距離画像と X 線画像の融合による内部欠陥像の検出 (第 1 報)*

—階調計を利用した距離画像と X 線画像のマッチング法—

青 木 公 也** 菅 泰 雄*** 末 守 良 一†

Detection of Internal Defect by Fusion of Range Image and X-ray Image
-Matching Method between Range Image and X-ray Film Image Using Contrast Indicator Image-

Kimiya AOKI, Yasuo SUGA, Ryouji SUEMORI

In this study, construction of an automatic inspection system of X-ray film is tried. Films used in this study are acquired by X-ray inspection of welded joints. Because the X-ray radiographic testing method is useful in inspecting the inside of weld metal, it is often used in industries. However, skilled inspectors for X-ray radiographic testing are gradually decreasing, recently several methods to detect weld defects from films automatically have been investigated. But, a X-ray film involves a number of noise, and defect images show very low contrast and various shape in spite of the same kinds of defect. Moreover, when unevenness on the surface of bead is large, detection of an internal defect image is difficult with the previous technique which depends on only a two-dimensional film image. Therefore, in this study, the new image processing system was constructed. Shadows by the surface unevenness in the X-ray film is removed using the range image of the bead surface on this system. That is to say, first of all, the range image is matched to X-ray image about resolution, intensity and location. Then, the transferred image is defined as the background image and subtracted from the X-ray image. In this process, matching method between range image and X-ray image is important. In this study, the matching method using contrast indicator was constructed.

Key words: image processing, weld defect, nondestructive inspection, X-ray film, range image, matching, contrast indicator

1. 緒 言

X 線透過試験法は、溶接部の非破壊検査法として広く実用されており、近年の自動化・省力化の流れからフィルム検査の自動化の要望が高まっている。また、溶接部 X 線検査フィルム画像は、その画質の悪さ、抽出対象である欠陥像の不明りょうさ等から難度の高い画像処理対象とされている。そこで従来より、欠陥像の位置と形状を抽出する様々な画像処理手法が提案されてきた^{1)~10)}。著者らも、背景差分法、領域拡張法、遺伝アルゴリズムを応用した欠陥像形状検出等の画像処理アルゴリズムを提案している⁹⁾¹⁰⁾。これらの手法を用いれば、不明りょうな欠陥像を目視の印象に近い状態で抽出することが可能である。しかし、従来のいずれの手法においても欠陥像を局所的な低輝度領域としてとらえ、そのような領域をフィルム中から抽出するのが基本的な考え方であった。そのため、リップル等溶接ビード表面の凹凸に起因する陰影と内部欠陥像が重なって記録されている場合、欠陥像のみを分離して抽出することが困難であると考えられる。

図 1 にコンピュータに入力された溶接部 X 線フィルム画像とその輝度分布の一例を示す。溶接方向に直交方向の輝度分布が大きく山なりであるのは溶接余盛のためである。また、表面の凹凸により輝度分布がより複雑となる。欠陥像はこれらの表面の凹凸に起因する大きな背景輝度分布中の小さな輝度の落ち込みとして記録される。従来のほとんどの研究ではビード表面凹凸が比較的少ない溶接法による溶接部の検査フ

ィルムを対象としていた。しかし、溶接法によってはこの表面の凹凸が著しく、形状が複雑な溶接ビードも形成される。また、余盛による背景輝度分布の除去には、従来の研究における欠陥像抽出手法においてもその労力の多くが費やされている。そこで、本研究では近年 X 線フィルム検査と同様、自動化の手法が研究されている溶接ビードの外観検査^{11)~13)}のフィルム検査への導入を試みた。すなわち、外観検査によって得られるビード表面の距離画像を用いて、X 線フィルムに

Fig.1 Bead image

* 原稿受付 平成11年7月28日

** 学生会員 慶應義塾大学大学院 (横浜市港北区日吉3-14-1)

*** 正 会 員 慶應義塾大学理工学部

† 慶應義塾大学理工学部

記録されたビード表面の凹凸像を求め、それを実際のフィルム画像から差し引くことで内部欠陥による陰影のみを抽出する新たな検査システムを提案する。

本論文では特に、X線画像と距離画像の差分処理を実現するための解像度、濃度、位置のマッチング手法について検討を行った。さらに、構築したシステムをモデル試験片に適用しその妥当性を検討した。

2. 実験装置

検査フィルムは、透過原稿ユニットを搭載したイメージスキャナによって、0.25mm/pixel、グレー256階調でデジタル化され、パーソナルコンピュータに送られ処理される。

ビード表面の凹凸情報である距離画像は図2に示す光切断法装置によって取得する。装置は主にスリット光投射器、CCDカメラ、イメージディジタル化ボード、パソコン、X-Yステージ等で構成されている。光切断法は、対象物にスリット状に光を照射し物体上のライン光を撮像して、三角測量法により距離データを得る手法である。本装置では、輝線をX軸に平行に照射してY軸を順次移動させ、輝線情報を取得していくことにより溶接ビード表面の距離画像を得る。画面上の輝線情報の取得には2値化・細線化・欠落点の補間等の画像処理手法を用いる。なお、分解能についてはX軸方向は取得画像の標本化により、Y軸方向についてはステージの移動ピッチに依存する。本研究においては移動ピッチを0.5mmとし測定を行った。

図3にそれぞれの装置で得られるX線検査フィルム画像とビード外観の距離画像の一例を示す。距離画像については各座標点を画素として、各画素における高さ情報をグレー256階調で輝度として表現する。以後の処理で距離データについてはこの距離画像を用いる。

3. X線画像と距離画像の差分による内部欠陥像の抽出

3.1 処理の概要と要点

本研究では、検査対象とする溶接ビードの表面形状を計測

Fig.2 System of light section method

Fig.3 X-ray film image and range image of a weld bead

Fig.4 Appearance and dimension of contrast indicator

して得られる三次元データから、それがフィルム上で記録されるであろう輝度分布画像を推定し、これをX線検査フィルム画像から差し引くことにより内部欠陥像のみを抽出する。ここで、撮像・入力条件の異なる二つの画像は、それぞれ異なる分解能・輝度値・撮像位置を有する。従って、それらを正確にマッチングする必要がある。

分解能の調整は従来のデジタル画像処理における手法を採用した。輝度値・位置のマッチングには図4に示す形状を持つ3段階の階調計を利用した。階調計の段差によるX線画像上での透過度起因する輝度変化と、距離画像での高さ情報起因する輝度変化をマッチングさせ、画像全体に対し濃度変換を施すことで差分を可能にする。また、X線画像と距離画像の階調計の位置を完全に一致させることにより、位置のマッチングも正確に行う。各パラメータのマッチングの終了後、両画像の差分処理を行う。図5に以上に述べた画像処理の流れを示す。

Fig.5 Flowchart to obtain a subtracted image between X-ray film image and range image of specimen

Fig.6 Flowchart detecting contrast indicator

3.2 解像度変換

取得される距離画像と X 線画像との間で差分処理を施すためには、それらの解像度を一致させる必要がある。本来は、両画像を同一の空間分解能を持つ画像として取得できることが望ましいが、ハードウェアの制約からそれが困難な場合は入力画像に対し解像度変換を行う。本システムでは距離画像の縦横方向の分解能が異なるため、この点からも解像度変換を必要とした。そこでまず、画像の拡大・縮小処理によって、距離画像の解像度を X 線画像のそれに一致させる。なお、拡大処理には零次ホールド法を、縮小処理には平均操作法を用いた。

3.3 階調計の自動検出

X 線画像と距離画像のマッチングを行うため両画像からそれぞれ階調計を検出する。その検出アルゴリズムはいずれの画像に対しても同様であり、その処理の流れを図 6 に示す。まず、高周波ノイズを除去するためにメディアンフィルタ処理を行う(1)。次に、階調計の境界線を検出するためエッジ強調を行う(2)。さらに、2 値化によって階調計領域を抽出する(3)。

Fig.7 Contrast indicator filter

Fig.8 Hough transform to detect a contrast indicator

一般に、階調計領域はその周囲の母材領域に比べて高輝度であり、従って 2 値化による抽出が容易である。なお、しきい値の決定法は P タイル法を用いた。ただし、この段階では階調計と同様に高輝度領域である溶接ビード部、フィルムマークも抽出される。

得られた 2 値画像について孤立点除去・エッジ平滑化処理を行い抽出像を整形した後(4)、エッジの画素のみを縦横の画像走査によって抽出する(5)。さらに、処理の高速化と誤認識の防止のため階調計のエッジ画素の候補点を階調計枠フィルタによって絞り込む(6)。図 7 にフィルタの模式図を示す。まず入力画像における階調計のサイズと同様の大きさを持つ長方形を設定する。次にその輪郭から内外に r 画素の領域を探索領域とする中空形のフィルタを設定する。この階調計型フィルタをフィルタのサイズ分の移動量で走査し、フィルタ内に理想的な階調計周囲長画素数の $L\%$ の画素点が存在しない場合はフィルタ内の画素点を除去する。なお、本研究では r を 3 画素、 L を 90% に設定した。この処理ですべての画素が除去された場合は処理(3)に戻り、2 値化のしきい値を下げて再度同様の処理を行う。

最後に抽出された階調計エッジ候補画素に対してハフ変換を適用し、階調計を検出する。階調計の形状は長方形でしかも縦横の比が 3 : 1 であることから、ハフ平面上においても階調計を構成する 4 本の直線を表す投票点は特定の位置関係を持つ。図 8 にその様子を模式的に示す。階調計を構成する直線群のみを考えた場合、最も投票数の多い直線は階調計の長い方の一辺である。それに平行なもう一辺は、階調計の短辺の長さだけ ρ 方向に離れた位置に存在する。さらに、短辺はハフ平面上で長辺から θ 方向に 90° 離れた位置に存在し、2 本の短辺は互いに ρ 方向に長辺の長さだけ離れた位置に存

Fig.9 Detection of contrast indicator

在するはずである。なお、投票点の探索においては、長辺・短辺の長さは既知であるので投票数の上限にもしきい値を設定する。また、長辺の一方を基準に探索を進める際に、次の点の探索は理想的な位置を中心に $\pm\alpha$ 画素、 $\pm\beta^\circ$ の探索範囲を設定する。なお、本研究では α を3画素、 β を 1° に設定した。以上の特徴を満たす全体として投票数の最も多い4点一組を階調計構成直線としてハフ平面から選択する。このように、ハフ平面から互いに拘束する4点を選択することで、階調計を安定して検出することが可能である。図9に階調計検出結果の一例を示す。

3.4 画像のマッチングと差分処理

検出した階調計を利用して画素の濃度のマッチングを行う。具体的には距離画像における相対的な高さを表す輝度値をX線画像における高さに対応する輝度値に変換する。その原理を図10に模式的に示す。まず、X線画像および距離画像において、母材を含めて階調計のa, b, c, dの4点の輝度を求める。なお階調計の輝度値としては、各段の中央領域（ $\gamma \times \gamma$ pixel; $\gamma=10$ ）の平均値を代表輝度値として用いた。階調計の高さは既知であるから、それぞれの画像において、高さと輝度値の関係は図10に示すように求まる。本研究では、高さと輝度との関係を最小二乗法を用いて一次式で求めた。

以上のX線画像および距離画像より求めた二つの関係式より、両画像をマッチングするための関係を求める。すなわち、ある高さ h に対応するX線画像および距離画像のそれぞれの輝度値を k_x , k_r とすると、輝度値と高さの関係は次式で表される。

$$k_x = a_x h + b_x \quad (1)$$

$$k_r = a_r h + b_r \quad (2)$$

ここで、 a_x , a_r , b_x , b_r はそれぞれ定数であり、上記の手順でその値は求められている。従って式(1)および式(2)より、距離画像の輝度値 k_r をX線画像において対応する k_x に変換する式は次のように表される。

$$k_x = \frac{a_x}{a_r} k_r - \frac{a_x b_r - a_r b_x}{a_r} \quad (3)$$

式(3)を用いて距離画像の輝度分布をX線画像のそれに対応

Fig.10 Relations between height of indicator and intensity of brightness in X-ray image and range image

する画像に変換することによって、画像間の差分処理が可能となる。

濃度変換終了後、X線画像・距離画像のそれぞれにおいて検出された階調計の頂点座標を利用し位置のマッチングを行う。最後に差分処理を実行することで、検査対象の表面形状に起因するX線画像中の輝度分布を除去することができる。

4. システムの評価

4.1 モデル試験片

本研究ではいくつかの表面形状と内部空隙を持つモデル試

Fig.11 Model 1

(a) Illustration

(b) Appearance

(c) X-ray film

Fig.12 Model 2

験片を作成し、提案したシステムの妥当性を検討した。ここでは例として 2 種類のモデル試験片とそれらを用いた実験結果を示す。モデル試験片の模式図とその外観および X 線検査フィルムを図 11, 12 に示す。モデル 1 は 3 層の鋼板から構成されている。表面には幅 10mm の溝が加工してあり、裏面には人工欠陥としての直径 8mm の穴が半径分表面の溝と重なるように配列してある。X 線画像では溝と穴に対応する領域の濃度が高いことがわかる。また、穴と溝が重なっている領域は濃度がさらに高い。一方、溝と重なっていない穴の領域の濃度は、溝の濃度と類似しており、X 線フィルム画像からだけでは、この穴の領域のみを抽出することは困難である。

モデル 2 は溶接ビードを 1 層目にし、2 層目の鋼板に直径 3mm の穴を人工欠陥として加工した。

4.2 実験結果

モデル試験片 1, 2 に対して提案したシステムを適用した結果を図 13, 14 に示す。抽出結果をみると、モデル 1 のように表面の凹凸形状が比較的単純で大きなものについてはおおむね良好な結果を得ることができた。しかし、モデル 2 のように表面形状が複雑なものについてはマッチングが適切でない場合があった。画像の濃度と階調計高さの関係を 1 次式で近似したことが原因の一つであると考えられる。特に、X 線フィルムの場合は濃度と被検査物の厚さの関係は、厳密には線形関係ではない。階調計の段数を増やし、より多くのプロットから関係式を導く必要がある。しかし、本手法の概念はいたってシンプルであり、従来手法とは異なり様々な溶接継手に柔軟に対応できると思われ、処理の方向性としては十分実用化が可能なシステムであると考えられる。

5. 結 言

Fig.13 Result of subtraction (Model 1)

Fig.14 Result of subtraction (Model 2)

本研究では、階調計を利用して距離画像を X 線画像に対応するように変換し、それらを差分処理することによって X 線フィルム上の表面形状に起因する像と内部欠陥像とを分離する手法を提案した。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 光切断法により溶接ビード表面の距離画像を比較的簡単に取得することが可能である。
- (2) 階調計を検出する手法としてハフ変換を用いた。階調計構成直線をハフ平面上で互いに拘束する 4 個の投票点として探索することにより、安定して階調計を検出できるアルゴリズムを提案した。
- (3) 階調計を利用して X 線画像と距離画像を対応させる

ために、両画像の輝度値および位置を正確にマッチングする手法を提案した。

- (4) 放射線透過試験と外観検査を組み合わせ、得られた画像データを融合することにより内部欠陥をよりの確に検出できることを示した。
- (5) モデル試験片を用いて提案したシステムの評価実験を行い、その実用化に対する可能性を示した。

なお、今後の課題として以下の点があげられる。

- ① 表面形状測定法の高精度化による距離画像の分解能向上。
- ② 適正な階調計の提案。
- ③ 階調計高さと画像の輝度との関係を示す関係式の精度向上。
- ④ 実際の溶接継手の検査に対する本手法の適用およびその改良。

本手法は、新しい考え方を実現するための萌芽的な研究である。従って、今後さらに基礎的な検討を継続することによって一層の改良を図り、実用に供し得るシステムの開発を行いたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 興水大和, 吉田 亨: 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, 信学技報, PRL80-106 (1981)75.
- 2) 青木昭雄, 卯西裕之: 放射線透過写真の画像処理 (1), 非破壊検査, 33-2(1983)108.
- 3) 藤田 勉, 日置幸男, 松井久夫: 溶接部検査写真の画像処理, 日立造船技報, 39-4(1983)217.
- 4) 菅 泰雄, 児島幸一郎, 富永哲郎: 画像処理による X 線検査フィルム中の溶接欠陥の認識と画像表示, 日本機械学会論文集, 60-576, C(1994)2885.
- 5) 石井 明, ラシキアワクタング, 越智保雄, 阿久津正幸: 欠陥モデルによる内部欠陥の自動認識, 日本機械学会論文集, 60-578, C(1994)2440.
- 6) 川野征士郎: 画像処理及び AI 技術を利用した放射線透過試験の自動判定システム, 非破壊検査, 45-8(1996)578.
- 7) 佐藤晋也, 渋川勝久, 岸浪建史, 石井 明: 溶接部 X 線透過写真フィルムからの溶接欠陥領域の自動検出, 精密工学会誌, 64-4(1998)573.
- 8) V.Lasikia and A.Ishii: Small Low Contrast Defect Detection in X-ray Images Using Fuzzy Reasoning, Proc. Second Japan-US Symp. Advances in NDT, (1999)190.
- 9) 青木公也, 吉田祐樹, 菅 泰雄: 背景差分法および領域拡張法による X 線フィルム中の不明りょう溶接欠陥像の抽出, 日本機械学会論文集, 65-634, C(1999)2561.
- 10) K.Aoki and Y.Suga: Detection of Weld Defect Image in X-ray Film by Genetic Algorithms, Proc. Second Japan-US Symp. Advances in NDT, (1999)195.
- 11) 井上勝敬, 伊 娜: ニューラルネットの溶接ビード外観検査への応用, 溶接学会論文集, 11-2(1993)288.
- 12) 久保克巳, 相川徹郎, 浅井 知, 金子忠昭: 溶接ビード表面外観検査装置, 「外観検査の自動化」ワークショップ, (1996)38.
- 13) 川手隆義・仲野 剛・菅 泰雄: 両眼立体視による溶接ビード表面の外観検査, ロボメック 99, (1999)2A1-19-002(1).