



非破壊検査と画像処理

尾 上 守 夫*

Non-Destructive Testing and Image Processing

Morio ONOE

1. 非破壊検査における画像処理のニーズとシーズ

検査において使われている欠陥の名称—われ、ひげ、あて、ひつかき、等、等—を見るとその多種多様なのに驚かされる。一般に製造に関する現象は温度とか寸法とか対象がはつきりしていることが多く、その意味で表現しやすい。これに反して検査が対象としている欠陥は本来あつてはならぬものなのでとらえにくい。それを何とか表現し、できればその成因にまで関連づけようという努力のあらわれが、多種多様の命名の所以であろう。それは高度の識別、分類能力を必要とする作業であつて、これまでは人間の目視によらざるを得なかつた。いわゆる表面の目視検査だけでなく、X線、渦流、浸透等の検査において計測手段はいろいろ変わつても、最終判定は2次元パターンを目視で行つてきたのである。この自動化は人間のもつ非常に高度のパターン認識の能力に迫ろうというのだから難しい。事実検査の自動化は製造の自動化に比べてはるかに遅れている。流線化された製造ラインのさき、人海戦術的な広大な目視検査場が付属しているのはよく見かけられるところである。

このような事態は最近急速に改善されつつある。そのニーズとシーズを考えてみよう。まずニーズの方であるが、第一に検査すべき対象が拡がり、データ量が急増してとても人手では追いつかなくなつてきたことがあげられる。構造物の巨大化、溶接工法の普及、安全性に対する社会的関心の高まりなどがそれに拍車をかけている。

第二にオンライン探傷の普及、そしてその高速化、高温化によつて人手による検査では対処できなくなつてきている。

第三にロボットや FMA の導入によつて工場に人間そのものがいなくなつてきた。これはまた自動搬送、ワークの位置ぎめ、部品の選択、工具の破損検出など検査と類縁の技術のニーズも増大させている。

第四に原子力関係の検査のように放射線被爆をさけるため自動化が必要であり、またプラントの製造から供用

そして廃棄にいたるまでの長年月にわたつて変化を追跡できる定量性・記録性が要求されてきている。

第五に破壊力学の進歩により構造物の強度や寿命の推定が可能になつてきたが、それには欠陥の位置、形状、方向など従来の検査で得られるよりもより定量的なまた画像的な情報が必要である。

第六に FRP, FRA などの複合材料、あるいはセラミックスのような新しい材料の登場があげられる。これらは一般に形状が複雑であり、材料的な特性から従来の検査法では欠陥が発見しにくい。

幸いにして以上のようなニーズにこたえる新しい検査技術のシーズもいろいろ生まれてきている。レーザのように強力でかつ高品質の光源が得られるようになって表面の光学的撮像及び処理の能力がいちじるしく向上したこと、あるいは固体撮像素子のように位置精度のよい撮像素子が容易に入手できるようになつたことはその例である。しかし一番インパクトの大きいのはデジタル画像処理技術が実用化の段階に達してきたことである。

画像処理の技法としてはデジタル方式のみならず、光学方式、写真方式、ビデオ処理方式などのアナログ方式があり、歴史的にみればアナログ方式の方が長い実績をもっている。にもかかわらず広く普及するにいたらなかつたのはアナログ方式では以下に述べるような多くの難点があつたからである。

図1は光学方式による画像処理の例であつてレンズを介して画像のフーリエ変換が簡単に行えることを利用したものである。すなわち透明スライドの形で与えられた入力画像 f をレーザ光をコリメートした平行光線で一

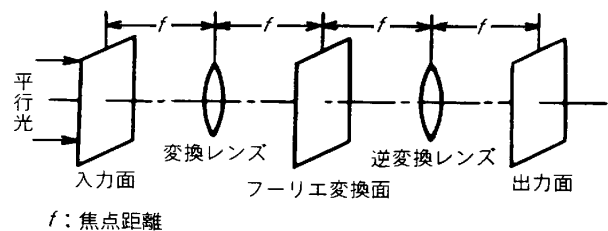


図1 光学方式による画像(フィルタ)処理

昭和 59 年 4 月 2 日 受付 (Received Apr. 2, 1984) (依頼解説)

* 東京大学生産技術研究所 工博 (Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 7-22-1 Roppongi, Minato-ku 106)

様に照明し、レンズ I に入射させると、その焦点面にはフーリエ変換像 F が得られる。画像全面にわたるゆつくりした変化に対応する成分は空間周波数が低いので中心に、輪郭など細かい変化に対応する成分は空間周波数が高いので周辺に回折される。したがって空間フィルタ H を置けば、透過光 G はその積になるから、レンズ II でもう一度フーリエ変換を行うと出力画像 g が得られる。各々の間の関係は次式で表される。

$$G = F \cdot H \dots\dots\dots (1)$$

$$g = f * h \dots\dots\dots (2)$$

ここで * 印はコンボリューション (2次元のたたみこみ演算) を表している。たとえば空間フィルタが中心にあけた孔である場合は低域フィルタに相当し、出力は平滑化された、あるいはぼけた画像になる。逆に中心の透過度を周辺に比べて下げた空間フィルタを使えば輪郭など細かい部分が強調された出力画像が得られる。

これからわかるように光学方式の特徴は全画面の処理が並列的に一瞬のうちに行えることであつて、その高速性に匹敵するものはない。その反面精度をあげるためには装置を防震台上に設置し、軸合わせその他の調整を念入りに行わなければならない。またレンズも良質のものを用いなければならない。大開口のものは非常に高価になる。さらに高価な装置ほど単能的になつて融通性を欠くようになる。

他のアナログ方式もこれらの長短は共通であつて、大面積の画像を高速に処理できる反面、精度、再現性、調整の容易さ、融通性などに欠けるうらみがある。

デジタル方式はちょうど逆であつて、画像を画素にわけてそれに濃淡、色などの値を数値としてわりあて、順々に計算機で処理していくものである。たとえば上記の光学方式に対応するフィルタ処理は (2) 式のコンボリューションを直接行うか、あるいは光学方式を模擬した恰好で前後にフーリエ変換をはさんで (1) 式の演算を行う。後者は高速フーリエ変換 (FFT) の登場によつて実用的になつた方法である。いずれにせよ光学方式に比べてはるかに時間がかかることは明らかであろう。しかしフィルタの特性をかえるのはプログラム上で簡単に行えるし、さらに光学方式では特殊な技法によらないと困難であつた位相特性の制御も自由に行える。このように処理のパラメータが自由に設定できること、しかも画像の部分部分に応じて最適なパラメータを選ぶようなアダプティブな処理が行えること、非線形処理を簡単に組み入れることができること、精度、再現性、融通性、に優れていることがデジタル方式の利点である。

しかしこのように優れたデジタル方式の実用化をはばんでいたものは画像データが膨大になるため、それを計算機内に蓄積するための記憶容量及びそれを直列処理するための演算時間もしくは演算量の問題であつた。

日常最も見慣れている画像はテレビジョンであるう

が、これは約 500 本の水平走査線からなつている。これを走査線間隔と同じ幅で画素にわけるとすると 1 水平走査線当たり約 700 画素になる。したがって全体では $700 \times 500 = 35$ 万画素ということになる。テレビジョンの場合、濃淡あるいは色の識別レベルはたかだか数十であるが簡単のため 1 バイト ($B=256$ レベル) とするとデータ量は 350 KB となる。これを計算機処理しようとする、他にオペレーティング・システム、処理プログラム、作業用記憶、出力用記憶などもいるから、これらすべてを高速記憶に収めることは相当大型の計算機でないと無理であつて、普通は磁気ディスクやテープのような補助記憶を使わざるを得ない。そうするとその読み書きのためにさらに処理時間がかかることになる。

テレビジョンの画面は画像としてはまだ粗い部類であつて、非破壊検査でおなじみの X 線フィルムなどは、その優れた解像度を活かすためには 1 mm 当たり何十画素といった細かさでデジタル化しなければならない。したがってそのデータ量はすぐ数 MB のオーダーになつてしまう。(後述のようにこれが一番ポピュラーでありながら X 線フィルムの画像処理が遅れている原因となつている)

幸いにして半導体集積回路技術は IC から LSI さらに VLSI と急速に進歩し、デジタル記憶及び演算のコストは急激に低下しつつある。図 2 は記憶素子におけるその模様を示したもので、1 チップ当たりの集積度が増すとともに、5~6 年で 1 桁という大幅なコストの低下を示している。しかもこの傾向はなお続くものと予想されている。演算のコストもマイクロ・プロセッサなどの登場により同様の傾向がみられる。デジタル画像処理の実用化の最大の障害が除かれてきたわけで、ニーズの強い分野から実用化がはじまつてきた。

2. デジタル画像処理

図 3 はデジタル画像処理システムの構成である。入力の部分は X 線、超音波など対象とする画像の種類によつて撮像センサが異なり、システムの中でもつともパラエティの富んだ部分である。計算機にとり入れるデータ量を減らし高速化をはかるために、視野の中から必要な領域を自動設定したり、雑音除去、平滑化、変化分抽出

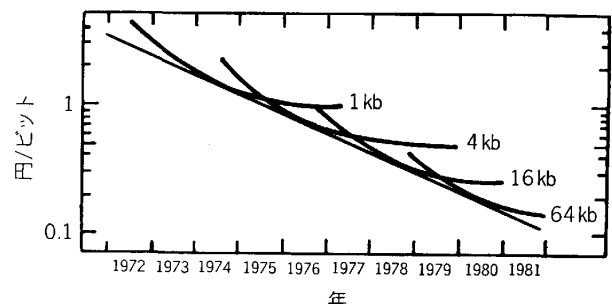


図 2 半導体記憶素子のコストの低下動向

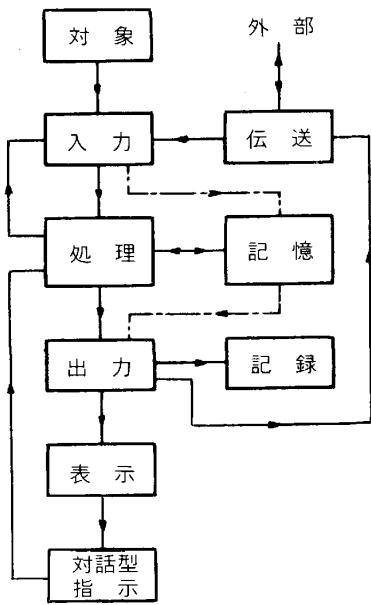


図 3 デジタル画像処理システム

などの前処理を行うことが多くなつてきて、入力部専用のプロセッサを用いた知能化が進んでいる。

出力はとくに研究段階では中間処理結果を迅速に表示して対話型指示を処理にフィードバックできるようにし、必要に応じてハードコピーに記録できるようにする。最近ではメモリーが安くなつたのでリフレッシュ型のディスプレイが普及してきて、画素数も 256×256 から 512×512 としだいに大きくなり、すでに 1024×1024 のものも登場してテレビジョンの画質を凌駕するようになってきている。このような大容量のメモリーはリフレッシュ用だけでなく、演算メモリーとしても、また入力のバッファとしても使うのが便利である。そのため大量のデータを高速に転送できるよう図中鎖線で示したように処理装置を介さないで直接入出力が可能となるような記憶中心のシステム構成がとられるようになってきている。

補助記憶としては磁気ディスク、磁気テープが標準的で、簡単なものとしてはフロッピー・ディスクがよく使われる。しかし多数の画像データの記憶には容量的に十分でなく、光ディスクなどが登場しはじめています。

処理の部分はシステム全体としての処理量を上げるために、高速化の要求が強い。個々の演算素子の速度を桁違いに向上させることは困難であるから、並列処理やパイプライン処理によつて実質の速度を上げる方向がとられている。

現在の画像処理システムは独立して相互に連繋はないが、将来は高速デジタルイザ、光ディスク、レーザープリンタなど高価な資源を共用し、また画像データベースを組むなど、各システム間で自由に情報を伝送交換できることが必要になる。画像データの伝送には高速大容量の通信回線が必要であるが、光ケーブルの出現はこれに明るい見通しを与えている。

表 1 画像処理用プログラム

演算プログラム	
操作項目	プログラム内容
生成	線図形、文字、塗りつぶし、乱数、消去、編集
点操作	階調補正、階調等化、色彩、偽カラー、擬似カラー、等高線、しきい値
幾何学的処理	抽出、そう入、補間、再標本化、回転、移動、反転、拡大、縮小、地図変換
画像間演算	加算、減算、乗算、比、論理演算、相関、重ね合わせ、SSDA
変換	FFT、HT、KLT、slant、DCT、フレネル
近傍処理	畳込み(フィルタ)、方向微分、ラプラシアン、孤立点除去、最大、最小
計測	長さ、周長、面積、体積、角度
統計	ヒストグラム、平均、重心、バリエーション、コバリエーション、エントロピー、クラスター、テクスチャ、主軸
立体処理	透視図、ステレオ対、隠線消去、断面、陰影

認識・判定プログラム

項目	プログラム内容
線抽出	2値化、縁検出、細線化、連結、線追跡、骨格線、 $\rho-\theta$ 変換
特徴点抽出	端点、屈折点、交点
テクスチャ解析	領域分割
クラスタリング	距離、写像変換

システムとして考えるとき上述のハードウェアは実はその半分であつて、あとの半分はソフトウェアであるといつてよい。表1には画像処理でよく使われるプログラムを示してある。これらは現在サブルーチン・パッケージの形で与えられることが多い。とくに情報処理の専門家でない人々が容易に使えるように、コマンド方式、メニュー方式によるシステムが多くなりつつあり、さらにエキスパート・システムなどコンサルテーション機能を入れたものも試みられている。

デジタル画像処理の大きな特徴はその汎用性にある。入力部分を除き計算機にし、表示装置にし、ハードウェアの多くはどのような応用に対しても同様に使える。ソフトウェアに関しても同様であつたと例えばX線像における輪郭抽出技法は磁粉模様の輪郭抽出にも有用であろう。したがつてある分野での実用化の成功は他の分野にも一斉に波及する効果をもっている。これは非破壊検査の中での分野に限つたことでなく、広く一般的に言われることである。

歴史的にみるとデジタル画像処理が最初に使われたのは衛星画像の分野である。月にはじまつて火星、金星、木星、土星と次々に展開された宇宙開発の成果は目をみはるものがあるが、その美しい画像の数々はデジタル画像処理技術によつてもたらされたものである。ついでで気象衛星、地球資源探査衛星、海洋衛星などによるリモート・センシングにおいてもデジタル画像処理技術が急速にとり入れられてきた。静止気象衛星“ひまわり”の画像のように一般の人々もテレビジョンや新聞を通

じて日常的に接する機会もましてきている。

衛星画像と並んでデジタル画像処理実用化の先端に立っているのは医用画像の分野である。これは非破壊検査ととくにかかわりが深いので少しくわしく眺めてみよう。

3. 医用画像処理と非破壊検査画像処理との対比

医学では非観血、無侵襲の計測ということがよく言われる。これは非破壊計測に他ならない。事実両分野は歴史的に見ても互いに密接に技術交流をしながら発展してきた。たとえばX線検査はまず医学应用にはじまつてそれが非破壊検査に取り入れられ、超音波検査は金属の非破壊検査がはじまつてからそれにならつて超音波診断が誕生した。

しかし画像関係についてみるとこのところ非破壊検査の分野の立遅れが目につく。医学では計算トモグラフィ(CT)の登場を契機として、デジタル画像処理の実用化が一気に進み、さらにデジタル・ラジオグラフィ(DR)から画像データベースと通信(PACS)へと展開している。これらはデジタル技術の汎用性のゆえに非破壊検査の分野にもぜひ導入していきたいものである。

もちろん技術の転移あるいは導入といつても、医学の対象とする人体の組成、物性は比較的限られた範囲に収まっている。これに対して非破壊検査が対象とする工業材料は実に千差万別である。したがって単なる直輸入ではなく非破壊検査特有の研究開発が必要であることは言うまでもない。

通常のX線写真は3次元立体構造を2次元に投影したいわば影絵であつて、必要な情報は相互にオーバーラップし、その読影には熟練を要する。これに対してCTは各方面からとつた投影像から真の断面像を計算機処理によつて再構成するものであつて、X線の分野ではレントゲンによるX線の発見にも匹敵する革命とも言われている。いろいろの診断にとつて今や不可欠となつたためCTの普及の早さは目をみはるものがあり、1台1~3億円の高価な装置が日本国内だけでも2000台使われている。したがってそのインパクトは単に医学のみならず、国民経済など社会の多くの分野に及んでいる。工学からみたときCTの最大のインパクトはデジタル画像処理の実用化にある。

CTの原理すなわち投影像からの断面像の再構成は図4の逆投影に基づくものが理解しやすい。図に示すようにX線吸収体があつたとすると、矢印の方向からX線をあてたときの吸収のプロファイルは図中実線のような山形の投影像になるであろう。これから断面像を再構成する一番簡単なやり方は単純逆投影、すなわち各投影像をそのまま投影された方向に逆にのぼして加え合わせる方法である。そうすれば山の部分はすべて元来物体のあつ

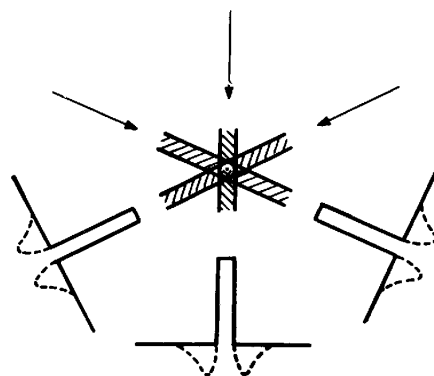


図4 CTの原理—逆投影

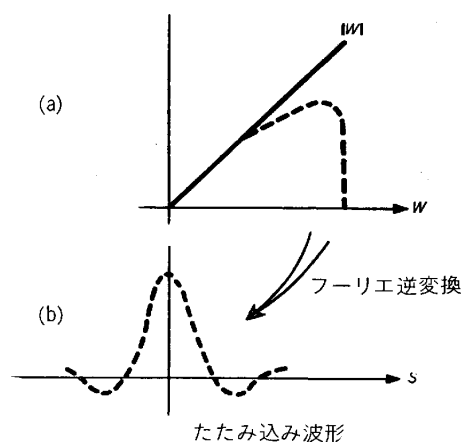


図5 再構成用フィルタ

た位置で重なるから一番濃くなる。しかしその周囲も逆投影された各成分が部分的に重なるのでボケを生じる。CTでは投影像を図5(a)実線のように空間周波数に比例して利得が増すようなフィルタを通してから逆投影する。ただし際限なく利得を上げていくと、高い空間周波数では雑音を増幅するだけだから、実際は図中点線のようにある空間周波数以上では利得をさげている。このフィルタ操作を空間周波数領域ではなく実領域で行うためには図5(b)のようなインパルス応答を投影像にコンボリューション(たたみ込み)すればよい。ここで大事なのは中心の左右に現われている負の部分で、これがあつたために図4点線で示したように周囲にはみだしたボケを打ち消すことが可能になる。

図6はCTの発展を示したもので、近々10年の間に第1~4世代にわたる集中的な研究開発がなされ驚異的な発展をとげた。第1世代は1対のX線管と検出器とが直線走査をし、それを回転する原理そのものの形式である。第2世代では狭い角度の扇形ビームを用い数十個の検出器で受けることによつて、その角度分だけ回転のきざみを粗くしている。第3世代は数百個の検出器を用いることによつてビームの角度をさらに広くして対象物が常にビームに含まれるようにし、直線走査を省いて1回の回転のみで全投影データが取得できるようにした

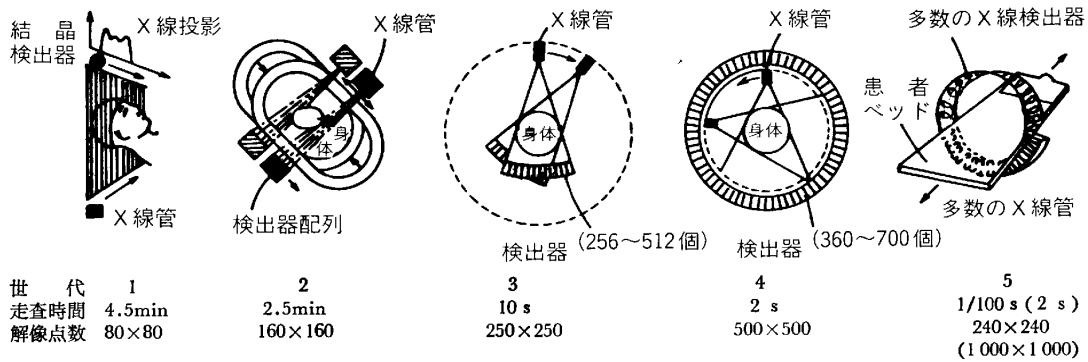


図 6 CT の 発 展

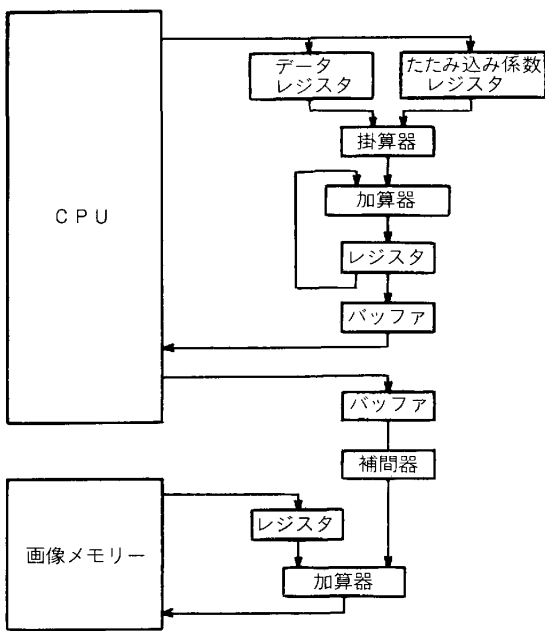


図 7 たたみ込み演算及び逆投影専用プロセッサ

ものである。第 4 世代は検出器が全周に固定配置され、X線管のみが回転するものである。これらによつてデータ取得時間は当初の 4.5 分 から数秒に短縮された。

再構成の方もそれに見合う高速化が達成されている。前述のたたみ込み演算の他に補間が必要になる。すなわち逆投影はデジタル的に考えると、投影データ上のサンプル点は極座標の上であり、表示などに使用される直角座標上のサンプル点とは一致しないので補間が必要になる。この両者を高速に行うために図 7 のような専用演算装置が開発され、ほとんど瞬時に再構成が行われるようになった。

現在の CT は高速化されたとは言えなお心臓のような動きの速いものを撮るには十分でない。そこで時間分解能 10 ms をめざす第 5 世代の研究開発が始まつており、図示したように多数の X 線管を切り替える方式や、図示はしていないが強力な電子ビームを偏向して X 線発生角度自体を電子的に走査する方式などが試作されている。

通常の CT でもスライスを積み重ねれば立体情報が得られる。3 次元像を時間的な変化も入れて得られるようになったわけであるが、それをどう表示するか、また膨大な 3 次元動態データをどう蓄積、記録、伝送するかは新しい研究課題になつている。CT の原理は RI、核磁気共鳴 (NMR)、粒子線、超音波、マイクロ波、などの波や線にも拡張されており、これらは非破壊検査の分野でも活用できそうなものが少なくない。

第 3 世代の CT 機において X 線の回転をとめたままで、人体を軸方向に送つていくと従来の X 線写真に相当する 2 次元の投影像が得られる。ただ写真では数千点×数千点の画素になるのが、CT では数百個の検出器でつくるテレビジョン程度の画像になるので解像度でははるかにおよばない。しかし検出器の直線性、動的範囲などはフィルムの特長よりはるかによく、しかも現像が不要であるのでほとんど瞬時に結果を見ることができる。デジタル・ラジオグラフィ (DR) というのはこのようにデジタル化した X 線像にさまざまな処理を施して有用な結果を引き出す分野の総称であるが、その主流は血管造影にある。すなわち造影剤の注入前後の像の差分をとることによつて血管像のみを選択的に抽出し、その分布、狭窄、閉塞などを見ようとするものである。これは要するに画像の変化分を強調、検出する技術であるから非破壊検査の分野でも割れの進展などをみるのに有用であろう。

以上のように医用画像処理の分野ですでに開発実用化された技術で非破壊検査の分野に転移・導入できるものは少なくない。もちろん経済性など考慮を要する点もあるが、関係者の理解や熱意に期待する点も少なくない。

4. 非破壊検査における画像処理

非破壊検査の分野で最も古くから実用化されてきたのは顕微鏡画像の処理である。これは金属組織中の粒状物の個数、面積などを迅速に計測するものである。Quantimet に代表されるようなビデオ技術に基づいたアナログ方式のものが製鉄所を中心に広く使われてきた。最近これがデジタル化され、さらに複雑な処理も可能

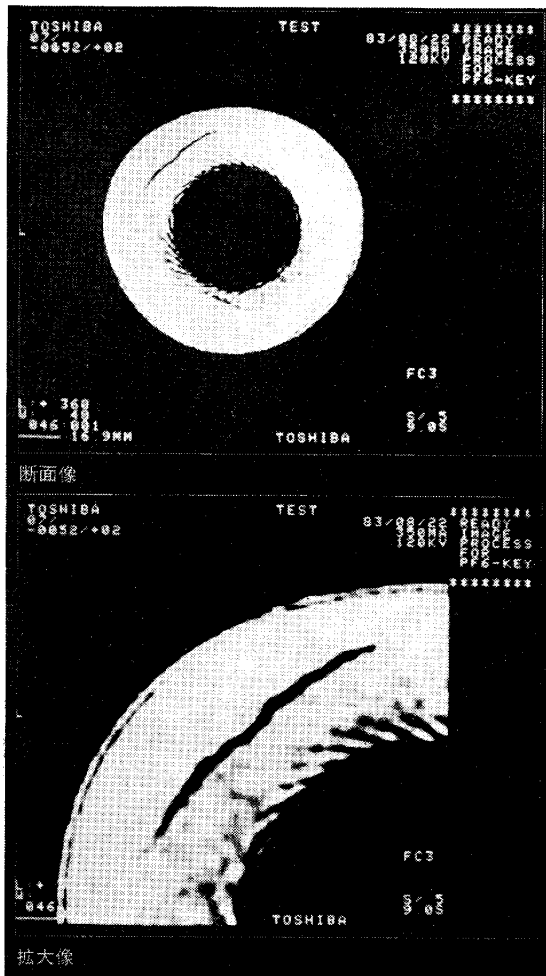


写真 1 CTによる内部欠陥像
(株)東芝のご好意による)

になつてきている。ここで得られる情報は2次元断面に関するものであるが、それから3次元構造を推定する数理形態学も長足の発展をとげてきている。電子顕微鏡、X線および電子線マイクロアナライザの画像についても同様である。

形態の測定はレーザ測距計の登場により非常に大型の構造物でも無接触で行えるようになった。また複雑な形状でも、写真測量やモアレ法により定量的に測定できるようになった。大面積の変形あるいは振動変位分布もホログラフィー法やスペックル干渉法で容易にできるようになった。これらのデジタル処理も活発に研究されている。

表面欠陥の検出にもレーザ走査による光学方式が実用になつている。これはレーザ光を小さいスポットにしぼつて回転鏡で走査し、その反射光量の変化を測定するのが主流である。その他にレーザの可干渉性を積極的に利用して欠陥による回折パターンを検知する方式もあり、方向性のある欠陥の判別に用いられている。さらにライトガイドと受光素子の組み合わせ、ITV、CCDなど撮像方式の多様化と高性能化、はいちじるしいものが

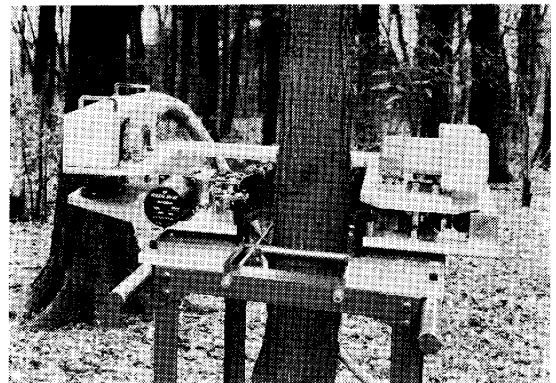


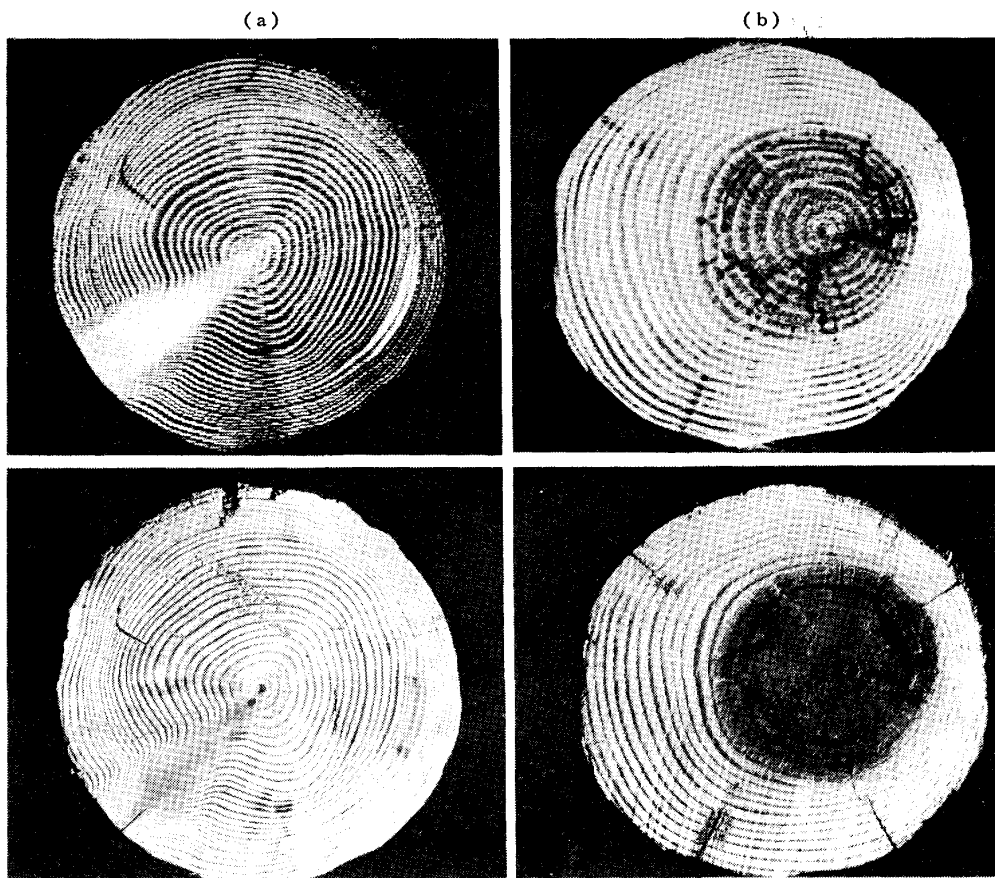
写真 2 可搬型CT

あり、熱間スラブ探傷など新しい応用分野が開拓されつつある。とくに CCD は位置精度がよく、画素数も1次元ではテレビジョンを数倍上廻るものが出現してきているので今後広く使われるようになるであろう。

放射線検査は出力がはじめから画像になつている典型であるが、歴史が深いわりには処理は案外実用になつていない。これは既述のようにフィルムの解像度に現在のシステムがなかなか対応できないこと他に、肉厚による線質の変化、散乱線の影響など像形成の機構が複雑で有効なフィルタ処理がなかなか行えないところに原因があると思われる。したがつて現状ではコントラストや輪郭の強調など前処理的なものがなされているにすぎない。しかしイメージ・インテンシファイヤーと組合したテレビジョン系、あるいはアレイ検出器などの解像度は現在の処理技術の射程内にあり、実用化のきざしがみえている。一方解像度の方も高品位テレビジョン、CCD等による高解像度のフィルム読取り装置、あるいは輝尽性蛍光体を用いた新しいX線撮像法など次々に新顔が登場してきており将来が期待される。

CT は真の断面像を再構成するのみならず、非常に高感度の計測法である。通常の投影像では画素当たり吸収量が10%くらい変化しないとそれが認められないのに対し、CT では1桁以上検出感度が増すので微細な傷も見つけることができる。ただ金属を相手にするには高エネルギーの線源の開発が必要である。この点最近話題になつているセラミックスのようにX線が通りやすく検出すべき欠陥の寸法が小さいものへの応用が有用であろう。写真1は内部欠陥のCT像の例であり、下はその拡大図である。このように自由自在に領域をえらび必要ならば吸収係数のプロファイルも得られるのがデジタル方式の特徴である。

一般のCT装置は室内に固定であるが、写真2は筆者らの開発した可搬型CTであつて電柱や立木を立つたまま切らないで断面がみれる。写真3はベイスギの電柱の例で、CT像では外からはわからない枝分かれ(a)や内部腐食(b)がよくわかり、あとから切断した実際の断面ともよく一致している。写真4は生きたスギの測



上 CT再構成像 下 実察の断面
写真 3 電柱のCT像と断面写真の比較

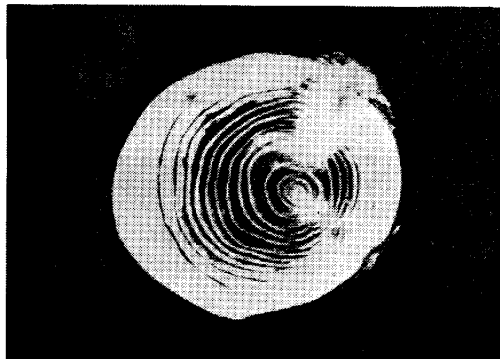


写真 4 スギの立木のCT像

定例で乾いた材木と異なり心材部に比べて蒸散水の通る辺材部のX線減衰が大きい(白い)ことがよくわかり、植物生理学や環境計測に有用である。

超音波探傷では長年の課題であった2次元記録が画像技術の進歩により容易にできるようになり、さらに3次元立体表示も可能になった。また方位分解能をあげるための開口合成などの手法も導入されてきているが本格的

な画像処理はこれからである。これは波長が長いという本質的な限界と近距離音場が複雑なため有効なフィルタがかけにくいなどいくつかの難問があるためである。医学分野では標準となつてきているアレイ探触子の活用とその画像処理も緊急の課題である。

磁気、浸透、などの探傷は元来画像を出力とするものでこれに関しても画像処理技術の導入がいろいろはかられている。渦流探傷も多周波数化がすすんでおり、多次元な画像処理手法が活用される領域が大きくなつてきている。

以上のように各検査分野とも新しい撮像方法及び画像処理をとり入れる気運はみちてきており、一方医学その他の分野では転移可能な技術がすでに少なくない。今後の発展が期待されるわけである。

参 考 文 献

日本非破壊検査協会には、非破壊検査画像処理(005)特別委員会が設けられ、この関係の発表が多い。

医用画像については次のものが総括的である。

医用画像処理(尾上守夫編)(1982)[朝倉書店]