。これは元来軍用航空機のパイロット用に開発されたもので、パイロットの頭上に置いた運航用コンピューターのモニターに映し出された情報を、ハーフミラーで反射させて正面を向いたパイロットに見せる装置であって、そのハーフミラーの代わりに波長選択性の鋭い厚い位

相ホログラムで作ったHOEを用いるというものである。モニターの色をHOEの反射光に合わせておけば、高い反射率でモニターが見え、透過光で見える外景も暗くならない。光学系を併用してモニターの像を遠方にずらせば、パイロットの目の負担も軽くすることができる。

最近では、これを自動車に積載して、速度計などの情報を見やすくし、特に高齢者が老眼鏡なしでよく見えるようにすれば安全の見地からも好ましいといわれ、その開発が進んでいる¹⁰¹⁾。装置をコンパクトにするため、HOEは前の窓ガラスにサンドイッチにして取り付けられるが、強い日光に長時間曝らされ、温度変化も激しい窓ガラスにはめ込んだ状態でのホログラムの寿命が問題である。HOEの材料としては、フォトポリマー、重クロム酸ゼラチンなどが検討されているが、さらに耐久力のある感材が期待されている。

ホログラフィーの応用技術について、歴史的な観点で概観を行った。はじめに述べたように、ホログラフィーにおける重要な技術はほとんど1960~70年代に開発されたもので、その後の発展は、いかにして実用に耐えるような応用を開発するかに集約されている。

はじめ、電子顕微鏡の分解能の向上のために開発されたこの技術は、レーザーの出現によって当初期待していなかった新しい光学技術となり、特にコンピューターとエレクトロニクス発展に助けられて、今日のように広い分野で使われるようになった。

応用を概観すると、やはり最も興味深いのは3次元ディスプレイであろう。これは、他のディスプレイ技術では達成できない立体視の生理的要因である調節、輻輳、両眼視差のすべてを具現し、自然な立体視を可能としている。今日では、ホログラムを見るときにはレーザーの存在を意識しないようになったが、まだ視域が狭いとか、よく見える状態が実現しにくいなどの欠点が目立ち、まだ完成されたディスプレイ技術とはいえない状態にある。

ホログラフィーTVは興味深い技術であって、従来技術の延長で可能な映画とは根本的に異なっている。完全なホログラフィーTVはきわめて実現は困難であり、単に3次元像TVを実現するためなら、ホログラフィー方式は決して賢明な選択ではないが、ホログラムの伝送により、さらに高度な機能を付加できると期待したい。すでに、ホログラフィックステレオグラムを適当な光学系と併用して伝送する方式によっていくつかの実用化の萌芽がみられ、今後が期待できる。

計測では、ホログラフィー干渉によって光学的粗面の測

定が可能となったことは特筆すべきであり、その結果変形測定、振動測定、非破壊検査などに新しい可能性ができた。しかし、ホログラムの撮影という面倒なプロセスが介在するため、自動化・コンピューター化が進んでいる最近の傾向になじみにくく、代わってスペックル干渉に移行しつつある。一方、フォトリフラクティブ結晶を使うホログラフイー干渉の提案もあり、ホログラムの現像の煩わしさもないので、今後の展開が興味深い。

情報処理の分野では、当初の期待にもかかわらず、応用技術の実用化は難しかった。しかし、最近またメモリーに関心が集まり、新しい記録材料の開発も続いているので、今後が楽しみである。

HOE はホログラフイーとしては最も単純な応用であるが、将来性のある技術である。特にコンピューターで設計・合成ができ、リソグラフイーで製作するというのは、最近の半導体デバイスと似て近代的な製品である。最近では、電子ビーム加工により、深い表面レリーフ型 HOE の製作が容易になり、その興味深い特性¹⁰²⁾を生かした応用が期待されている。耐久性のある材料を用いた自動車用ヘッドアップディスプレイが普及すれば、速度計だけではなく、カーナビゲーターなどへの対応も期待できそうである。

問題はホログラム記録用材料である。メモリーなどに使う新しい材料の開発が続いているのは好ましいことであるが、大手の銀塩感光材料メーカーの生産打ち切りはホログラフイーの前途に不安を招いている。原因は市場消費量が少なく、商品としての魅力がないためで、ホログラフイーの研究・実用が飛躍的に隆盛にならない限り、一時的に解決してもまた同じことが繰り返されるおそれがある。この際、銀塩感光材料から他の感光材料に転換することもひとつの選択であるが、銀塩に匹敵する材料が見あたらないのが寂しい。この状態から早く脱却することを期待したい。

50年を経過してホログラフイーの技術は普及し、応用にも一応用途が立ったといえようが、依然として発展途上技術であるとの印象を拭えない。それが研究者にとって一種の魅力となっているのは結構であるが、早く完成した技術となって安心して使える応用が多数生まれて欲しいというのが筆者の願いである。

文 献

- 1) D. Gabor: "A new microscope principle," *Nature*, **161** (1948) 777-778.
- 2) E. N. Leith: "Holography—The promise fulfilled," *Proc. SPIE*, **532** (1985) 2-7.
- 3) W. L. Bragg: "The X-ray microscope," *Nature*, **149** (1942)

- 470-471.
- 4) D. Gabor: "Microscopy by reconstructed wave-fronts," *Proc. R. Soc. London, A*, **197** (1949) 454-487.
- 5) E. N. Leith and J. Upatnieks: "Wavefront reconstruction and communication theory," *J. Opt. Soc. Am.*, **52** (1962) 1123-1130.
- 6) E. N. Leith and J. Upatnieks: "Wavefront reconstruction with continuous-tone objects," *J. Opt. Soc. Am.*, **53** (1963) 1377-1381.
- 7) E. N. Leith and J. Upatnieks: "Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects," *J. Opt. Soc. Am.*, **54** (1964) 1295-1301.
- 8) E. B. Champagne: "Nonparaxial imaging, magnification and aberration properties in holography," *J. Opt. Soc. Am.*, **57** (1967) 51-55.
- 9) H. Kogelnik: "Coupled-wave theory for thick hologram gratings," *Bell Syst. Tech. J.*, **48** (1969) 2909-2947.
- 10) J. A. Kong: "Second-order coupled-mode equation for spatially periodic media," *J. Opt. Soc. Am.*, **67** (1977) 825-829.
- 11) R. Magnussen and T. K. Gayload: "Analysis of multiwave diffraction of thick grating," *J. Opt. Soc. Am.*, **67** (1977) 1165-1170.
- 12) M. G. Maharam and T. K. Gayload: "Rigorous coupled-wave analysis of planar grating diffraction," *J. Opt. Soc. Am.*, **71** (1981) 811-818.
- 13) A. W. Lohmann and D. P. Paris: "Binary Fraunhofer holograms, generated by computer," *Appl. Opt.*, **6** (1967) 1739-1748.
- 14) S. H. Lee: *Computer-Generated Holograms and Diffractive Optics*, SPIE Milestone Series, MS 33 (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, 1992).
- 15) 大田和哉, 横田英嗣: "ドイツのホログラム感材 BB-PAN とその特性", *HODIC Circular*, **17** (1997) 2-5.
- 16) 本田 凡, 永島利晴, 高橋成明, R. Rankin: "医用ホログラフシステムと感光材料", *HODIC Circular*, **17**, No. 1 (1997) 6-11.
- 17) たとえば, 辻内順平: *ホログラフイー* (裳華房, 1997) pp. 123-129.
- 18) たとえば, 大越孝敬: *三次元画像工学* (産業図書, 1972) pp. 5-28, または, 大越孝敬: *三次元画像工学* (朝倉書店, 1991) pp. 7-31.
- 19) S. A. Benton: "Hologram reconstruction with incoherent extended sources," *J. Opt. Soc. Am.*, **59** (1969) 1545A.
- 20) Yu. N. Denisjuk: "Photographic reconstruction of the optical properties of an object in its own scattered radiation field," *Sov. Phys.-Dokl.*, **7** (1962) 543-545.
- 21) たとえば, M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 2nd ed. (Pergamon Press, Oxford, 1964) p. 280.
- 22) H. Chen and F. T. S. Yu: "One-step rainbow hologram," *Opt. Lett.*, **2** (1978) 85-87.
- 23) C. P. Grover, R. A. Ressard and R. Tremblay: "Lensless one-step rainbow holography using a synthesized masking slit," *Appl. Opt.*, **22** (1983) 3300-3304.
- 24) F. Iwata and J. Tsujiuchi: "Characteristics of a photoresist hologram and its replica," *Appl. Opt.*, **13** (1974) 1327-1336.
- 25) W. Koechner: "Holographic portraiture," *Handbook of Holography*, ed. H. J. Caulfield (Academic Press, San Diego, 1979) pp. 613-619.
- 26) 辻内順平: *ホログラフイー* (裳華房, 1997) pp. 36-45.

- 27) 辻内順平：ホログラフィー（裳華房，1997）pp. 144-153.
- 28) J. Tsujiuchi, T. Honda, K. Okada, M. Suzuki, T. Saito and F. Iwata: "Conditions for making and reconstructing multiplex holograms," *AIP Conference Proceedings, No. 65, Optics in Four Dimensions* (American Institute of Physics, New York, 1981) pp. 594-603.
- 29) Multiplex Company (Lloyd Cross, President), 454 Shotwell Street, San Francisco, CA 94110, USA.
- 30) L. H. Lin, K. S. Pennington, G. W. Stroke and A. E. Labeyrie: "Multicolor holographic image reconstruction with white light illumination," *Bell Syst. Tech. J.*, **45** (1966) 659-660.
- 31) P. Hariharan, W. H. Steel and Z. S. Hegedus: "Multicolor holographic imaging with a white-light source," *Opt. Lett.*, **1** (1977) 8-9.
- 32) K. Ohnuma and F. Iwata: "Color rainbow hologram and color reproduction," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 3859-3863.
- 33) 久保田敏弘, 西村正雄: "カラーホログラフィーによる文化財の記録・展示", *日本写真学会誌*, **53** (1990) 291-296, 297-302.
- 34) M. Yamaguchi, N. Ohyama and T. Honda: "Holographic three-dimensional printer: New method," *Appl. Opt.*, **31** (1992) 217-222.
- 35) 本田 凡, S. J. Hart, R. J. Rankin: "多重断層ホログラムによる医用立体画像表示システム", *O plus E*, No. 217 (1997) 125-130.
- 36) J. Tsujiuchi: "Medical applications of holographic 3-D display," *International Trends in Optics*, ed. J. W. Goodman (Academic Press, San Diego, 1991) pp.297-311.
- 37) E. N. Leith, J. Upatnieks, A. Kozma and N. Massey: "Hologram visual display," *J. Soc. Motion Pict. Telev. Eng. J.*, **75** (1966) 323-326.
- 38) D. J. De Bitetto: "A holographic motion picture film with constant velocity transport," *Appl. Phys. Lett.*, **12** (1968) 295-297.
- 39) N. Aebischer and C. Bainier: "Multicolor holography of animated scenes by motion synthesis using multiplexing technique," *Proc. SPIE*, **402** (1983) 51-56.
- 40) P. Smigielski: *Holographie Industrielle* (Teknea, Toulouse, 1994) pp. 78-86.
- 41) K. Higuchi, J. Ishikawa and S. Hiyama: "An improved experimental holographic movie to estimate picture quality for holographic television," *Proc. SPIE*, **1914** (1993) 197-205.
- 42) T. Okoshi and A. Yano: "Reduced information projection-type holography using a horizontally direction selective stereoscreen," *Opt. Commun.*, **3** (1971) 85-88.
- 43) 沼倉俊郎: "ホログラフィー(コロナ社, 1974) p. 141.
- 44) V. G. Komar: "Progress on the holographic movie process in the USSR," *Proc. SPIE*, **120** (1974) 127-144.
- 45) E. N. Leith, J. Upatnieks, B. P. Hildebrand and K. Haines: "Requirements for a wavefront reconstruction television and facsimile system," *Soc. Motion Pict. Telev. Eng. J.*, **74** (1965) 893-896.
- 46) L. H. Enloe, J. A. Murphy and C. B. Rubinstein: "Hologram transmission via television," *Bell Syst. Tech. J.*, **45** (1966) 335-339.
- 47) C. B. Burkhardt and L. H. Enloe: "Television transmission of holograms with reduced requirements on the camera tube," *Bell Syst. Tech. J.*, **49** (1970) 1529-1535.
- 48) P. St Hilaire, S. A. Benton and M. Lucente: "Synthetic aperture holography: A novel approach to three-dimensional displays," *J. Opt. Soc. Am. A*, **9** (1992) 1969-1977.
- 49) N. Hashimoto, K. Hoshino and S. Morokawa: "Improved real-time holography system with LCDs," *Proc. SPIE*, **1667** (1992) 2-7.
- 50) K. Maeno, N. Fukaya, O. Nishikawa, K. Sato and T. Honda: "Electro-holographic display using 15 Mega pixels LCD," *Proc. SPIE*, **2652** (1996) 15-23.
- 51) F. Iwata: "Grating images," *Optical Security Systems in the 2nd International Symposium for the Applications of Holography in Security* (Optical Data Storage and Display, Zurich, 1988).
- 52) S. Takahashi, T. Toda and F. Iwata: "Three dimensional grating images," *Proc. SPIE*, **1461** (1991) 199-205.
- 53) T. Toda, S. Takahashi and F. Iwata: "3D video system using grating image," *Proc. SPIE*, **2406** (1995) 191-198.
- 54) S. Takahashi, T. Toda and F. Iwata: "Full color 3D-video system using grating images," *Proc. SPIE*, **2652** (1996) 54-61.
- 55) J. H. Kulick, S. T. Kowel, G. P. Nordin, R. Lindquist, P. Nasiatka and M. Jones: "IC Vision—A VLSI-based diffractive display of holographic stereograms," *Proc. SPIE*, **2176** (1994) 2-11.
- 56) J. H. Kulick, G. P. Nordin, A. Parker, S. T. Kowel, R. G. Lindquist, M. Jones and P. Nasiatka: "Partial pixels: A three-dimensional diffractive display architecture," *J. Opt. Soc. Am. A*, **12** (1995) 73-83.
- 57) M. W. Jones, G. P. Nordin, J. H. Kulick, R. G. Lindquist and S. T. Kowel: "Real-time three-dimensional display based on the partial pixel architecture," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 1418-1420.
- 58) J. H. Kulick, M. Jones, G. P. Nordin, R. Lindquist and S. T. Kowel: "Presentation and demonstration of a full color IC-Vision holographic stereogram display," *Proc. SPIE*, **2652** (1996) 85-95.
- 59) R. L. van Renesse: "Security design of valuable documents and products," *Proc. SPIE*, **2659** (1996) 10-20.
- 60) G. B. Parrent, Jr. and B. J. Thompson: "On the Fraunhofer (far field) diffraction pattern of opaque and transparent objects with coherent background," *Opt. Act.*, **11** (1964) 183-193.
- 61) B. J. Thompson: "Particle size measurements," *Handbook of Holography*, ed. H. J. Caulfield (Academic Press, San Diego, 1979) pp. 609-611.
- 62) M. H. Horman: "Application of wavefront reconstruction to interferometry," *Appl. Opt.*, **4** (1965) 333-336.
- 63) K. A. Haines and B. P. Hildebrand: "Surface-deformation measurement using the wavefront reconstruction technique," *Appl. Opt.*, **5** (1966) 595-602.
- 64) S. Nakadate, N. Magome, T. Honda and J. Tsujiuchi: "Hybrid holographic interferometer for measuring three-dimensional deformation," *Opt. Eng.*, **20** (1981) 246-252.
- 65) T. Matsumoto, K. Iwata and R. Nagata: "Distortionless recording in double-exposure holographic interferometry," *Appl. Opt.*, **12** (1973) 1660-1662.
- 66) J. H. Bruning: "Fringe scanning interferometers," *Optical Shop Testing*, ed. D. Malacara (J. Wiley & Sons, New York, 1978) pp. 409-437.

- 67) M. P. Georges and Ph. C. Lemaire: "Holographic interferometry using photorefractive crystals for quantitative phase measurement on large objects," *Proc. SPIE*, **2652** (1996) 248-257.
- 68) K. A. Stetson and R. L. Powel: "Interferometric hologram evaluation and real time vibration analysis of diffuse objects," *J. Opt. Soc. Am.*, **55** (1965) 1694-1695.
- 69) E. Archbold and E. Ennos: "Observation of surface vibration modes by stroboscopic hologram interferometry," *Nature*, **217** (1968) 942-943.
- 70) C. C. Aleksoff: "Temporally modulated holography," *Appl. Opt.*, **10** (1971) 1329-1341.
- 71) E. Archbold, J. M. Burch and A. E. Ennos: "Recording of in-plane surface displacement by double exposed speckle photography," *Opt. Act.*, **17** (1970) 883-898.
- 72) O. J. Lokberg: "Electronic speckle pattern interferometry," *Optical Metrology*, ed. O. D. D. Soares (Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1987) pp. 542-572.
- 73) 鈴木正根: 実践ホログラフィー技術 (オプトロニクス社, 1993) pp. 101-104.
- 74) H. Saito, I. Yamaguchi and K. Hachimine: "An application of holographic interferometry to stress analysis of elastic bending plate," *Sci. Papers I.P.C.R.*, **64** (1970) 101-111.
- 75) 土井康弘, 小松忠紀, 麻田治男: "ホログラフィーの光弾性への応用", *精密機械*, **37** (1971) 600-606.
- 76) L. J. Cutrona, E. N. Leith, L. J. Porcello and W. E. Vivian: "On the application of the coherent optical processing techniques to synthetic-aperture radar," *Proc. IEEE*, **54** (1966) 1026-1032.
- 77) A. Kozma, E. N. Leith and N. G. Massey: "Tilted-plane optical processor," *Appl. Opt.*, **11** (1972) 1766-1777.
- 78) A. Vander Lugt: "Signal detection by complex spatial filtering," *IEEE Trans. Inf. Theory*, **IT-10** (1964) 139-145.
- 79) G. W. Stroke and R. G. Zech: "A posteriori image correcting deconvolution by holographic Fourier-transform division," *Phys. Lett.*, **25A** (1967) 89-90.
- 80) A. W. Lohmann and H. W. Werlich: "Holographic production of spatial filters for code translation and image restoration," *Phys. Lett.*, **25A** (1967) 570-571.
- 81) D. Casasent and D. Psaltis: "Deformation invariant, space variant optical pattern recognition," *Progress in Optics*, vol. XVI, ed. E. Wolf (North-Holland Pub. Co., Amsterdam, 1978) pp. 289-356.
- 82) Y. N. Hsu, H. H. Arsenaault and G. April: "Rotation-invariant digital pattern recognition using circular harmonic expansion," *Appl. Opt.*, **21** (1982) 4012-4015.
- 83) P. Niesenson and R. A. Sprague: "Real-time correlation," *Appl. Opt.*, **14** (1975) 2602-2606.
- 84) A. Vander Lugt: "Design relationship for holographic memories," *Appl. Opt.*, **12** (1973) 1675-1685.
- 85) H. Kiemle: "Considerations on holographic memories in the gigabyte region," *Appl. Opt.*, **13** (1974) 803-807.
- 86) L. d'Auria, J. P. Huignard, C. Slezak and E. Spitz: "Experimental holographic read-write memory using 3-D storage," *Appl. Opt.*, **13** (1974) 808-813.
- 87) 八木生剛: "ホログラフィックメモリー: フォトリフレクティブ材料", *光学*, **26** (1997) 362-367.
- 88) Y. Owechko, G. J. Dunning, E. Marom and B. H. Soffer: "Holographic associative memory with nonlinearities in the correlation domain," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 1900-1910.
- 89) C. De Caro, A. Renn and U. P. Wild: "Hole burning, Stark effect, and data storage: 2. Holographic recording and detection of spectral holes," *Appl. Opt.*, **30** (1991) 2890-2898.
- 90) 佐々木浩子: "ホログラフィックメモリー: ホールバーニング材料-ホールバーニングホログラフィーの原理と応用", *光学*, **26** (1997) 368-374.
- 91) G. T. Sincerbox: *Selected papers on holographic storage*, SPIE Milestone Series, MS 95 (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, 1994).
- 92) G. Pieuchard and J. Flamand: "Properties of ruled and holographic gratings," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **14**, Suppl. 14-1 (1974) 153-157.
- 93) Y. Aoyagi, K. Sana and S. Namba: "High spectroscopic qualities in blazed ion-etched holographic gratings," *Opt. Commun.*, **29** (1979) 253-255.
- 94) T. Fujita, H. Nishihara and J. Koyama: "Blazed gratings and Fresnel lenses fabricated by electron-beam lithography," *Opt. Lett.*, **7** (1982) 578-580.
- 95) J. R. Leger, M. Horz, G. J. Swanson and W. B. Veldkamp: "Coherent laser beam addition: An application of binary optics technology," *Lincoln Lab. J.*, **1** (1988) 225-246.
- 96) Y. Ono and N. Nishida: "Holographic laser scanners using generalized zone plates," *Appl. Opt.*, **21** (1982) 4542-4548.
- 97) K. Yamazaki, T. Ichikawa, H. Aritake, F. Yamagishi, H. Ikeda and T. Inagaki: "Compact POS scanner using new holographic technology," *Proc. SPIE*, **883** (1988) 207-214.
- 98) S. Ura, T. Suhara, H. Nishihara and J. Koyama: "An integrated-optic disk pickup device," *IEEE Lightwave Technol.*, **LT-4** (1986) 913-918.
- 99) B. K. Jenkins, P. Chavel, R. Forchheimer, A. A. Sawchuk and T. C. Strand: "Architectural implication of a digital optical processor," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 3465-3474.
- 100) A. A. Friesem and Y. Amitai: "Planar diffractive optical elements for compact optics," *Trends in Optics*, ed. A. Consortini (Academic Press, San Diego, 1996) pp. 125-144.
- 101) A. Ramsbottom, S. Sergeant and D. Sheel: "Holography for automotive head-up-display," *Proc. SPIE*, **2652** (1996) 341-344.
- 102) 辻内順平: ホログラフィー (裳華房, 1997) pp. 323-330.

(1997年12月19日受理)