コンクリート構造物表面のひびわれ測定のための階層構造化画像処理

Hierarchical Image Processing for Crack Measurement on Concrete Structures.

土居原 健*・織田 和夫*・広野 貴一*・笠井 靖浩**・

木村 鷹志**・大沼 一彦***・安田 嘉純***

*Takeshi DOIHARA, Kazuo ODA, Kichi HIRONO, Yasuhiro KASAI,**Takashi KIMURA, Kazuhiko OHNUMA and Yoshizumi YASUDA*

Abstract : As assessment of crack width with precision of the order of 10-1 mm is required in periodical crack inspection of concrete structures, crack measurement has been performed by using crack-scale manually and/or by using image processing with close range photograph. In the image processing especially, closer photograph images are required for more precise measurement of cracks, which usually have width of about 0.1 mm, because of the restriction of inherent resolving power of imaging devices.

This paper presents a crack measuring algorithm in which images of different resolution are generated from a closer range photograph and hierarchically structured from fine to coarser in order to extract concrete crack automatically by using a single spatial filter rather than using a series of spatial filters. And it is also designed to offer processing time saving from data exploding of closer range imaging with high-resolution.

As a result of experiments, more than 80% of cracks above 0.1 mm width are extracted automatically and RMS error in measuring crack width is performed less than 0.19 mm. It is concluded that our approach to crack measurement shows much possibility of a practical crack measuring system, which can be substituted for a conventional measurement in human-dependent inspection.

1. はじめに

荷重作用や塩害・中性化、アルカリ骨材反応・凍結融解・乾燥収縮などによるコンクリート構造物の劣化は、現象としてひびわれを伴うことが多い。さらにそのひびわれが鉄筋腐食あるいは強度・弾性の低下、漏水・気密性の低下、美観の低下など、他の劣化現象の誘引となっていることが多く、発生しているひびわれの量を把握することがコンクリート構造物の健全度を評価する重要な指標となると考えられている。また、先の劣化原因で発生するひびわれには構造物の各部位の主鉄筋方向に対する規則性の有無など、形状パターンに特長があり、それによる劣化原因の推定も試みら

れている¹⁾。このため、コンクリート構造物を保守管理する上でひびわれの状況を定量的に把握することは、劣化の進行性を判定したり原因を推定するために極めて有用である。

コンクリート構造物表面のひびわれ測定は、従来から定期的な点検において目視や簡易な測定器を用いて行われてきた。例えば、0.04~1.4mm まで数種類の線幅が刻まれたクラックスケールによりひびわれ幅を読み取り、形状パターンは現場でのスケッチやチョークによるマーキングの後、写真撮影し図に展開して求めている。また、測定後のひびわれデータの解析はひびわれ長、ひびわれ幅あるいは最大ひびわれ幅例えば床版パネル每などの所定の面積単位に集計して行っている。しかし、このような測定を行うには多くの人手と時間が必要なため、ひびわれを写真撮影し画像処理により迅速に測定する装置が求められている。

類似の装置として路面計測車がある。路面を撮影しひびわれの形状パターンを画像処理して抽出するが、

* アジア航測(株) Asia Air Survey Co., Ltd.

** 東京電力(株) Tokyo Electric Power Co.

*** 千葉大学 Chiba Univ.

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 37, NO. 3, 1998

自動化には問題も残されている。それらは、

- 〈1〉 表面の汚れにより単純な2値化が困難
- 〈2〉 測定要求が詳細になるに従って画像化密度が高まり、データ量が膨大となる
- 〈3〉 自然光の下では画像取得の制御が困難

である。島村²⁾は線構造としてのひびわれに着目し、前処理によるテクスチャノイズの低減とデータ縮小の手法を提案した。他方、コンクリート構造物のひびわれ測定では形状パターンを抽出するだけでなく、幅が0.1 mm程度の微小なひびわれまでその幅を測らなければならない。ひびわれは路面のようなマクロ視点では直感的に画像上の線画素列と捉えられるが、0.1mmのミクロな視点では幅2 mm程度のひびわれでも帯領域を形成する。このため、その抽出には単純な線画素列に対する画像処理が適用できない(問題〈4〉)という新たな問題が生じている。

本研究では、上記〈1〉、〈2〉、〈4〉の問題に対して注目すべき箇所はより詳細にそれ以外は概観するパースピ・ビジョン的な処理概念を応用し、階層構造化した画像をもとにひびわれが存在する部分のみ詳細に処理する一方で、存在しない部分は処理から除外するという選択的な coarse to fine 画像処理によるひびわれ測定方法を提案する。本論では以下にひびわれ測定方法の基本的な考え方を概説した後、その処理手法について述べる。次に実際のコンクリート構造物表面のひびわれ写真に対して処理手法を適用し、その有効性を検証する。なお、照明光の問題〈3〉は人工照明を用いて撮影をコントロールすることとし、ここでは議論しない。

2. 基本的な考え方

2.1 画像によるひびわれ測定の課題

コンクリート標準仕方書によれば、コンクリート構造物のひびわれはかぶり厚にもよるが、概ね幅0.3mmが点検の基準となる³⁾。したがって、画像によるひびわれ測定はそれ以下の例えば幅が0.1mm程度のひびわれまで行うことが測定要求となる。このような要求に従うとすると、画像は測定値に求められる有効桁数に見合う十分な解像度で取得しておく必要があるため、例えば4画素/0.1mm幅の密度、8 bit 階調/1画素のモノクロ画像として高々1 m×1 mのコンクリート面を画像化したとしてもデータ量は約1.6GBにも達

する。そのため、一般的な画像処理では計算コストがかかりすぎ、効率的な処理が不可欠となる。

また、幅0.1~数mmのひびわれを測定対象としたとき、0.1mmのひびわれは画像上で高々数画素幅の線画素列であるのに対して、幅数mmのひびわれは幅数十画素の帯領域を形成する。そのため、ひびわれを抽出する画像処理はひびわれ幅に応じて線画素列を処理する手法を選択するか、長く太い帯領域を処理する手法を選択するかしなければならない、幅に無関係に一意的に定めることができない。

さらに、コンクリート構造物の表面には汚れの付着や変色、骨材の凹凸による影など、ひびわれ以外の明暗がある。このため、線画素列あるいは帯領域のいずれの処理の場合にも、ひびわれを単純に画像の明暗によって2値化するのは難しい。処理対象となるひびわれがひびわれ幅により画像としての特徴を変えているため、その2値化には線画素列と帯領域の抽出を複合し、かつ各々の特徴を捉えた2値化閾値の計算法が必要である。

2.2 想定するひびわれ測定装置

コンクリート構造物のひびわれ測定には上述の測定要求がある一方で、巡視点検時の使用を前提とする携行性も要求されている。CCD 撮像装置も高密度化されているが、現状ではコストや画像取得の容易さ、画像密度などの点からフィルムカメラによる撮影と画像処理の方法を取らざるを得ない。そこで、本研究ではひびわれ測定装置として図1を想定する。

図1は携行可能な70mmカメラによる測定対象面のスポット的な撮影、撮影フィルムのデジタル化、画像処理によるひびわれの形状パターンの抽出と幅の測定、原因を推定するひびわれデータの解析など、装置の機能構成を示す模式図である。測定対象とするひびわれは幅0.1~2 mmである。撮影に複写用マイクロフィルムを用いると、フィルムの解像性⁴⁾⁵⁾により縮尺1/10が撮影条件となり、70mmフィルムでは50cm×50cmのコンクリート面が1ショットの撮影範囲となる。画像は4画素/0.1mm幅を実現することとし、フィルムを密度2.5 μ で読み取りデジタル化する。

2.3 画像の階層化と coarse to fine 画像処理の適用

処理対象データの増大とパターン認識の問題には従来から画像の階層構造化手法が研究⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾されてき

図1 ひびわれ測定装置の概念図

た。例えばステレオマッチングにおいては coarse to fine によりマッチング精度を向上させている。この処理概念はひびわれ測定においてもマクロな画像からひびわれを線画素列として抽出した後、ミクロな視点で幅を精細処理する手法として応用可能と考えられる。

しかし, coarse to fine によっても精細画像の段階で全画像を処理したのでは2.1項に示した計算コストの問題は解決されない。また, 階層構造化はミクロとマクロな視点の融合には有効であるが, これには粗い画像上でも0.1mm 幅のひびわれ情報が保持されていなければならない。したがって, 階層構造化の手法を適用するには異なった幅のひびわれ情報を保持する画像の縮小法が必要である。さらに, coarse to fine の過程においても表面のテクスチャ・ノイズを分離しながらひびわれを2値化しなければならず, その手法も必要となってくる。

そこで, コンクリート構造物表面のひびわれ測定方法として図2に示す階層構造化した画像をベースとする処理手法を考案した。処理の第1はフィルムの読み取り後, 先ず画像をミクロ視点からマクロ視点まで階層的に構成することである。この階層構造化では微細ひびわれの線構造を保存し, かつノイズを低減する論理フィルタ処理を行い, 測定対象とするひびわれを単純な線画素列の抽出問題として取り扱えるよう変換する画像縮小法を考えた。処理の第2は coarse to fine によりひびわれを2値化し, 形状パターンの抽出とひびわれ幅の算出を行うことである。表面のテクスチャ・ノイズの影響を除き, かつ計算コストを下げるため, ここではその過程をさらに2分し, 第1段階として最も粗い画像から線画素列の2値化を行う(図2の概略のひびわれ抽出とひびわれ幅の算出)。第2段階が詳細なひびわれ抽出とひびわれ幅の算出であり, 粗い画像から順にフィルムの読み取り原画像に至るまで

の処理である。ここでは局所的に2値化小領域を決定し, その領域に逐次, 繰返し判別2値化法を適用して2値化閾値を自動決定する手法を考えた。また, 画像が精細になるにつれ増加するデータ量に対しては, ひびわれの形状パターンが存在する部分のみ詳細な処理の対象とするパーパス・ビジョンの処理を行うことにより計算コストの低下を図った。なお, ひびわれ幅の算出には概略の方法として直線オペレータ法を, 詳

図2 階層構造化した画像によるひびわれ測定の考え方

細な方法として最大内接円法を各々考えた。

3. ひびわれ測定のための画像処理手法

本研究ではひびわれ部を暗部として高データ値、コンクリート部を明部として低データ値となるように画像データを作成しており、これを前提として手法を説明する。

3.1 階層構造化（線構造保存の縮小）

図3に示すように読み取った原画像から始めに1/4縮小画像を生成し、順次、幅2mmのひびわれを数画素幅の線構造とみなすのに十分な縮率までの縮小画像を生成し階層構造化する。後述の円形フィルタの作用性をみると3画素幅までの線構造に強く反応するため、目的のひびわれ幅を検出するには1/32縮小画像まで生成すれば良いことが分かる。また、縮小後も細いひびわれ情報を保持させなければならないため、縮小方法は1/4縮小画像の場合には平均化と単純間引き、それ以下の縮小には線構造を残す線保存平滑化フィルタリングと最大値選択による方法考えた。

(i) 原画像の1/4縮小

最初の縮小は最小検出ひびわれ幅0.1mmが画像の1画素となるような原画像の縮小である。ミクロな視点では表面の微細な凹凸により画像に明暗ノイズが生じている。そこで、4画素×4画素の16画素から平均値算出し、この値を新たな1画素とすることによりランダムノイズを1/4に低減させる^{11b)}。0.1mm幅のひびわれが0.1mm間隔で繰り返し発生する形状パター

ンは現実には存在し難いと考えられるため、平均化を行っても疑似解像度の発生^{11b)}はなく、画像のエッジは鈍るがひびわれの形状パターンは保存されると考えた。

(ii) 線保存平滑化フィルタリングと最大値選択による間引き

1/4縮小以降では細いひびわれ線構造を保持することを目的として以下の縮小法を採用する。図4(1)に示すように、まず1/4縮小画像の各点 (i, j) を中心に第1～第8方向にそれぞれ n 画素長の平均値 AVE_m , $m=1\sim 8$ を計算し、 AVE_m の中から最大値を検索して点 (i, j) の値とする。線状に平均値を求めることによりひびわれなど線構造を構成している点列の一部の点 (i, j) では値に変化はないが、それ以外の孤立した暗部では値が平滑化される。次にひびわれ部分がコンクリート部分よりも画像データ値が大きいことから、図4(2)に示すように 2×2 の4画素の中から最大値を選び画像を間引きする。この処理によって細いひびわれは細い線のままに残され、他方、幅の太いひびわれは徐々に細い線構造に変換される。

後述する円形フィルタの処理は、ひびわれ部とコンクリート部の画像データ値の比が大きいほど線構造の指標となる特徴量が大きく算出され線抽出に有利となる。これに反し、縮小に最大値選択による間引きを行うため、必然的にコンクリート部のデータ値は高くなり比が低下する。平滑化は円形フィルタを効果的に作用させるため、孤立暗部のデータ値を下げておくために必要な処理である。なお、フィルタの長さは最も縮小した時の1画素に相当するように、 $n=8$ とする。

3.2 概略のひびわれ抽出と幅の算出

エッジがやや鈍ったルーフ型エッジの抽出は文献⁸⁾¹²⁾¹³⁾のレビューや、図5に示す円形フィルタ¹⁴⁾が提案されている。この中で後者は経験的ではあるがエッジの強さから2値化閾値が自動決定でき、背景の明暗変化に比較的強いという利点がある。そこで、1/32縮小画像における概略のひびわれ抽出に際し円形フィルタの応用を考えた。

(i) 円形フィルタによる特徴量算出

図5に示す円形フィルタを画像に作用させると画素 O について(1)式により特徴量 S が算出される。

$$S = W_T / \{ \sum (W_{Bi} - \text{Max } W_{Bi}) / 7 \} \quad (1)$$

ここで、 W_T , W_{Bi} は画素 O および O を中心とし半径 R , i 番目($i=1\cdots 8$)の方向にある各々のウィンド

図3 ひびわれ画像の階層構造化

図4 線保存平滑化フィルタリングと最大値選択による間引き

ウの画像データ平均値, $\text{Max } W_{Bi}$ は $W_{Bi} (i=1 \cdots 8)$ の中の最大値, WS は処理ウィンドウの大きさ, g_n はウィンドウ中心の極座標である。

図6は $R=5$, $WS=1$ として, 幅が1~8画素のルーフ型エッジの特徴量 S をひびわれ部に対するコンクリート部の画像データ値の比 (本論では, この比を仮にコントラストと呼ぶ) を変化させながらシミュレーションした結果である。ノイズの混入を無視すると, 線幅が3画素以下のエッジに良く反応し, 4画素以上で鈍くなるのが分かる。すなわち, 1/32縮小画像なら幅が2 mm以下のひびわれに対して作用が期待できる。

しかし, コンクリート面に汚れが多く, 黒くなる (コントラストが1に近づく) と特徴量 S は低下する。このことは明暗の差が大きな幅広のルーフ型エッジが付近にあると特徴量 S が逆転することを示している。したがって特徴量 S からひびわれを2値化するには, 2値化領域内でひびわれ部とコンクリート部のコントラストを同一に保つか, コントラスト別に領域を区分し2値化閾値を算出しなければならない。

(ii) 2値化閾値の算出

画像のコントラストに影響をあたえるような領域としてのデータ変化を検出するには画像の領域分割法がしばしば用いられる¹⁷⁾。しかし, 縮小した画像を領域分割するとひびわれ部分もセグメント内に取り込まれ, コンクリート部分の暗部とひびわれの暗部を再度区分

する閾値決定が新たな問題となる。本研究では, コントラストによる領域区分によらず画像全体を小ブロックに分け, この中ではコントラストを一様とみなし特徴量の逆転を抑えることを考えた。具体的には小ブロック毎に特徴量 S の平均値 S_{AVE} を算出し2値化閾値の決定を図った。なお, 2値化閾値は S_{AVE} の1.1倍を適用¹⁴⁾した。

(iii) 2値化・芯線化・ノイズ除去とベクトル化

小ブロック毎に算出した閾値によりひびわれを2値化した後, Hilditchの細線化法¹²⁾により芯線化する。細線化アルゴリズムの特徴として生じるヒゲ状ノイズは縮退により, 閉ループは穴ウメの後, 再芯線化により除去する。その他, 孤立点や短線も除去する。ノイズ処理の後, 芯線を追跡しベクトル化して概略のひび

図5 円形フィルタの模式図と特徴量 S (鈴木, 1985)

図6 画像のコントラストの変化に伴う特徴量の変動

われ中心線とする。

(iv) 概略のひびわれ幅の算出

概略のひびわれ幅は coarse to fine のための初期値となる。ひびわれ幅は coarse to fine により徐々に測定精度が高まるため、ここでは原理が単純で計算コストの低い直線オペレータ A (図7参照) により概略のひびわれ幅 w を算出する。

$$\text{直線オペレータ } A = \{a_i\}, (-k \leq i \leq k) \quad (2)$$

ここで、

$$S = \{a_j\}, (j = -m, -m+1, \dots, 0, \dots, n-1, n) \quad (3)$$

$$T = \{a_j\}, (j = -k, \dots, -m-1, \text{ および } n+1, \dots, k) \quad (4)$$

$-k \leq -m \leq 0, 0 \leq n \leq k, (S, T \subseteq A)$ とするとき、

$$D(m, n) = |s - t|, (\text{ただし, } s \text{ と } t \text{ は } S, T \text{ の平均値}) \quad (5)$$

を最大とする m, n の組から、

$$w = m + n + 1 \quad (6)$$

を決定する。

3.3 詳細なひびわれの抽出と幅の算出

1/32縮小画像で抽出したひびわれ中心線とひびわれ幅を初期値として縮小した順と逆順に段階的に精細な画像内のひびわれを探索し、中心線の再決定とひびわれ幅の再算出を行う。これをフィルム読み取り原画像まで行いひびわれ測定の精度を向上させる。

(i) 局所的な逐次、繰返し判別2値化

粗い画像から求めた中心線位置 (x_{up}, y_{up}) と幅 w_{up} を1段階精細な縮小画像に移すには、

$$(x, y) = (2x_{up}[\text{or}, 2x_{up} + 1], 2y_{up}[\text{or}, 2y_{up} + 1]) \quad (7)$$

$$w \leq 2w_{up} \quad (8)$$

とすればよい。ここで、 x, y, w は1段階精細な縮小画像上の位置と幅、添字 up は粗い画像を表す。したがって、精細な画像でひびわれを2値化するにはひびわれ中心線が位置する部分のみ選択的に処理すればよく、この位置参照により計算コストを抑えることができる。

また、画像の2値化には判別2値化法¹⁵⁾が一般的である。しかし、この手法には2値化対象と背景の面積割合が極端に偏っていると適正な2値化閾値が算出されないという問題がある¹⁶⁾。このためひびわれが少ないとき、あるいは表面全体が汚れているなどノイズが多いときには画像強調などの前処理が必要となる²⁾。これに対して本研究ではひびわれ中心線と幅が概略ではあるが既知である。このことから、図8に示すように幅 w に応じて扁平率の異なる楕円形の2値化小領域を設けることにより面積割合の極端な偏りが回避できると考えた。しかし、概略のひびわれ幅 w_{up} は縮小画像で簡易に算出したため曖昧であり、また幅の細かいひびわれは縮小の際、平滑化後に残る周囲のノイズが取り込まれて構造化されている可能性がある。そこで、coarse to fine ではこれらの影響を抑えるために[2値化→孤立領域除去→膨張→2値化領域再決定]をループする繰返し2値化を考えた。すなわち2回目以降の2値化に際しては孤立領域の除去後、2値化結果を膨張させその範囲を楕円に代わって2値化小領域に設定し直す。これにより2回目以降の2値化にはノイズの持つデータ分散が2値化閾値の算出に取り込まれ難くなる。また、膨張回数も面積割合の変化を抑えるためひびわれ幅に応じて可変とし、判別2値化の問題とノイズ混入への対応を図った。ループの終了は前回の2値化結果と今回の結果を比較し変化がなくなった時と

図7 直線オペレータによるひびわれ幅算出の模式図

図 8 繰返し判別 2 値化の模式図

し、ひびわれ中心線の全点に設けた楕円小領域を個別に 2 値化し、結果を繋ぎ合わせて処理が終了する。

(ii) 中心線移動とノイズ除去

図 9 に示すように中心線の方向と直交する方向にエッジを探索し、両エッジの中央を新たに中心線的位置と決める。このとき概略のひびわれ抽出で部分的にノイズに中心線が置かれていたとすると、精細な処理の後、ひびわれの連続性に矛盾が生じる。そこで、図 10 に示すようにひびわれにラベリングし中心線の各点のラベルを求める。ここで各点のラベルがその前後点のラベルの多数と一致しないとき、中心線の方向と直交する方向にひびわれを探索する。このような多数決によって中心線をより確からしい近傍領域に移動させ矛盾の解消を図った。

(iii) 詳細なひびわれ幅の算出

詳細なひびわれ幅の算出は、単純膨張と縮退によるひびわれの穴埋めの後、図 10 に示すように中心線の方向と直交する方向に円の中心を揺らしながら最大内接円を検索する。ひびわれ中心線の各点について最大内接円を求めて直径をひびわれ幅とする。

4. 実験

4.1 実験フローとパラメータ

実験は図 2 のフローに従い表 1 に示すパラメータを与えて行った。なお、詳細なひびわれの抽出の際、局

所的な逐次、繰返し判別 2 値化を幅 1 mm 以上のひびわれに適用すると幅が細く算出される傾向にあることが予備実験により分かった。そこで、2 値化時の過度な痩せ細りを抑えるため概略のひびわれ幅 w_{up} と画像間倍率 sc の積が、

$$8 \leq w_{up} \times sc \quad (9)$$

$$sc = [\text{処理対象画像の縮小率}] / (1/32) \quad (10)$$

となるとき、繰返し回数を 1、膨張回数を 0 に制限し実験を進めることとした。

4.2 検証方法

提案するひびわれの測定方法は最も縮小した画像で 0.1mm 幅のひびわれ情報が保存されていることを前提とし、ここで抽出された形状パターンを元に詳細な処理を進めている。したがって、処理の妥当性は概略のひびわれ抽出の段階で漏れなく、かつノイズの影響

図 9 ひびわれ中心線位置の決定の模式図

図10 多数決によるノイズの除去（左）と最大内接円法によるひびわれ値の算出（右）

が少なく形状パターンが抽出できたかによって判断できる。また、2値化の妥当性はひびわれ幅の算出精度により確かめることができる。そこで、画像処理による結果を画像上でマニュアル測定した結果に比較し、(11)～(13)式の指標を算出して手法を検証することとした。ここで、 L_{au} は抽出対象とする幅0.1mm以上のひびわれ全長、 L_{corr} は正しく自動抽出したひびわれ長、 L_{incorr} は誤って抽出した線長、 W_{auto} は最大内接円法による幅、 W_{man} はマニュアル測定した幅、 NS は画像毎の検査点数である。

1) ひびわれの抽出率として認識率と誤認率

$$\text{認識率} = L_{corr} / L_{au} \quad (11)$$

$$\text{誤認率} = L_{incorr} / L_{corr} \quad (12)$$

2) ひびわれ幅の測定精度として標準誤差

$$\text{標準誤差} = [\sum (W_{auto} \cdot i - W_{man} \cdot i)^2 / (NS - 1)]^{1/2}, \quad (i=1, \dots, NS) \quad (13)$$

4.3 実験サンプル

実験に用いた画像サンプルを図11にまとめて示す。サンプルはコンクリート面を70mmフィルムを用いて縮尺が概ね1/10となるように(カメラの設置位置の制限から厳密に1/10縮尺ではない)撮影し、フィルムを密度2.5μ/画素でデジタル化したものである。

なお、検証には対象となる構造物のひびわれ状態や表面の汚れ状態を定量化し、これを基準として抽出率や精度を評価するのが望ましいが、実際の構造物のひびわれ状態は多種・多様、汚れも環境により種類や程度が様々なため、その定量化は困難であった。そこで、この実験では表現の曖昧さを許すとして、サンプルをひびわれの分布状況とコンクリート表面の汚れにより

次のように区分した。

- No. 1: 打設直後のコンクリート・ブロックにひびわれを発生させたサンプルで、汚れが無い
- No. 2: 比較的汚れが少なく細いひびわれの多いサンプル
- No. 3: 一部に石灰の析出と水のしみ出しが見られるサンプル
- No. 4: 汚れが比較的多く黒いサンプル

5. 結果と評価

5.1 画像処理の結果

(i) ひびわれの抽出率

画像処理した結果を表2と図12にまとめて示す。表2に示すとおり汚れの少ないサンプルNo. 1とNo. 2ではひびわれの抽出は100%可能であった。これより細かいひびわれ情報が縮小後も保持され、円形フィルタにより抽出可能なことが分かる。また、やや汚れた場合(No. 3とNo. 4)にも80%近くのひびわれを正しく抽出できることが確かめられた。反対に抽出ができなかった部分は、No. 3では画像中央部の部分的に石灰が析出した箇所や、ひびわれ内に砂が詰まり画像では途切れたように見える箇所、汚れた水の垂れ落ちが帯状にみられる箇所である。No. 4では番号札左側の汚れた箇所が抽出漏れとなった。

一方、誤認率は数% (No. 3) から約40% (No. 2) となっている。ひびわれと誤認したものはNo. 1とNo. 2ではコンクリート打設時に使用した板枠の木目痕である。これらは実際に細い筋状の明暗をつくっており、これをひびわれと誤った。また、No. 4では点在

表 1 検証実験で設定した各種パラメータと値

項 目	テストに用いた設定値など
撮影とフィルムの読み取り	
ひびわれ撮影	構造物50×50cmを縮尺1/10で撮影
デジタルデジタル画像の密度	実構造物上で0.025mm/画素
画像の階層構造化	
画像データの縮小	1/4縮小（1画素は実構造物上で0.1mm）：4×4画素の平均化 1/8縮小（1画素は実構造物上で0.2mm） ↳ 線保存平滑化フィルタ（フィルタ長=8）と最大値選択による間引き 1/32縮小（1画素は実構造物上で0.8mm）
概略のひびわれ抽出と幅の算出	
線構造の抽出 芯線化	円形フィルタ法：WS=1，R=5，特徴量平均による2値化閾値係数=×1.1 Hilditchの細線化法
ノイズ除去	孤立点・孤立領域の閾値=4.8×4.8mm（実構造物上） 連結点列の閾値=12.8mm（実構造物上） 閉ループ領域の穴埋め：単純膨張と縮小 ピクセル点列の閾値=4mm（実構造物上）
概略ひびわれ幅の算出	直線ベクトル法
詳細なひびわれの抽出と幅の算出	
局所的な逐次、繰返し2値化	楕円長軸=2×概略ひびわれ点間隔（1/16,1/8縮小時） =1×概略ひびわれ点間隔（1/4縮小時,オリジナル時） 楕円短軸=3×概略ひびわれ幅×階層化画像間の倍率比 =4×概略ひびわれ幅×倍率比（概略ひびわれ幅=1のとき） 最大繰返し2値化回数=2，膨張回数=1（概略ひびわれ幅×画像間倍率<4） =2，=2（概略ひびわれ幅×画像間倍率<8） =1，=0（8≤概略ひびわれ幅×画像間倍率）
ノイズ除去	穴埋め：単純膨張と縮小 多数決による孤立点・領域除去
ひびわれ幅の算出	最大内接円探索による内接円直径 ひびわれ幅測定間隔=0.8mm（1/32縮小時の画像密度に相当）

する黒いシミの輪郭エッジをひびわれと誤っている。

なお、図12はひびわれ測定の対象範囲（図11の4隅のマークや測定枠を置いた範囲）の他に、参考のため画像全体を自動処理した結果を表示している。ただし、表2の抽出率や測定精度の算出には測定範囲外のノイズはカウントしていない。また、範囲内にあっても実験用のマークや番号札、測定枠など、本来、コンクリート面に存在しない実験材のエッジ長も計算から除外している。

(ii) ひびわれ幅の測定精度

提案する手法ではひびわれ中心線の全点に対して幅を算出する。点の間隔は撮影縮尺により若干変化するが、概ね0.8～1 mm 間隔であり、各サンプルはひびわれ長に比例して1000～3300点の測定点を持っている。表2は画像サンプル毎にその測定点から無作為に20点を抽出して求めた標準誤差である。結果は0.12～0.19 mm となった。また、図13には散布図を示す。ノイズの影響が現れ当初の目標よりやや誤差が大きく測定されたが、図13の散布図を併せてみると0.1～2.0mm の範囲で概ねひびわれ幅が測定可能なことが分かる。

誤差が大きい点は、僅かに途切れたせん断ひびわれ

がノイズにより見かけ上、連結したひびわれとなり測定された箇所（No.1），ひびわれの分岐部分で内接円が大きくなった箇所（No.2），ひびわれの角が落ち画像でエッジが不鮮明に写された箇所（No.3），ひびわれに剝離や骨材痕が重なった箇所（No.4）であった。

5.2 評 価

測定結果とともに一部で発生した細部におけるひびわれの抽出エラーについて、図14を参照しながら手法の有効性を検討する。

(i) 線構造を保存した画像データの階層構造化

図12のひびわれ抽出結果（No.1やNo.2）に示したとおり、細いひびわれやひびわれに似た細い筋も抽出されており、線構造を保存した階層構造化は機能している。ただし、この例のように明暗のみによって抽出した線構造は最終的にヒトがひびわれか否かを判定しなければならず、抽出したひびわれ候補と原画像を重ねて表示し、容易にチェックや修正が行える機能が実用システムの開発に際して不可欠であることが分かった。

サンプル No. 1 ←10cm→

サンプル No. 2 ←10cm→

サンプル No. 3 ←10cm→

サンプル No. 4 ←10cm→

図11 コンクリートひびわれサンプル4例

(ii) 円形フィルタによるひびわれの抽出

円形フィルタの作用性はルーフ型エッジの幅とコントラストにより変化することを予測し、組み合わせによっては抽出される線構造が逆転する可能性を示した(図6)。この現象がサンプル No. 1 や No. 2, No. 4 に現れている。図11, 図12を見るとコンクリート面に書いた白線や番号札、測定枠のエッジに円形フィルタが反応しているのが分かる。従来のひびわれ検査ではコンクリート面にチョークでマーキングすることが多く、実験結果はこのようなマーキングがひびわれ抽出の妨げとなることを示唆している。表面の黒いコンクリート面に白いマークがあると、コントラストの高いマークの特徴量が大きく算出され、2 値化閾値が押し上げられる。その結果、周囲のひびわれは閾値を下回り抽出漏れとなる。白線など極端な明部は計算から除外するなど、これらに対する新たな処理が必要なこと

が分かった。

また、サンプル No. 4 の左上部は全体に暗くコントラストが低いにもかかわらずひびわれが正しく抽出されている。逆に右下部は明るい反面、点在する汚れ領域の輪郭をひびわれとして誤認している。左上部の結果は画像を小ブロックに分け2 値化閾値を設定した効果の現れといえる。反対に右下部は特徴量の平均値から経験的に決めた2 値化閾値ではひびわれが無い時、ノイズが2 値化されることを示した。領域分割法の適用などによりステップエッジの輪郭を無視するような処理も必要ことが分かった。

(iii) ノイズの除去と詳細ひびわれの抽出

図14は細部におけるひびわれ抽出エラーである。画像は原画像あるいは1/4 縮小画像から数・の範囲を拡大したものである。coarse to fine の過程にはノイズに対する考案も組み込んだが、図14(a)(b)などノイズ

表 2 実験の結果

サンプル 番号	ひびわれ抽出結果					ひびわれ幅測定結果
	ひびわれ長[cm] (正解)	正しく認識した ひびわれ長[cm]	認識率[%]	誤ってひびわれ と認識したノイズ [cm]	誤認識率[%]	標準誤差[mm]
1	114.6	114.6	100	13.5	12	0.13
2	103.7	103.7	100	38.0	37	0.15
3	428.0	333.8	78	13.4	4	0.12
4	248.2	188.5	76	35.2	19	0.19

図12 コンクリートひびわれ抽出結果 4 例

分離が不十分な箇所も確認された。図14中の折れ線は抽出されたひびわれの中心線を示しているが、(a)(b)ともにノイズ上に中心線が位置しているところがある。これは(a)の右図に示すとおり、2値化状態でひびわれとノイズが連結したのが原因である。ことに(b)はひびわれ周囲の暗部が連結したものであり、2値化小領域がひびわれから外れてしまい、2値化結果の繋ぎ合わせによりノイズが連結されたことが原因である。

また、(c)はひびわれに析出した石灰の外側に暗部が線上に形成されており、とぎれたひびわれが連結された例である。(d)(e)はひびわれ周辺の点状ノイズが除去しきれず2値化の誤りが回復されていない。さらに、ひびわれ中心線の点間隔が長くなっているのは誤った移動が行われた結果である。(e)は細いひびわれの周りにある点状の細かなノイズが縮小画像で連結し太いひびわれと見なされた例である。2値化領域が広く取られノイズがブドウの房のように連結され回復

図13 ひびわれ幅の測定結果

困難に陥っている。このように細部のエラーを検証すると、ひびわれの存在は間違えてはいないが、繰返し逐次判別2値化結果にも誤りの発生があるのが分かる。細かいひびわれを太いと誤った際に必要となる形状によるチェック法や回復法が新たな機能として必要ことが分かった。

上述したように手法には幾つか改善の余地も残されたが、階層構造化画像の処理によりひびわれの形状パターンが抽出可能であり、また coarse to fine によりひびわれ幅の測定が可能になったことが分った。実験結果は手法の有効性を示したものと云え、本研究によりコンクリート構造物のひびわれ測定を合理化するシステムの実現可能性を示すことができたと考える。

6. まとめ

本研究では、コンクリート構造物の維持管理のため

図14 細部におけるひびわれ抽出エラー

巡視点検に利用するひびわれ測定装置に関して、携帯可能なカメラで写真撮影した画像からひびわれを自動測定する画像処理機器を想定し、幅0.1~2.0mmのひびわれの形状パターンと幅を自動測定する画像処理手法を提案した。

手法は階層構造化した画像をベースとし、微細ひびわれの線構造を保存しノイズを低減する論理フィルタ処理と縮小処理、円形フィルタの作用性を応用した線構造の抽出、計算コストを抑えるためにパーパス・ビジョン的な処理を取り入れた coarse to fine によるひびわれの自動2値化、最大内接円法によるひびわれ幅の測定などから構成した。

この手法を実際のコンクリート構造物のひびわれ画像に適用し検証した結果、以下を得た。

- ①ひびわれの線構造を残す画像の縮小により、帯領域とみなされた幅の太いひびわれは徐々に幅の狭い線構造に変換され、一方で細いひびわれは縮小画像においても情報が保持され、円形フィルタによりひびわれの形状パターンが抽出できた。実験では80%以上のひびわれが抽出可能であった。
 - ②画像を縮小しマクロ的視野に基づき形状パターンを抽出するため、局所的な線状ノイズをひびわれと誤る危険性が小さくなった。
 - ③円形フィルタの適用では画像を分割し2値化閾値を決定することにより、コンクリート表面の汚れなどひびわれ抽出を妨げるノイズの影響を抑えることができた。
 - ④抽出したひびわれの形状パターンと概略のひびわれ幅を初期値とする coarse to fine 画像処理により標準誤差0.12~0.19mmでひびわれ幅の測定が可能となった。
 - ⑤精細な画像になるに従って増加するデータ処理量は概略の形状パターンを利用した画像処理により効率化が図られた。
 - ⑥細部におけるひびわれの抽出エラーに対する処理手法の改良点が明らかとなった。
- 以上のとおり、実用システムの構築には幾つか改善すべき課題は残されたが、従来の現場作業の多くを室内作業に置き換える手法を示すことができたと考える。
- (受付日1998.3.6, 受理日1998.5.15)

参考文献

- 1) 杉正ほか：コンクリート構造物のひびわれによる

健全度評価について、コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム講演予稿集, 1988.

- 2) 島村秀樹ほか：路面画像の自動ひびわれ抽出, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 33, No. 6, pp. 16-25, 1994.
- 3) 土木学会編：コンクリート仕方書
- 4) Kodak 社：フィルム・テクニカルデータ
- 5) 富士写真フィルム 社：フィルム・テクニカルデータ
- 6) L.G. Shapiro: Data Structure for Picture Processing: a survey, Computer Graphics and Image Processing, Vol. 11, No. 3, pp.162-184, 1979.
- 7) 服部進ほか：空中写真によるステレオマッチングのための多段階相関法の改良(2), 写真測量とリモートセンシング, Vol. 25, No. 2, pp.24-38, 1986.
- 8) 奥水大和：産業応用から見た画像処理アルゴリズムの動向, O plus E 別冊号, 1986.
- 9) Toni Schenk, et al.: Towards an Autonomous System for Orienting Digital Stereopairs, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 57, No. 8, pp.1057-1064, 1991.
- 10) Mengxiang Li: Hierarchical Multipoint Matching, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 57, No. 8, pp.1039-1047, 1991.
- 11 a) 長尾真訳：デジタル画像処理, 近代科学社, pp. 198-204, 1978.
- 11 b) 同じく, pp.162-166, 1978.
- 12) 電子技術総合研究所：SPIDER ユーザーズマニュアル, 1980.
- 13) 共同システム開発：SPIDER-2 ユーザーズマニュアル, 1986.
- 14) 鈴木英夫：肺癌検出を目的とした胸部 X 線画像解析システム, 第16回画像工学コンファレンス論文集, pp.145-148, 1985.
- 15) 大津展之：判別および最小2乗基準に基づく自動閾値選択法, 電学誌, Vol. J63-D, No. 4, pp.349-356, 1980.
- 16) 斉藤泰一：判別閾値選択法の一改良, 情報処理論文誌, Vol. 22, No. 6, pp.596-599, 1981.
- 17) 尾上守夫：画像処理ハンドブック, 昭晃堂, 1990.