

計算機ホログラム技術の展開

谷田 貝 豊 彦

レーザーとホログラフィーの出現によって、コヒーレント光学系のすぐれた機能が理論的研究の対象から、具体的応用の対象として認識されるようになった。従来の干渉や回折の光学理論に情報理論が加わり、ホログラフィーが生まれ、コヒーレント光学が学問体系として確立されたのである。空間周波数フィルタリング、3次元画像の表示記録、そして、干渉測定をはじめとする各種計測などホログラフィーを利用した技術は、コヒーレント光学の利点を最も有効に発揮した例といえる。電子計算機に代表される情報処理がデジタル量の時系列処理であるのに対して、光学系の特徴は、2次元的なアナログ情報処理の機能を備えていることである。しかも、デジタル情報処理が汎用性と融通性をもっているのに対し、光情報処理はアナログ的光学高速処理の機能を有している。

1966年、Lohmannらによって発表された計算機ホログラムは、アナログ処理が中心だった光情報処理の分野に、電子計算機によるデジタル処理という強力な手段をもたらした。この計算機ホログラムは光情報処理とデジタル処理技術の融合という点から注目を集め、多くの研究発表がなされた。光学が情報理論を吸収して、ホログラフィーを生んだように、こんどは、ホログラフィーがデジタル情報処理技術を吸収して新たな発展を生むことが期待されたのである。

計算機ホログラムの研究は、アナログ処理技術とデジタル処理技術の接合の問題として計算機ホログラムをとらえ、応用技術も含め、計算技術や表示法など幅広い分野で60年代後半から80年代にかけて活発に研究された¹⁻¹⁰⁾。しかし、ホログラム製作に要する膨大なデータ量処理の困難性と、明確な応用分野が快適化できなかつたこともあつ

て、計算機ホログラム技術は停滞の感があつた。

ところが、デジタル情報処理の飛躍的な発展により、従来計算機ホログラムの技術的発展を制限していた計算の問題がほとんど解消してしまった。1990年代後半に入り、計算機ホログラム技術は新たな発展期に突入しようとしている。この点を中心にして、計算機ホログラム作成技術をまとめ、従来技術を展望し、最近の各応用分野での進展を述べる。

1. 計算機ホログラムの発展

ここでは、計算機ホログラム研究の発展を歴史的にながめてみよう¹⁻¹⁰⁾。

1.1 ホログラム構成法

最初の計算機ホログラムはKozmaとKellyによるハードクリップフィルターである¹¹⁾。しかし、このホログラムは1次元であり、一種の位相変化を与える空間フィルターで本格的なホログラムとはいえない。計算機で空間周波数フィルターを作るという概念はまもなく、Lohmann、BrownそしてParisらによって発展され、本格的な計算機ホログラム (computer-generated hologram または synthetic hologram) が生まれた¹²⁻¹⁴⁾。

この計算機ホログラムは従来のホログラムのように、物体からの波面と参照波面とが作る干渉縞で物体の複素振幅分布を記録することはせず、この過程をすべて計算の手段におきかえたところに特徴がある。再生すべき物体または波面のデータをもとに、ホログラム面上に到達する波面を計算し、適当な表示装置にホログラム原図を表示し、通常は、それを写真的に縮小したものをホログラムとする。したがって、原理的には、数学的に記述できる物体であればいかなる波面でも、従来のホログラムでは再生できない波面でも、再生が可能である。

筑波大学物理工学系 (〒305-8573 つくば市天王台 1-1)
E-mail: yatagai@bk.tsukuba.ac.jp

ここで、再生すべき物体波の複素振幅分布を $f(x, y) = A(x, y)e^{i\phi(x, y)}$ としよう。ただし、 $A(x, y)$ と $\phi(x, y)$ は物体波の振幅と位相である。今、フーリエ変換ホログラムを考えると、 $F(\nu_x, \nu_y) = |F(\nu_x, \nu_y)| \exp[i\Theta(\nu_x, \nu_y)] = \mathcal{F}[f(x, y)]$ がホログラムの再生すべき波面である。ただし、 $\mathcal{F}[f(x, y)]$ は $f(x, y)$ のフーリエ変換であり、その位相を $\Theta(\nu_x, \nu_y)$ とする。計算機ホログラムは、これを適当に離散化とコード化をして、ホログラム $T(\nu_x, \nu_y)$ を作る。

1.2 振幅型ホログラム

このときホログラムの透過率は正の実数 $T(\nu_x, \nu_y)$ であるので、そのフーリエ変換である再生像 $t(x, y)$ は

$$t(x, y) = t^*(-x, -y) \quad (1)$$

を満足しなければならない。このような性質を再生像がもつためには、

$$t(x, y) = f(x - x_0, y - y_0) + f^*(-x - x_0, -y - y_0) \quad (2)$$

が必要で、振幅型の計算機ホログラムには、原点（光軸）に対して点対称に再生像とその共役像が得られることがわかる。再生像と共役像が重ならないためには、物体の広がりを $(\Delta x, \Delta y)$ とすると、 $x_0 \geq \Delta x, y_0 \geq \Delta y$ の条件を満足しなければならない。式(2)から、ホログラムの透過率は、

$$T(\nu_x, \nu_y) = |F(\nu_x, \nu_y)| \cos[2\pi(x_0\nu_x + y_0\nu_y) - \Theta(\nu_x, \nu_y)] + B(\nu_x, \nu_y) \quad (3)$$

と書ける。ただし、 $B(\nu_x, \nu_y)$ は、透過率を正にするためのバイアス項である。

計算機ホログラムのコード化法として、式(3)を直接表示する方法やこれを2値化して表示する方法が知られている。この方法を点表示型計算機ホログラムという。一方、式(3)を適当な大きさ（これをセルとよぶ）に分割して、コード化する方法をセル型計算機ホログラムとよぶ。

Lohmannらが最初に発表したホログラムは振幅透過率が0と1の2つのレベルからなるセル型のバイナリーホログラムである。構成法は、ホログラムを矩形のセル（幅を $\Delta\nu$ とする）に分割し、各セルの中心位置に到達する波面の振幅と位相を求め、次にセルに矩形の開口をもうけ、

その大きさを変化させて振幅変化を、また開口の中心位置をセルの中心位置からずらすことによって位相変化を与える detour phase 効果を利用したものであった¹²⁻¹⁵⁾。Lohmann型ホログラムでは、 $\Delta\nu = \Delta x^{-1}$ としている。このLohmann型のホログラムは構成法が簡単であり、しかも良質の再生像が得られることから多くの研究者の注目を集め、以後、計算機ホログラムの研究は応用光学におけるユニークな研究分野を形成することになった。

現在までに、Lohmann型ホログラム以外にも多くのホログラム構成法が提案され、実用化されている。それらをまとめると表1のようになる。

1.2.1 Lohmann型ホログラム

ホログラムが再生すべき複素振幅分布 $T(\nu_x, \nu_y)$ を表示する方法は種々考えられるが、ここでは detour phase 効果を用いた Lohmann型バイナリーホログラムの方法で考える。この方法では、図1に示すようにホログラム面を各サンプル点を中心に一辺 $\Delta\nu$ のセルに分割する。 $\nu_x = j\Delta\nu, \nu_y = k\Delta\nu$ として、座標を離散化して表すことにする。(j, k) 番目のセルに矩形の小窓を明け、小窓の高さ V_{jk} と中

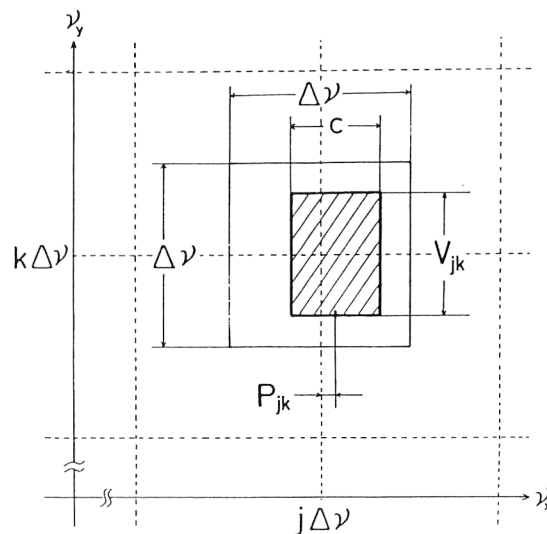


図1 Lohmann型ホログラムのセル構造。

表1 ホログラムの種類と特徴。

ホログラムの種類		振幅透過率	特徴
振幅型	セル型	Lohmann型	2値 多値(2値)
		Lee型	
	点表示型	off-axis型	多値 2値
		干渉縞型	
	その他	輪帯板型など	
位相型	キノフォーム	一定	波面をレイフに記録, on-axis 再生可能 点像列, ビーム分割
	ダンマン格子	一定	

心位置のシフト量 P_{jk} を変調して、振幅と位相の変化を表す。数値計算の結果から、 $T(j\Delta x, k\Delta x)$ の実部 R_{jk} と虚部 I_{jk} が得られるので、波面の振幅 A_{jk} と位相 ϕ_{jk} は

$$A_{jk} = \sqrt{R_{jk}^2 + I_{jk}^2} \quad (4)$$

$$\phi_{jk} = \tan^{-1}\left(\frac{I_{jk}}{R_{jk}}\right) \quad (5)$$

で与えられる。よって、窓の高さ V_{jk} とシフト量 P_{jk} は、

$$V_{jk} = \frac{A_{jk}}{\max(A_{jk})} \cdot \Delta\nu \quad (6)$$

$$P_{jk} = \frac{\phi_{jk}}{2\pi} \cdot \Delta\nu \quad (7)$$

のように表される。このようにして計算された高さとしフト量をもつ多くの矩形開口からなるバイナリーパターンを X - Y プロッターやグラフィックディスプレイ装置に出力し、写真記録すればホログラムができあがる。ホログラムの振幅透過率分布は、

$$T(\nu_x, \nu_y) = \sum_j \sum_k \text{rect}\left(\frac{\nu_x - j\Delta\nu - P_{jk}}{c}\right) \times \text{rect}\left(\frac{\nu_y - k\Delta\nu}{V_{jk}}\right) \quad (8)$$

ただし、

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & |x| \leq \frac{1}{2} \\ 0 & |x| > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (9)$$

であり、 c は矩形開口の横幅を表す。

1.2.2 ホログラムの再生

ここでは、式(8)で表されるホログラムの再生の過程を解析する。ホログラムは平行光で照明され、レンズの後側焦点面に波面のフーリエ変換像を得る配置を考える。計算機ホログラムがフーリエ変換ホログラムの場合には、この面に再生像が得られる。

レンズの後側焦点面の座標 (x', y') とすると、ホログラムのフーリエ変換像は、

$$\begin{aligned} t(x', y') &= \iint T(\nu_x, \nu_y) \exp[-2\pi i(x'\nu_x + y'\nu_y)] d\nu_x d\nu_y \\ &= \sum_j \sum_k w_{jk}(x', y') \exp[-2\pi i(jx' + ky') \Delta\nu] \end{aligned} \quad (10)$$

ただし

$$\begin{aligned} w_{jk}(x', y') &= \frac{\sin\pi cx'}{\pi x'} \cdot \frac{\sin\pi V_{jk} y'}{\pi y'} \\ &\quad \times \exp(-2\pi i P_{jk} x') \end{aligned} \quad (11)$$

次に、 w_{jk} を $x'_c = n/\Delta\nu$, $y' = 0$ のまわりに級数展開する。 x' は $\Delta\nu$ に逆比例しており、ホログラムのキャリア周波数の n 倍に相当している。関数、 $w_{jk}(x', y')$ は $|x' - x'_c| \leq 1/\Delta\nu$, $|y| \leq 1/\Delta\nu$ の領域で展開し、高次の項を無視すれば、式(10)は次式のように書ける。

$$\begin{aligned} t(x', y') &= \frac{\sin\pi cx'}{\pi x'} \sum_j \sum_k (1 - q_{jk}) V_{jk} \\ &\quad \times \exp(-2\pi i n P_{jk} / \Delta\nu) \exp[-2\pi i(jx' + ky') \Delta\nu] \\ &= \frac{\sin\pi cx'}{\pi x'} \sum_j \sum_k (1 - q_{jk}) A_{jk} \Delta\nu \\ &\quad \times \exp(-2\pi i n \phi_{jk}) \exp[-2\pi i(jx' + ky') \Delta\nu] \end{aligned} \quad (12)$$

ただし

$$q_{jk} = (\pi A_{jk} \Delta\nu y')^2 / 6 + 2\pi i \phi_{jk} (x' - x'_c) \Delta\nu \quad (13)$$

ノイズの項 q_{jk} を無視すれば、式(12)は、 $n=1$ のとき、所望の波面、 $U(\nu_x, \nu_y) = A(\nu_x, \nu_y) \exp[i\phi(\nu_x, \nu_y)]$ のフーリエ変換の形をしている。したがって Lohmann 型のホログラムは q_{jk} 程度のノイズをもった波面を再生しているといえる。

1.2.3 点表示縞型ホログラム (干渉縞型)

従来の off-axis ホログラムと同様に、ホログラムの強度分布

$$\begin{aligned} h(x, y) &= |\text{Re}^{2\pi i \alpha x} + A(x, y) e^{i\phi(x, y)}|^2 \\ &= R^2 + A^2(x, y) + 2RA(x, y) \cos[2\pi \alpha x + \phi(x, y)] \end{aligned} \quad (14)$$

を計算し、表示する方法である。ただし、 R は参照波の振幅、 α は参照波のキャリア周波数、 $A(x, y)$ と $\phi(x, y)$ は物体波の振幅と位相である。ここで、 $A^2(x, y)$ の項は直接再生像に寄与しないので省略することが多い。ホログラムを表示するには、濃淡図形が出力できる CRT ディスプレイ装置を用いる^{16,17)}。

ホログラムを2値化して表示する方法が一般的であるが、このときには当然再生像には雑音が発生する。雑音を低減するための最適なバイナリー分布を求めめるため、種々の最適化技術が研究されている¹⁸⁾。また、濃淡表示方法として印刷技術で利用されている誤差拡散法などの利用も研究されている¹⁹⁻²¹⁾。

再生波面の振幅分布が一様な場合には、式(1)で表されるホログラムの振幅透過率分布を、そのまま濃淡図形として表示せず、これをバイナリー表示することも可能である。 u をパラメーターとして、

$$\cos[2\pi \alpha x + \phi(x, y)] \geq \cos\pi u \quad (15)$$

を満たす領域を透明とすればよい。応用上、この種のホログラムは干渉原器として使用されることが多い。その場合には、式(15)の代わりに、 n を整数として、

$$2\pi \alpha x + \phi(x, y) = 2n\pi \quad (16)$$

の等位相線を描くことで十分な精度の波面が得られる。高精度で、しかも高速にこのホログラムを得るためのアルゴリズムが Birch²²⁾、Lee²³⁾、そして筆者らによって発表さ

れている^{24,25)}。

1.2.4 Lee 型ホログラム

Lee によって提案された標本化フーリエ変換ホログラムは、複素振幅分布を振幅と位相の項からなると考える代わりに、実部と虚部に分け、おのおのが正または負の値をとると考えたところから出発している²⁶⁾。したがって、ホログラムのセルは4つの等間隔の小開口に分けられ、第1番目の開口には複素振幅分布の実部の正成分が、第2, 第3, 第4の開口にはそれぞれ虚部の正, 実部の負, 虚部の負の成分が割り当てられる。各成分の大きさは開口の透過率分布、または、開口の面積に比例させる。Burckhardt は、この方式を単純化して3つの開口からなるセルを考えてもホログラムができることを指摘した²⁷⁾。また、Hsueh と Sawchuk はセルを2分割し各々の開口に位相分布をもたせた2重位相ホログラムを提案している²⁸⁾。また、この改良型も提案されている²⁹⁾。

1.2.5 その他

上記のいろいろなホログラムとまったく異なった考え方から出発したものに、Waters による輪帯板型のホログラムがある³⁰⁾。彼は、物体を離散的な点光源の集合とみなし、個々の点光源が参照光と干渉して、ホログラム面上にフレネルの輪帯板を作ると考えた。この方法では回折計算に相当する部分は、輪帯板の計算、およびその重ね合わせですみ、少数の点光源で表すことができる単純な物体のフレネル型ホログラムの作製に便利である。

また、物体を、点や線、面などの要素からなるとして、この各要素のフーリエ変換やフレネル変換をあらかじめ計算しておいて、物体によりこれを組み合わせてホログラムの複素振幅を計算する手法も提案されている^{31,32)}。

1.3 キノフォーム

これまで述べたホログラムは、いわゆる振幅ホログラムであるが、Lesem らのキノフォームは、ブレード・ホログラムに対応している³³⁾。このキノフォームでは、式(1)の位相 $\phi(x, y)$ に関する情報のみから像再生を行うことを特徴としている。振幅の情報に関しては、物体の各点にあらかじめランダムな位相を与え、キノフォーム面上の振幅を一様とみなせるようにしておく。Lesem らは位相変化を与える手段として写真のレリーフ像を利用した。Chu らは、3層の感光膜を有するカラーフィルムを使って記録された色によって感光層の厚さが変化することを利用して位相変化を与え、キノフォームを作った³⁴⁾。

さて、キノフォームでは振幅情報を無視するので、このため発生する雑音・偽像を低減するために、最適なキノフォーム位相分布を探索する方法が研究されている^{35,36)}。詳

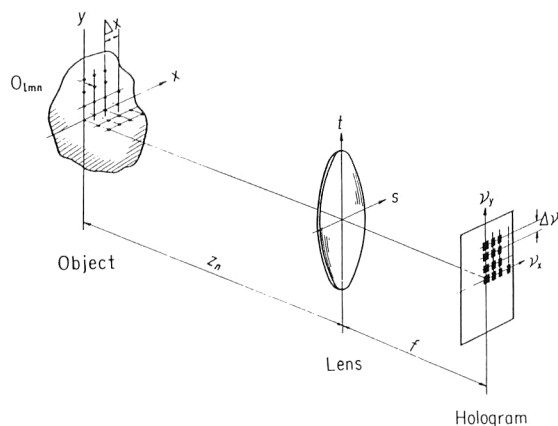


図2 回折計算のための配置。

細は最適化の3章2節で述べる。

1.4 ダンマン格子

ビーム分割や光インターコネクションを目的として、等しい強度をもつ多数の点像配列を再生する位相格子をダンマン格子という³⁷⁻³⁹⁾。ダンマン格子は、バイナリーな位相格子でその設計には最適化手法が利用される。

2. ホログラムの計算法

2.1 回折の計算

2.1.1 FFT による回折計算

3次元の物体からホログラム面に回折されてくる波面を考える。数値計算の都合から図2のように物体を $N \times N \times N$ 個の3次元格子状に置かれた点光源の集合と考えることにする。光学系の便宜上、物体とホログラム面の間に焦点距離 f のレンズを置き、焦点面でホログラムを記録する配置をとる。物体の標本間隔を Δx とし、ある格子点状の光源の座標を $O_{lmn}(l\Delta x, m\Delta x, z_n)$ と表す。ただし、 l, m, n は整数で $|l|, |m|, |n| \leq N/2$ である。物体上の1点 O_{lmn} からレンズを通してホログラム面に到達する波面の複素振幅分布は⁴⁰⁻⁴²⁾、

$$\begin{aligned}
 U_{lmn}(v_x, v_y) &= \alpha_{lmn} e^{i\beta_{lmn}} \\
 &\times \iint_s \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda z_n} \{(l\Delta x - s)^2 + (m\Delta x - t)^2\}\right] \\
 &\times \exp\left\{-\frac{i\pi}{\lambda f} (s^2 + t^2)\right\} \\
 &\times \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda f} \{(s - v_x)^2 + (t - v_y)^2\}\right] ds dt
 \end{aligned} \tag{17}$$

ただし、 $\alpha_{lmn}, \beta_{lmn}$ は点光源 O_{lmn} から発する波面の振幅と位相を、 λ は使用波長を、 (s, t) はレンズ面にとられた座標を表す。計算の簡単化のため、ホログラム面の実空間

座標 (v_x, v_y) を

$$v_x = \frac{1}{\lambda f} v_x, \quad v_y = \frac{1}{\lambda f} v_y \quad (18)$$

と変数変換する。レンズの瞳 S が物体と比べて十分大きければ、瞳の大きさの影響は無視できるので、下式が得られる。

$$\begin{aligned} U_{lmn}(v_x, v_y) &= \alpha_{lmn} e^{i\beta_{lmn}} \\ &\times \exp\{\pi\lambda i(f - z_n)(v_x^2 + v_y^2)\} \\ &\times \exp\{-2\pi i(\Delta x \cdot v_x + m\Delta x \cdot v_y)\} \end{aligned} \quad (19)$$

いま、物体は $z = z_n$ の1つの面上のみに存在する2次元物体であるとする、ホログラム面上の波面の複素振幅分布、 $U_n(v_x, v_y)$ は、

$$\begin{aligned} U_n(v_x, v_y) &= \sum_{l=-N/2}^{N/2} \sum_{m=-N/2}^{N/2} \alpha_{lmn} e^{i\beta_{lmn}} \\ &\times \exp\{\pi\lambda i(f - z_n)(v_x^2 + v_y^2)\} \\ &\times \exp\{-2\pi i(l\Delta x \cdot v_x + m\Delta x \cdot v_y)\} \end{aligned} \quad (20)$$

が得られる。式(21)は離散的な2次元フーリエ変換の形をしている。

ここで、ホログラム面上の波面を Δv の間隔をもった2次元格子で標本化しよう。そのために、

$$\begin{aligned} v_x &= j\Delta v \\ v_y &= k\Delta v \end{aligned} \quad (21)$$

とおく。 Δv は標本化定理が成立するような間隔でなくてはならない。物体の大きさは $N\Delta x$ であるので物体のバンド幅は $N\Delta x/2$ であるので標本化定理の要請から⁴³⁾、

$$\Delta v \leq \frac{1}{2(N\Delta x/2)} \quad (22)$$

の条件が必要である。よって、

$$\Delta x \cdot \Delta v \leq \frac{1}{N} \quad (23)$$

を満足させねばならない。この条件をはずれた場合には重複歪み誤差 (aliasing error) を生じる。また、 N 個の標本数の離散的なフーリエ変換からは、独立なスペクトルは N 個しか求まらないから⁴⁴⁾、

$$2\pi\Delta x \cdot \Delta v \frac{2\pi}{N} \quad (24)$$

を満たすように Δv を定めると、式(20)は、

$$\begin{aligned} U_n(j, k) &= U_n(j\Delta v, k\Delta v) \\ &= \exp\{\pi\lambda i(f - z_n)(f^2 + k^2)(\Delta v)^2\} \\ &\times \sum_l \sum_m \alpha_{lmn} e^{i\beta_{lmn}} \exp\left\{-\frac{2\pi i}{N}(lj + mk)\right\} \\ &= L_{jk}(z_n) \sum_l \sum_m \alpha_{lmn} e^{i\beta_{lmn}} W^{lj+mk} \end{aligned} \quad (25)$$

が得られる。ただし、

$$L_{jk}(z_n) = \exp\{\pi\lambda i(f - z_n)(j^2 + k^2)(\Delta v)^2\} \quad (26)$$

$$W = \exp\left(-\frac{2\pi i}{N}\right) \quad (27)$$

式(25)の和の部分のフーリエ変換は、高速フーリエ変換のアルゴリズムを用いて計算する⁴⁴⁻⁴⁸⁾。

$z = z_n$ 以外の面にも物体が存在するような3次元物体の場合には、

$$\begin{aligned} U(j, k) &= \sum_{n=1}^N U_n(j, k) \\ &= \sum_n L_{jk}(z_n) \sum_l \sum_m \alpha_{lmn} e^{i\beta_{lmn}} W^{lj+mk} \end{aligned} \quad (28)$$

となり、各 $z_n (n=1, \dots, N)$ ごとに2次元フーリエ変換を計算し、そのおのおのに $L_{jk}(z_n)$ の位相を乗算したものの和を計算すればよい^{13,42)}。

2.1.2 その他の回折計算

上記のアルゴリズムは物体がホログラム面から離れていて、フレネル回折やフラウンホーファー回折の近似が十分成立する場合に適用可能である。いわゆるイメージホログラムの場合には、必ずしもフレネル回折の近似が成立しない。このような場合には、直接フレネルキルヒホッフの積分を計算する方法や^{49,50)}、回折波を角スペクトル展開して計算する手法がとられる⁵¹⁾。

再生像面がホログラム面に対して傾いている場合や⁵²⁾、曲面上に像を再生させる方法も検討されている⁵³⁾。

2.2 再生像とホログラムの内挿

空間周波数フィルタリングにおいて、入力物体の幅がフィルターのインパルス応答の幅と比べて大きい場合に所望の出力像を得るためには、入力物体幅に応じた十分高いキャリア周波数をフィルターに与えねばならない⁵⁴⁾。計算機ホログラムで空間周波数フィルターを作る場合には、計算機の処理能力(計算量と記憶容量)の制約から高いキャリア周波数をもつフィルターを直接計算することは困難が多い。

Barteltらは高いキャリア周波数を得る方法として、Lohmann型ホログラムにおける開口横ざらし量および開口幅を $1/M$ にして、 M 次回折光で所望のインパルス応答を得る方法を試みた⁵⁵⁾。しかし、このままでは0次から $M-1$ 次にも回折によって偽像が生じるため、開口横ざらし量と幅を $1/M$ にしたため生じたスペースに上記の同じホログラムをインターレースとして偽像の影響を軽減した。筆者は、内挿計算法によってホログラムの各標本点間の振幅と位相を求め、高いキャリア周波数をもったホログラムを作製する方法を提案した⁵⁶⁾。この本方法ではBarteltの方法で生じる偽像はまったく生じない。

一般に、セル型ホログラムでは、ホログラムの標本数と再生像の解像点数は同じである。したがって、大きな解像

点数をもつホログラムの計算には、大規模なフーリエ変換が必要となる。再生像の解像点の複素振幅が各点で独立である場合には、この条件を満足する必要があるが、そうでない場合には、計算の効率を上げることが可能である。 $NK \times NK$ の標本数をもつフーリエ変換計算機ホログラムを計算する場合に、 $N \times N$ の標本のホログラムを計算しこれを $K \times K$ 倍内挿する方法が提案されている⁵⁷⁾。まず $N \times N$ のホログラムを計算し、これを $K \times K$ 個並べる。この状態に適当な複素関数の重みを掛けることによって再生像が内挿される。筆者らは、重みの決定法、内挿関数などについて理論的に検討し、いくつかの例について実験的に検証した⁵⁸⁾。また、物体の位相がランダムである場合の検討もなされた⁵⁹⁾。

内挿法を用いた光・電気ハイブリッドシステムによるキノフォームの合成法が提案されている。プログラム可能な液晶空間光変調器をキノフォームとして用いる場合に、シミュレーティッドアニーリングによりキノフォームの位相を最適化するが、内挿法によって再生像のランダムノイズを最小化することが可能である⁶⁰⁾。また、Takaki らは、物体標本点の位相を適当に選ぶことにより再生像の解像点数を増すことができることを示した⁶¹⁾。

3. 再生像の画質・雑音と最適化

3.1 画質と雑音

以上述べたように、計算機ホログラム構成法に関する研究は多岐にわたっている。これらの研究と並行して、再生像の画質の改良法および雑音の解析の研究が進められてきた。

画質の研究に対しては、Dallas⁶²⁾、Gallagher⁶³⁾、Gabel⁶⁴⁾、Chu⁶⁵⁾ら多数の研究者によって、物体に与えるべきランダム位相の最適化の研究がなされ、Lohmann-Brown⁴²⁾および Chavel⁶⁶⁾らによって Lohmann 型ホログラム、Lee 型ホログラムの位相誤差補正の研究が行われた。

再生像の雑音解析については、位相の量子化についての Goodman⁶⁷⁾、Dallas^{68,69)} および Kawatani による干渉縞強度の量子化の研究⁷⁰⁾、筆者らによるキノフォームの位相非線形性の解析^{71,72)}、量子化されたキノフォームの誤差^{73,74)} およびホログラム製作中に加わる種々の統計的な雑音に関する検討がなされ、種々のホログラム構成法における再生像の性質と雑音特性が明らかにされた^{75,76)}。

干渉原器として計算機ホログラムを使用する場合には、特に再生波面の精度が問題になるため、MacGovern⁷⁷⁾、Wyant⁷⁸⁾、Fercher⁷⁹⁾ および Yatagai⁸⁰⁾ の研究など多くの

研究がなされている^{81,82)}。そして、これらの成果をもとに、再生波の位相誤差の補正法が Yatagai²⁵⁾ によって研究され、実用上十分な精度の波面が得られるようになった。

3.2 ホログラムの最適化

キノフォームでは、複素振幅分布のうちで振幅分布を無視した最適位相分布を求めたり、あるいは、空間周波数フィルターでは目的とする応答をもつ最適な複素振幅分布を必要とすることが多い。このような目的で最適な複素振幅分布を計算する手段として、直接検索法⁸³⁻⁸⁸⁾、焼き鈍し法、遺伝アルゴリズムなどの非線形最適化アルゴリズムが利用されている。

焼き鈍し法（シミュレーティッドアニーリング）によるキノフォームの設計が議論された⁸⁹⁻⁹¹⁾。このとき、焼き鈍し法は再生雑音を減少させ、再生デバイスの特性に合わせて最適化を行うことができる。液晶空間光変調器でキノフォームを表示し、良好な再生像を得、量子化効果についても議論された⁹²⁾。遺伝的アルゴリズムを用いて量子化された位相をもつキノフォームの位相最適化法が研究された⁹³⁾。そもそも遺伝的アルゴリズムはディスクリットな情報を扱うものなので量子化された位相の計算に適している。2次元フーリエキノフォームは遺伝的アルゴリズムにおける離散的フーリエ変換の周期性を効果的に利用できる点も特徴である。

ホログラムの最適化に対して、最適な物体位相分布の研究もなされている⁹⁴⁾。

4. ホログラムの製作技術

上記の方法で設計された計算機ホログラムを利用するには、なんらかの方法でこれを表示し、透過あるいは反射型のホログラムとしなくてはならない。当然のことであるが、ホログラムは回折光学素子であるので、表示されるセル間隔や干渉縞のキャリア周波数で再生像の大きさが決まる。

4.1 プロッター、プリンター

振幅型のホログラムの場合には、従来から X - Y プロッター⁸⁾ やプリンター^{95,96)} あるいは CRT に表示し^{16,17)}、適当な大きさに縮小する方法がとられている。特に振幅型のバイナリーホログラムの場合には、 X - Y プロッターやレーザープリンターが用いられる。

4.2 空間光変調器

空間光変調器を用いてホログラムを表示する方法では、実時間でホログラムを表示でき⁹⁷⁻⁹⁹⁾、また、液晶の位相変調モードを使った場合にはキノフォームの表示も可能で

ある^{100,101)}。現在のところ、液晶空間光変調器、磁気光学空間光変調器などを使った研究¹⁰²⁾が報告されている。最も一般的に利用されている液晶空間光変調器の解像点数は、1000×800点程度である。

4.3 レーザービーム描画装置

レーザービーム露光装置は、高い空間解像力と広い描画領域をもつ表示装置である。通常この描画装置は、液晶表示装置用のマスク描画や、CDの原盤製作に利用されている。CD原盤製作用のレーザー描画装置を用いてLohmann型ホログラムが製作されている¹⁰³⁾。類似の研究に、磁気光学ディスクにホログラムを書き込んだ例がある¹⁰⁴⁾。エキシマーレーザーを用いた方法もある¹⁰⁵⁾。

4.4 電子ビーム露光装置

電子ビーム露光装置を用いれば高い解像力をもったホログラムの直接描画が可能であるため、多くの研究がある¹⁰⁶⁻¹¹¹⁾。直接描画を利用する方法以外に、エッチング用のマスクを制作する方法がある。何種類かのマスクを利用すれば、多レベル位相のキノフォームの制作も可能である。

4.5 屈折率変調

ホログラムの位相を変調する方法として、ホログラム基板の屈折率を変調する方法が報告されている。キノフォームを制作する方法として、はじめに位相分布を濃淡表示し、これを銀塩感光材料に記録し漂白して位相分布を作る方法⁸⁾、ガラス基板にイオン交換法で屈折率変化をつける方法などが知られている¹¹²⁻¹¹⁴⁾。また、波長以下の微細構造による等価屈折率制御による位相ホログラムの製作も試みられている^{115,116)}。

5. 計算機ホログラムの応用

計算機ホログラムの応用に関する研究については、(1) 情報処理(フィルター、光メモリー、スキャナー)、(2) 3次元像ディスプレイ、カラー画像表、(3) 干渉法(非球面の検査)、(4) 光インターコネクション、(5) 波面変換、回折光学素子、などが実用上重要と思われる。

5.1 情報処理

空間周波数フィルタリングに計算機ホログラムを最初に使用した例は、前述のごとくKozmaの1次元マッチトフィルターである¹¹⁾。2次元の本格的な空間周波数フィルターは、Brown, Lohmannのマッチトフィルターであり¹²⁾、その後、Lohmann, Paris, Werlichのグループにより、微分フィルター、インバースフィルター、コード変換フィルター¹³⁾の製作が次々と試みられた^{14,117)}。計算機ホログラムを使った空間周波数フィルタリングで一番問題と

なることは、計算機の処理能力(計算量と記憶容量)の制約から光学的に作られた空間周波数フィルターに比較して高いキャリア周波数のフィルターを作ることが困難なことである。Lowenthal⁵⁴⁾、Bartelt⁵⁵⁾およびYatagaiは、計算機ホログラムの標本点のインターレース法と内挿法を用いたキャリア周波数増大法を研究した⁵⁶⁾。

空間周波数フィルタリングでは、入力物体と参照用物体との間に生じる倍率の変化や回転など幾何学的な歪みによって出力がいちじるしく損なわれてしまう。Casasentは倍率不変な変換であるMellin変換を空間周波数フィルタリングに導入し、大きさの異なる物体に対するマッチトフィルタリングを行った¹¹⁸⁾。筆者はこのMellin変換を計算機ホログラムで実現し、倍率不変なパターン¹¹⁹⁾の分類法を試みた¹¹⁹⁾。またSaitoらは¹²⁰⁾、極座標系と直交座標系の変換をする計算機ホログラムの設計を行っている。

光メモリーに関しては、Shew-Blanchard¹²¹⁾、Kozma¹²²⁾などの先駆的な研究、その後の多くの実用化研究がある。光メモリーの情報蓄積密度と再生像質の関係も研究され、Gabel-Liu¹²³⁾、Chu-Goodman⁶⁵⁾、Dallas⁶²⁾、Gallagher¹²⁴⁾などにより計算機ホログラムの位相符号化の問題が検討された。

計算機ホログラムを空間周波数可変なグレーティングとみなせば、計算機ホログラムによりレーザービームの偏向器ができる。Bryngdahlらはこの考え方を発展させて、2次元的なラスタースキャン、スパイラルスキャンなどを行った^{125,126)}。

空間周波数フィルタリングにおいて、相関演算を利用するマッチトフィルターやウェーブレット変換によるフィルタリング¹²⁷⁾、多重ターゲットフィルタリング^{128,129)}などが試みられている。

5.2 ディスプレイとカラー表示

計算機ホログラムを用いた3次元ディスプレイ法に関しては、比較的初期の段階からWaters³⁰⁾やLohmannらにより研究が進められ¹³⁾、いくつかの実証的な試みがされた。しかし、立体感のある3次元像を得るためには、大型のホログラムを作る必要がある。これを直接的に作るには膨大な計算量と高精度な表示装置を必要とするため、計算機ホログラムは実用的な3次元像再生の手段とはならなかった。Kingらは、回折の計算の時間短縮をはかるため、従来の光学的なステレオグラムの手法を計算機ホログラムに導入した¹³⁰⁾。また、筆者は、3次元物体の投影像の計算を利用することにより、計算時間および記憶容量を大幅に低減することに成功した。これらの手法により、計算機ホログラムによる3次元ディスプレイの問題は一応の解決を

みた¹³¹⁾。

大型の再生像をつくる工夫¹³²⁾，カラー画像の表示法^{133,134)}，レインボーホログラムの作製¹³⁵⁾，4つの再生像の同時再生¹³⁶⁾，セキュリティを目的とした二重露光ホログラム¹³⁷⁾などが試みられ，また，ホログラム面が曲がっている場合の像再生¹³⁸⁾や曲面の表示¹³⁹⁾についても議論がなされている。

5.3 干渉計測

干渉法への応用は，計算機ホログラムの応用の中でも最も実用的価値が高いと考えられている。Pastor¹⁴⁰⁾の提案以来，MacGovern⁷⁷⁾，Wyant⁷⁸⁾，Birch²²⁾，Fercher¹⁴¹⁾，Witz¹⁴²⁾，Ichioka¹⁴³⁾，Takahashi¹⁴⁴⁾，Sirohi¹⁴⁵⁾そしてYatagaiによる研究²⁵⁾など多数をかぞえる。主な研究内容は，Wyant-Bennett⁷⁸⁾，Yatagaiによる測定誤差の解析²⁵⁾，Birch²²⁾，Lee²³⁾，Fercher¹⁴¹⁾，Yatagaiらによる高精度ホログラムの作製法および誤差の検討²⁵⁾，Ichioka¹⁴³⁾，Schwider¹⁴⁶⁾による輪帯板型ホログラム法，Takahashiらによるホログラム誤差の補正法¹⁴⁴⁾，Faulde¹⁴⁷⁾，Yatagaiによる収差バランス法による大曲率光学素子の測定法²⁵⁾，Fercher⁷⁹⁾，Yatagaiによる2つの参照波面を1つのホログラムから発生させるDualホログラフィー法¹⁴⁸⁾などである。また，同じく干渉法への応用例であるが，Bryngdahl-Leeによって計算機ホログラムを用いたシアリング干渉法が報告されている¹⁴⁹⁾。

5.4 光インターコネクション，波面変換，回折光学素子

ホログラムは，像表示や情報処理用の複素フィルターとして利用されるばかりでなく，光ビームの分配や統合あるいは波面形状の変換などの目的でも使用される。光コンピューティング¹⁵⁰⁾や光通信などにおいて，光ビームの分配，光回路の配線などを目的として，光インターコネクション¹⁵¹⁾用の計算機ホログラムが多用されている。目的や光演算の種類によりきわめて多くの研究がなされているがここでは詳しくは述べない¹⁵²⁻¹⁵⁵⁾。

適当な振幅分布をもった波面は，光の回折現象をあまり受けずに空間を伝搬することができる。このような性質をもつ波面を計算機ホログラムで発生させることができる¹⁵⁶⁻¹⁵⁸⁾。また，加工機などへの利用から，ビームの振幅分布や強度分布を均一にする目的で計算機ホログラムが利用されている¹⁵⁹⁻¹⁶⁴⁾。ビームの空間伝搬に蛇行特性をもたせたり¹⁶⁵⁾，コンカルやヘリカル形状をもった波面の発生¹⁶⁶⁾，円周状のキャリアーの利用¹⁶⁷⁾，また，光散乱特性を制御した拡散板としての計算機ホログラムの利用¹⁶⁸⁻¹⁷⁰⁾も検討されている。2つのホログラムの重ね合わせによって，焦点可変の光学素子を作製したり^{171,172)}，偏光特性を

利用した計算機ホログラム^{173,174)}などの提案もある。多波長に対して最適化されたホログラムも提案されている^{175,176)}。また，レーザートラッピング用のレンズとしての利用も検討されている^{177,178)}。このように，特殊な機能をもったホログラムの設計には，種々の最適設計手法が利用される¹⁷⁹⁻¹⁸⁶⁾。

以上述べてきたように計算機ホログラムの研究は，基礎から応用にいたるまで非常に広範な分野で研究が進められ，応用光学上の重要な技術として発展してきた。今後のデジタル計算機の飛躍的な発展はもちろんのこと，電子ビーム露光装置やエッチング技術などに代表される精密加工技術そして空間光変調器の進歩などに支えられ，計算機ホログラムの重要性は今後ますます増加するものと期待される。

文 献

- 1) W. H. Lee: *Progress in Optics*, Vol. 16, ed. E. Wolf (North-Holland, Amsterdam, 1978) pp. 119-232.
- 2) W. -J. Dallas: *The Computer in Optical Research*, ed. B. R. Frieden (Springer-Verlag, Berlin, 1980) pp. 291-366.
- 3) T. S. Huang: *Proc. IEEE*, **59** (1971) 1335-1346.
- 4) L. P. Yaroslavskii and N. S. Merzlyakov: *Methods of Digital Holography* (Consultants Bureau, New York, 1980).
- 5) O. Bryngdahl and F. Wyrowski: *Progress in Optics*, Vol. 28, ed. E. Wolf (North-Holland, Amsterdam, 1990) pp. 1-86.
- 6) G. Tricoles: *Appl. Opt.*, **26** (1987) 4351-4360.
- 7) O. Bryngdahl: *Opt. Eng.*, **14** (1975) 426-435.
- 8) 谷田貝豊彦，武田光夫：光学ニュース，No. 117 (1971) 3-12; No. 118 (1971) 3-10.
- 9) 谷田貝豊彦：精密機械，**47** (1981) 1541-1546.
- 10) ed. S. H. Lee: *Diffraction and Miniaturized Optics, Critical Reviews of Optical Science and Technology*, *Proc. SPIE*, **CR49** (1993).
- 11) A. Kozma and D. L. Kelly: *Appl. Opt.*, **4** (1965) 387-392.
- 12) B. R. Brown and A. W. Lohmann: *Appl. Opt.*, **5** (1966) 967-969.
- 13) A. W. Lohmann and D. P. Paris: *Appl. Opt.*, **6** (1963) 1739-1748.
- 14) A. W. Lohmann and D. P. Paris: *Appl. Opt.*, **7** (1968) 651-655.
- 15) U. Levy, E. Marom and D. Mendlovic: *Appl. Opt.*, **37** (1998) 3044-3052.
- 16) A. J. Meyer and R. Hickling: *J. Opt. Soc. Am.*, **57** (1967) 1388-1389.
- 17) L. B. Lesem, P. M. Hirsch and J. A. Jordan, Jr.: *Commun. ACM*, **11** (1968) 661-674.
- 18) R. Hauck and O. Bryngdahl: *J. Opt. Soc. Am. A*, **1** (1984) 5-10.
- 19) R. Eschbach: *Appl. Opt.*, **30** (1991) 3702-3710.
- 20) S. Weissbach, F. Wyrowski and O. Bryngdahl: *Opt. Commun.*, **67** (1988) 167-171.

- 21) S. Weissbach, F. Wyrowski and O. Bryngdahl: *Opt. Commun.*, **72** (1989) 37-41.
- 22) K. G. Birch and F. J. Green: *Appl. Phys.*, **5** (1972) 1982.
- 23) W. H. Lee: *Appl. Opt.*, **13** (1974) 1677-1682.
- 24) 谷田貝豊彦: *光学*, **5** (1976) 228-232.
- 25) T. Yatagai and H. Saito: *Appl. Opt.*, **17** (1978) 558-565.
- 26) W. H. Lee: *Appl. Opt.*, **9** (1970) 639-643.
- 27) C. B. Burckhardt: *Appl. Opt.*, **9** (1970) 1949.
- 28) C. K. Hsueh and A. A. Sawchuk: *Appl. Opt.*, **17** (1978) 3874-3883.
- 29) J. N. Mait and K. -H. Brenner: *Appl. Opt.*, **26** (1987) 4883-4892.
- 30) J. P. Waters: *Appl. Phys. Lett.*, **9** (1966) 405-407.
- 31) T. Sato and T. Seo: *Bull. Tokyo Inst. Technol.*, **99** (1970) 71-80.
- 32) D. Leseberg and C. Frere: *Appl. Opt.*, **27** (1988) 3020-3024.
- 33) L. B. Lesem, P. M. Hirsch and J. A. Jordan, Jr.: *IBM J. Res. Dev.*, **13** (1969) 150-155.
- 34) D. C. Chu, J. R. Fienup and J. W. Goodman: *Appl. Opt.*, **12** (1973) 1386-1388.
- 35) R. W. Gerchberg and W. O. Saxton: *Optik*, **35** (1972) 234-246.
- 36) B. K. Jennison, J. P. Allebach and D. W. Sweeney: *Opt. Eng.*, **28** (1989) 629-637.
- 37) H. Dammann and K. Gortler: *Opt. Commun.*, **3** (1971) 312-315.
- 38) H. Dammann and E. Kortz: *Opt. Acta*, **24** (1977) 505-515.
- 39) H. Dammann: *Appl. Opt.*, **17** (1978) 2273-2279.
- 40) J. W. Goodman: *Introduction to Fourier Optics*, 2nd ed., (McGraw-Hill, New York, 1996).
- 41) A. Papoulis: *Systems and Transforms with Applications in Optics* (McGraw-Hill, New York, 1968) p. 411.
- 42) B. R. Brown and A. W. Lohmann: *IBM J. Res. Dev.*, **13** (1969) 160-168.
- 43) C. E. Shannon: *Proc. IRE*, **37** (1949) 10.
- 44) B. Gold and C. M. Rader: *Digital Processing of Signals* (McGraw-Hill, New York, 1969) p. 162.
- 45) J. W. Coley and J. W. Tukey: *Math. Comp.*, **19** (1965) 297.
- 46) E. O. Brigham: *The Fast Fourier Transform* (Prentice-Hall, New Jersey, 1974).
- 47) H. J. Nussbaumer: *Fast Fourier Transform and Convolution Algorithms* (Springer-Verlag, Berlin, 1981).
- 48) 谷田貝豊彦: *光とフーリエ変換* (朝倉書店, 1992).
- 49) T. J. Suleski, B. Baggett, W. F. Delaney, C. Koehler and E. G. Johnson: *Opt. Lett.*, **24** (1999) 602-604.
- 50) N. Yoshikawa, M. Itoh and T. Yatagai: *Proc. SPIE*, **3740** (1999) 521-524.
- 51) D. Leseberg: *Appl. Opt.*, **31** (1992) 223-229.
- 52) T. Tommasi and B. Bianco: *J. Opt. Soc. Am. A*, **10** (1993) 299-305.
- 53) J. Rosen: *Appl. Opt.*, **38** (1999) 6136-6140.
- 54) S. Lowenthal and P. Chavel: *Appl. Opt.*, **13** (1974) 718-719.
- 55) H. Bartelt, W. J. Dallas and A. W. Lohmann: *Opt. Commun.*, **20** (1977) 50-55.
- 56) T. Yatagai: *Opt. Commun.*, **23** (1977) 347-351.
- 57) T. Yatagai: *Proc. SPIE*, **437** (1983) 19-24.
- 58) N. Yoshikawa, M. Itoh and T. Yatagai: *Opt. Commun.*, **119** (1995) 33-40.
- 59) N. Yoshikawa and T. Yatagai: *Opt. Rev.*, **6** (1999) 433-438.
- 60) N. Yoshikawa, M. Itoh and T. Yatagai: *Opt. Rev.*, **4** (1997) 161-163.
- 61) Y. Takaki and J. Hojo: *Appl. Opt.*, **38** (1999) 2189-2195.
- 62) W. J. Dallas: *Appl. Opt.*, **12** (1973) 1179-1187.
- 63) N. C. Gallagher, Jr. and B. Liu: *Appl. Opt.*, **12** (1973) 2328-2335.
- 64) R. A. Gabel: *Appl. Opt.*, **14** (1975) 2252-2255.
- 65) D. C. Chu and J. W. Goodman: *Appl. Opt.*, **11** (1972) 1716-1724.
- 66) P. Chavel and J. P. Hugonin: *J. Opt. Soc. Am.*, **66** (1976) 989-996.
- 67) J. W. Goodman and A. M. Silvestri: *IBM J. Res. Dev.*, **14** (1970) 478-484.
- 68) W. J. Dallas: *Appl. Opt.*, **10** (1971) 673-674.
- 69) W. J. Dallas: *Appl. Opt.*, **10** (1971) 674-676.
- 70) T. Kawatani: *Opt. Commun.*, **3** (1972) 348-353.
- 71) T. Yatagai and M. Takeda: *Optik*, **43** (1975) 337-352.
- 72) 武田光夫, 谷田貝豊彦: *応用物理*, **41** (1972) 1039-1046.
- 73) S. Yang and T. Shimomura: *Appl. Opt.*, **37** (1998) 6931-6936.
- 74) S. Yang and T. Shimomura: *Appl. Opt.*, **39** (2000) 2896-2903.
- 75) F. Wyrowski: *J. Opt. Soc. Am. A*, **7** (1990) 383-393.
- 76) E. Zhang, S. Noehte, C. H. Dietrich and R. Manner: *Appl. Opt.*, **34** (1995) 5987-5995.
- 77) A. J. MacGovern and J. C. Wyant: *Appl. Opt.*, **10** (1971) 619-624.
- 78) J. C. Wyant and U. P. Bennett: *Appl. Opt.*, **11** (1972) 2833-2839.
- 79) A. F. Fercher: *Opt. Acta*, **23** (1976) 347-365.
- 80) 谷田貝豊彦, 安田賢司, 斎藤弘義: *光学*, **3** (1974) 132-139.
- 81) A. Ono and J. C. Wyant: *Appl. Opt.*, **23** (1984) 3905-3910.
- 82) K. Hibino and K. Matsuda: *Optik*, **72** (1986) 120-124.
- 83) F. Wyrowski: *Appl. Opt.*, **28** (1989) 3864-3870.
- 84) B. K. Jennison, J. P. Allebach and D. W. Sweeney: *J. Opt. Soc. Am. A*, **8** (1991) 652-660.
- 85) M. Bernhardt, F. Wyrowski and O. Bryngdahl: *Appl. Opt.*, **30** (1991) 4629-4635.
- 86) L. Legeard, P. Refregier, and P. Ambs: *Appl. Opt.*, **36** (1997) 7444-7449.
- 87) M. Clark: *Appl. Opt.*, **38** (1999) 5331-5337.
- 88) B. B. Chhetri, S. Yang and T. Shimomura: *Appl. Opt.*, **39** (2000) 5956-5964.
- 89) J. Turunen, A. Vasara and J. Westerholm: *Opt. Eng.*, **28** (1989) 1162-1167.
- 90) M. S. Kim, M. R. Feldman and C. C. Guest: *Opt. Lett.*, **14** (1989) 545-547.
- 91) A. G. Kirk and T. J. Hall: *J. Mod. Opt.*, **39** (1992) 2531-2539.
- 92) N. Yoshikawa and T. Yatagai: *Appl. Opt.*, **33** (1994) 863-868.
- 93) N. Yoshikawa, M. Itoh and T. Yatagai: *Opt. Lett.*, **20** (1995) 752-754.
- 94) Y. Torii: *Opt. Commun.*, **24** (1978) 175-180.
- 95) A. J. Lee and D. P. Casasent: *Appl. Opt.*, **26** (1987) 136-138.
- 96) V. E. Shrauger, L. L. Erwin, J. L. Ahn and C. Warde: *Appl. Opt.*, **33** (1994) 5318-5327.
- 97) F. Mok, J. Diep, Hua-Kuang Liu and D. Psaltis: *Opt. Lett.*, **11** (1986) 748-750.
- 98) J. Amako, H. Miura and T. Sonehara: *Appl. Opt.*, **32**

- (1993) 4323-4329.
- 99) D. C. O'Brien, R. J. Mears, T. D. Wilkinson and W. A. Crossland: *Appl. Opt.*, **33** (1994) 2795-2803.
 - 100) J. Amako and T. Sonehara: *Appl. Opt.*, **30** (1991) 4622-4628.
 - 101) J. Gourlay, S. Samus, P. McOwan, D. G. Vass, I. Underwood and M. Worboys: *Appl. Opt.*, **33** (1994) 8251-8254.
 - 102) J. N. Mait and G. S. Himes: *Appl. Opt.*, **28** (1989) 4879-4887.
 - 103) T. Yatagai, J. G. Camacho-Basilio and H. Onda: *Appl. Opt.*, **28** (1989) 1042-1044.
 - 104) D. Psaltis, M. A. Neifeld, A. Yamamura and S. Kobayashi: *Appl. Opt.*, **29** (1990) 2038-2057.
 - 105) N. A. Vainos, S. Mailis, S. Pissadakis, L. Boutsikaris, P. J. M. Parmiter, P. Dainty and T. J. Hall: *Appl. Opt.*, **35** (1996) 6304-6319.
 - 106) H. Farhoosh, M. R. Feldman, S. H. Lee, C. C. Guest, Y. Fainman and R. Eschbach: *Appl. Opt.*, **26** (1987) 4361-4372.
 - 107) K. S. Urquhart, S. H. Lee, C. C. Guest, M. R. Feldman and H. Farhoosh: *Appl. Opt.*, **28** (1989) 3387-3396.
 - 108) R. W. Hawley and N. C. Gallagher: *Appl. Opt.*, **29** (1990) 216-224.
 - 109) M. S. Kim and C. C. Guest: *Appl. Opt.*, **29** (1990) 3380-3386.
 - 110) H. Andersson, M. Ekberg, S. Hard, S. Jacobsson, M. Larsson and T. Nilsson: *Appl. Opt.*, **29** (1990) 4259-4267.
 - 111) J. Fan, D. Zaleta, K. S. Urquhart and S. H. Lee: *Appl. Opt.*, **34** (1995) 2522-2533.
 - 112) T. Yatagai, R. Sugawara, H. Hashizume and M. Seki: *Opt. Lett.*, **13** (1988) 952-954.
 - 113) K. W. Wong, W. C. Yip and L. M. Cheng: *Appl. Opt.*, **32** (1993) 4955-4959.
 - 114) J. Saarinen, S. Honkanen, S. I. Najafi and J. Huttunen: *Appl. Opt.*, **33** (1994) 3353-3359.
 - 115) R. C. Enger and S. K. Case: *Appl. Opt.*, **22** (1983) 3220-3228.
 - 116) W. Yu, K. Takahara, T. Konishi, T. Yotsuya and Y. Ichioka: *Appl. Opt.*, **39** (2000) 3531-3536.
 - 117) A. W. Lohmann, D. P. Paris and H. W. Werlich: *Appl. Opt.*, **6** (1967) 1139-1140.
 - 118) D. Casasent and D. Psaltis: *Proc. IEEE*, **65** (1977) 77-10.
 - 119) T. Yatagai, K. Choji and H. Saito: *Opt. Commun.*, **38** (1981) 162-165.
 - 120) Saito, S. Komatsu and H. Ohzu: *Opt. Commun.*, **41** (1983) 8-11.
 - 121) L. F. Shew and J. G. Blanchard: *IEEE Conference on Laser Engineering and Applications* (1969).
 - 122) A. Kozma, W. H. Lee and P. J. Peter: *IEEE/OSA Conference on Laser Engineering and Applications* (1971).
 - 123) R. A. Gabel and B. Liu: *Appl. Opt.*, **9** (1970) 1180-1191.
 - 124) N. C. Gallagher, Jr.: *Proc. SPIE*, **48** (1974) 87.
 - 125) O. Bryngdahl and W. H. Lee: *Appl. Opt.*, **15** (1976) 183-194.
 - 126) J. Cederquist and A. M. Tai: *Appl. Opt.*, **23** (1984) 3099-3104.
 - 127) D. Mendlovic, I. Ouzieli, I. Kiryuschev and E. Marom: *Appl. Opt.*, **34** (1995) 8213-8219.
 - 128) M. Taniguchi, K. Matsuoka and Y. Ichioka: *Appl. Opt.*, **34** (1995) 1379-1385.
 - 129) M. Taniguchi, K. Kurokawa, K. Itoh, K. Matsuoka and Y. Ichioka: *Appl. Opt.*, **36** (1997) 9138-9145.
 - 130) M. C. King, A. M. Noll and D. H. Berry: *Appl. Opt.*, **9** (1970) 471-475.
 - 131) T. Yatagai: *Appl. Opt.*, **15** (1976) 2722-2729.
 - 132) C. Frere and D. Leseberg: *Appl. Opt.*, **28** (1989) 2422-2425.
 - 133) M. C. Nuss and R. C. Morrison: *Opt. Lett.*, **20** (1995) 740-743.
 - 134) H. H. Suh: *Opt. Lett.*, **24** (1999) 661-663.
 - 135) D. Leseberg and O. Bryngdahl: *Appl. Opt.*, **23** (1984) 2441-2447.
 - 136) R. ChaoHong, Z. Jin and G. WenQi: *Appl. Opt.*, **36** (1997) 8844-8847.
 - 137) N. Yoshikawa, M. Itoh and T. Yatagai: *Opt. Lett.*, **23** (1998) 1483-1485.
 - 138) C. Frere: *Appl. Opt.*, **29** (1990) 4761-4765.
 - 139) Z. Jaroszewicz, A. Kolodziejczyk, D. Mouriz and S. Bara: *J. Opt. Soc. Am. A*, **8** (1991) 559-565.
 - 140) J. Pastor: *Appl. Opt.*, **8** (1969) 525-531.
 - 141) A. F. Fercher and M. Krieser: *Optik*, **35** (1972) 168-179.
 - 142) W. Witz: *Optik*, **42** (1975) 287-294.
 - 143) Y. Ichioka and A. W. Lohmann: *Appl. Opt.*, **11** (1972) 2597-2602.
 - 144) T. Takahashi, K. Konno, M. Kawai and M. Isshiki: *Appl. Opt.*, **15** (1976) 546-549.
 - 145) R. S. Shirohi, H. Blume and K. J. Rosebruch: *Opt. Acta*, **23** (1976) 229-236.
 - 146) J. Schwider and R. Burow: *Proc. ICO-10* (Prague, 1975) p. 471-479.
 - 147) M. Faulde, A. F. Fercher, R. Torge and R. N. Wilson: *Opt. Commun.*, **7** (1973) 363-365.
 - 148) T. Yatagai and H. Saito: *Optica Acta*, **26** (1979) 985-993.
 - 149) O. Bryngdahl and W. H. Lee: *J. Opt. Soc. Am.*, **64** (1974) 1606-1615.
 - 150) T. Yatagai, S. Kawai and H. Huang: *Proc. IEEE*, **84** (1996) 828-852.
 - 151) 行松健一：光スイッチングと光インターコネクション（共立出版，1998）。
 - 152) B. Robertson, J. Turunen, H. Ichikawa, J. M. Miller, M. R. Taghizadeh and A. Vasara: *Appl. Opt.*, **30** (1991) 3711-3720.
 - 153) S. H. Song, C. D. Carey, D. R. Selviah, J. E. Midwinter and E. H. Lee: *Appl. Opt.*, **32** (1993) 5022-5025.
 - 154) B. Bianco and T. Tommasi: *Appl. Opt.*, **34** (1995) 7573-7580.
 - 155) D. Mendlovic, Z. Zalevsky, G. Shabtay and E. Marom: *Appl. Opt.*, **35** (1996) 6875-6880.
 - 156) J. Turunen, A. Vasara and A. T. Friberg: *Appl. Opt.*, **27** (1988) 3959-3962.
 - 157) J. Rosen, B. Salik and A. Yariv: *J. Opt. Soc. Am. A*, **12** (1995) 2446-2457.
 - 158) E. G. Churin: *Opt. Lett.*, **24** (1999) 620-621.
 - 159) M. Duparre, M. A. Golub, B. Ludge, V. S. Pavlyev, V. A. Soifer, G. V. Uspleniev and S. G. Volotovskii: *Appl. Opt.*, **34** (1995) 2489-2497.
 - 160) T. Dresel, M. Beyerlein and J. Schwider: *Appl. Opt.*, **35** (1996) 4615-4621.
 - 161) T. Dresel, M. Beyerlein and J. Schwider: *Appl. Opt.*, **35** (1996) 6865-6874.
 - 162) C. Haupt, M. Pahlke, R. Krupka and H. J. Tiziani: *Appl. Opt.*, **36** (1997) 4411-4418.

- 163) U. Levy, D. Mendlovic, Z. Zalevsky, G. Shabtay and E. Marom: *Appl. Opt.*, **38** (1999) 6732-6736.
- 164) Y. Arieli, N. Eisenberg, A. Lewis and I. Glaser: *Appl. Opt.*, **36** (1997) 9129-9131.
- 165) J. Rosen and A. Yariv: *Opt. Lett.*, **20** (1995) 2042-2044.
- 166) D. Leseberg: *Appl. Opt.*, **26** (1987) 4385-4390.
- 167) G. Neugebauer, R. Hauck and O. Bryngdahl: *Appl. Opt.*, **24** (1985) 777-784.
- 168) R. Brauer, U. Wojak, F. Wyrowski and O. Bryngdahl: *Opt. Lett.*, **16** (1991) 1427-1429.
- 169) R. Brauer, F. Wyrowski and O. Bryngdahl: *J. Opt. Soc. Am. A*, **8** (1991) 572-578.
- 170) R. W. Cohn, A. A. Vasiliev, W. Liu and D. L. Hill: *J. Opt. Soc. Am. A*, **14** (1997) 1110-1123.
- 171) A. W. Lohmann and D. P. Paris: *Appl. Opt.*, **6** (1967) 1576.
- 172) 豊原裕一郎, 谷田貝豊彦: *光学*, **22** (1993) 345-352.
- 173) M. Nakajima, H. Komatsu, Y. Mitsuhashi and T. Morikawa: *Appl. Opt.*, **15** (1976) 1030-1033.
- 174) F. Xu, Joseph E. Ford and Y. Fainman: *Appl. Opt.*, **34** (1995) 256-266.
- 175) Y. Arieli, S. Noach, S. Ozeri and N. Eisenberg: *Appl. Opt.*, **37** (1998) 6174-6177.
- 176) 小倉裕介, 白井伸弘, 高原浩滋, 谷田 純, 一岡芳樹: 第47回応用物理学会講演予稿集, 31a-W-9 (2000).
- 177) M. Itoh, M. Takahira and T. Yatagai: *Opt. Rev.*, **5** (1998) 55-58.
- 178) M. Reicherter, T. Haist, E. U. Wagemann and H. J. Tiziani: *Opt. Lett.*, **24** (1999) 608-610.
- 179) J. R. Leger, M. G. Moharam and T. K. Gaylord: *Appl. Opt.*, **34** (1995) 2399-2400.
- 180) H. O. Bartelt: *Appl. Opt.*, **24** (1985) 3811-3816.
- 181) J. J. Cowan: *J. Opt. Soc. Am. A*, **7** (1990) 1529-1544.
- 182) R. Brauer, F. Wyrowski and O. Bryngdahl: *Appl. Opt.*, **30** (1991) 3307-3314.
- 183) N. R. Heckenberg, R. McDuff, C. P. Smith and A. G. White: *Opt. Lett.*, **17** (1992) 221-223.
- 184) R. Piestun and J. Shamir: *Opt. Lett.*, **19** (1994) 771-773.
- 185) T. Hessler, M. Rossi, R. E. Kunz and M. T. Gale: *Appl. Opt.*, **37** (1998) 4069-4079.
- 186) C. Paterson and R. W. Smith: *Appl. Opt.*, **38** (1999) 6152-6158.

(2000年12月12日受理)