10 画像処理と AI 技術を応用した自動放射線検査システムの開発*

Development of Automatic Radiographic Inspection System
using Digital Image Processing and Artificial Intelligence*

糸賀 興右**, 杉本 幸治***, 道場 康二**,
加藤 雄平****, 杉田 雄二****, 恩田 勝弘****

Kouyu ITOGA**, Koji SUGIMOTO***, Koji MICHIBA**,
Yuhei KATO****, Yuji SUGITA****, Katsuhiko ONDA****

キーワード: 放射線検査, 自動化, 画像処理, 人工知能, エキスパートシステム, 溶接欠陥

1. はじめに

溶接検査へのコンピューターの適用は急速に拡大しつつある。適用区分には、データ取り込み、分析と処理、結果の画像表示、欠陥種類の判別と欠陥の有害度評価、合否判定等がある。これらの内、データ取り込みの自動化へのコンピューター技術の適用は、超音波探傷自動スキャナー等に見られるように比較的早い時期に実現した。現在進行中の技術はデータ処理とその結果のグラフィック表示であり、これから急速に拡大して行くであろう技術に欠陥種類判定及び有害度評価への人工知能の応用がある。

ここでは、著者らが開発したコンピューター支援放射線検査システムを例にとり非破壊検査へのコンピューター技術の適用の現状の紹介と将来の展望を試みる。

2. 放射線検査に必要なコンピューター技術

放射線検査に限らず非破壊検査の一般的特徴は、検査員の経験、技量への依存度が非常に高いことにある。これは、計測される物理量が比較的単純であるのに反して、その解釈に多くのバックグラウンドの知識が動員されていることを意味している。例えば、放射線検査で得られる情報は像の濃淡のみである

が、この濃淡像からの欠陥像の抽出は門外漢には困難であり、ましてや欠陥種類の判別は不可能である。検査員がフィルム像を解釈できるのは、パターン認識的に欠陥像を認識する視覚的な能力、認識した像とそれらの像が形成される原因となる検査対象物側因子との関係に関わる知識を有しているからである。したがって、放射線検査をコンピューター化するためには、これら二つの能力をコンピューターに持たせる必要がある。前者には画像処理技術、後者には知識工学が当てはまる。

3. 開発システムの概要

著者らは実用化システム開発には、検査員の欠陥検出と種類識別のプロセスをできるだけ忠実にコンピューターで再現することが重要と考え、これを開発の基本方針とした。

本システムの対象は、板厚が 30 mm 程度までの鋼材の余盛付きのアーク突合せ溶接継手である。処理は放射線透過像（フィルムまたはリアルタイム像）のデジタル変換からスタートする。まず、画像処理により透過度計、階調計の識別、評価を行い、画質が規準を満足しているものについてのみ欠陥候補像の抽出、画像強調を行って検査員が見やすいようにモニターに表示する。同時に、抽出された全ての欠陥候補像の欠陥特徴量を計測し、原画像、強調画像と共にファイルする。次に、エキスパートシステムによって欠陥候補像の欠陥候補像の欠陥種類を識別する。さらにプログラム化された規格に基づき等級分類及び合否判定を行い、検査結果をファイルとして保存すると共に、モニターおよびプリンターに出

*原稿受付 平成 2 年 12 月 12 日

**会 員 川崎重工業(株) Member, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

***非 会 員 川崎重工業(株) Non Member, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

****非 会 員 中部電力(株) Non Member, Chubu Electric Power Company, Inc.

力する。画像処理部の構成は、照明・撮影系、画像入出力部及び画像処理部から成る。機器の構成は、高周波点灯型透過照明台、ニュービコン映像管を用いた TV カメラ (浜松ホトニクス (株))、専用画像処理ボード (米国 ITI 社) を画像入出力装置として搭載した EWS コンピューター (SUN/4)、補助記憶装置 (光フィルム) 及びプリンターから成る。画像処理プログラムはすべて自主開発であり、欠陥種類判別エキスパートシステムも独自開発のツール (川崎重工 (株) KIS) を用いて構築した。なお、画像処理の対象となる 1 単位画像は、輝度階調 8 ビットの 240×256 ピクセルである。すなわち、全ての機能が 1 台の計算機に集約されており、可能な限りの高速処理が実現されている。ちなみに処理速度についておおよその目安を述べると、12 インチ $\times$ 5 インチサイズフィルム 1 枚の処理時間は、抽出された欠陥数にも依存するが、成績書の印刷まで含めて約 300 秒と予想され、1 日フル稼働した場合約 290 枚の処理が可能である。さらに、より高速の EWS を用いれば 150 秒程度にまで短縮でき、1 日に約 580 枚のフィルム処理が可能である。この速度は溶接構造物の製作現場への実用化に十分耐えられ、イメージインテンシファイア等を用いたりリアルタイム放射線検査の量産品製造ラインへの適用の可能性も高いと考えられる。

4. 画像処理手法

放射線による溶接検査にコンピューター画像処理を適用した最初の例は 1960 年代後半まで遡るが¹⁾、本格的な開発は 1970 年代後半から 1980 年代に入ってからであり、欠陥を含む溶接余盛の濃度分布断面形状に着目した研究²⁻⁴⁾、パターン識別手法を取り込んだ研究⁵⁾等がある。画像情報として得られるのは濃度の分布であるから、欠陥像の抽出においては、画質改善手法は別にして、いずれも濃度差や濃度勾配を識別する手法が採用されている。ところが、余盛付溶接部の放射線透過写真には溶接欠陥と同程度あるいはそれ以上の濃度差や濃度勾配を有する像が多数存在する。言い替えると、疑似指示と欠陥像の識別が困難であり、画像処理を用いた放射線溶接検査システムの実用化にはこの問題の解決が必須の条件である。

4.1 欠陥像の抽出

欠陥の特徴に着目すると、フィルム上の欠陥像はブローホール等の立体状欠陥に見られるコントラ

図1 画像処理の流れ

トが強く比較的検出しやすいものと、融合不良に多いコントラストが弱い線状の影として現れる検出の難しいものに大別できる。単一画像抽出法ではこれら二種類の欠陥像に対して同時に満足のいく検出性能、寸法計測精度を得ることはきわめて難しい。そこで本システムでは、図1に示すように立体状欠陥および面状欠陥（き裂を含む）のそれぞれに適するよう開発した強調抽出法を一つの対象画像に並列的に適用し欠陥候補像（疑似指示を含む）の領域を抽出することになっている。図中で第4種欠陥処理とはタングステン巻込みを対象にしたもので、内容的には輝度を反転した第1種欠陥処理法である。これらの像の情報は、形状、濃度分布を表す特徴量パラメータに集約され、欠陥種類判別のためのエキスパートシステムに引き渡される。

4.2 欠陥像の強調

欠陥像の強調手法の代表的なものは、画像取り込み時の電氣的なランダム雑音を除去する平均化処理及び各種のフィルターの適用によるコントラスト強調法である⁶⁾。本システムではこれらの方法とスプライン変換法によるバックグラウンド濃度の平滑化手法を採用している。すなわち、比較的コントラストの強い立体状欠陥に対しては、余盛部の輝度変化が欠陥部に比べて緩やかであることを利用し、図2に示すように原画像の溶接線方向及びそれに垂直方向の輝度分布を二次曲線の連鎖で近似したバックグラ

図2 立体状欠陥像強調法

図3 平面状欠陥強調法

ウンド画像を差し引くことによって欠陥のコントラストを強調する。一方、画状欠陥はコントラストが弱いため、図2の方法では強調が困難である。そこで、この種の欠陥像が溶接線方向に細長いことを利用して、図3に示すように溶接線方向に長い方形領域の平均化窓処理を施すと共に、溶接線に垂直な方向の二次差分型の窓処理を施して像のコントラストを強調する。これらの方法は、溶接欠陥像の強調ばかりでなく、フィルム像質を判定するため同時に写し込まれた透過度計（線形及び有孔形）の画像強調にも適用される。

4.3 欠陥領域の抽出

強調画像の溶接ビード内の画素値の分布の統計量からしきい値（抽出しきい値）を求め、統計的に暗い部分を二値画像として抽出する。この場合、しきい値は見落としが無いという条件下で出来るだけ低い（高濃度）方がよい。しきい値が高いと多数の疑似指示を拾い上げる結果になるからである。抽出された欠陥候補像については、抽出領域に隣接する、あるしきい値（寸法しきい値）以上の比較的暗い部分を併合して領域の拡大を行った後、形状の整形、

微小領域の削除を行い、寸法の計測を可能とする。

なお、欠陥の抽出しきい値、及び寸法しきい値は、多数の検査員の判定を整理した結果に基づき、検査員と同等の結果を与えるように設定した。透過度計識別度判定のためのしきい値決定も同様に行ったが、その過程で、透過度計識別度の比較で評価する限り検査員の抽出感度よりも本システムのそれが優れていることが明かとなった。

4.4 疑似指示削除

上記抽出領域の中には、本来の欠陥の像以外に、フィルム濃度差のみでは区別できない溶接ビードのさざなみ模様の谷間、フィルムの粒状性、現象むら等の疑似指示が含まれる。これらのうち検査員の高度な経験則を用いるまでもなく形状、濃度分布等で排除できるものは画像処理の段階で削除する。特に濃度分布については、疑似指示と実欠陥像近傍の濃度変化に特徴的な差異が見いだされた。この差異を表現するパラメーターを定義し、疑似指示削除ルールを作成して適用した結果、図4に示すように、ほとんどの疑似指示が排除可能となった。

図4 疑似指示削除ルールの適用例

5. 欠陥種類識別の知識

欠陥種類の識別手法としては各種溶接欠陥の特徴量の統計解析結果をデータベースとして有し、対象欠陥の特徴量がどの種類の欠陥に該当するかを判断する方法⁷⁾、欠陥形状のパターン認識法⁸⁾、ニューラルネットワーク法⁹⁾が試みられている。本システムではエキスパートシステムを採用している。

検査員のインタビューを積み重ねた結果、図5に示すように、検査員は欠陥像の検出及び識別に画

図5 欠陥種類識別知識の構造

図6 欠陥種類推論機構

像から得られる情報の他に経験に裏打ちされた種々の知識を動員していることが分かった。この結果から、画像から得られる情報は最も重要ではあるが、そのみで欠陥種類を識別するには困難が伴うことが明かである。そこで本システムでは二つに大別される手法を複合して欠陥の種類を識別している。第一は画像情報を定量的データとして扱うために画像処理により計測した欠陥特徴量を欠陥の属性値として扱って欠陥識別に利用する手法であり、第二は検査員の知識や経験をプロダクションルール化して欠陥識別に利用する手法である。図6に本システムの欠陥種類識別法の構造を示す。

5.1 画像の知識のルール化

欠陥種類毎の欠陥特徴量データを蓄積、管理するデータベースシステムを構築し、統計処理を施した。欠陥特徴量としては参考文献〔7〕に示されている5種に、有効性が見い出された新たな特徴量10種を定義して追加した。その結果、任意の欠陥特徴量の分布及び複数の欠陥特徴量の間には欠陥種類に特有な相関を示すものがあることが分かった。そこでこれらをプロダクションルール化し、対象欠陥の特徴量がそのルールに合致するとき、その欠陥はルールが導かれた母集団の欠陥種類に該当するとした。このとき確信度には、元の分布や相関の平均値に近い程高い値を与えることにした。現在このようなルールが約500蓄積されている。

5.2 検査員の経験則のルール化

検査員が表現に用いる「丸い」、「ぼんやりしている」等に相当するパラメーターと量を見だし、定

性的な表現を定量的な表現で置き換えた。例えば「丸い」とは長短径比が1.5以下である等である。これにより、「小さくて丸く、かつコントラストの高い欠陥は100%の確率でブローホールである」といった表

図7 ブローホール寸法計測結果の比較

現が欠陥特徴量を用いたプロダクションルールで表現可能となった。現在、約100のこの種のルールを用いている。

5.3 システムの検証

検査員と画像処理による欠陥指示寸法の計測値の比較結果をブローホールを例にとり図7に示す。画像処理結果は検査員の結果とよく一致している。他の各種欠陥についても同様の結果を得ている。欠陥種類識別手法の検証結果を表に示す。対象としたフィルムはすべて、データベースに登録されていない欠陥を含むものである。コンピュータの推論結果は4人の検査員の識別結果と非常によく一致している。これらの結果から本システムの有効性が認められる。

6. 実用化システムの概念

本システムは以下の4つの使用法が全て可能な設計となっている。

1) 検査結果の信頼性向上はもちろん最近の労働力逼迫状況を考え、自動化の機能を有する、少品種

表1 溶接欠陥種類判別エキスパートシステムの検証結果の一例

検査員の判定結果				エキスパートシステムの推論結果	合致度
検査員A	検査員B	検査員C	検査員D		
BH(1.0)	BH(1.0)	BH(0.90), PI(0.10)	BH(1.0)	BH(0.82), UN1(0.58)	4/4
BH(1.0)	BH(1.0)	BH(0.90), PI(0.10)	BH(1.0)	BH(0.88), UN1(0.58), SIS(0.14)	4/4
BH(1.0)	BH(1.0)	BH(1.0)	BH(1.0)	BH(0.87), UN1(0.43)	4/4
BH(1.0)	BH(1.0)	BH(1.0)	BH(1.0)	BH(0.88), UN1(0.56)	4/4
IP(1.0)	IP(1.0)	IP(1.0)	IP(1.0)	IP(0.75), CR(0.70)	4/4
IP(1.0)	IP(1.0)	IP(1.0)	IP(1.0)	IP(0.59), UN2(0.59)	4/4
IP(1.0)	IP(1.0)	IP(1.0)	IP(1.0)	IP(0.72), CR(0.69)	4/4
IP(1.0)	IP(1.0)	IP(1.0)	IP(1.0)	IP(0.59), CR(0.49)	4/4
CR(1.0)	CR(1.0)	CR(1.0)	CR(1.0)	CR(0.56), IP(0.43)	4/4
CR(1.0)	CR(1.0)	CR(1.0)	CR(1.0)	CR(0.65)	4/4
CR(1.0)	CR(1.0)	CR(1.0)	CR(1.0)	CR(0.67), UN2(0.59)	4/4
LF(1.0)	LF(0.95), SIL(0.05)	LF(1.0)	LF(0.95), SIL(0.05)	LF(0.64), UN2(0.56)	4/4
SIS(1.0)	SIS(1.0)	SIS(1.0)	SIS(1.0)	SIS(0.58), UN1(0.52), BH(0.52)	4/4
SIL(1.0)	LF(0.95), SIL(0.05)	LF(1.0)	LF(0.95), SIL(0.05)	LF(0.88), CR(0.67), IP(0.59)	3/4

UN1: 第1種疑似指示 BH: ブローホール SIS: スラグ巻き込み(丸) UN2: 第2種疑似指示
SIL: スラグ巻き込み(細長) PI: パイプ IP: 溶込み不足 LF: 融合不良 CR: 割れ
※検査員の判定結果の()内の数字は判定に対する確信度を1.0を満点としてつけさせたもので、エキスパートシステムの確信度とは意味が異なる。

大量生産のインライン検査の場合にも対応が可能

2) 基本的には自動であるが、本システムによって確信度が低いと判定された欠陥を含むフィルムは検査員の判定に任せる。

3) より厳しい検出感度を設定し、なおかつ合格と判定されるものは除いて、欠陥候補像が抽出されたフィルムは検査員が判定する。スクリーニングの使用法であるが、検査員の労力の軽減に大きな効果がある。

4) 欠陥候補像の抽出・強調を行った画像と原画像を並べて表示する。検査員に原画像のどの位置を注意して観察すればよいかを示す。検査結果の信頼性向上、検査員の労力軽減に対し、大きな効果が期待できる。

7. 今後の課題と将来展望

本システムは鋼材のアーク溶接継手を対象として開発を終了した。しかし、実用化の為にはより多くのフィルムを用いた実証試験が必要である。また、アルミニウム合金、ステンレス鋼等の各種材料の溶接継手に対する処理法を開発する必要がある。特に、ステンレス鋼の溶接金属では凝固組織に起因する疑似指示の処理が問題であり、パターン認識やニューラルネットワーク手法の導入の必要が生ずる可能性がある。さらに、構造物の溶接継手に限らず、量産品へと適用を拡大するためには、リアルタイム画像への画像処理手法の拡張、オンライン検査を可能とするための高速化が必要となろう。しかし、ハード、ソフト両面におけるコンピューター技術は驚くべき

速度で進歩しており、近い将来に上記問題の解決が図れるものと考えられる。

参考文献

- 1) Shirai, Y. "Automatic Inspection of X-Ray Photograph of Welding", Pattern Recognition, 1, pp. 257-261 (August, 1967)
- 2) 藤田, 日置, 松井, 「溶接部写真の画像処理」, 日立造船技報, 39, 4, pp. 1-6 (1978. 12)
- 3) 青木, 卯西, 「放射線透過写真の画像処理(I)」, 非破壊検査, 昭和59年度春季大会講演概要, 1-6, pp. 108-109, (1984. 2)
- 4) Daum, W., Rose, P., Heit, H. and Builtjes, J. H. "Automatic Recognition of Weld Defects in X-Ray Inspection", British Welding Journal of NDT, Vol. 29, No. 2, pp. 79-82 (March, 1987. 3)
- 5) 興水, 吉田, 「溶接部 X 線写真における成分図形識別とその X 線透過試験の自動化について」, 電子通信学会研究会資料 PRL 80-106 (1981. 3)
- 6) Kahoe, A. and Parker, G. A., "Image Processing for Industrial Radiographic Inspection: Image Enhancement", British Journal of NDT, Vol. 32, No. 4 (April, 1990)
- 7) Inoue, K. and Kobayashi, M., "Automatic Recognition of Weld Defects in Radiographic Test (Report 1)", Trans. JWRI, 11, 2, pp. 123-132 (February, 1982)
- 8) 興水, 村上, 長谷川, 「画像処理による溶接欠陥自動識別分類について」, 日本非破壊検査協会, 第2回産業における画像センシングシンポジウム, pp. 137-142 (1987. 7)
- 9) Demandt, K. and Hansen, L. K., "Real-Time X-Ray System with Fully Automatic Defect Detection and Quality Classification", Proceeding of Symposium on "X-Ray Real-Time Radiography and Image Processing", Newbury, England, November 1988, The British Institute of NDT (Chartwell Press Ltd., 1989)