欠陥モデルによる内部溶接欠陥の自動認識*

石 井 明^{*1}, Vakhtang LACHKHIA^{*2}
越 智 保 雄^{*1}, 阿久津 正 幸^{*3}

Recognition of Internal Weld Defects by Defect Model

Akira ISHII, Vakhtang LACHKHIA,
Yasuo OCHI and Masayuki AKUTSU

In order to improve the automation of defect inspection by careful examination by the naked eye, we consider that defects should be understood as special featured regions, and we present a new approach for detecting such defects. The approach uses "a defect model" for recognizing defects. The defect model is carefully constructed based on visual features of defects, including their sizes, shapes, and intensity or shade, and also the inspector's knowledge and experience. This approach is applied to detect internal weld defects which appear in X-ray radiographic films. On the basis of visual features and size distribution of observed defects in 107 films and the global feature of the weld zone, an efficient defect model is constructed geometrically and arithmetically. The results show success in detecting very small and fuzzy defects.

Key Words: Nondestructive Inspection, Image Processing, Recognition, Weld Defect, Defect Model, X-Ray Film, Radiated Frame

1. は じ め に

製品や素材の品質検査において、検査員の凝視による欠陥検査が必要とされる対象を考える。欠陥は多くの場合、その周囲の特徴と異なった領域として観察されるが、その際、検査員は経験的知識によってその領域が欠陥であるかどうかを判断し、欠陥検査を行っている。そして、欠陥の特徴がある程度わかっている場合には、照明むらが著しくても、また、その欠陥のコントラストが著しく低くてもその領域が欠陥であるかどうかを判断することができる。しかしながら、そのような対象では、欠陥の特徴、例えば、その大きさや形状あるいは色合いなどはさまざまであり、あらかじめ数値としてその特徴を明確に規定できないことが多い。そこで、そのような対象に対して画像処理によって検査の自動化を図る場合には、産業応用の分野で通常、用いられている二次元の空間フィルタのようなサイズの固定した局所的な画像処理手法の組合せでは、そのような欠陥を検出することは容易ではない。また、

それらの局所的な処理によってかえって欠陥ではない領域を欠陥候補として過剰に検出したり、あるいは低コントラストの欠陥を検出できなくなる恐れがある⁽¹⁾⁽²⁾。最近、このような凝視による検査が必要な対象に対しては、画像処理+エキスパートシステムによって問題解決を図る試みがいくつか見られるようになってきた^{(3)~(5)}。しかしながら、検査システムの完全自動化を図るためには、システムへの人間の関与を極力、排除することが望まれる。また、エキスパートシステムを巨大なものとしないうえにも第一次的な処理である欠陥候補領域の検出は特に、慎重に行うことが必要であると思われる。

そこで、本研究では、検査員の凝視による欠陥検査の自動化を進展させるために、欠陥自体も特徴のある特別な領域として認識することが必要であると考え、欠陥モデルによる欠陥の認識という新しい欠陥検出の考え方を提案する。

なお、欠陥モデルの対象とした欠陥は鋼溶接部の内部欠陥であり、検出にはX線透過写真フィルムを利用する。本対象はフィルムの画質が低いことならびに欠陥のパターンが多様であることから難易度の高い画像処理対象として従来より多くの研究が行われている^{(2)~(6)}。また、その難易度のレベルは、検査員がその

* 平成5年11月19日 日本機械学会第1回機械材料・材料加工部門講演会において講演、原稿受付 平成6年3月9日。

^{*1} 正員、電気通信大学 (〒182 調布市調布ヶ丘1-5-1)。

^{*2} 一橋大学経済学部 (〒186 国立市中2-1)。

^{*3} 電気通信大学大学院。

対象から欠陥を検出するとき、その画像に対して十分な凝視を行うことによって、ようやく欠陥を発見することができる程度のものである。

2. 溶 接 欠 陥

2.1 画像の入力 対象とする溶接欠陥は大径鋼管の突合わせ溶接部内部に生じた欠陥であり、検査員によって溶接欠陥が発見された107枚のX線透過写真フィルムについて検討を行った。鋼溶接部の放射線透過試験による非破壊検査手法については、JISのZ 3104に規定されており、この規定に従って作製されたX線透過写真フィルムの模式図を図1に示す。図中、2本の溶接境界線に挟まれた部分が溶接部である。画像の入力はX線透過写真フィルムを透過照明ボックスの上に置いて、図中に示すように溶接境界線をまたぐ4角の枠領域をCCDカメラによって入力する。画素数は溶接線直角方向に512画素、溶接線方向に480画素、濃度階調は256である。このとき1画素の大きさは63.5 μm 角(400 DPI)である。

2.2 溶接欠陥の特徴 検出された溶接欠陥は、表1に示すようにブローホール(BH)、スラグ巻き込み(SI)、溶込み不足(IP)、融合不良(LF)、縦割れ(LCR)および横割れ(TCR)の全部で6種類であり、その一例を図2に示す。図において上下方向が溶接線方向であり、中央の幅広の帯状の領域が溶接部である。図2(a)では丸っぽく、一様に明るさの低い領域がブローホールと呼ばれる溶接欠陥である。図中の円弧状の曲線は検査員が検出した欠陥を示すために鉛筆でフィルム上に描いたものである。また、図2(b)は、溶接境界線

近傍に現れた縦長の形状をした融合不良の例を示している。融合不良は溶接線方向に沿って2個観察されるが、水平方向のグローバルな濃度傾斜部に現れているため欠陥部の左右の境界が不明りょうとなっている。このような溶接欠陥はさまざまな要因によって生じるが、放射線透過試験によって検出される内部溶接欠陥は溶接部内部に生じた空げきあるいは異物(スラグ)の巻き込みによって生じるものであり、鋼材の溶接では、必ずその周囲より明るさの低い領域(その領域でのX線の透過量が多くなるため、結果としてフィルムはより感光し、濃度が増加する)として観察される。このことが、検出すべき溶接欠陥の最も大きな特徴である。

図3はすべての入力画像について、市販の画像処理装置を利用して一つ一つの欠陥の領域を手動で求め、溶接線方向長さ L_v とその直角方向長さ L_H について整理した結果である。これより、比較的丸っぽく、サイズのさまざまな欠陥(主に、ブローホール、スラグ巻き込み)のほかに、溶接線方向に縦長な欠陥(融合不良と溶込み不足)と線状の欠陥(横割れ、縦割れ)が存在することがわかる。特に、溶込み不足の中には、溶接線方向に非常に細長く(L_v/L_H が10~100)、1枚の画像の大

表 1 検出対象の溶接部内部欠陥

defects	blow hole	slag inclusion	incomplete penetration	lack of fusion	transverse crack	longitudinal crack
symbol	BH	SI	IP(I,II)	LF	TCR	LCR
number of films	37	40	13	11	3	3

図 1 X線フィルムの外観と画像の入力サイズ

(a) ブローホール

(b) 融合不良

図 2 溶接欠陥(原画像)

きを越えるものも含まれることがわかる(便宜上、細長いもの IP(I), 比較的丸っぽいものを IP(II)として区別する)。

3. 欠陥モデルの構築

3・1 欠陥の特徴表現 欠陥の特徴表現に、著者が提案した放射状フレーム⁽²⁾を導入する。放射状フレームは図4(a)に示すように単純な同心曲線群 $k_i(i=1, 2, \dots, c)$ と中心より放射状に伸びる放射状直線群 $r_j(j=1, 2, \dots, s)$ で構成される。同心曲線群は検出しようとする対象物の大きさと形状をおおざっぱに表現し、放射状直線群とによって区分される領域を単位として対象物の境界を判断し、対象物を認識しようとするものである。検査員が特定の欠陥に対して抱く視覚的イメージならびに欠陥に対する経験的な知識をこの放射状フレームを利用して幾何学的かつ算術的に表現することによって欠陥モデルを構築することにする。

(1) 大きさと形状の表現 溶接欠陥の形状はさまざまであるがおおざっぱに見れば、丸っぽいものと細長いものの2種類である。しかしながら、細長いものは強い方向性があり、その長軸方向が溶接線方向に平行かあるいは直角かのいずれかである。このような形状の特徴は溶接欠陥の発生原因から予想されることである。

また、図3の結果より検出すべき欠陥の大きさは、垂直方向(溶接線方向)の長さ L_V が数画素から480画素、その水平方向の長さ L_H が同じく数画素から100画素程度と、非常にその範囲が広いことがわかる。そこで、それらの欠陥を効率よく検出できるように図4(b), (c)の放射状フレームによって欠陥の大きさと

形状を幾何学的に表現する。なお、図4(b)では丸っぽい欠陥を図4(c)では縦長の欠陥を捉えている様子を示している。

ここで、欠陥の大きさは放射状フレームの大きさ(間隔) a_i と b_j によって表現されるが、それらの最小値と最大値は図3の結果に基づいて検出すべき最小の欠陥サイズ(検査員が欠陥であると確認できる最小のサイズ)と予測できる最大の欠陥サイズに合わせる。

(2) 明るさ・色合いの表現 溶接欠陥の色合い(濃淡)は、非常に明りょうなもの(特に、ブローホール)から非常に不明りょうなもの(特に、縦割れ)まであったが、共通した特徴は欠陥部の明るさがその周囲より一様に低いことである。そこで、欠陥部とその周囲の明るさ・色合いの違いを基本的には図4(b)に示すように網掛けの線分領域における平均濃度値で算術的に表現する。例えば、欠陥部中央の明るさを縦方向の線分領域“0”の平均濃度値 $P_{V,0}$ で表現し、欠陥部の周囲の明るさを同様に $P_{V,i}$ と $P_{V,i'}$ で表現する。このとき、欠陥の色合い(濃淡)は次式で表現される。

$$C_V = P_{V,i} - P_{V,0}; C_{V'} = P_{V,i'} - P_{V,0} \dots\dots\dots (1)$$

すなわち、欠陥部と周囲との平均濃度値の $C_V, C_{V'}$ が色合いの程度を表現しており、これらの値が大きい欠

(a) 放射状フレームの基本構造

図3 欠陥サイズの分布と計画された探索領域

(b) 溶接欠陥の欠陥モデル (c) 縦長の欠陥を検出している様子

図4 放射状フレームと欠陥モデルによる溶接欠陥の検出

陥ほど明りようである。

同時に、このように明るさの表現に線分領域の平均濃度差を用いることによってX線写真フィルム特有の強い粒状性雑音の影響を最小限に抑えている。

3・2 欠陥部の境界検出

(1) 左右の境界検出

最初に、図4(b)に示す放射状フレームの縦長の濃い目の網掛けの線分領域を用いて欠陥部の左右(溶接線直角方向)の境界の検出条件を考える。右側の線分領域*i*(大きさは幅1画素×長さ*b_i*画素)の平均濃度値を*P_{V,i}*とし、対応する左側の線分領域*i'*との間隔を*a_i*とする。ただし、*b_i*と*a_i*の値は効率的な境界の検出が行えるように図3の欠陥の大きさの分布に基づいて決定しており、それらの値を図中に示す。

このとき、欠陥部の左右の境界の存在は次の条件式によって判断される。

$$m_1 = \text{minimum} \{i; i=1, 2, \dots, 7\};$$

$$[\{P_{V,i} - P_{V,0} > P_{th1}\} \text{ and } \{P_{V,i'} - P_{V,0} > P_{th1}\}] \dots\dots\dots (2)$$

ここで、*P_{th1}*はしきい値である。なお、式(2)は二つの条件式のいずれもが初めてかつ同時に満足するときに、二つの線分領域 *m₁*, *m_{1'}* が欠陥部の外側境界となることを意味している。しかしながら、欠陥部内での濃度の変化がしきい値 *P_{th1}* の値よりも大きい場合には、式(2)を満足する線分領域 *m₁*, *m_{1'}* 自体が欠陥部の内側に存在する可能性がある。そこで、それらの線分領域とそれらの外側の線分領域 (*i* > *m₁*) において、次式の境界判断を行う。

$$m_2 = \text{minimum} \{i; i = m_1 + 1, \dots, 7\};$$

$$[\{P_{V,i} - P_{V,m_1} > P_{th2}\} \text{ and } \{P_{V,i'} - P_{V,m_1} > P_{th2}\}] \dots\dots\dots (3)$$

図5 グローバルな濃度こう配部での左右の境界検出

ただし、式(2)によって既に欠陥の存在がわかっていることから、*P_{th2}*の値は*P_{th1}*よりは多少小さな値に設定している。上式を満足する *m₂* が存在する場合には、*m₁* を *m₂* と置き換えて式(3)を繰返し、*m₂* の最大値が最終的に欠陥の外側の線分領域を表すことになる。

なお、しきい値 *P_{th1}*, *P_{th2}* の値はいずれも二つの領域の色合いを区別する際のしきい値であるが、この値は単なるしきい値ではなく、検査員が画像中の欠陥を見て明るさの異なる領域であると判断できる限界の色合いを意味している。さらに、それらの値は線分領域の平均濃度値を基準としていることから検査員の欠陥判断に合わせることが極めて容易である。

(2) 上下の境界検出

次に、欠陥部の上下(溶接線方向)の境界の検出を行う。基本的には左右の境界検出と同じであり、式(2)、(3)に対応して次式によって境界を検出する。

$$n_1 = \text{minimum} \{j; j=1, 2, \dots, 14\};$$

$$[\{P_{H,j} - P_{H,0} > P_{th1}\} \text{ and } \{P_{H,j'} - P_{H,0} > P_{th1}\}] \dots\dots\dots (4)$$

$$n_2 = \text{minimum} \{j; j = n_1 + 1, \dots, 14\};$$

$$[\{P_{H,j} - P_{H,n_1} > P_{th2}\} \text{ and } \{P_{H,j'} - P_{H,n_1} > P_{th2}\}] \dots\dots\dots (5)$$

ただし、線分領域の長さは既に式(2)、(3)で欠陥の左右境界がわかっていることから、欠陥部の左右の内側境界の位置 *m₁-1* (あるいは *m₂-1*) での間隔 *a_{m1-1}* を用いている。さらに、図3の欠陥サイズの分布より欠陥の垂直(溶接線方向)長さ *L_V* が30 mmを越えるような縦長の欠陥はその水平長さ *L_H* が1 mm以上の領域には存在せず、また、*L_H* が4 mmを越えるような横長の欠陥は存在しないことがわかるので、探索は図3中の水平の破線で区分される範囲について行っている。

3・3 グローバルな濃度こう配の表現 欠陥の大きさがある程度以上大きい場合には、式(2)、(3)による欠陥部の左右の境界検出は、図5に示すように、溶接部の盛り上がりによるグローバルな濃度こう配の影響を無視することができなくなる。すなわち、図5において探索の中心とその両隣の位置をそれぞれ0, 1, 1' とすると、図中の網掛けで示されるような欠陥が存在する場合には、*P_{V,1'} - P_{V,0} < 0* となり、欠陥の中心より左側部分での明るさが低くなり式(2)、(3)の適用ができなくなる。

そこで、そのようなグローバルな濃度こう配部においては、式(2)、(3)の代わりに次式によって境界の判断を行う。

$$\begin{aligned}
m_1 &= \text{minimum} \{i; i=1, 2, \dots, 7\}; P_{th1} < \Delta P_{V,i} \\
\text{where, } \Delta P_{V,i} &= (P_{V,i} + P_{V,i'})/2 - P_{V,0} \dots (6) \\
m_2 &= \text{minimum} \{i; i=m_1, \dots, 7\}; \\
&[(P_{th2} < \Delta P_{V,i+1}) \text{ and } (P_{th2} < \Delta P_{V,(i+1)'})]
\end{aligned}$$

where,

$$\begin{aligned}
\Delta P_{V,i+1} &= (P_{V,i+1} - P_{V,(i+1)'}) \times C_1 + P_{V,(i+1)'} - P_{V,i} \\
\Delta P_{V,(i+1)'} &= (P_{V,i+1} - P_{V,(i+1)'}) \times C_2 + P_{V,(i+1)'} \\
&\quad - P_{V,i'} \\
C_1 &= \frac{a_{i+1} + a_i}{2a_{i+1}}; C_2 = \frac{a_{i+1} - a_i}{2a_{i+1}} \dots (7)
\end{aligned}$$

3・4 欠陥の検出 構築された欠陥モデルを用いて画像中の欠陥を検出する場合には、放射状フレームを画像の左上から右下まで適当な画素間隔で全画像中を移動あるいは走査することが必要である。すなわち、欠陥の検出アルゴリズムとしては、画像中のある画素を中心として式(2)～(7)によって左右境界および上下境界の判断を最内側の領域から順次行い、最外側の領域まで行う。その過程で欠陥を検出することができた場合、あるいは最後まで検出できなかった場合には、適当な距離(画素)だけ放射状フレームの中心を移動する。その際、移動先が既に欠陥を検出した領域の場合

には適当な距離だけその中心を移動する。そして、再び最内側の領域から境界判断を行う。この作業を画像全体に対して行うことによって欠陥モデルに表現された領域のみを欠陥として検出することができる。

4. 検 出 結 果

溶接欠陥の検出結果の一例を図6に示す。検出結果は図2の原画像に対応するもので、欠陥部を検出時の左右と上下の線分領域で結ぶ矩形の白枠(濃度値255)で囲み、その中心部に“+”マークを付けている。検出結果はいずれの欠陥に対しても欠陥をその境界とともに正確に検出していることを示している。特に図6(b)の融合不良ではグローバルな濃度こう配の影響を受けずに欠陥の左右の境界をほぼ正確に検出しており、式(6)、(7)による左右境界の判断が有効に機能していることがわかる。また、いずれも欠陥のみを検出しており、通常の局所フィルタでは検出されてしまうような鉛筆マークやX線の散乱ノイズによる点状領域は検出されていない。このことは、当然のことながら欠陥モデルにそれらの特徴を表現しなかった領域は検出されないことを意味している。

図7は縦割れの検出結果である。図7(a)が原画像であり、図7(b)は検出された欠陥の輪郭形状を表示するために、検出された領域内に対しての次の処理を行って、欠陥の領域を白(濃度階調255)で表示している。

$$s(i, j) = \begin{cases} 255 & \text{if } g(i, j) < g_{min} + L \\ g(i, j) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$g_{min} = \text{minimum} \{g(i, j)\} \dots (8)$$

ただし、 $g(i, j)$ は検出された領域内の画素の濃度値、 $s(i, j)$ は処理後の濃度値、 L はしきい値である。図7(b)の欠陥部の表示では、視覚で認識することができる以上に、微細な割れが画像化されている。それらの一部は過検出ではないかと思われる箇所も認められる

(a) ブローホール

(b) 融合不良

図6 検出結果(検出領域を白枠で表示)

(b) 検出結果

図7 溶接欠陥：縦割れ(欠陥部を白で表示)

が、注目すべき点は欠陥部近傍以外からの誤った検出は見られないことである。なお、欠陥形状を表示するために式(8)によるしきい値処理を行っているが、しきい値 L の値は視覚で認識できる欠陥の境界とほぼ一致するように式(2)の P_{th1} より少し大きめの値としている。このように、縦割れは多くの場合ほぼ溶接部中央に現れ、溶接線方向に途切れ途切れに周囲より濃度のわずかに低い領域として観察される。しかしながら、割れは致命的な欠陥であるため検査員の凝視による検出と同等な高い欠陥検出能力が要求される。従来から行われてきたような局所フィルタによるエッジ検出処理や背景画像との差分処理では特にこのような低コントラストの欠陥の検出がほとんど困難であるが²⁾、本処理では、縦割れが縦長の領域であるという特徴を有効に利用しているため、極めて低コントラストでも検出が可能となっている。

しかしながら、本欠陥モデルでは欠陥の形状を非常におおざっぱに表しており、また、欠陥部の境界判断も左右上下のみでおおざっぱである。したがって、欠陥部の境界を正確に検出する必要がある場合には左右上下の線分領域の間隔を小さくしたり、境界の区分領域を増やすことが必要である。その意味では提示した検出処理は欠陥候補領域の検出のための第一段階的処理であると位置づけることができるが、欠陥モデルに表現されなかった領域は検出しないことから本処理は極めて信頼性の高い処理であるといえる。

なお、他の残りフィルムについても同様な検出処理を行った結果、欠陥のほかに鉛筆マークを欠陥として誤って検出してしまったケースもいくつかあったが、本処理によってほぼすべての溶接欠陥を良好に検出す

ることができた。

5. 結 論

検査員の凝視による欠陥検査の自動化を進展させるために、欠陥自体も特徴のある特別な領域として認識することが必要であると考え、欠陥モデルによる欠陥の認識という新しい欠陥検出の考え方を提案した。欠陥モデルの構築の対象としては溶接欠陥が検査員によって認められた 107 枚の X 線透過写真フィルムを用いて、溶接欠陥の特徴であるその大きさ、形状、明るさ・色合いと溶接部のグローバルな濃度こう配の特徴を幾何学的かつ算術的に表現する方法、ならびに溶接欠陥の大きさの分布を考慮した効率的な欠陥の境界判断の方法を示した。提案した方法を実際に 107 枚の X 線透過写真フィルムに適用した結果、すべてのフィルムの溶接欠陥を良好に検出することがわかった。

文 献

- (1) 興水, ネオマシンビジョンアプリケーション, 第7回産業における画像センシング技術シンポジウム, (1992), 211, 日本非破壊検査協会.
- (2) 石井・ラシキア・越智, 微小欠陥検出のための画像処理アルゴリズム, 非破壊検査, 42-4(1993), 199.
- (3) 村上・興水・長谷川, 画像処理手順のエキスパート知識をガイド情報にもつ会話型溶接欠陥識別システム, 情報処理学会論文誌, 29-2(1988), 114.
- (4) 村上・興水, 溶接検査の画像処理とエキスパートシステムの統合, 電気学会論文誌, 112-2, C(1992), 73.
- (5) 加藤・奥村・糸賀・原田・杉本・道場・川野, 放射線透過写真の自動合否判定システムの開発(第2報), 溶接欠陥の種類識別機能の開発, 非破壊検査, 41-4(1992), 196.
- (6) Shirai, Y., Automatic Inspection of X-Ray Photograph of Welding, *Pattern Recognition*, 1(1967), 257.