The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	電子計算機と光学情報処理
Author(s)	一岡, 芳樹
Citation	大阪大学大型計算機センターニュース. 1973, 10, p. 23-28
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/65187
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

電子計算機と光学情報処理

大阪大学　応用物理学教室
一　岡　芳　樹

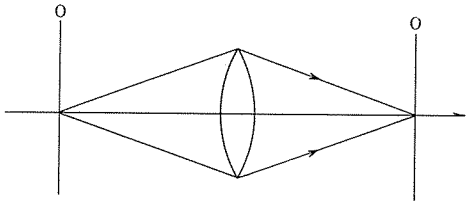
光学情報処理は光を介して信号を処理する技術であり、光学的な二次元の信号や、画像を扱う広い分野と考えられているのが普通である。その基礎は光学であり、回折理論、レーザ光源などが重要な役割を果す。また光学情報処理では、電気的な信号処理の手法、考え方を基にした所も多くあり、それらの技術等と結びついて、新しい方式、装置開発の試みも多方面にわたって行なわれている。大阪大学でも色々の学部で光学情報処理の研究が行なわれており、思いもかけない分野に応用されていたりして、驚かされることがしばしばある。光学情報処理の中で特に電子計算機と関連があるのは、ホログラフィーの技術を使った光メモリーに関する研究と、計算機を用いた画像処理研究の分野であろうと思われる。ここでは私が関連している後者について、如何に電子計算機がこのような分野に利用されているかということについてのべる。

光学的な信号処理の特徴は、画像のような大容量のアナログ信号を、瞬時にしかも同時に処理するという点にあるが、光の信号はその性質上、電気信号処理のように自由に信号を制御する方法が存在しない。

また得られた結果は殆んど写真フィルムのような記録媒質上に記録されるので、それを用いて更に高度の処理を行なおうとする場合にはいささか不便な点がある。従って光学的な手法で可能なもの、例えば、物体像の記録、簡単な空間フィルタリングによる画像処理、物体に含まれる空間周波数成分の検出等では非常に有用であるが、複雑な二次元の情報処理となるとやや難点があるように思われる。電子計算機による光学情報処理はこの複雑な処理を補助すると共に、その自由度、精度のよさなどの性質を利用して、アナログ的な処理では不可能な処理、例えば、ホログラムの合成、マスターパターンの作成、複雑なフィルタリング処理、画像に含まれる信号の解析、光学的手法では不可能な非線型操作を用いた。画像修正、強度の操作、形状の操作、複数画像の割算等に用いられているようである。

光学情報処理で最も基本的な演算は２次元フーリェ変換である。これは、光のフラウンホーファ回折を表わす式が、丁度２次元フーリェ変換で表示されるからであり、その他光学でしばしばあらわれるフレネル回折の計算もフーリェ変換を用いると簡素化出来るからである。

レーザ光のようにコヒーレントな光で物体を照明した時、系に配置されている結像レンズは実は２次元フーリェ変換の演算を光学的に行なっていると考えることができるのである。例えば、図１（ａ）のような結像光学系では物体をコヒーレント光で照明すると、像面上にその像がえられる。これは写真機で写真を撮る場合と考えてもよい。この時、レンズの働きは、実は物体を２回連続的に２次元フーリェ変換を行ない、物体像を像面上に射像していることになるのである。この結像操作は普通は当然のことと思っているし、フーリェ変換を知らなくてもよい



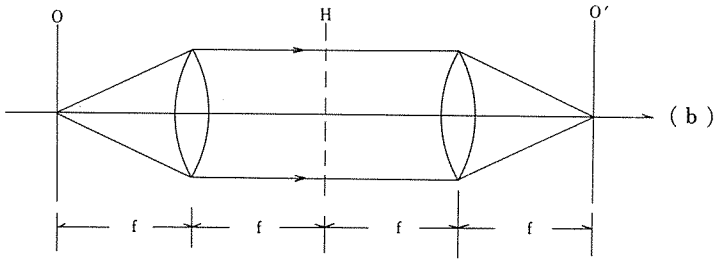


図 1

写真はとれるのであまり注意されていないようである。この結像作用を図1(b)のように2枚のレンズ系からなる系に置換すると上のことが理解しやすい。物体から生じた回折波が前側レンズで平行にされ、後側レンズで再び収束されても像面上に物体像がえられる。第一レンズの後側焦点面上Hにやってくる波面の分布を回折理論から計算すると丁度物体をフーリェ変換したものになっている。この面にスリガラスを置いてみると、物体とは似ても似つかぬ光の分布が観測される。これは強度分布であらわされた量であるが、強度が光の複素振巾分布（H面上での光波の振巾位相成分を記述した量）の自乗であらわされていると看做すと、この複素振巾分布は物体の透過率のフーリェ変換で表わされ、これはまた空間周波数スペクトルともいわれているものである。この空間周波数スペクトルを再び後側レンズに入射させると、後側の焦点面上で像を結ぶ。これは前側レンズの物面、及びH面の配置関係による光の伝播と同じであるから、前のレンズのフーリェ変換の操作を考えると、像は空間周波数スペクトルをフーリェ変換したものと考えられるのである。即ち結像作用は物体を相連続する2回の2次元フーリェ変換を行なったものと考えることができる。空間周波数スペクトルは物体の形状と全く異なった光の分布であらわされるが、物体に関する情報はそのまま含んでいる。この光と、光軸に傾いた平面波とでH面を同時に照明すれば、2つの光の干渉によってH面上で干渉縞が生じる。これをフィルム上に記録したものはホログラムと呼ばれており物体に関する、振巾、位相情報を一枚のフィルム上に同時に表示したものとなっている。

ここで前側のレンズと物体を取去り、ホログラムをH面に置いてホログラムを作成した時に用いたのと同じ傾いた平面波で照明してやれば、再び像面上にもとの物体像が再生される。これはホログラム直後に現われた波面を後側レンズでフーリェ変換したものであるから前のことから当然理解される所であろう。

図1(b)の光学系は、光学情報処理を行なう場合の基本的な系であって、特に物体の空間周

波数スペクトルの生ずるH面は重要である。例えばH面に光軸近傍のスペクトルのみを通過させるマスクをおくと、得られる像は物体のスペクトルの低周波成分のみで形成されたものとなり、非常にぼけた像となるし、逆に光軸近傍を遮蔽するマスクをおいて高周波成分のみを通過させると、再生される像は高周波スペクトル成分のフーリェ変換であらわされるので、その像は輪郭が強調された像となる。これから類推して、H面に様々のフィルターを置いて得られる像は、フィルターの作用で任意に制御された像（処理像）となることがわかる。例えば、物体としてピンボケ像を置き、フィルターとしてその原因を補償するものをおけば、像面上にシャープな像をうることもできる。これは画像修正と呼ばれる技術の基本的な考え方である。しかしふつうこのフィルターの製作は高精度を要し、その形状が複雑になるとデリケートな実験操作が必要となる。また実験系内でのセットにも細心の注意を払ってやらなければならない。また場合によっては負強度といって透過率が負のフィルターが必要になる場合があり、この時にはふつうの実験では不可能となるのである。

このような場合に、電子計算機はその威力を発揮することができるのである。

電子計算機を用いた光学情報処理で最も基本となるのは上の２つのレンズの操作を

$$\widetilde{F}_{nm}=\frac{1}{N}\sum_{k}\sum_{\ell} Oke\ \ exp\ \left[-\frac{2\pi i}{N}(nk+m\ell)\right] \qquad (1)$$

及び $$O'_{k\ell}=\frac{1}{N}\sum_{n}\sum_{m}\ \widetilde{F}nm\ exp\left[\frac{2\pi i}{N}(nk+m\ell)\right] \qquad (2)$$

の２つの有限ディスクリートフーリェ変換で置きかえた式である。ここで$\widetilde{F}nm$は物体のスペクトル分布、$O_{k\ell}$, $O'_{k\ell}$ はそれぞれ物体、及び像をあらわす。(1)式は図１(b)の前側レンズの(2)式は後側レンズの作用を計算機の操作で置換えたものである。例えば$O_{k\ell}$を架空の物体で数学的にしか解っていないものとすれば、(1)式の演算結果を振巾位相変調して表示したものは計算ホログラムと呼ばれ、後側のレンズの作用を光学実験で行なえば、像面上に架空物体像が再生される。物体が３次元になれば、(1)式の計算を異なる物面上の物体に関して行ない像面位置の値を考慮して加えればよいが、演算時間が物面数に比例して大きくなるので、高分解能の像は演算時間、表示能力の点から不可能である。計算ホログラムの考え方を使うと複雑な形状のフィルターが容易に合成されるので、それを作る試みも多くなされている。計算ホログラムの合成とは逆に、光学的に作成されたホログラムを光電変換して標本化し、標本化されたホログラムから計算機のフーリェ変換の演算で再生像を得ることも可能で、特殊な目的には有用である。

空間周波数フィルタリングの操作は(2)式の$\sum\sum$の中のFnmの所に、物体スペクトルFnmとフィルター関数Hnmの積を置いて(2)式の演算を行なえばよい。この時フィルターが光学的に簡単に作れるものでは特に電子計算機を用いる必要がないが、フィルターの形状が複雑な時には、計算機処理の方が効果があがる場合が多い。$Fnm\cdot Hnm$ の計算は標本点同志の値での積を求めればよいから、フィルター作成時の実験誤差や、セッティング誤差等は一切入らないから、分解能は低いなりに有効かつ簡便な方法と考えることができる。この応用で重要なのは画像修正

の場合である。画像修正は光学実験の中でも特に難かしいものの一つでありその意味から、計算機処理は大切である。この時、被修正物体は画像入力装置で標本化され、計算機でそのスペクトルを求め修正フィルターを掛けて、(2)式に従って計算すれば修正像がえられる。

画像は標本化して演算されるが、そのデータ数は非常に大きいので、画像処理の計算には大型計算機の利用が必須の条件である。(1)及(2)式の演算は2次元高速フーリェ変換のアルゴリズム（ＦＦＴ）が用いられる。ＦＦＴを使ってもデータ数の多い物体の計算は不可能な場合が多く、従って目的を見極めて、計算機の長所を十分生かさなければこのような画像処理の研究は徒労に終ることが多い。

我々の所では初期の頃はＮＥＡＣ2206（４Ｋワード）を使って計算を行なっていた。この時64×64標本点の二次元フーリェ変換が約４分50秒、128×128で28分、256×256で２時間であった。勿論この時２台の外部磁気テープ装置を用いている。現在利用している阪大計算センターのＮＥＡＣ2200Ｎ－500 で64×64点のホログラムの演算が６分30秒（ＦＦＴ, Arc tan,ドラフター用の磁気テープへのデータ転送を含む）京大計算センターのFacom 230-60で64×64のホログラムの計算が約20sec である。

画像処理を考えると出来るだけ標本点数の多いデータを扱いたいわけであるが、演算時間、メモリーサイズ、ターンアラウンドタイムを考えると、共同利用の計算センターの大型電子計算機では今の所256×256のサイズのものが限度のように思われる。この標本点数は市販のネオパンＳＳフィルムの分解能（約70本/mm）を考えるとほぼ3×３mm²の大きさのフィルム上に記録された画像の情報量と等価である。従って現在では高分解能の画像を電子計算機で扱かうことはまず不可能で、せめてＴＶとかＳＥＭ等で用いられる500×500, 1000×1000程度の分解能がほしい所であるが、上でのべたように幾多の困難が存在するのが現状である。

今迄のべたのは画像処理の基礎のごく一部であるが、実際には、電子計算機の自由度を駆使した様々の研究を行なっている。

電子計算機への画像入力及び画像の表示方法

このような画像処理を計算機で行なう為には、まず画像を標本化して電子計算機に入力する装置及び得られた結果を表示する装置が必要となる。最近の大型計算機のシステムではこのような画像入出力装置が付属しているものが多く、ユーザーに共されているが、画像のように濃度レベルが多く、かつ精度を要するものとなると、なかなか思うものが利用できない。このようなわけで、我々の所では研究の当初からオフライン動作のＣＲＴディスプレーを製作している。既に1963年にはスポットダイアグラムの表示出来るＮＥＡＣ2206に合わせた試作一号機 Automatic Plotter を試作した。この時点では未だ、計算機の周辺装置といったものが国内外に殆んどなく、関数表示とか光学像表示が短時間でできるので大いに利用したものである。以後、濃度レベルが８bits 表示できるcontinuous-tone plotter を1967年、1969年、1971年と作成し現在では京大計算センターのFacom 230-60に合わせた磁気テープ装置を用いた表示装置が稼

動中である。画像入力装置は出力装置以上に試作の難しいものであるが 1969 年 に ＮＥＡＣ 2206 に合わせたＴＶ走査方式の、1972年にはFacom 230-60に合わせたフライングスポットスキャナータイプの画像入力装置を開発した。残念ながら阪大の計算センターの大型計算機と互換性のあるものは未だ開発していないので、現在ＮＥＡＣ2200 Ｎ－700 と互換性をもたせた装置を検討中でもう少し研究能率を上げたいと思っている。これらの装置を試作していた初期の時点ではメーカも計算機本体の製作に懸命で周辺装置の開発迄は手が回らなかったようであるが、現在ではオンライン、オフラインの優秀な性能のものが出来ており、我々の所では現在はむしろ、目的に応じた性能を持ち、如何に安価にかつ精度のよいものを作るかを心掛けている。

ＣＲＴディスプレーはその性質上、出力画像の表示が非常に速く、特にパラメーターを変化させた実験結果の表示には威力を発揮するが、大口径のＣＲＴが作れないし、高精度に輝点の位置制御するのがむづかしく、高品質のマスターパターンを得るような目的には不向きである。幸い昨年より、阪大の計算センターに設置されたドラフターが利用出来るようになり高精度或いは大画面の画像を描くのに大変便利になった。我々の所では高精度計算ホログラム或はマスターパタンの作成にこれを利用しょうと考え、若干実験を始めている。図２（ａ）はドラフターを用いて描いたホログラムの一例である。計算は(1)式に従ってＦＦＴで物体のフーリェ変換を行ない、計算結果の内、振巾成分の情報を透過率１の開口の面積で、位相を開口の規則的な標本点からの移動量で表示したものであってバイナリーホログラムと呼ばれているものである。

ホログラムの作図は、阪大計算センターに準備されているサブルーチンRECT(XS, YS, W, H, SLOPE）を用いて各開口の枠を計算から求めた値に対応して描いたものである。作図面積は64×64cm²で個々の開口は１cm²当りに一個配置するようになっており、計4096の矩型開口からなっている。演算時間はＮＥＡＣ2200Ｎ-500で６分30秒、最高描画速度19.2m/min, ペン巾0.35mmのインク画きで、一行の描画時間が２分、全体で２時間８分かかっている。猶各開口の内部はドラフターの描画時間を考慮し、手でぬりつぶした。この時間は大変なもので、もう少し効率よい描画法を考えるべきであるし、Calcomp プロッターのようにペンの代りに刃物で画面を切り取る表示法が阪大のドラフターにも付属していれば大変助かるとも考えられる。描画されたホログラムは写真縮少し、それを図１(b)のＨ面上にセットしてコヒーレント光で照明した時得られた再生像が図２（ｂ）である。再生像の画質はあまりよくないが、光学的な ホログラ ムと比較するとこの分解要素をもつホログラムは0.01mm²の面積から再生されたものとほぼ同じであるから、再生像質の悪いのは当然である。しかしＣＲＴディスプレーで得られたものに比べるとかなり良い像がえられている。

このように簡単な矩型開口からなるホログラムをドラフターで画くのは一に精度を要するからであり、それほど精度を要せず、かつパラメータ変化の多い実験ではＣＲＴディスプレーの方がはるかに便利である。

このドラフターでは、ペンの動きの最小ピッチが0.02mm／パルスであるので、上のホログラ

ムでの開口移動量に対する量子化誤差は(1/50)mm，開口の大きさに対してもペン巾を除いて同程度の精度であり、これは我々の目的に対しては十分であった。

この曲線表示可能なドラフターを用いて光学系検査用のマスターパターンが描画できる。実際の検査用光学要素は高精度に作成しなければならないので試作に膨大な経費を要するが、ゾーンプレート状のバイナリーな円群よりなるマスターパターンはこれと同じ働きをし、しかも簡単に高精度のものが作れるので非常に有効な方法であると思われている。ドラフター使用の経験ではこのマスターパターンの作成は十分可能であると思われる。この時、一つの系の測定には特定のマスターがあればよいので、たとえ描画に10時間以上要しても十分役立つことが考えられるからである。このように我々が行っている研究ではドラフターは高精度な原図を得る為に大いに役立つものと考えており、今後とも利用していきたいと思っている。

高精度の原図を描くには長時間の連続描画が必要である。ドラフターが共同利用でしかもユーザーにオープンにしてくれているのは大変良いシステムであると思うので、さらに稼動時間を効率よいものにしてほしいものである。特殊ジョブとして終夜運転利用を可能にするような効率的な運用を望みたい所である。

大阪大学の計算センターに設置されたドラフターを出来るだけ多くの人が有効に利用できるよう、 運用面を一考していただくと共に、 ユーザの方もそれぞれに全面的に協力してより円滑な研究の促進ができるようにしたいものである。そのためにはセンター及びユーザーが協力してより有用なアルゴリズムを開発することも重要であろう。

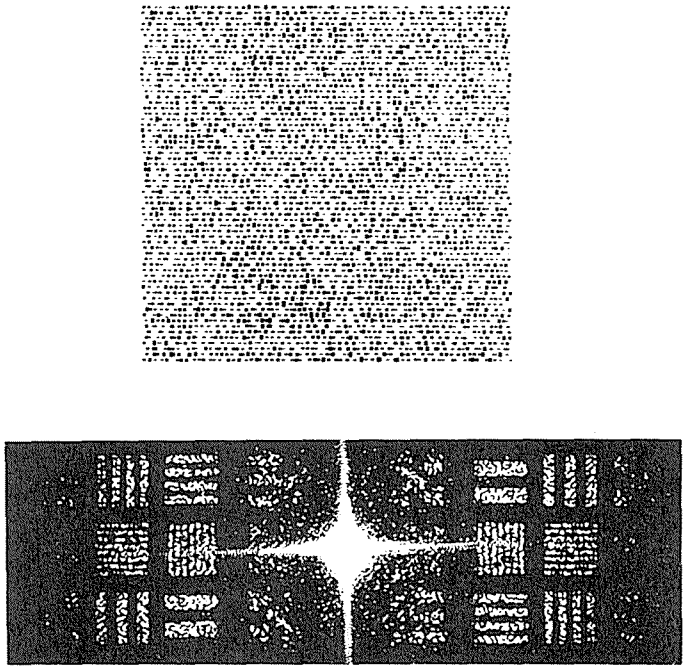


図 2