目視検査の自動化の現状と動向

正 員 山 本 和 彦 (電子技術総合研究所)

1. はじめに

一般に工場の生産ラインには部品の製造、部品の検査、組立、製品検査などの工程が存在する。これらのうち、部品製造や組立ラインの自動化には目覚ましいものがあり、単純な製造作業だけでなく、従来人間が行わざるを得なかった種々の高度な組立作業もコンピュータ制御による組立機械などによって代替されるようになってきた。これにひきかえ、部品および製品の検査はまだまだ人手によって行われているのが現状である。そこで、これらの目視検査作業を画像処理装置によって代替させようとする目視検査の自動化の機運が高まっている⁽¹⁾⁽²⁾。本稿では、この現状と動向について述べる。

2. 目視検査自動化の背景

最近、生産ラインにおいては、利用者の多様性に対応するために、従来のような少品種大量生産だけでなく、部品のバラエティ、組立のバラエティを許容した多品種小量生産の方向に向かっている。この場合、同一生産ラインで幾つかの異なる製品を作ることとなり、各品種あたりのロット数が極端に少ない場合も生じている。このような場面でも組立てラインはコンピュータや組立機械の利用によってフレキシブルマニファクチャリングが可能となりつつある。しかしながら検査員による検査工程がからんでいる場合には、大きな問題を引起す。かつてフォードは、自動車生産ラインを個々のステップに分割することによって個々の人間の作業をできるだけ単純化し、作業能率を大幅に向上させた。目視検査もこの原理に基づいて、単純作業と長い訓練とによってかろうじて信頼性と高速性を保ってきた。しかし、このままでは検査員による検査

は多様性に対処できず、信頼性と作業能率の低下を余儀なくされることになるかもしれない。

一方、人間は短時間の集中作業に対してはすばらしい能力を発揮するが、長時間の単純な作業には疲れを生じ、検査結果のばらつきが大きくなる。時には全数検査を行っているにもかかわらず、検査もれの製品も生じてしまう。初期には自動化される検査装置を前者の人間の能力と比較しがちであったが、現在ではこの状況が理解されつつあり、ばらつきの下限を自動化によって確実に押し上げることが期待されてきている。

3. 画像処理技術の適用

人間による検査を画像処理装置で置き換えて意味のある場合は、以下のような場合である。

- (1) 多すぎて見る気がしない場合
- (2) 通常では見えないものを見えるようにする場合
- (3) 精密計測と組合せられている場合

(1)項が目視検査では主流である。これは小さな部品が多量に流れている場合である。検査の対象としては幾つかの部品が流れており、これを分類する段階、分類された部品の姿勢を整える段階、部品の形状などの検査の段階がある。また検査工程を完全に自動化する場合と疑わしい部品を選択して、検査者に注意を喚起する場合がある。(1)項のジャンルは上記部品のほかに傷検査などがある。例えば鋼板表面における傷検査においては、いつどこでどのような傷が生じるかは明らかではなく、製造システムが安定であればあるほど次に出現するまで長時間にわたって監視する必要がある。(2)項は画像強調といったレベルからCT(コンピュータ・トモグラフィ)のレベルまで幅広く考えられるが、検査員のための画像処理と目視検査の自動化の場合には異なっている場合が多い。検査員に対しては感覚に訴えやすいような表示法が中心となるが、自動化では機械が線分や形を抽出しやすいような画像処

Present State and Progress of Automatization of Visual Inspection. By Kazuhiko Yamamoto, Member (Electrotechnical Laboratory).

表1 視覚検査技術の発展⁽⁴⁾

年 代	'72	'73	'74	'75	'76	'77	'78	'79	'80	'81	'82	'83	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90
エレクトロニクス技術 ・マイコン ・メモリ	4040			8080/85					8086/186					80286/386				1 M	
	TTL			2 K					64 K					256 K				ニューロコンピュータ	
													画像処理 LSI 信号処理 LSI						
視覚センサ技術	ビジコンカメラ							固体カメラ											
画像処理技術	ミニコン画像処理 ミニコンコンピュータシミュレーション							パソコン画像処理 超大形コンピュータシミュレーション											
視覚検査システム	研究開発																		
	専用機																		
	プリント板検査, LSI マスク検査, はんだ付検査																		
	農産物選別(トマト, プリンスメロン, きゅうり, なす)																		
	アンブル自動検査 錠剤検査, カプセル検査																		
	目薬検査																		
	キーボード配列検査																		
	汎用機																		
	普及機																		

理が行われる。(3)項は三次元形状や時間的変化を測定しようとする場合である。視覚の柔軟性のためにかえて人間には絶対計測が困難な場合に、画像処理的なとらえ方によってばらつきのない精密測定が可能となる。

4. 目視検査自動化の流れ

目視検査における自動検査装置の最近の進歩は、アルゴリズムやソフトウェアの開発による能力およびフレキシビリティの拡大と、ハードウェア価格の低下である。デジタル画像処理はプログラムさえ書けば任意のアルゴリズムが実現可能である。反面、処理速度が遅いこと、並列化によって処理速度を上げようするとコストが高くなるなどの欠点をもっていた。

目視検査の自動化は表1⁽⁴⁾に示すように個々の専用機の開発から始められ、初期には不十分なマイクロコンピュータ技術と少ないメモリー容量で実現できる手法と対象に限定し、主として電子産業の製品検査を中心にシステム開発が進められた。その後ハードウェア技術、特にメモリーの高密度化とマイクロプロセッサの低価格化によって専用システムが作りやすくなり、農業団や医用など幅広い応用システムが作られるようになってきた。更に画像処理や信号処理の市場の拡大と共に DSP などの信号処理用 LSI、更には画像処理 LSI の ISP⁽⁵⁾などが開発され、これらの LSI を用いた汎用検査装置も作られるようになった。更に汎用機は高価であり、実現できる機能や性能を整理した普及機が開発されつつある⁽²⁾。

5. 自動検査システム

目視検査の自動化装置は一般にイメージセンサ部お

よび判別処理部、機構部から成り立っている。このなかで画像処理という立場で見た場合、イメージセンサ部と第6章で述べる判別処理部が重要である。

(1) イメージセンサ部 イメージセンサ部は更に照明部とセンサ部から構成される。照明方法は検査しようとする対象に依存して多くのバリエーションがある。現在のところ、このイメージセンサ部できれいな画像が取出せなければ、以降の処理に手をかけても性能の向上はあまり期待できないことが多い。

(2) 照明部 照明方法は大きくは反射照明と透過照明に分けられる。検査対象と取出したい情報によって透過照明、周囲一様照明、明視野同軸照明、斜方照明、正反射照明、光切断法が用いられる⁽¹⁾。周囲一様照明や明視野同軸照明は表面の傷や表面パターンの検出に用いられる。また、表面異物の検出や凹凸検出は斜方照明や暗視野照明が用いられる。刻印文字などの検出には、斜方からの正反射照明が用いられる。びんの検査のような透明物体や検査対象の背景から拡散先透過されるようなボードなどの場合はシルエット像としてとらえる透過照明が用いられる。更に反射照明の一種であるが、背景部分の素材によっては、背景に紫外線を当ててそこからの蛍光反射を受けることによって、透過照明と同様のシルエット像を得る方法が用いられることもある。更にスリット光などを投影して、その形状の変化を見ることによって対象物の曲がりや、そり、凹凸形状を検出する光切断法が用いられている。また物体の立体感を検出しようとする場合は、方向性の強い照明方法が選択される。いずれにしても対象に強く依存しており、数多くの方法が利用されている⁽⁶⁾。

(3) センサ部 受光部は従来高解像度の点から

視覚センサとして用いられていたビジコンカメラに替わって、寿命が長い、残像がないなどの特性のほかに、小形で取扱いやすいという利点をもつ固体センサに置き換えられつつある⁽²⁾。

6. 自動検査アルゴリズム

画像処理アルゴリズムの開発環境としては、初期にはミニコンピュータによるシミュレーションが中心であったが、最近のパーソナルコンピュータの高性能化によって、パーソナルコンピュータによる画像処理も可能になってきた。一方、形の認識のためのモデル作りなどにはスーパーコンピュータによる画像処理シミュレーションが行われている。しかし、開発されたアルゴリズムは依然マイクロコンピュータによって実行されている。

照明法によって得られるデータは各点に濃度情報をもった画像である。現在の技術レベルでは、これらの画像を2値化し、データ圧縮することによってはじめに実用的な処理することが可能になっている⁽²⁾⁽³⁾。

(1) 入力画像の2値化 2値化には固定しきい値法、浮動しきい値法、微分法、濃度ヒストグラム法がある。固定しきい値の場合、最初に黒レベルを合せるとか、分割した画像に対してそれぞれのしきい値を定めるような工夫を行っている。浮動しきい値法⁽⁷⁾は、画像信号を遅延積分して作成した平均値を用いることによって、微小欠陥の2値化を実現している。一方、映像信号を微分すると変化部分にピークが出る。これのあるしきい値でクリッピングすると傷によって生じる立上がりや立下がり信号が検出できる。更に処理時間の余裕があれば濃度のヒストグラムを見て、その分布の形からしきい値を決定する高精度な方法も発表されている⁽⁸⁾。

(2) 判別処理 判別方法としては、標準パターンと入力パターンを重ね合わせて類似度を求めるパターンマッチング法と、検査パターンから対象固有の特徴量を抽出して、この値を既に用意された標準の値と比較する特徴抽出による方法がある。

辞書をあらかじめ用意しておく方法⁽⁹⁾は、標準パターン全体と未知パターンを照合する方法である。位置ずれに弱いので対象物の位置決めや、回転の補正を組合せることによって実用化されている。部分パターンマッチング法⁽¹⁰⁾は標準パターンを対象物の特徴付ける特徴的な部分について用意しておき、この部分パターンで入力パターンを走査することによって同一部分パターンを捜し、対象物の位置がずれることに対処している。辞書パターンの代わりに、入力パターンを拡

図1 判別木 (decision tree) の例
(G. J. Agin and R. O. Duda, "SRI Vision research for advanced industrial automation", 2nd USA-Japan Computer Conf. Proc., pp. 113 ~117, 1975)

大縮小することによって参照マスクを作成し、これと入力との比較を行うことによって微小なひびやひげなどの傷を判定する拡大縮小法⁽⁷⁾は、辞書パターンを用いないパターンマッチング法としてよく知られている。

特徴抽出による方法でよく知られているのはSRIアルゴリズム⁽¹¹⁾である。これは Stanford Research

Institute で開発されたビジョンモジュールで、まず 2 値化パターンをファクシミリなどで用いられているようなランレングスで表現する。次にこの各ラインの上下の連結性を解析して連結領域の様々な特徴量を計算する。特徴量としては領域の面積、重心、周囲長、縦横方向の投影パターン、外接長方形など、数十種類のパラメータが求められる。識別は、これらの特徴およびそれらの組合せ特徴をあらかじめ定められた値と比較して図 1 のような判別木を用いて行われる。このようにモデルが定まれば、最も分離に適した特徴を用いて判別がされる。

このほか多数の良品を統計処理して面積、長さ、曲がり、太さなどの標準値を求めておき、入力の特徴の値を比較する方法⁽¹²⁾や周囲長差法や周囲長比法、対象パターンの面積 S と周囲長 L の比 $L \times L / S = K$ が真円であれば $L \times L / S = 4\pi$ であることを利用して真円との比較を行う円形法⁽¹³⁾が提案されている。

これらの特徴抽出による方法は、位置ずれや変形に強いという利点があるが、その反面、検査に有効な特徴を見いだしたり、それらの特徴を組合せた判定論理を個々に作成しなければならない。

7. 産業応用例

一般的な画像処理アルゴリズムは共通ではあるが、個々の分野によって個別の問題がある。電子産業については詳しい解説がある⁽⁶⁾ので、ここでは農水産分野における選別と鉄鋼分野における欠陥検査の事例を紹介する。

7.1 選別工程における自動化

野菜や魚の選別においては、判定要素の多様性、判定基準設定の困難性、判定基準の不統一、周辺異物の処理の問題、対象の傷み防止対策など独自の難しさがある。判定要素は、大きさ、形の良し悪し、つや、表面の傷などがあるが、つやなどは現状では困難でありパターン計測可能な輪郭線形状認識を中心とした検査選別装置が開発されている⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。ここでは、人間が日常会話で表現する定性的な判定基準を計測可能な要素に分解し、それらの組合せで定量的に表現する。例えばきゅうりの選別では、ずんぐり度は大きさと長さの比、曲がり度は花卉と茎を結んだ線から中心線の一番離れた点までの距離として解釈し直す必要がある。このように実測値と評価値とをどのように結び付けるかといった、従来、パターン計測や認識で議論する以前のシステム化技術が成功の鍵を握っている。

魚の選別においては、魚と共に海草の切れ端やごみなどの周辺異物が同時に送られてくる。このため格子

状の金網の上に魚を置き、これらの異物を落下させることによって除去している。このためシルエット画像には、魚と共にこの金網が写っている。しかし、後の画像処理で収縮膨張を用いたノイズ除去演算によって、魚のシルエット像だけが取出せる。

このほか二次元的な形の測定だけでなくカラーセンサを用いて、表面の色調を求めて果物を高速高精度に選別する装置も開発されている⁽¹⁶⁾。しかしながら、光沢や傷の検査などより高度な品質検査による選別を行うためには、表面の濃淡画像やカラー画像処理が必要であろう。

食品ではないが食品容器の検査では、ビールびんの検査装置が開発されている。これは透明物体のため照明の方向やリングライトなどの照明の種類、光検出器に工夫がなされている。

7.2 欠陥検査の自動化

金属産業における目視検査は表面傷検査が主体である。ここでの難しさは欠陥の形態が多様であり、定義することが難しいうえに製造技術と共に変わっていくことや、検査面の大きさに比べて欠陥サイズが小さく、膨大な画像情報の高速な処理が必要となることである⁽¹⁷⁾。

省エネルギーを目的とした熱間直送圧延における赤熱スラブの自動探傷⁽¹⁸⁾では、高速で流れてくる鋼板から欠陥の可能性のある部分の画像を選択抽出する。ここでの画像は従来の冷間での傷の見え方とは異なり、検査対象物自体が発光しているため、ヘゲや割れなどによる表面温度の低下に注目したものである。温度分布パターンを空間微分した信号を求めて、信号の幅や信号の強さによって欠陥の種類をリアルタイムで識別を行う。ここでの困難性はヘゲと信号が弱いにより重大な根つきヘゲの場合のように、欠陥の有害性と取れる信号の強度が対応していないことである。有害の程度に応じて濃度だけでなく、色むらやパターンやテキスチャや光沢などの視覚的特徴を種々の分解能で取出して、総合的に判断している人間の場合とは大きな違いである。

8. 画像処理システムの自動構築

これまでに様々な画像処理アルゴリズム（処理モジュール）が開発されてきた。また、個々のアルゴリズムの開発だけでなく、検査の専門家であるが必ずしも画像処理の専門家ではない人々にどの処理モジュールを用いたら良いかを指示したり、どのような手順で画像モジュールを組立てるかを示す画像処理エキスパートシステム⁽¹⁹⁾が提案されている。更に幾つかの画像

と目的や一般的性質を与えるだけで、対象物の性質や画像処理手順を自動的に形成してくれるシステムも幾つか試みられている⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。

9. 目視検査自動化の展望

現在電気学会の目視検査の自動化調査専門委員会では、目視検査の自動化問題になるポイントなどに関して既に発表された論文などの追跡調査を行い、各分野の代表的な目視検査の自動化装置やアルゴリズムの事例集を作成しつつある。

目視検査の現状では、検査の自動化は安くて早いものが要求されており、その結果、高機能な手法に手が出ない状況にある。具体的には取扱う画像の大部分は2値であり、計測の中心は外枠の寸法や面積などである。今後、はだあいや感性に基づく判断をしようとするれば、濃淡画像やカラー画像を直接対象として認識理解することが必要になると考えられる。このためにはVLSIを用いた超並列超分散方式のハードウェアの開発が望まれる。また幾つかのセンサから観測された情報の融合を図るセンサヒュージョンも重要である。形の判定においては、現状では二次元画像に写像しているものが大部分であるが、三次元の形を直接入力し判断することにより高機能の検査が可能となる。このためには三次元視覚センサの開発が望まれる。

最近ニューロコンピューテーションなどの研究が再び活発化している。このような学習機能をもつモデルは1950年代後半のRosenblattのパセプトロンに端を発している。この神経回路網モデルはその後10年間あまり研究されたが、線形識別能力しかもたないことが数学的に明らかにされてから鎮静化していた⁽²²⁾。しかし、最近RumelhartらのPDPグループは、多層モデルの中間層の係数の学習問題の解法として提案したバックプロパゲーション学習アルゴリズムが非線形識別関数を作れることを示した⁽²³⁾。このためパターン認識分野への応用がクローズアップされ始めた。更に最近ではLSI化の動きも活発化しており⁽²⁴⁾、シミュレーションを主体とした可能性追求はますます加速されている⁽²⁵⁾。しかしながら、このような期待の先行した現状に対して批判⁽²⁶⁾、警告⁽²⁷⁾が投げかけられている。まだ目視検査の自動化に直接適用された例はないが、盲目的な期待よりははるかに健全なこのような環境の中で、多数の議論が繰返されることであろう。

現場の検査員のノウハウは長年の経験を経たスキル(技巧)である。これらのスキルを上記超並列超分散

の枠組の中で学習する試みが注目される。数多くの画像処理例とその結果を知識ベース化し、これを提示することによって、欠陥などを発見する熟練検査システムの実現が期待される。

(平成元年6月12日受付)

文 献

- (1) 森下, 他: 外観検査の自動化(昭59-11) 電気学会
- (2) 新田, 他: ビデオセンサ導入ガイド(昭63-7) 電気書院
- (3) 谷内田: 「視覚を用いた自動検査および組み立てシステムの動向」, 日経エレクトロニクス, 292, 169 (昭57-6)
- (4) 枝松: 「目視検査における実用化技術」, 平成元年電気学会大会, S15-7
- (5) 福島, 他: 「画像処理用 LSI-ISP の開発」, 昭58, 情報処理学会第26回大会, p. 939
- (6) 中川: 「電子産業における目視検査の自動化」, 電学論 D, 109, 458 (平元-7)
- (7) M. Ejiri, et al.: "A process for Detecting Defects in Complicated Pattern", Computer Graphics Image Processing, 2, 326 (1973)
- (8) 大津: 「判別および最少2乗規準に基づく自動しきい値選定法」, 信学論 D, J63, 349 (昭55-4)
- (9) Ishizaka, et al.: "High speed pattern recognition system based on a template matching", SPIE Proc, 849, 202 (1987)
- (10) S. Kashioka, et al.: "A Transistor Wire-Bonding System Utilizing Multiple Local Pattern Matching Techniques", Proc. 4th IJCPR, p. 955 (1978)
- (11) G. J. Agin, et al.: "SRI vision research for advanced industrial automation", Proc. of 2nd USA-Japan Computer Conference, p. 113 (1975)
- (12) 前田: 「生鮮食の選別」, テレビジョン学誌, 35, 902 (昭56-11)
- (13) K. Edamatsu, et al.: "Automation Capsule Inspection Method", Pattern Recognition, 14, 365 (1981)
- (14) 野村: 「パターン計測技術応用の農水産物形状自動選別システム」, 映像情報, p. 65 (昭56)
- (15) 島立, 他: 「パターン計測技術応用の魚種・魚体自動選別装置」, 三菱電機技報, 56, 44 (昭57-3)
- (16) 一川: 「果物の等級・階級別仕分けシステム」, オートメーション, 27, 69 (昭57-2)
- (17) 西元: 「金属産業における目視検査の自動化」, 昭63 電気情報関連学会連大, 5-5
- (18) 岩崎, 他: 「リアルタイム画像処理を用いた赤熱スラブの自動探傷装置」, 鉄と鋼, 70, 1194 (昭59-9)
- (19) 久保, 他: 「粒子画像解析エキスパートシステム DIA-Expert/PA1」, 情報処理学論, 29, 209 (昭63-2)
- (20) K. Yamamoto, et al.: "MIRACLE-IV: Multiple Image Recognition System Aiming Concept Learning-Intelligent Vision", Proc. 9th IJCPR, p. 818 (1988)
- (21) 長谷川, 他: 「サンプル図形の提示による画像処理手順の自動構成方法とその線図形抽出手順構成への適用」, 電子通信学会技報, PRL85 (昭60)
- (22) Minsky, et al.: Perceptrons (1969) MIT Press
- (23) Rumelhart, et al.: Parallel Distributed Processing (1986) MIT Press
- (24) 「鳴動するニューロチップ」, 日経マイクロデバイス, p. 43 (昭63-7)
- (25) 「ニューラルネット」, バックプロパゲーション型の改良が進む」, 日経エレクトロニクス, 455, 153 (昭63-8)
- (26) 「MITのMinsky教授ら, 著者の改訂版でPDPを再び批判」, 日経 AI, p. 5 (昭63-1)
- (27) 「IEEEの説明会で研究者らがニューラル・ネットの過大評価に警告」, 同上, p. 7 (昭63-2)