目視検査の自動化

——総論 (現状と今後の課題)——

谷内田 正彦 大阪大学基礎工学部制御工学科

特集

解説

1. はじめに

工場で生産される製品の信頼性を向上するには検査が不可欠である。単に最終製品の検査のみでなく、加工や組み立てによって作られた部品や半製品の検査も重要で、生産工程の多くの過程で検査は必要となる。

対象の検査を行うには、まず対象の状態をセンサで観測し、そのセンサ情報を処理して対象の状態、すなわち正常か異常かを同定する。このとき、使えるセンサ情報としては種々のものが考えられるが、視覚情報を用いた外観検査は情報量も多く、とりわけ重要である。

従来、このような外観検査は人間の目視に頼っていた。これは、一般に外観検査工程は検査項目が多く、かつ複雑なため、人間のもつパターン認識能力に頼らざるを得なかったためであろう。

しかし、人間の目視による外観検査には次のような問題点がある。

(1) 苛酷な作業 目視検査は集中力を必要とする単純な繰返し作業であるため、苛酷な作業である。

(2) 検査基準のばらつき 人間の判断には常にあいまいさがつきまとい、個人差、熟練度、そのときの気分などにより異なるため、検査基準が変動する。

(3) ミスの発生 人間のもつ目視検査の能力は非常に優れているが、反面、長時間の繰返し作業を続けると、単調さや疲労から間違いを起すことは避けられない。

(4) 目視の限界 LSI パターンの傷検査のように大きなパターンの中で微小な傷を発見するのは難し

く、また耐え難い。

(5) クリーン、危険作業 クリーンルームのようにほこりを嫌う所では、ほこりの源である人間が入らない方がよい。また原子炉やビル壁面の検査などのような危険作業は機械にまかせた方がよい。

このようなことから、近年、目視検査の自動化に対する要望が急速に高まってきた⁽¹⁾⁽²⁾。一方、近年の画像処理やパターン認識技術の発展やマイクロコンピュータを中心とするハードウェアの進歩 (大容量化、高速化、低価格化) などにより、目視検査の自動化が技術的、速度的、あるいは価格的な点からも可能となってきた。

目視検査の自動化のメリットとしては、省力化、苛酷な作業や危険作業からの作業者の解放などがあげられるが、それら以外にも次のような利点が考えられる。

(i) 定量的な基準のもとに検査するため、製品の品質が均一化される。

(ii) 検査結果の統計的データが得やすくなるので、生産工程の改善に役立てることができる。また、検査結果をオンラインで製造工程へフィードバックすることにより、不良品の統出を防ぐことができる。

(iii) 人手による目視検査では、数が多いため標本検査しかできなかったものが、全数検査に切り換えられれば、当然、品質の向上と信頼性につながる。

以上のような背景から、プリント基板や薬品の錠剤などの外観検査の自動化が 1970 年代後半から始まった。しかし、目視検査の自動化が本格的に始まったのは 80 年代に入ってからで、最近では製造業にとどまらず、表 1 に示すような幅広い産業分野で実用化が試みられている。これはマイクロコンピュータの急速な発展・普及に支えられて、それを使った目視検査の自動化が様々な分野で試みられるようになったためである⁽³⁾。

Automatic Visual Inspection—Current State of Art and Future Directions—, By Masahiko Yachida (Dept. of Control Engineering, Faculty of Engineering Science Osaka University).

表 1 外観検査の応用例⁽¹⁾

対象物 産業分野	自動外観検査の対象物
電子工業	シリコンウェーハ、IC マスタパターン、トランジスタチップ、はんだ付け
電子部品	プリント板、はんだ付け、接点ろう付け、カラーTV シャドーマスク、液晶文字
製薬	錠剤、カプセル、アンプル、箱のラベル
食品	ビンのラベル、ビンの汚れ、ビンの口吹け、ふた、容器、液面
化学	プラスチックシート、樹脂成形品、ホース、タイヤ文字
自動車部分	エンジンナンプ、メータ、エンジンバルブ
電線	エナメル線
鉄道	トロリ線
製鉄	熱間鋼片、熱間鋼板、原料粒度
農水産	きゅうり、メロン、トマト、りんご、魚
建築	外壁の検査

また、技術的な面から眺めると、初期の項は2値化が容易で、処理アルゴリズムの簡単な対象が中心であったが、最近では濃淡画像を必要としたり、あるいは複雑な処理アルゴリズムの必要な対象の自動化も盛んになってきた。

一方、より高度の目視検査の自動化を目指して、画像処理の高速化を狙ったイメージプロセッサ、目視検査への三次元情報の利用、目視検査装置の高度化と使いやすさを目指したエキスパート検査システムなどの研究が盛んに行われている。

本稿では、外観検査の自動化に焦点において、その基本構成や処理方式を述べた後、今後の発展動向について述べる。

2. 目視検査の自動化とシステム構成

2.1 実用化への要求項目

目視検査の自動化を実用化へ移そうとすると、生産ラインの要求する幾つかの条件を満たしている必要がある。これらの条件は次のようにまとめることができる⁽⁴⁾。

- (1) 経済性 性能価格比の良いこと。但し、人間にとって危険な作業や苛酷な作業など、自動化へのニーズの強いものはある程度経済性は犠牲にされる。
- (2) 実時間性 生産ラインの速度にあった、あるいはそれ以上の速度で検査できることが望ましい。
- (3) 高信頼性 人間の検査員と同程度、あるいはそれ以上の高い信頼性が望まれる。対象が少数であると人間の検査精度は非常に優れているが、長時間の繰り返し作業になるとミスが発生する。従って、統計的な意味での信頼性の比較が重要となる。

2.2 自動化システムの設計

目視検査の対象は広範囲にまたがり、またその検査内容も対象ごとに異なる。このような広範囲の検査対象、検査内容を一般的に扱える検査システムやアルゴリズムはなく、現状では検査対象ごとに処理アルゴリズムを設計しているのが実状である。すなわち、目視検査の自動化は、現在のところ一品生産の色彩が濃い。しかし、基本的な考え方は共通する部分も多いので、ここでは、目視検査の自動化システムを新たに構築するときの一般的な手順や注意点について概説しておく。

検査システムを開発するには、まず、対象の何を検査するのか(検査項目)、何をもって異常とするのか(検査基準)を明らかにする必要がある。また、正常/異常の判別だけでなく、異常の場合にはその種類や程度を認識する必要がある場合も多い。これらがマニュアルなどにより整備されている場合はよいが、そうでないときには、専門の検査員からこれらのことを聞き出して整理する必要がある。

検査項目や検査基準などが決れば、次にそれを処理するためのアルゴリズムの設計となるが、その前に考慮すべき重要な点として、処理のしやすい画像を得るための工夫があげられる。すなわち、光源の種類や照明方法、対象の置き方、レンズ・フィルタやカメラの種類や配置方法を工夫して、検査対象の鮮明な良い画像を得ることが重要である。

こうして、検査対象の見え方、すなわち入力画像が決ると、次にその処理方式を設計する。既に数多くの画像処理アルゴリズムが開発されているので、その中から、前に述べた経済性、実時間性、高信頼性などを総合的に評価して、対象にあったものを選択、改良して組み合わせて使えばよい。このとき注意すべき点として、専門の検査員の用いている対象の特徴がいつも最良であるとは限らないことである。これは、人間にとっては簡単に検出できる特徴でも、機械にとっては時間がかかったり、難しかったりするからである。またその反対に、人間にとっては計測するのに面倒な特徴でも、機械では簡単な場合もある。

アルゴリズムの設計が終わると、画像処理システムにプログラム化して実験を行う。最初に設計したアルゴリズムのままで完全であることは少なく、実験を通してアルゴリズムの修正を行う必要がある。このため、画像処理システムはアルゴリズムの誤りの発見や修正が容易に行える対話形システムが便利である。

処理方法が決ると、マイコンなどにプログラムを移植して、性能価格比の良い実用システムを作成する。

図 1 開発システムの構成例⁽⁵⁾

しかし、検査項目が多かったり、処理内容が複雑だと、通常のマイコンでは速度的に無理なことも多い。このため、時間のかかる画像処理の部分をハードウェア化することがよく行われる。最近では画像処理用のプロセッサも市販されるようになったので、これらをうまく利用することも重要である。

2.3 画像処理システム

目視検査の自動化のための画像処理の方法は検査対象や検査項目によって少しずつ異なる。検査対象にあったアルゴリズムを開発するには、道具の揃った画像処理システムを用いるのが便利である。

このような開発用のシステムの一例を図1に示す。しかし、個々のシステムが必ずこの構成を必要とするわけではなく、普通はもっと簡単な構成がとられることが多い。これらのハードウェア構成要素は、図に示すように、照明系と画像の入力、処理、出力、蓄積の五つのサブシステムに分けることができる。

(1) 照明・光学系 前にも述べたように、検査対象にあった照明源、照明方法や、レンズ・フィルタなどを選んで処理しやすい画像を得ることが重要である。

照明源としてはけい光灯、タングステンランプ、ハロゲンランプ、水銀灯、ストロボ（キセノンランプ）、レーザなどが使われている。前三者が一般的に利用され、残りは特殊用途に用いられている。ストロボは対象が移動するときなどにカメラの残像現象を防ぐ目的で用いられていることが多く、レーザは投光法でよく用いられている。

照明法としては種々の方法が考えられているが、その代表的なものを図2に示す。なお、個々の照明方法についてその特徴を述べる紙面の余裕はないので、興味のある方は文献(2)、(6)を参照されたい。

図 2 種々の照明法⁽⁶⁾

TVカメラに取り付けるレンズ系としては、標準、広角、望遠の各種レンズと接写リング、あるいは顕微鏡などが用いられる。主に対象物の大きさから使用するレンズが決められる。対象物に色がついていたり、使用する光源の波長がレーザなどのように限られていると、フィルタを用いて入力光の波長を選択するのもSN比の良い画像を得るのに有効である。また、狭い場所を利用して画像を入力したいときには、イメージファイバが用いられることもある。

一方、外観検査のみでなく、対象の内部状態の検査を行いたいときは、X線やCTなどが用いられる。

以上に述べたように、照明源、照明方法、レンズ、フィルタには幾つかの種類があるので、対象やその背景の特徴、処理目的に応じて選択して使う工夫が必要である。

(2) 視覚センサ 視覚センサとしては、少し前までビジコンやカルニコンなどの撮像管を用いたテレビカメラがよく使われた。しかし、数年前に登場したCCDやMOSといった固体センサは、従来の撮像管に比べて感度や分解能といった点で劣るが、小形・軽量で残像も少なく、また空間的なひずみも少ないという長所がある。このため、最近では固体センサが用いられることが多い。

固体センサには一次元のリニアセンサと二次元のエリアセンサがあるが、リニアセンサは既に4,000画素以上の画素数をもっているため、高分解能を必要とする検査によく用いられる。

通常のシステムでは明るさの情報を入力できれば十分であるが、視野内の色や対象までの距離も入力できれば便利なのも多い。色情報はカラーのテレビカメラを用いたり、白黒のテレビカメラの前に赤、緑、青などのカラーフィルタを取り付けて入力することにより得られる。

また、視覚センサからシーンの各点までの密な距離情報も得られると凹凸の検出などに便利である。密な距離情報は、各点が距離を表わす画像と考えることができるので、一般に「距離画像」と呼ぶ。距離情報を

図3 実用システムの例(1)

得る手法は種々研究されているが、まだ簡単な装置は市販されていない。

(3) 画像プロセッサ 前にも述べたように、通常のコンピュータで二次元の画像を処理すると演算時間がかかる。このため、演算時間を短縮する目的で、画像処理に適した専用のコンピュータである画像処理用プロセッサをコンピュータのフロントエンドとして置くことも多い。画像プロセッサはそのアーキテクチャから局所並列形、完全並列形、パイプライン形、マルチプロセッサ形やそれらのハイブリッド形に分類できる⁽⁷⁾。

これらの画像プロセッサを試作してもよいが、面倒なので、特殊目的を除いては市販品を用いた方が便利である。最近では、各社から、画像をデジタル化する回路を含んだ画像処理用プロセッサが市販されている。また、これらのプロセッサの基本的な部分をLSI化する試みも盛んである⁽⁸⁾。今後、これらのLSIを用いた、小形で安価な画像プロセッサが次第に商品化されるだろう。

2.4 実用システムの構成

開発用システムで処理方法が決ると実用システムが作られる。実用システムでは、不要な部分は削り取って、もっと簡単な構成がとられる。

実用システムの例を図3に示す。実用システムでは検査対象を決った姿勢に整理したり、検査結果に応じて排出先を決定する機構も必要となる。

3. 目視検査のための画像処理アルゴリズムの現状

視覚センサからの情報は、ほとんどの場合、画像という形で得られる。この入力画像を加工、処理して目的とする情報を抽出する。しかし、現在のところ、汎用の一つの画像処理手法はないので、種々の画像処理手法の中から、検査対象・目的に応じて適当なものを選択し、組み合わせて使う必要がある。それには道具となる個々の画像処理手法の特徴や使い方について習熟しておくことが重要となる。しかし、個々の技術について詳しく述べる紙面の余裕はないので⁽⁹⁾、その概略

について述べておこう。

3.1 2値画像、濃淡画像、色彩画像⁽⁹⁾

外観検査システムを設計する際に、入力画像として何を使うかを決めることは重要である。

2値画像は、必要とするメモリー容量や演算量が少なく、また画像処理の専用ハードウェア化も容易なので、2値画像のシステムが実用システムとして多く使われてきた。

しかし、2値化により検査対象がうまく安定に切り出せる場合にはよいが、コントラストが悪かったり、照明環境が変動すると、安定に2値化できないことも多い。特に、目視検査では微妙な濃淡の違いを検出する必要があることも多い。このような場合、もっと情報量の多い濃淡画像を使う必要が生じてくる。

以上のようなことから、最近、濃淡画像も目視検査の自動化に盛んに用いられるようになった。これには、近年のメモリーや演算素子の価格の急激な低下と速度の向上や、濃淡画像を高速に処理することを目的としたイメージプロセッサの進歩などの要因も見逃がせない。

一方、検査対象に色がついていると、色情報も重要である⁽¹⁰⁾。しかし、色情報は明るさの情報に比べて更に情報量が多いため、その処理量も多くなることなどから、あまり使われなかった。しかし、果物の成熟度やサングラスの着色度の検査などのように、表面の色状態自体を検査したいときには色情報を使わざるを得ない。今後、画像処理の進展と目視検査の応用分野の拡大につれて、次第に色情報も使われるようになるだろう。

3.2 目視検査の手法

前にも述べたように、目視検査の自動化では検査対象や目的によって画像処理のアルゴリズムが少しずつ異なる。しかし、比較的共通して用いられる手法もあるので、それらのうち、幾つかを紹介しておこう。

目視検査の自動化における基本的な考え方は、正常な対象のパターンをモデルとして記憶しておいて、それと検査対象の画像とを比較して、差異がなければ正常、あれば異常とする方法である。もちろん、傷や欠陥のパターンを記憶しておいて、それらを検査対象の画像の中で探すという考え方もある。しかし、傷や欠陥のパターンは千差万別で、それらをすべて事前にリストアップするのは難しい場合が多い。

正常なパターンのモデル化のやり方には種々あるが、代表的なものをあげると次のようになる。

(1) 重ね合せ法 正常な対象のパターン全体をモデルとして記憶しておいて、それと検査対象とを比

較してその差異を欠陥として考える方法である。モデルを作成する方法として、現物を直接見せる方法と、CAD データから作成する方法とがある。あるいはモデルを事前に作成しておかないで、現物を二つ並べて直接に比較し、その差異を欠陥として検出する方法もある。

この重ね合せ法は明快な方法であるが、位置合せ精度が必要である、データ量が大きくなるといった問題点もある。

(2) 局所的な特徴抽出法 産業用部品や回路パターンなどの人工物体は、直線とか円などの規則的な形状で構成されていることが多い。しかし、欠陥のある部分では不規則な形状をしている。従って、検査される対象がもっているはずの局所的な特徴を決め、それをモデルとして記憶しておくと、入力画像でそれと矛盾するものを欠陥として検出することができる。正常な局所特徴の決め方に種々の手法がある。しかし、当然のことながら、正常な局所特徴と似た欠陥は検出できないという問題点がある。

(3) 大局的な特徴抽出法 対象の大局的な特徴、すなわち、大きさ、周囲長、円形度などをモデルとして記憶しておき、これらを検査対象の値と比較して判別する方法である。対象に合った特徴を用いることが重要である。しかし、この方法では回路パターンの微小な傷のように大局的な特徴の値にほとんど影響を与えないものは検査できない。

以上、幾つかの手法について述べたが、いずれの手法においても、どれだけの差異があれば欠陥と判断するのか、また回路パターンのように、同じ程度の傷でも、場所により致命的なものと、そうでないものがあるが、それをどう区別するかが問題となる。

4. 今後の発展動向と期待

目視検査システムの応用分野は極めて広い。生産現場のみでなく、その潜在的な需要は社会生活の隅々にまで至っているといつて過言ではない。従って、より高次の検査の自動化を目指した研究が活発に行われている。これらの研究を基に、これからの発展動向をいくらかの期待を含めて述べておこう。

4.1 イメージプロセッサと検査の高速化

イメージプロセッサの研究・開発が我が国では活発に行われてきた。最近では、アメリカでも DARPA (Defence Advanced Project Agency) の ALV (Autonomous Land Vehicle) 計画とも関連して、高速のイメージプロセッサの研究・試作が盛んに行われている。これらのイメージプロセッサの発展やその性能価

表 2 奥行き情報入力のための種々の手法

● 単眼画像から	{	濃淡分布 (shading) から
		輪郭から
● 多重画像 (三角測量)	{	テクスチャから
		影情報から
● 多重画像 (三角測量)	{	複眼視 { 両眼視
		三眼視
● 多重画像 (三角測量)	{	多眼視
		投光法 { スポット
● 時間伝搬法 { レーザ	{	スリット
		符号化並列光
● 焦点調節	{	並列光
		レーザパルス
● 動画画像 { 物体移動	{	観察者移動
		超音波

格比の向上により、従来、経済性や速度的な点から困難とされたてきた、検査項目の多い、あるいは検査内容の複雑なものにも自動化の波が押し寄せることが期待される。

4.2 奥行き情報の利用

対象の表面の凹凸状態を検査したい、あるいは三次元的な形状を調べたいといった要望も非常に多い。このような場合には濃淡情報から直接的には検査できないので、奥行き情報が得られれば便利である。また、背景とのコントラストが少なく濃淡画像では検査対象を検出し難い場合にも、奥行き情報を用いることにより検出できることも多い。

このように、奥行き情報は検査にとって重要な情報であるが、従来あまり利用されなかった。これは精度良く奥行き情報を手軽に入力できる装置がなかったのが主な原因だろう。

このため、奥行き情報の入力方法は、現在盛んに研究されており、詳細は省略するが⁽¹¹⁾、その主なものを分類すると表2のようになる。

これらの手法のうち、投光法は照明条件を制御できる環境下での比較的信頼できる奥行き情報の入力法として、実用化されつつある技術である。

この投光法を用いて奥行き情報を得て検査に利用した例として、タービンブレードの表面の腐食の検査⁽¹²⁾、プリント板上の部品の有無やコネクタの検査、三次元形状によるはんだ付けの不良の検査⁽¹³⁾などがある。

奥行き情報の入力と検査への利用法は今後も活発に研究が続けられ、次第に実用化の例も増えていくと思われる。

4.3 目視検査と知識——検査の高度化——

目視検査の能力を向上するには、画像という信号を

処理だけでなく、検査対象についての知識に基づいた推論を行うことも重要である。

重要な知識の一つとして、検査対象の幾何学的な形状や構造についての知識があるが、それはモデルという形で従来から用いられてきた。このような形状や構造についての知識と同様に重要な知識として、検査対象についての背景となる知識がある。

例えば、我々が医学写真や複雑な回路パターンをみた場合、正常と異常の区別がつかない。しかし、医師は人間の体やその病気についての知識、過去の経験則などを用いて、画像を解釈して病名の同定を行う。同様に、複雑な対象の検査を、専門の検査員は種々の知識（対象とその不良状態についての知識、経験則）を用いて、検査を行っている。

従って、機械にも同様な能力を与えようとする、対象についての背景となるノウハウ、専門知識が必要となる⁽¹⁴⁾。

この研究はまだ始まったばかりであり、画像情報を推論システムが使いやすい形式でいかに表現するか、算術演算の多い画像処理と記号操作が主体の推論部とのインタフェースをどうするかなど、今後の課題が数多くある。

4.4 専門家検査システム——使いやすい目視検査システム——

前にも述べたように、目視検査の対象は広範囲で、しかも処理内容は対象により少しずつ異なる。一方、従来の目視検査システムでは処理アルゴリズムが一定で、しかもその処理手順は手続き的であった。このため、その処理方式に合った対象にしか適用できないという問題点があった。これらが、従来の検査システムが、たぶん一品生産的な色彩の濃かった一つの大きな原因であろう。

画像処理の分野では、現在までの研究により、数多くの処理アルゴリズムが開発されているが、各アルゴリズムの特徴、すなわち有効な対象、機能や効率は異なる。これらの画像処理アルゴリズム自体に関する知識をシステムに与えておくと、システムはそれらの知識に基づいて、対象画像や検査目的に応じて、うまくアルゴリズムを使い分けることが期待できる。

更に、状況に応じてどのアルゴリズムをどういう順番で適用すれば良いかを決定するための制御戦略に関する知識を与えておけば、画像処理を効率的に行うことも期待できる。これらの知識は目視検査の高度化にも必要であるが、使いやすい画像処理システムを構築

するのにも重要となってくる。すなわち、これらのシステム自身についての知識や制御戦略など汎用性の高い部分と、処理対象についての知識などの応用に依存した部分を分離しておく。そうすると、処理対象が変わっても応用に依存した部分のみを前に述べた方法で書きかえれば、その応用目的に適した専門家システムに変わる。更に、処理対象や処理目的などの応用に依存した知識をいちいちプログラムしなくても、対話的にあるいは学習により獲得できれば、一層、使いやすいシステムとなる⁽¹⁵⁾。

この「エキスパート検査システム」が今後の柔軟なシステムの一つの姿としてその実現が期待される。

この研究もまだ始まって間もないが、最近、研究が活発化してきた。

5. おわりに

目視検査の自動化の目的や実用化への課題、システム構成やアルゴリズムの現状を述べた後、今後の研究動向や期待、課題などについて述べた。今後、目視検査の自動化について考えておられる方々の一助になれば幸いである。（昭和62年4月25日受付）

文 献

- (1) 谷内田：「外観検査の自動化と視覚センサ・システム」センサ技術 4, 11, 18 (昭 59-10)
- (2) 電気学会編：外観検査の自動化 (昭 59-11)
- (3) 谷内田：「視覚を用いた自動検査および自動組み立てシステムの動向」日経エレクトロニクス 292 号, p. 169 (昭 57-6)
- (4) 谷内田：「コンピュータビジョンの FA への応用」電学誌 104, 392 (昭 59-5)
- (5) 谷内田：「ロボット・ビジョンの設計」日本ロボット学会誌 4, 4, 72 (昭 61-8)
- (6) 谷内田：「ロボットビジョンとカメラ照明系の制御」電学誌 106, 761, (昭 61-8)
- (7) 木戸出：「画像処理ハードウェア」情報処理 21, 6, 620 (昭 55-6)
- (8) 松本、他：「画像処理分野をねらったデータフロー型プロセッサ LSI」日経エレクトロニクス p. 181 (昭 59-4-9)
- (9) 谷内田：「視覚センサシステム」日経メカニカル, 昭和 59 年 7 月 16 日号から 6 回連載
- (10) 谷内田：「色の認識」電子技術 26, 5, 26 (昭 59-5)
- (11) 谷内田：「視覚を用いた 3 次元位置・形状の計測とその応用」システムと制御 29, 10, 631 (昭 60-10)
- (12) G. B. Porter, et al.: "A model driven visual inspection module" Robotics Research, M. Brady, et al (ed.) p. 371 (1984) MIT Press.
- (13) Y. Nakagawa, et al.: "The Structured light method for inspection of solder joints and assembly robot vision systems" *ibid.* p. 355 (1984)
- (14) 谷内田：「検査ロボットの知能化」日本ロボット学会誌 4, 5, 46 (昭 61-10)
- (15) 谷内田：「32ビットマイコンの画像処理・理解への応用」自動制御技術 36, 45 (昭 62)