

# 計算機ホログラムの作製

## - 光エレクトロニクス教材の開発において -

神奈川県立産業技術短期大学校 電子技術科 矢島 康治

### 1. はじめに

1960年のレーザーの発明以来、光を利用した科学技術は急速な展開がなされている。なかでも、光エレクトロニクスを利用した光ファイバ通信や光情報処理などは、わが国の基盤産業の1つとなってきた。

このような現状をふまえ、当校電子技術科では、光エレクトロニクス教育の展開を試みている。現在の高校教育の課程では、光学の教育（物理を含む）に割く時間はわずかである。このような学生に対し、光学の面白さを体験させ、技術革新に対応できる基礎力を育成するために、エレクトロニクスの立場から光に関する教育方法や教材開発を行っている。

本報告では、当校における光エレクトロニクス教育について簡単に紹介する。さらに、平成9年度に行った電子技術科の卒業研究の中から“計算機ホログラムの作製”を実践例として紹介する。

### 2. 光エレクトロニクスのカリキュラム

#### 2.1 カリキュラムについて

表1に電子技術科のカリキュラムにおける光エレクトロニクス関連の科目を示す。専門教科の電子デバイスと通信工学実習は、2年生全員が履修する科目であり、2つの教科で光ファイバ通信全般について学ぶ。電子デバイスでは、発光ダイオード(LED)、半導体レーザー(LD)といった発光デバイスや、ホトダイオード(PD)に代表される受光デ

表1 光エレクトロニクス関連の科目

	科 目	履修時期	単位数	内 容
専門 教科	電子デバイス	2年前期	2	発光デバイス, 受光デバイス, ディスプレイデバイス
	通信工学実習	2年後期	4	光ファイバ通信, LEDを用いた光通信回路の製作
専攻 教科	光エレクトロニクスコース			
	光エレクトロニクス工学	2年前期	2	光の物理現象, 干渉計測法, ホログラフィ
	光エレクトロニクス実習	2年後期	6	LD駆動回路の製作, 位相シフト干渉計測実験 光ファイバ通信実験
	卒業研究	2年後期	22	平成9, 10年度のテーマ(一部) 計算機ホログラムの作製 液晶テレビを用いた光学関係の構成 アナログ変調光通信システムの製作 半導体レーザーを用いた位相シフト干渉計の構成

注) 通信工学実習は、他に高周波無線通信回路製作などを行っている。

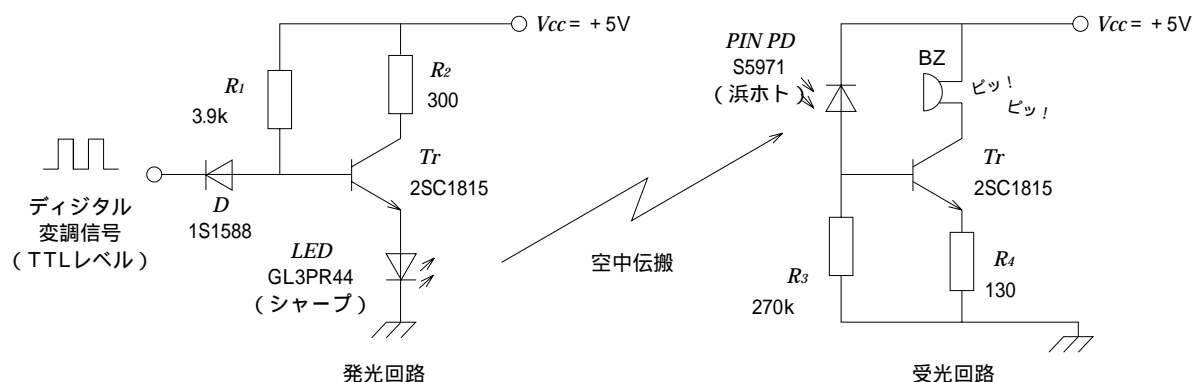


図1 発光ダイオードとPINホトダイオードを用いた光通信回路

バイスなど光通信の入口と出口にあたるデバイスについて学んでいる。一方、通信工学実習では、伝送媒体である光ファイバについて学ぶとともに、可視発光ダイオードとPINホトダイオードを用いた光通信回路などを製作している。図1に示すような簡単な光通信回路では、LEDから放射された光は空中を伝搬してPDに到達されるため、最も身近に光通信を体験することができる。LEDとPDの間隔は、条件が良ければ5 cmくらいまで広げて通信が可能である。この回路は、部品点数も少なく回路作成が容易であるため、セミナー（光通信デバイス、2日間）での実施も好評であった。

専攻科目は、電子技術の専門性を高めるため産業界の動向やニーズをみながら柔軟に対応しており、光以外にも3コース設定している。光エレクトロニクスコースでは、前期の2単位で、光の性質や干渉、回折などの基礎現象を学び、後期6単位の实習で、干渉計測実験や光ファイバ通信実験を行い、光学実験ができる知識と技能を学んでいる。今年度は2年生34人中6人の学生が専攻している。

卒業研究では、2年間の総仕上げとして、トータルな先端光技術を用いる「ものづくり」ができるよう取り組んでいる。ものづくりの作業的な能力だけでなく、その背景にある理論や評価のための工学的手法などの能力が養われるよう心がけている。

## 2.2 光学実験機器について

一般に、光学実験を行うには、暗室、写真現像室などの実験設備、光源としてのレーザー装置や光学部

品、さらに除振台などが必要である。当校が有する機器は、光源としてヘリウム・ネオン（He-Ne）レーザー（ $\lambda = 632.8\text{nm}$ 、出力5 mW）、レンズやミラー等若干の光学機器、および除振台（ヘルツ工業（株）、HOA-189LA）である。He-Neレーザーは以前からあった光実験装置の光源として使っており、それ以外は昨年度購入した。なお、除振台はシールドルームに設置してある。

機器や設備において、大学や研究機関と比べるとは無意味なことだが、職業能力開発施設において十分な機器を有しているところは1~2カ所ほどしかない。そのためか、カリキュラムの中で光エレクトロニクスを取り上げている短期大学校は数えるほどしかない。実践技能として電気通信界の光化が進んでおり、各家庭にまで光ファイバを施設することが景気対策の一環として進められている現状をみ限り、時代のニーズがあることは確かだと考える。現に、当校を卒業した数人の学生は光関連の仕事に就いており、今後もその割合が高まると予想される。

そこで十分な機器の整備が期待できない今、現有のものを上手く活用し、最小限の機器で、どう実践していくか考える必要がある。学生が関心を持ち、その関心を維持し、さらに高価な機器に依存しない方法でいかに具現化できるか、というポイントから光エレクトロニクスの教材開発を手がけている。

## 2.3 卒業研究のテーマ選定について

現有の機器では、本格的な光学実験を行うことは難しい状況である。そこで昨年度は、購入した

数点の光学部品で構成することができる光学実験を考えた。その結果、再生のための光学系のみが必要となる“計算機ホログラム”ならば実現が可能であると判断し、卒業研究のテーマとした。その際、学生が主体であることを念頭に、次のことも考慮して検討した。

- 光学系の調整が容易で、学生自身が組める。
- 結果の良否がはっきりと確認できる。
- 高度な計算能力や専門知識がなくても、その物理現象を理解できる。

### 3. 計算機ホログラム

#### 3.1 ホログラフィ

ホログラフィは、干渉と回折を利用し物体のすべての情報を記録し、再生する技術であり、光学素子の設計、光情報処理等に多く利用されている。最近では、ホログラムがセキュリティに応用され、偽造防止の手段等に採用されている。

ホログラフィの原理を図2に示す。ホログラフィに用いる光源は、干渉性のよいコヒーレントなレーザ光を使用する。

図2(a)に示すホログラムの記録において、レーザから出射された光はビームスプリッタによって、2方向に分けられる。一方の光は、対物レンズによって広げられ物体に照射される。照射された光は物体の各点で反射し、物体から適当な距離に置かれている記録材料（例えば写真乾板）に到達する。もう一方の光は、ミラーによって方向が変えられ、記録材

料に達する。物体から反射された光を物体光、もう一方の光を参照光という。物体光と参照光は、記録材料上で再び重ね合わされ干渉する。その結果、細かい複雑な縞模様の干渉縞を生じ、記録材料に記録される。この記録材料を現像処理したものがホログラムである。

この干渉縞には、物体光の明るさに関する情報（振幅）とともに、どの方向から光がやってきたかという情報（位相）が含まれており、これらの情報を干渉縞という形で記録したものがホログラムである。また、記録される干渉縞は、1mm当たり1,000本と非常に細かいため、記録材料も高解像力が必要である。

ホログラムを再生させるためには、図2(b)のように参照光と同じ光をホログラムに照射する。この光を再生照明光という。干渉縞を記録したホログラムは、回折格子であるため、入射した光はそのまま直進する光のほかに、回折して進む光を生じる。この回折光は再生光と呼ばれ、記録する際の物体光と全く同じ光となる。したがって、その光がやってくる方向を見れば、実際の物体がなくても、元の位置に物体の虚像を見ることができる。

#### 3.2 計算機ホログラム

ホログラムに記録する干渉縞は、計算によって求めることができる。したがって、計算機と干渉縞を表示する装置があれば、ホログラムを合成することができ、この合成したホログラムにレーザ光を照射すれば、そのパターンに応じた波面を再生すること

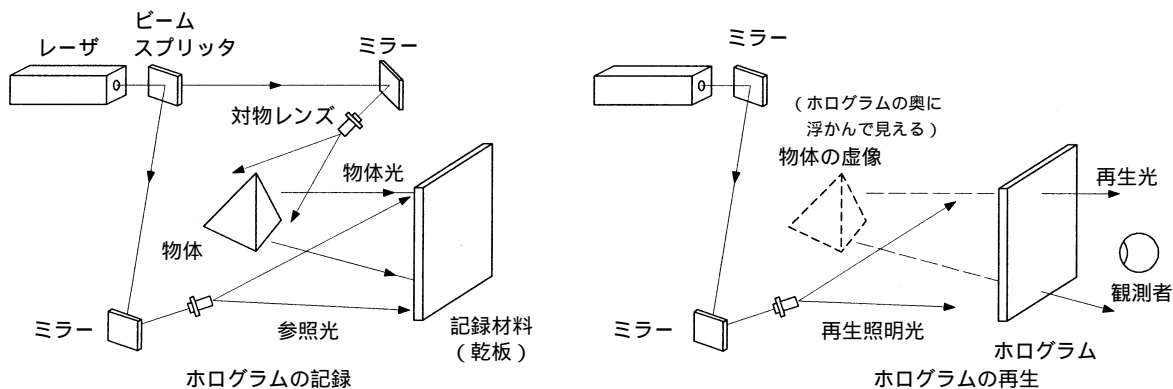


図2 ホログラフィの原理

ができる。このようにして作られるホログラムは、計算機ホログラム (Computer-Generated Holograms : CGH) と呼ばれている。CGHの特長は、記録のための物体は存在しなくてよいことである。このことは、任意の、また理想的な波面を再生することができることを意味しており、架空の物体の3次元像を得ることが可能である。

### 3.3 Lohmann型CGH

CGHでは、計算により求められた振幅と位相をコード化して表示している。ここでは、A.W. Lohmannが提案したLohmann型CGHにより振幅と位相をコード化している。Lohmann型CGHのセル構造を図3に示す。図は、64×64サンプル点で構成されるセルのうち(n,m)点のセルについて示している。Lohmann型CGHでは、CGHのセルに光を透過する窓(window)をもうけ、干渉縞の振幅はその窓の大きさにより、位相はセルの中心からの変位量により与えている。窓の幅は一定としている。

各サンプル点(n,m)における窓の高さh(n,m)は、干渉縞の振幅をA(n,m)として、

$$h(n,m) = A(n,m)dy \dots\dots\dots(1)$$

で与えられる。また、位相φ(n,m)を記録する窓の変位は、

$$C(n,m) = \frac{(n,m)dx}{2M} \dots\dots\dots(2)$$

となる。ここでMは回折次数を表し、M=1として計算している。dx, dyはそれぞれx方向, y方向

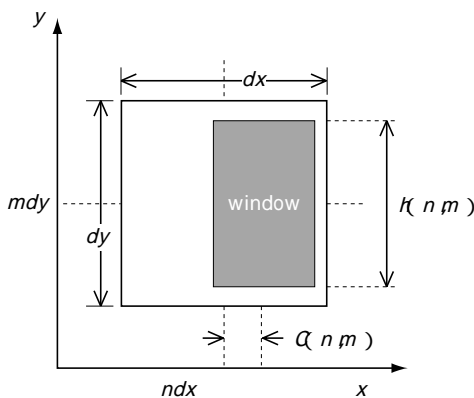


図3 Lohmann型CGHのセル

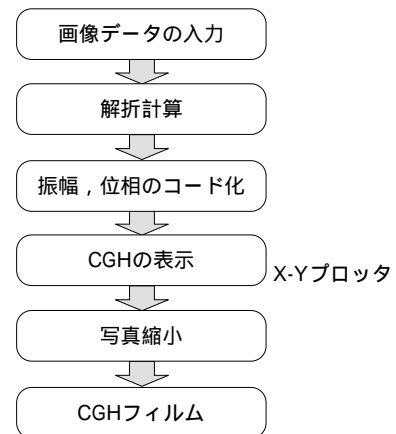


図4 CGHの作製手順

のセルの大きさである。

### 4. CGHの作製手順

CGHの作製手順を図4に示す。画像データは、64×64サンプル点で構成されている。CGHの再生像となる画像データは、中心の32×32サンプル点に“0”, “1”の値で入力されており、外側のサンプル点の値は“0”である。

回折計算では、入力画像データの2次元フーリエ変換を行い、CGHに記録する干渉縞の複素振幅分布が求められる。各サンプル点の振幅と位相は、次式で求められる。

$$A(n,m) = \sqrt{\{Re\{n,m\}\}^2 + \{Im\{n,m\}\}^2} \dots\dots\dots(3)$$

$$\phi(n,m) = \tan^{-1} \frac{\{Im\{n,m\}\}}{\{Re\{n,m\}\}} \dots\dots\dots(4)$$

ここで、{Re(n,m)}, {Im(n,m)}はそれぞれ、各サンプル点における複素振幅分布の実数成分と虚数成分である。回折計算に用いたプログラムは、BASIC言語で書かれている。

得られた振幅と位相は、先ほどのLohmannの手法によりコード化され、CGHのセルはX-Yプロッタに出力される。出力されたCGH原画は写真縮小され、CGHフィルムが作られる。作製されたCGHフィルムにレーザー光を照射すると、入力した画像データと同じ像が再生される。

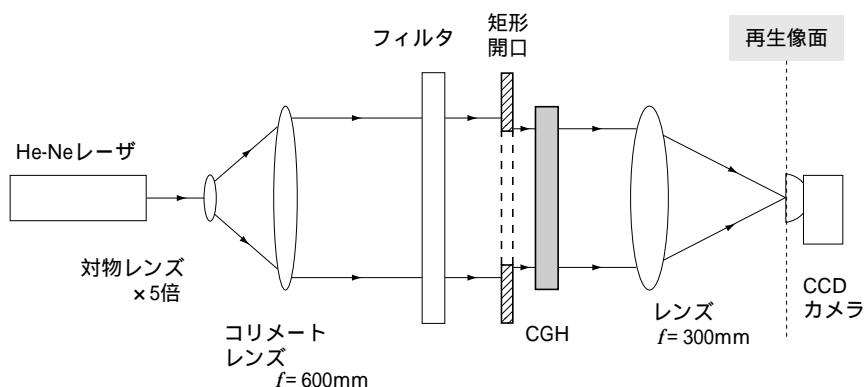


図5 CGH再生光学系

## 5. 実験結果

### 5.1 再生光学系

作製したホログラムを再生する光学系を図5に示す。光源には、波長632.8nm、出力5mWのHe-Neレーザを用いている。レーザ光は、対物レンズ（ $\times 5$ 倍）とコリメートレンズ（ $f=600\text{mm}$ ）により照射面が広げられ、CGHに入射される。CGHの前には、空間フィルタとして矩形開口が配置されており、CGHにのみ光が当たるようにしている。CGHを透過した光は、レンズ（ $f=300\text{mm}$ ）の焦点距離のところ（再生像面）に再生像を結像する。フィルタで十分減光した光であれば、再生像面に置いたルーペで目視することが可能である。実験では、CCDカメラにより再生像を撮像している。

### 5.2 CGHフィルム

図6は、入力した画像データである。画像データは、 $32 \times 32$ サンプル点に描かれた“光”の文字である。図7は、図4の手順によりX-Yプロッタに表示されたCGH（原画）である。CGHの大きさは約 $255 \times 255\text{mm}$ あり、1セルの1辺は3.93mmとなる。このCGHを約1/50に写真縮小し、 $5.4 \times 5.4\text{mm}$ のCGHフィルムを得ている。このとき1セルの大きさは、0.082mmと計算される。

表示に使用したX-Yプロッタは、富士通のFMXY-132であり、最小ステップ幅を0.025mm/stepに設定してある。ペンの太さが

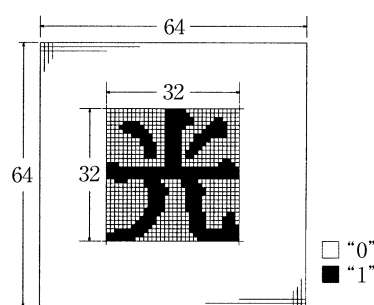
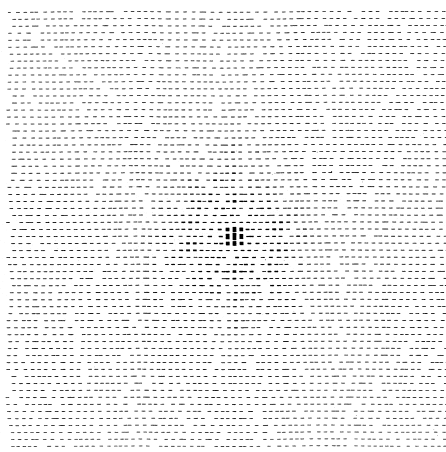


図6 入力画像



本図は約25%に縮小している

図7 CGH（原画）

0.2mmであるため、CGHフィルムの分解能は約250本/mmとなっている。写真縮小に関しては、フィルム上のCGHの大きさが5mm程度に縮小されるよう、CGHとカメラの距離を調整した。撮影には一眼レフカメラを用い、フィルムを装着せずフィルムカバーをあげ、シャッターを開放の状態、レンズの焦点位置に当てたルーペを見ながら、ピント合わせ

表2 フィルム現像の手順

手順(使用溶液)	時間	備考
現像(コピナール)	5分	常に攪拌
停止(酢酸)	1分	常に攪拌
定着(フジフィックス)	10分	時々攪拌
洗浄	20分	流水で
乾燥(ドライウエル)	30秒	

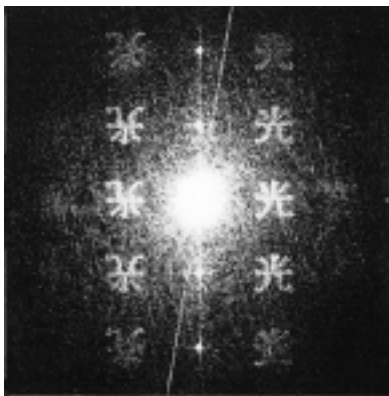


図8 CGHの再生像

せを行った。その後、カメラの位置を動かさないよう注意しながら、フィルムを装着し、撮影を行っている。なお、カメラはオリンパスのOM-2を、ズームレンズはテフノンの  $f=35\sim 80\text{mm}$  を用いた。また、用いたフィルムは、解像力の高いミニコピーフィルムHR（富士フィルム）である。フィルムの現像は、表2に示す手順で行い、写真現像には、当校産業デザイン科の暗室を使用した。

### 5.3 再生像

図8にホログラムの再生像を示す。図6に示した入力画像と同じ“光”の文字が再生されていることがわかる。中心の明るい光は0次光と呼ばれ、再生像全体のバイアス光である。0次光を中心に右左に見られる上下反転した像を+1次光、-1次光と呼ぶ。これらは共役の関係にあり、位相分布が反転した像である。

また、上下方向に見られる等間隔の繰り返しの像は、ホログラムの各セルを回折格子と見なした場合の回折像と考えることができる。この場合、1セル

の大きさが回折格子のピッチ  $d$  となり、再生像の0次光と1次光の間隔  $D$  は、 $D = f / d$  で求められる。ここで、 $f$  はレンズの焦点距離であり、 $\lambda$  は光源の波長である。上式に値を代入し計算すると  $D = 2.3\text{mm}$  となる。図8の再生像の表示間隔を測定すると、 $D = 2.2\text{mm}$  となり、ほぼ同様の値が得られていることがわかる。

## 6. おわりに

本報告では、当校における光エレクトロニクス教育の現状を紹介し、さらにその実践例として平成9年度の卒業研究で行った“計算機ホログラムの作製”について述べた。

ホログラムは学生の関心も高く、主体的に卒業研究がなされ、良い成果が得られた。今回作製したCGHは、写真現像などの煩雑な作業が多く、この状態で教材として用いることは難しい。今年度の卒業研究として、表示装置に液晶パネルを用いるCGHの作製を行っている。液晶パネルを用いることで、写真現像が不要となり、さらに実時間に再生が可能となる。液晶パネルは、光情報処理における入出力装置として広く利用されており、教材としての利便性が高いと考えている。

なお、光学実験については、職業能力開発大学校電子工学科の石井行弘教授に多くのご指導、ご助言をいただき、大変感謝している。筆者自身、まだまだ勉強不足であり、ようやく動き始めたところである。今後もみなさま方から、多くの助言をいただければ幸いである。

### 参考文献

- 1) 久保田敏弘：「ホログラフィ入門 原理と実際」, 朝倉書店, 1995.
- 2) 石井行弘：「ホログラフィーの応用技術の実際と今後の展望」, 技能と技術, Vol.23, 2, pp.15-28, 1988.
- 3) 石井行弘：「ホログラムと回折型光学素子(計算機ホログラム)」, 日本光学会主催第22回冬期講習会テキスト, AP962302, pp.21-40, 1996.
- 4) W. H. Lee, "Computer-Generated Holograms: Techniques and Applications", Prog. Opt.16, p.121,1978.