

計算機を用いた回折格子の作製と その情報処理への応用

亀丸俊一*, 大谷孝之**

(昭和62年8月21日受理)

Digital Production of the Diffraction Grating for Information Processings

Shun-ichi KAMEMARU* and Takayuki OHTANI**

Abstract – Recently optical information processing plays an important role in the engineering application and several kinds of techniques for producing frequency-plane masks for optical information processing have been proposed and demonstrated. In this paper we present a technique for producing a diffraction grating mask by personal computer. In this, what we call “digital”, way we can produce grating masks with desired transmittance very simply and it can be applied to produce various operation masks useful for optical information processing.

In this paper we show very remarkable properties of the digital way of synthesizing a differentiation filter with some experimental results.

1. 緒 言

エレクトロニクスによる情報処理では、時間とともに変化する1次元の信号が扱われ、電子回路によるアナログ演算あるいはデジタル演算が行われる¹⁾。これに対し、文字、図面、写真のような2次元パターン情報を光学的手段によって処理（微分、積分、ハイパスフィルタリング、相関検出など）する技術は、光情報処理と総称されている。また、電子情報処理に抵抗やコンデンサ、トランジスタなどの回路素子があるのに対し、光情報処理においてその光学系を構成する素子を光学素子と呼んでいる。

光学素子には、レンズ、ミラーなど種々の素子が挙げられるが、その中で最も簡単かつ重要な素子の一つに回折格子がある。回折格子は、Fig.1のように黒（光を通

さない部分）と白（光を回折する部分）の縞が規則的に並んだだけの構造であるが、分光やLDにおけるトラッキング制御など、その光情報処理への応用範囲は広がっている²⁾。

本研究では、この回折格子の基本について考察するとともに、格子を作製しこれを応用した実験を行うことによって光情報処理の基礎的研究を行うことを目的とする。

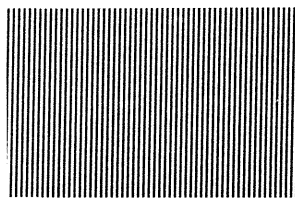


Fig. 1 Diffraction grating.

* 茨城大学工学部精密工学科（日立市中成沢町）

Department of Precision Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

** 茨城大学大学院工学研究科精密工学専攻（日立市中成沢町）

Graduate Student, Department of Precision Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

2. 回折格子の作製

回折格子の作製はFig.2のブロック図に示すような計算機を用いた手法(ディジタルの手法)で行った。まず、作製する回折格子の格子間隔 d およびスリット幅(白い縞の幅) s を設計する。本研究では最初に Ronchi 格子の作製を行った。パラメータは $d = 1 \text{ mm}$, $s = 0.5 \text{ mm}$ とした。この設計に従い黒い縞を周期的に描くプログラムを計算機に入力して、X-Yプロッタより原画を得る。プロッタによって得られた原画を写真乾板に縮小撮影することにより、出来上がった乾板そのものが回折格子となる。ところが、本研究では縮小撮影時の縮小率に限界があったために、原画を2段階に縮小して回折格子を作製することにした。

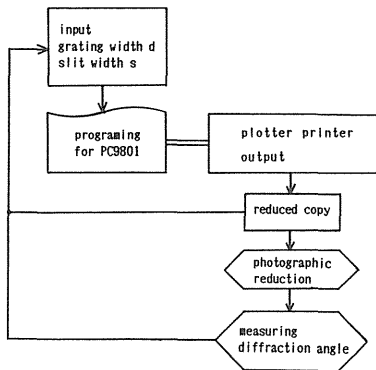


Fig. 2 Schematic diagram of producing a computer generated grating.

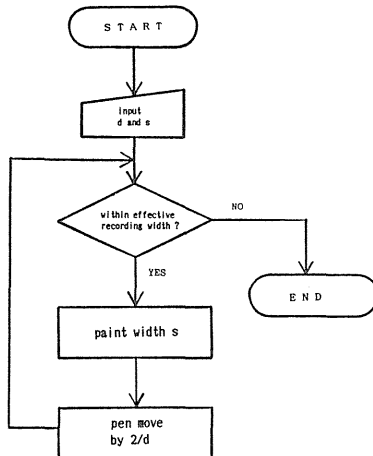


Fig. 3 Flow chart of computer process.

2.1 プロッタによる格子縞の出力

回折格子の縞を描かせたプログラムの流れ図を Fig. 3 に示す。このプログラムに $d = 1.0 \text{ mm}$, $s = 0.5 \text{ mm}$ の値をキーボードから入力し、X-Yプロッタより出力して格子縞の原画を得た。このようにして最終的に得られた原画のサイズは、縦 260 mm 、横 360 mm で、 $d = 1 \text{ mm}$, $s = 0.4 \text{ mm}$ であり、格子縞の数は 360 本となった。スリット幅 s が 0.5 mm ではなく 0.4 mm になっている理由については次節にて説明する。また、ペンのインクがややにじむために、格子縞のエッジにもわずかながら凹凸が見られた。後に述べるが、これが回折像のノイズの一因となる。

本研究では計算機に NEC PC9801E, X-Yプロッタとして渡辺測器のマイプロット WX4671を使用した。ここで、X-Yプロッタの有効記録範囲、ステップサイズ、ペンの精度には限界があり、原画に描くことのできる縞の数は制限され、実際の縞の数は最高 450 本程度であった。

2.2 格子縞の縮小撮影

本研究では、原画の縞の数が 360 本であるので、これを縮小して 16 本/mm 程度の空間周波数を得ることにした。ところが、原画とカメラとの距離が $1.7 \sim 1.8 \text{ m}$ までしか離すことができなかったため、直接縮小撮影したのでは 16 本/mm の空間周波数を実現することは不可能であった。そこで原画を 1 度縮小コピーした。またこのとき、コピー機特性により黒い縞がやや細く印刷されるため、縮小コピー後のパターンは、格子縞の幅 s の格子間隔 d に対する比、 s/d が変化してしまった。そこで、原画の s をやや小さめに修正し、縮小コピー後に $s/d = 0.5$ となるようにした。この原画を乾板上に横 22.0 mm の大きさに縮小撮影して回折格子を得た。したがって、格子の空間周波数は 16.4 本/mm となった。フィルタに用いる乾板には、SAKURA High resolution plate UN-IIを用い、これをカメラにセットできるように、縦 21 mm 、横 42 mm の大きさに切って使用した。撮影の準備(乾板のカメラへのセットなど)は乾板がオルソタイプであるため、セーフティライトのもとで行うことが可能であった。また、ピントあわせは肉眼では無理であり、ルーペを使用して行った。このときの最適露光条件は $F = 5.6$, 10 秒 であった。

2.3 回折系

作製した回折格子の回折角の測定には Fig. 4 に示した回折系を用いた。レーザービームを回折格子Gで回折させ、衝立面Sで観測する。格子と衝立の距離 l と衝立面上での0次光と1次光との距離 x を測定すれば、回折角 θ が求まり、この回折角 θ から格子の空間周波数が求められる。また、文字入力 of 回折には、Fig. 5 の光学系を用いた。この光学系では、入力画像をMにおき、格子Gでこれを回折させている。

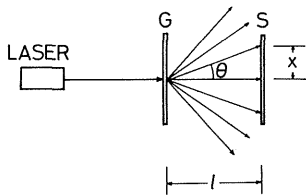


Fig. 4 Arrangement for measuring the diffraction angle.

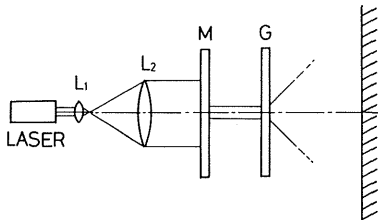
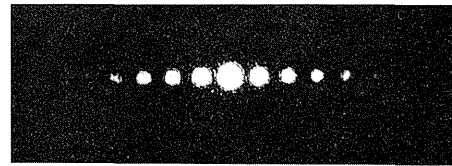


Fig. 5 Optical setup for diffraction of the object.

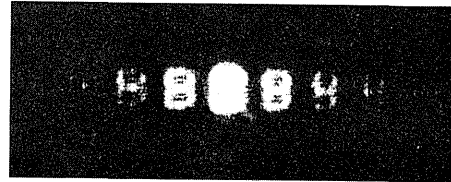
2.4 回折結果と考察

レーザービームを回折させた結果を Fig. 6 (a) に示す。Fig. 6 (a) には土 5 次のスペクトルまでが写真によって記録されているが、実際の肉眼による観測では土 7 次のスペクトルまで確認することができた。このように高次のスペクトルが得られることから、今回作製した回折格子が矩形波回折格子を実現していることがわかる。また、0 次のスペクトルと土 1 次のスペクトルの間隔を測定し、格子の空間周波数を求めると、16.1 本/mm であり、2.2 節の設計時の空間周波数をほぼ実現していることがわかる。

一方、文字入力 B を回折させた結果を Fig. 6 (b) に示す。この結果においても、回折像は高次のスペクトルを回折しており、格子が矩形波回折格子であることを示している。



(a)



(b)

Fig. 6 Diffracted beam spot (a) and object "B" (b).

(a) に比べて回折像がやや不鮮明になっているのは、レーザービームの径を大きくした上に、入力文字スライドを透過させたためである。

このように、文字入力も回折できることから、回折格子を画像の演算処理(光学的加算, 減算, 微分など)に応用することが可能であることがわかる。また、本実験ではもっと大きな空間周波数をもつ回折格子を実現しようと試みた。大きな空間周波数を得るためには原画の縞の数が多ければ良いが、2.1 節で述べたようにこれは限界がある。また、原画を小さく縮小撮影して大きな空間周波数を得ることも考えられるが、入力像の大きさとそのスペクトルの広がりを考慮すると、撮影時の縮小率には限界があり、格子の寸法をあまり小さくすることもできない。このようなことから、デジタル的手法では作製する回折格子の空間周波数は制限されてしまい、大きな空間周波数の実現はできなかった。これはデジタル的手法を応用した回折格子型フィルタの作製時には大きな課題となった。また、X-Yプロッタのペンの精度によって格子縞のエッジに凹凸が生じると、これが原因となって回折像にノイズが生じる。しかし、実験結果から、今回デジタル的手法により作製した回折格子でも、十分に回折格子として実用となることがわかる。

3. 回折格子の応用

本研究では、デジタル的手法の応用として微分フィルタの作製を行った。微分フィルタ(ただし、x方向の

みを微分する)とは、その振幅透過率 T が

$$T(f_x, f_y) = \text{const} \cdot f_x \quad (1)$$

という形のフィルタである。ここで f_x, f_y は空間周波数である。本研究では、式(1)の振幅透過率を、変調された格子縞をもつ回折格子によって近似して微分フィルタを得ることにした。

3.1 微分フィルタ³⁻⁵⁾

微分フィルタとは、入力した画像に対してそれを光学的に微分した画像を出力するフィルタである。そしてその振幅透過率はすでに式(1)に示した。一般に微分演算は差分の極限として表される。

$$dz(x)/dx = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} [z(x+\Delta x) - z(x)]/\Delta x \quad (2)$$

これは光学的微分においても全く同様であるので、今、入力画像の振幅分布を2次元に拡張して $o(x, y)$ とすれば、その x 方向の微分は

$$\begin{aligned} \partial o(x, y)/\partial x &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} [o(x+\Delta x, y) \\ &\quad - o(x, y)]/\Delta x \end{aligned} \quad (3)$$

と表せる。式(3)の両辺をフーリエ変換すれば

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} [\partial o(x, y)/\partial x] \exp\{-2\pi j(f_x x, f_y y)\} dx dy \\ = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \{ [\exp(2\pi j \Delta x f_x) - 1] \\ O(f_x, f_y) \} / \Delta x \\ = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} [\{ \exp(2\pi j \Delta x f_x) - 1 \} / \Delta x] \\ O(f_x, f_y) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ただし、 $O(f_x, f_y)$ は $o(x, y)$ のフーリエ変換である。式(4)の左辺にフーリエ変換の演算記号 $F[]$ を用いれば

$$\begin{aligned} F[\partial o(x, y)/\partial x] \\ = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} [\{ \exp(2\pi j \Delta x f_x) - 1 \} / \Delta x] \\ O(f_x, f_y) \end{aligned} \quad (5)$$

と書ける。ところで、式(5)の $O(f_x, f_y)$ の係数は

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} [\{ \exp(2\pi j \Delta x f_x) - 1 \} / \Delta x]$$

であるから $\exp(2\pi j f_x x) = f(x)$ とすれば

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} [\{ f(0+\Delta x) - f(0) \} / \Delta x]$$

となり、これは、点 $x=0$ における微分係数を意味するから

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta x \rightarrow 0} [\{ \exp(2\pi j \Delta x f_x) - 1 \} / \Delta x] \\ = (\partial/\partial x) \{ \exp(2\pi j f_x x) \} |_{x=0} \\ = 2\pi j f_x \exp(0) \\ = 2\pi j f_x \end{aligned} \quad (7)$$

と書ける。よって式(5)は

$$F[\partial o(x, y)/\partial x] = 2\pi j f_x O(f_x, f_y) \quad (8)$$

と書き替えられる。式(7)から、入力画像 $o(x, y)$ のフーリエ変換 $O(f_x, f_y)$ の振幅分布の光を

$$T(f_x, f_y) = \text{const} \cdot f_x$$

という振幅透過率をもつフィルタを透過させれば、入力画像を微分した画像のフーリエ変換(式(8)右辺)に比例した振幅分布が得られることがわかる。このフィルタが微分フィルタである。微分フィルタの振幅透過率を Fig. 7 に示す。

3.2 微分フィルタの格子縞

Fig. 7 に示した振幅透過率を得るためには、負の振幅透過率が実現されなければならない。ところが、フィルタの振幅透過率が負ということは、光がフィルタを透過するのではなく、フィルタに吸収されるということになり、これを実現することは不可能である。そこで、通常は Fig. 8 に示すように振幅フィルタ(a)と位相フィルタ(b)を重ねて微分フィルタを得ている。このため、2枚のフィルタの中心を正しく一致させ、かつ、密着させる必要がある。しかし、この手法が容易ではないため本研究では、すでに述べたように白黒の縞を用いて振幅透過率を近似する手法をとっている。そこで、この手法の特徴を生かし、位相フィルタを用いずに微分フィルタを作製することにした。

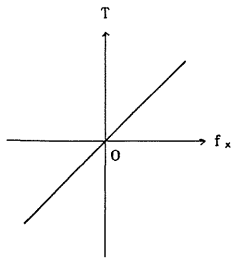


Fig. 7 Amplitude transmittance of a differentiation filter.

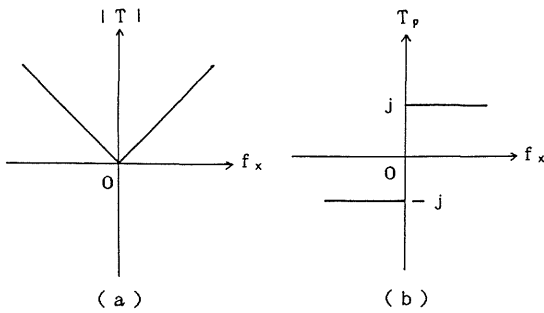


Fig. 8 Synthesized differentiation filter by (a) amplitude and (b) phase filter.

デジタル的手法により, Fig.9 に示すような格子縞を描かせた。 $f_x=0$ (中央)で, 振幅透過が0となるように縞を省略し, $|f_x|$ が増すにつれて振幅透過が線形的に増加するように, 格子間隔 d と黒い縞の幅 s の比 (s/d) を0から0.5に漸次近づけながら直線状の縞を描くようにプログラムを修正した。これをネガとして作製される回折格子フィルタを透過する光の平均的明るさを考えれば, この回折格子フィルタによってFig.8(a)の振幅透過率が近似されたことになる。

次に, 位相フィルタの効果であるが, これは, Fig.9の白黒の縞を波長 d の周期関数とみなすと, $f_x=0$ (中

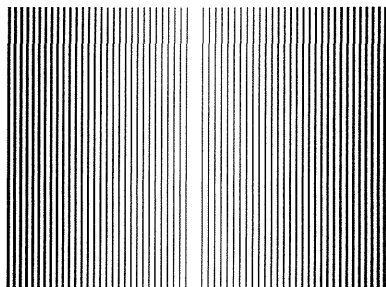


Fig. 9 Profile of differentiation filter.

央)の両側で格子縞が半波長だけずれていれば, 位相は π ずれていると考えることができる。したがって, Fig.9の格子縞の中央(縞を省略している部分)を $3d/2$ にとれば, 位相フィルタの効果を得られることになる⁶⁾。

このようにして, X-Yプロッタより格子縞を得たところ, X-Yプロッタの有効記録範囲の制限から, 縞の数は最大で60本であった。このままでは, 微分フィルタとしてはやや空間周波数が足りないため, Fig.9の格子縞の半分ずつを各1枚の紙に描かせ, それを2枚重ねることによって縞の数を増やした。これにより原画の縞の数を80本に増やすことができた。原画の大きさが大きくなったことを考えると, 縞の数が増加していないが, これは, 縞の数が増加するに伴い格子間隔 d も大きくする必要があるのである。また, 原画は2.2節と同様に1度縮小コピーを行っている。

3.3 格子縞の縮小撮影

前節の手法で出来上がった格子縞を, 2.2節で述べた方法で縮小撮影した。ただし, 2.2節ではカメラと原画を1.7~1.8mしか離すことができなかったため, これを改善して縮小撮影を行った。

この結果, 縞の総数80本, フィルタの開口15.4mm, 空間周波数5.2本/mm(計算値)の微分フィルタを得た。

また, 縮小撮影時に注意すべきことは, 接写用の光を原画全体に均一にあてるのではなく, 原画の中央付近がやや暗くなるようにライトをセットすることである。これは, フィルタの中央部はスリット幅がきわめて小さくなるので, 黒くなりやすいためである。

なお, 乾板は回折格子の作製時同様, SAKURA High resolution plate UN-IIを使用し, このときの最適露光条件は $F=8$, 30秒であった。

3.4 二重回折系

作製した微分フィルタによる光学的微分演算処理には, Fig.10に示す二重回折系を用いた。この光学系によりどのようにして実際に微分が行われるかを3.1節の数式に対応させて説明する。

まず, 光源Sからの光(球面波)をコリメータレンズ L_0 により, 光軸に平行に進む平面波にする。その後方O面に入力画像 $o(x, y)$ を置けば, ここで光の振幅分布は $o(x, y)$ となる。これをフーリエ変換レンズ L_1 によってフーリエ変換すれば, L_1 の後方焦点面 P_1 では, 光の振幅分布は式(8)の $O(f_x, f_y)$ となる。したがって

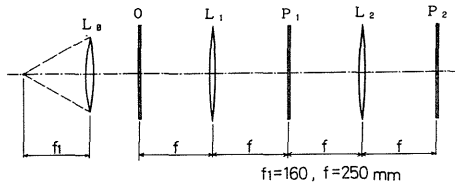


Fig. 10 Double diffraction system for optical differentiation.

この P_1 面に今回作製した微分フィルタを置くと、フィルタの直後では

$$G(f_x, f_y) = C f_x O(f_x, f_y) \quad [C \text{ は定数}] \quad (9)$$

の振幅分布が得られる。この振幅分布は式(8)を用いて書き替えると

$$C f_x O(f_x, f_y) = (C/2\pi j) F[\partial o(x, y)/\partial x] \quad (10)$$

となる。したがって、これをフーリエ変換レンズ L_2 で再びフーリエ変換すれば、 L_2 の後方焦点面 P_2 で得られる振幅分布 $g(x, y)$ は

$$g(x, y) = (C/2\pi j) \{ \partial o(x, y)/\partial x \} \quad (11)$$

となる。ここで、係数 $C/2\pi j$ は x に無関係な定数である。したがって、出力の振幅分布は $o(x, y)$ を微分した像になっている。

ところが、実際に観測されるのは光の振幅分布ではなく、光の強度分布であるので P_2 で観測される像は

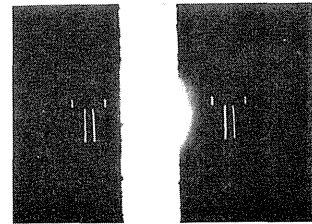
$$i(x, y) = (C^2/4\pi^2) |\partial o(x, y)/\partial x|^2 \quad (12)$$

の強度分布をもつ。ここでも、係数 $C^2/4\pi^2$ は x に無関係な定数であるから、式(12)は入力像を微分した像になっていることがわかる。

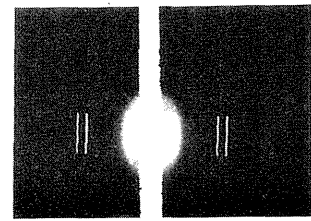
3.5 実験結果と考察

本研究では微分する画像として文字 T および I を用いた。これらの微分としては、それぞれの文字のエッジが検出されることが予想できる。これは、文字のエッジの部分でその振幅透過率が急激に変化しているためである。

二重回折系によって文字 T および I を微分させた結果を Fig. 11 に示す。中央の明るい部分が光軸であり、その左右に ± 1 次の回折像が現れている。T, I とも予想したような、入力文字の x 方向 (横軸方向) のエッジが



(a)



(b)

Fig. 11 Differentiated output of (a) "T" and (b) "I".

検出されている。しかも、その像が細く鋭く鮮明であることから、理論によく合致した微分フィルタができていることがわかる。

また、Fig. 11 の出力像から微分フィルタの空間周波数を算出すると、5.1本/mmとなり、これもフィルタ設計時の空間周波数をほぼ満足していることがわかる。

以上のように、デジタル的手法によって実用可能な微分フィルタが得られたことから、この手法によれば計算機のプログラムをわずかに修正するだけで種々の回折格子型フィルタの作製に応用できることがわかった。また、今回作製した微分フィルタは x 方向のみを微分するフィルタであったが、2方向、つまり、 x, y 両方向の微分フィルタの作製も可能である。

4. 結 言

本研究は、計算機を用いた手法によって回折格子を作製し、その実用性を確認した上でこの手法を光情報処理に有効な種々の演算フィルタの作製に応用しようというものであった。

回折格子作製の実験によって、計算機を用いた手法により、十分に実用が可能な回折格子が比較的簡単に作製できることがわかった。しかも、作製する回折格子の空間周波数は任意に設計することができる。

また、この手法によって作製される回折格子は矩形波

回折格子であるが, 原画を撮影する際にデフォーカスする(ピントをずらす)ことによって矩形波回折格子の高周波成分を除去し, 正弦波回折格子を作製することも可能である。良好な正弦波回折格子を得るデフォーカスの度合いを定量的に決定できれば, バイナリな格子縞から任意の空間周波数をもつ正弦波回折格子を非常に簡単に作製することができる。

一方, 今回の手法では, これによって作製する回折格子の最大空間周波数, 回折像の質が格子縞を出力させるX-Yプロットの仕様(有効記録範囲, ステップサイズ, ペンの線幅と精度)に大きく依存することもわかった。

次に, この手法を応用して微分フィルタを作製した実験からは, 計算機を用いた手法は計算機に入力するプログラムをわずかに修正するだけで種々の回折格子型フィルタの作製に応用できることがわかった。この場合にももちろん, フィルタの空間周波数は任意に設計できる。さらにこの手法では, フィルタの振幅透過率を格子縞を用いて近似するために, 3.2節で述べたように, 位相フィルタを用いることなくその効果を得ることができる。またこの場合には, 回折格子の作製時にも増して最大空間周波数が小さく制限され, これが短所となることもわかった。

今後, 光情報処理への寄与を考えれば, この空間周波

数の不足という課題を解決し, 一般画像の微分処理, 中間調をもつ物体の微分処理の可能な微分フィルタ, あるいはそのほかの演算フィルタを簡単に作製できるように工夫する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 辻内順平, 村田和美: 光学情報処理, 朝倉書店 (1974)
- 2) 服部肇: オプトエレクトロニクスの活用, 大河出版 (1984)
- 3) 亀丸俊一: ホログラムフィルタによる正弦波物体の微分, 北海道大学大学院工学研究科昭和54年度修士論文(1980)
- 4) R. S. SIROHI, V. RAM. MOHAN: Differentiation by spatial filtering, OPTICA ACTA, VOL. 24 (1977)
- 5) 小山次郎, 西原浩: 光波電子工学, コロナ社 (1978)
- 6) E. R. REINHARDT, W. H. BLOSS: Optical Differential Operation Processor, OPTICAL ENGINEERING, VOL. 17 (1978)