

画像ベクトル表示による材料欠陥目視検査の自動化技術の開発 (1)

Development of the System for Visual Inspection of Material

based on Vector Analysis Technique

佐久間正剛 久保克巳 仏円隆* 齋藤兆古** 堀井清之***
Sakuma Masatake Kubo Katsumi Butsuen Takashi Saito Yoshifuru Horii Kiyoshi
(株)東芝 *東芝エンジニアリング(株) **法政大学 ***白百合女子大学
Toshiba Toshiba Eng. Hosei University Shirayuri College
masatake.sakuma@toshiba.co.jp

Abstract 現在、溶接施工後の目視検査(VT)は熟練検査員により行われている。検査の客観性を保つためには、検査員のスキルに依存しない手法が必要とされている。本研究では、デジタル画像処理による目視観察自動化の試みとして、画像ベクトル法による欠陥候補抽出手法を開発し、その有効性を検証した。

1. はじめに

現在、溶接施工後の目視検査では、熟練検査員によって、割れ、表面ポロシティ、アンダーカット、オーバラップなどの欠陥の有無を検出している。また、プラントの高経年化、寿命延長に向け、溶接構造物の健全性を定期的に確認するために、据え付け後も長期にわたり疲労割れ、孔蝕などの検査を実施する必要性も増えている。これらの検査においては、現状直接目視や映像情報を用いた間接目視法が一般的に広く採用されている。直接目視による検査では、熟練検査員は表面のテクスチャが有する多面的な特徴を総合的に把握し、その特徴と異なる部位の濃淡の変化が連続する輪郭線の集合を欠陥として適応的に認識することにより、優れた検査スキルを発揮していると考えられる。しかし、検知能力が検査員の習熟度により大きく左右されるため、検査の客観性維持が課題となっている。また近年現場熟練検査員の高齢化や後継者不足など、検査業務に関わる技能継承の面でも課題が生じている。一方、TVカメラなどを使用する間接目視検査は、

溶接部のように被検査対象表面に複雑な凹凸が認められる形状の場合には、表面での反射や陰影の影響により、熟練検査員による欠陥識別においても困難を生じることが知られている。これは目視検査において、被検査対象の表面情報のみならず凹凸情報に起因する立体的な情報を勘案せねばならないことを意味する。

上述した課題の解決を目標として、われわれはこれまでもデジタル画像処理手法を応用した目視観察自動化手法の開発を進めてきた[1][2]。このうち、3次元的な形状情報を復元する手法は、実際の凹凸情報を再現でき、検査対象表面での陰影の影響排除には有効である。しかしながら、実際の検査工程において所定の測定分解能、欠陥検出性能で全検査範囲をカバーするためには、能率の面で困難を生じると考えられる。これらの技術をより有効に活用してゆくためには、

- ①全検査範囲に対する欠陥の高速スクリーニング処理
- ②欠陥候補を含む領域に対する形状復元などの詳細な解析

の後、最終的な欠陥識別・同定を行うことが現実的な解決策の1つであると考えられる。

そこで本研究では3次元的な画像復元処理の前処理として有効な2次元画像情報に基づく欠陥候補抽出手法の検討を行った。

以下では欠陥候補輪郭分離・抽出の基礎的手法として画像の輝度値をベクトルポテンシャルの一成分とみなすことによって定義できる画像の回転ベクトル[3]について述べた後、本手法を利用して欠陥候補の分離・識別、輪郭線の抽出、連結処理を行うアルゴリズムを提案し、プロトタイプシステムによる欠陥識別性能評価・検証を行った結果について報告する。

2. 欠陥抽出処理アルゴリズム

図1には、回転ベクトル画像処理を活用した、材料表面画像における円状欠陥の抽出処理フローを示す。表面欠陥候補の抽出処理過程は

①濃淡画像読み込み

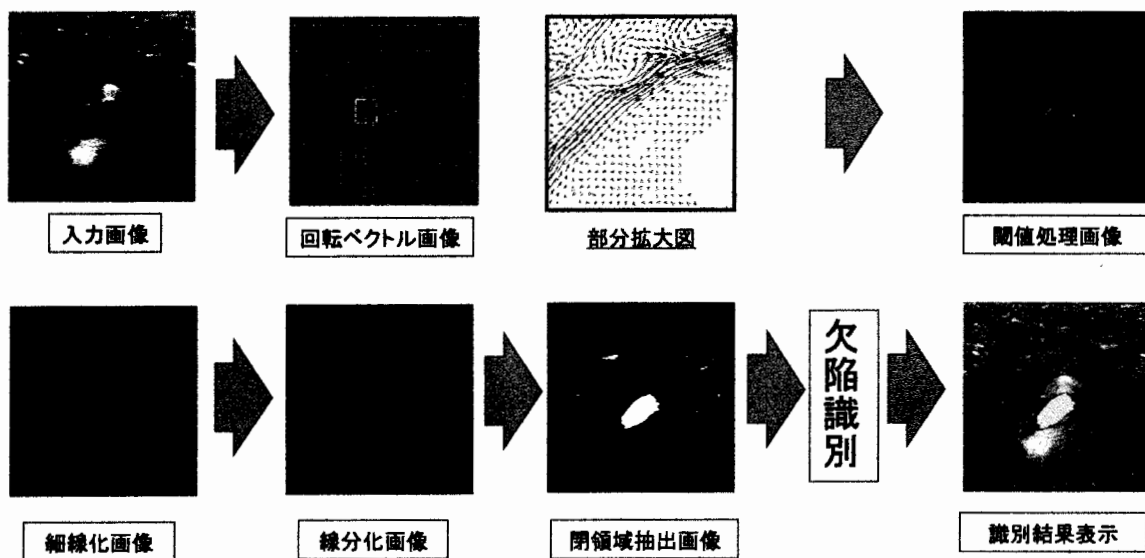


図1 欠陥候補抽出処理フロー

- ②回転ベクトル算出・抽出
- ④ベクトル方向を考慮した細線化
- ⑤端点・分岐点認識による線分方向評価
- ⑥輪郭検索・閉領域抽出処理
- ⑦欠陥候補領域分離抽出・欠陥タイプ識別処理
- ⑧識別結果表示処理からなる。

2.1. 画像ベクトル

目的でも述べたように、本研究では目視検査自動化の第1段階として、2次元映像情報に基づく間接目視検査の自動化を意図している。具体的には、被検査対象の画像が有する色彩・輝度情報の連続的空間変化情報を抽出する画像ベクトルを用いた欠陥候補抽出処理手法の開発である。画像を構成する画素をスカラーポテンシャルあるいはベクトルポテンシャルの一成分とみなして勾配、回転、発散、ラプラスの各ベクトル演算を定義できるが[3]、本研究では画像ベクトルの中の回転ベクトルに着目し、欠陥候補抽出処理手法について検討した。

以下回転ベクトルの定義について述べる。画像中の注目画素 (i,j) を画面に垂直方向に対する強度（画面を x,y の2軸とすると z 軸）と対応させて考えたとき、回転ベクトル $\mathbf{R}_{i,j}$ はベクトル解析の定義式に基づき、輝度画像から以下の関係式によって求められる。

$$\mathbf{R}_{i,j} = \left(\frac{I_{i,j+1} - I_{i,j-1}}{2}, -\frac{I_{i+1,j} - I_{i-1,j}}{2} \right) \quad (1)$$

ここで $I_{i,j}$ は画素 (i,j) での輝度値に対応する。すなわち、回転ベクトル画像は、注目画素 (i,j) における周囲4画素によるベクトル化処理であり、一次差分処理により求めることができる。定義式(1)から容易にわかるとおり、回転ベクトルは勾配ベクトルと同じベクトル長でかつ直交する方向のベクトルとなる。また、欠陥箇所のように濃淡が極端に変化している領域の周囲の輪郭線方向にほぼ等しく、欠陥周囲部の回転ベクトルの連結処理により欠陥輪郭線を抽出することが出来る。図2に線状欠陥画像に対する回転ベクトル演算



図2 欠陥周辺の回転ベクトル
(青矢印、右上図赤枠部拡大部分)

結果の一例を示す。図中原画像に回転ベクトルを重畳して示したが、輝度値が大幅に変化する画素すなわち欠陥の輪郭において、回転ベクトルは輪郭線に沿った方向に分布していることがわかる。

本研究で対象とするような、欠陥候補抽出処理においては、輝度が小さい領域の周囲に分布する一定以上の大きさの回転ベクトルを切り出すしきい値処理を施すことにより、欠陥輪郭抽出の前処理を行った。

2.2. 細線化

画像の輝度情報およびベクトル強度情報を用いた閾値処理により抽出された2値画像に対し、細線化処理により処理領域を決定する。微細な線状欠陥などでは細線化により輪郭情報が喪失してしまう。これを避けるため、回転ベクトルの方向成分によるマスクングの後細線化処理を行った。この処理により、隣接する輪郭線分を明確に分離できる。図3に分割細線化手法を示す。

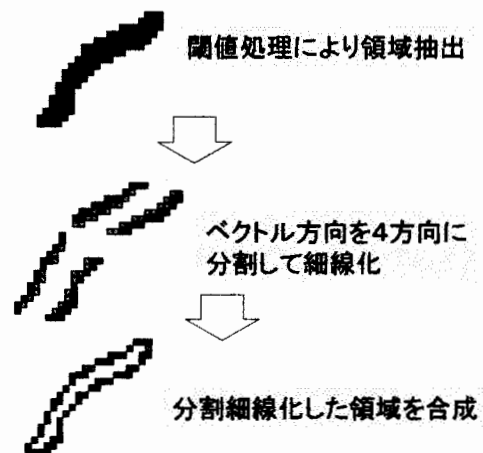
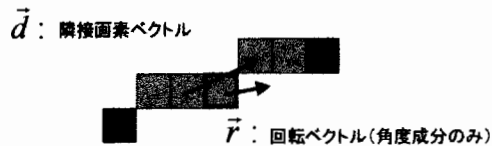


図3 分割細線化手法

2.3. 線分化および線分連結処理

まず、細線化により得られた線図形から論理フィルタを用いて端点・分岐点を検出し、この端点および分岐点を始点・終点とする線分に分割する。次に、各線分を方向を回転ベクトルにより評価する。図4に線分方向の評価手法を示す。図のように、線分を構成する各画素の回転ベクトルとそれに隣接する画素を結ぶベクトルの内積をもとめ、次式の評価値によりその線分方向を決定する。

また、図5のように領域の抽出閾値によって線分間の連結処理が必要となる。この場合、2つの線分の終点—始点あるいは始点—終点を連結する処理を行う。連結の判定には、2点間を直線的に結んだ線分方向を同様に評価し、その評価値より連結の可否を判定する。これにより線分間の連結処理を実現している。



$$\text{線分方向評価値: } e = \frac{\sum_i^N \vec{r}_i \cdot \vec{d}_i}{N}, \quad (-1 \leq e \leq 1)$$

図4 線分方向評価手法

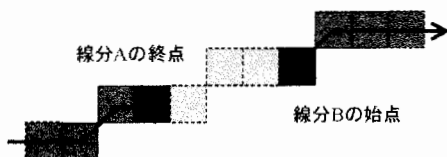


図5 線分連結処理

2.4. 閉領域抽出

次に線分化および線分連結処理された図形から、閉領域部を抽出する。まず、最大長線分の始点から探索を開始する。探索進路が分岐点にあたった場合、図6のように分岐点および8近傍の平均回転ベクトルと、分岐点に隣接する経路間を結ぶベクトルの内積をもとめ、大きい方の進路を選択する。探索は、探索始点あるいは探索通過点に帰着した場合、閉領域として抽出して終了する。この処理を全線分について行う。2.1.において述べたように、回転ベクトルが欠陥などの輪郭周辺に右回りのループを形成することから、選択的にこの閉領域を抽出する。

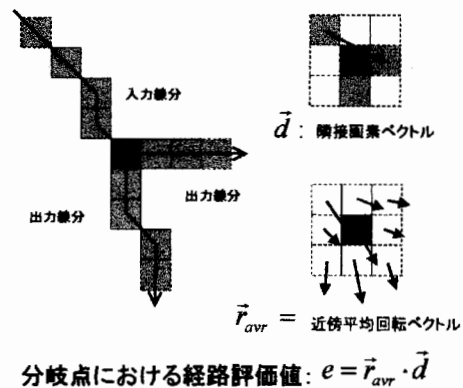


図6 経路探索手法

3. 欠陥候補識別特徴量

欠陥候補輪郭分離・抽出後、検出された欠陥候補は円状欠陥・線状欠陥・ノイズの3種類のいずれかである、と考えられる。分離された輪郭の持つ特徴量に基づき、この3種類の識別を行うこととした。それぞれの欠陥候補は一般的に以下の特徴を有している、と考えられる。

- ・円状欠陥と線状欠陥では、同じ長さの輪郭であれば、円状欠陥の方が欠陥面積が大きい。
- ・各欠陥の輪郭を構成する回転ベクトルは、線状欠陥では比較的直線的と考えられるし、円状欠陥は楕円に沿って滑らかな分布である。
- ・ノイズは欠陥に比べて面積、輪郭とも小さい。

上記の一般的な特徴に対応し、欠陥候補識別には以下の3種類の特徴量を採用した。

- ① 欠陥候補形状の複雑度 E
- ② 回転ベクトル方向分布不均一度 D
- ③ 欠陥候補の面積 S

これらのうち、①複雑度 E は図形形状の複雑さを図る無次元尺度で、欠陥候補の輪郭長を L 、欠陥面積を S とすると、以下の式により定義できる[5]。

$$E = L^2/S \quad (2)$$

③回転ベクトル分布の不均一度 D とは、抽出した欠陥の輪郭を構成する各点の回転ベクトルの方向のばらつきを評価する指標である。不均一度 D は以下の式により、定義した。

$$D = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\theta_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_i \right)^2} \quad (3)$$

ここで θ_i は、第 i 番目 (N は 1 つの欠陥候補の輪郭を構成する画素の数) の欠陥輪郭線画素での回転ベクトルの方向である。円状欠陥と線状欠陥で比較すると、線状欠陥の方が円状欠陥より不均一度が大きくなる。(3)式の定義からもわかるとおり、原画像の回転ベクトルを直接計算に使用することから、単純な輪郭線連結方向の度数分布や①の複

雑度に比べ、本特徴量は原画像の持つ輝度変化の情報をより強く反映する、と考えられる。

4. 欠陥候補識別結果

手法の有効性を評価するために、故意に欠陥を生じさせた溶接試験片を複数製作した。図7にこれらの試験片の写真と寸法を示す(中央部光沢の無い領域が溶接部である)。使用した試験片の数、欠陥の種類とサイズを表1にまとめた通りである。

CCDカメラによってこれらの試験片をデジタル画像化し、回転ベクトルに基づく欠陥候補の輪郭抽出・領域分離と、特徴量評価による識別処理を行った。

線状欠陥について、輪郭抽出・領域分離を行った結果の一例を図8に示す。図中左が原画像で、中央部分に縦に亀裂が認められる。図中右は領域分離結果を重畳した画像であり、欠陥部が青く識別されていることがわかる。

次に特徴量 E, S, D を各軸として、検出された欠陥候補を3次元空間上にプロットした結果を図9に示した。

同図から、線状欠陥、円状欠陥及びノイズが特徴量空間上の異なる領域に分布しており、これらの分離が可能であることが判る。

これらの結果から、構築したアルゴリズムが円状欠陥と線状欠陥の識別に有効な方法であること、欠陥候補に対する識別精度向上が図れることを確認した。

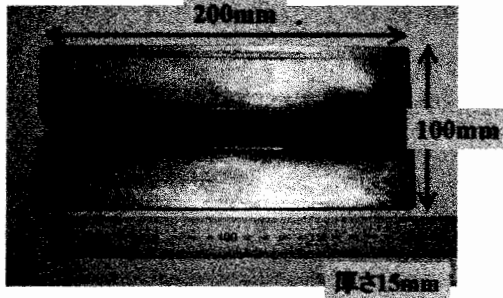


図7 溶接試験片

表1 欠陥の種類とサイズ

欠陥の種類	欠陥の大きさ	数量
線状(縦割れ)	1500 μ m \sim 10 μ m	15
線状(横割れ)	1500 μ m \sim 10 μ m	15
円状(ホロンテ)	3mm \sim 200 μ m ϕ	10

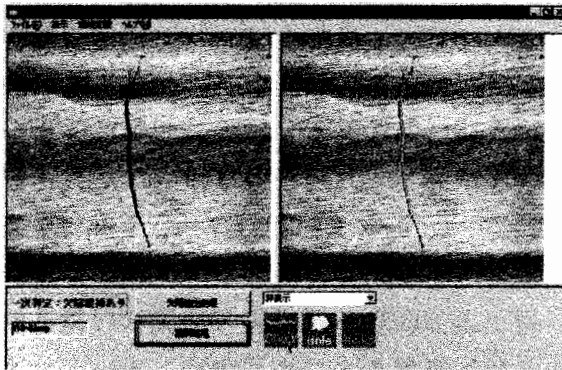


図8 欠陥候補抽出・識別処理の一例

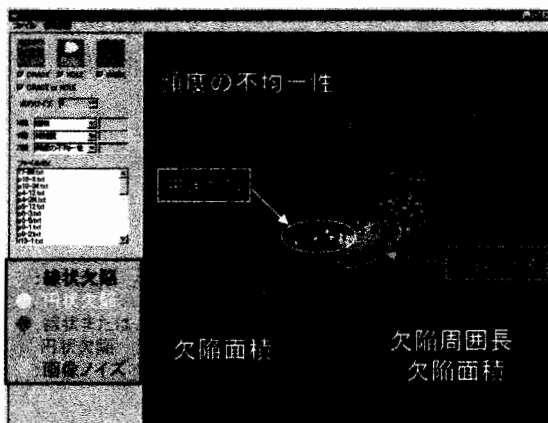


図9 特徴量空間における各欠陥の分布

5. おわりに

本研究では、デジタル画像処理による目視観察自動化の試みとして、画像ベクトル法による欠陥候補抽出手法を開発し、その有効性を検証した。画像の輝度値をベクトルポテンシャルとみなすことで定義される回転ベクトルと、連結・細線化処理とを組み合わせた材料欠陥目視検査アルゴリズムを構築し、溶接欠陥候補の分離抽出・形状識別に適用した。本研究の結果から、回転ベクトルを応用した画像処理手法が、溶接欠陥のように複雑なテクスチャ画像に埋もれた輪郭線の抽出処理に有効であるという知見が得られた。また、抽出された欠陥候補の多次元的な特徴表現により、形状識別・ノイズ分離が可能であることが確認できた。

謝辞

本研究は科学技術振興事業団 平成10年度 計算科学技術活用型特定研究開発推進事業（短期集中型）の支援をうけて行われた。

参考文献

- [1]久保克巳他、溶接ビード表面外観検査装置の開発、第8回外観検査の自動化ワークショップ、精密工学会、(1996)
- [2] 久保 克巳他、デジタル画像処理による目視観察の自動化、平成11年秋季大会講演概要集、p.99-102.、日本非破壊検査協会 (1999)
- [3] 斎藤兆古、Mathematicaによる画像処理入門、朝倉書店 (1998)