Crack Pixels Detection from Inner Side of Drain by Using Variable-sized Directional Filter

Toshiyuki Hatada Non-member (Gifu University)

Kunihiro Goto Student Member (Gifu University)

Fumihiko Saitoh Member (Gifu University)

Takayoshi OOSAKA Non-member (Tokyo Metropolitan Sewer-pipeline Service Co., Ltd.)

Shinji NUMAO Member (Nippon Koei Co., Ltd.)

Noriyuki HARIMOTO Non-member (Nippon Koei Co., Ltd.)

Keywords : crack, line detection, adaptive filter

This paper proposes a method to detect candidate pixels for cracks on an inner side of drain by image processing. Fig. 1 shows an image of an inner side of drain. As a crack is recognized as lines having a thin width, the conception of the proposed method is based on the line detection. The proposed method is comprised of two phases. One is line enhancement process, and another is the process for threshold determination by using features of cracks.

In paper, an adaptive filter that has variable directions and sizes to enhance cracks with arbitrary form is proposed. These two parameters are controlled to be adaptive the form of a crack. Fig. 2 shows a concept of the proposed adaptive filter.

The size of the filter is enlarged from the small size to the pre-decided large size sequentially. In every pixel, the directional filter as shown in Fig. 3 is applied to find the optimal direction of a crack. The direction with the maximum output value of the filter is selected as the direction of the crack. Fig. 4 shows a resultant image generated by the adaptive filter.

The continuous direction is an important feature of a crack. In the proposed method, thresholds to detect pixels on a crack are determined dynamically by using the directional strength in a local

block area. The resultant image by the adaptive filter is divided into multiple block areas and the variance of directions is calculated to determine the threshold to detect candidate pixels for a crack in every block area. Fig. 5 shows the detected candidate pixels for a crack by the above threshold technique.

Fig. 2. Concept of an adaptive filter

$$\begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -2 & -2 & -2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 1 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \\ -2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

Fig. 3. Example of a directional filter

Fig. 1. Image of the inner side of drain

Fig. 4. Result of filter process

Fig. 5. Experimental result

方向サイズ可変フィルタを用いた下水道内面ひび割れ候補画素の検出

非会員 幡田 敏行* 学生員 後藤 邦博*
 正 員 斉藤 文彦* 非会員 大坂 昂資**
 正 員 沼尾 信二*** 非会員 張本 紀行***

Crack Pixels Detection from Inner Side of Drain by Using Variable-sized Directional Filter

Toshiyuki Hatada*, Non-member, Kunihiro Goto*, Student Member, Fumihiko Saitoh*, Member,
 Takayoshi Oosaka**, Non-member, Shinji Numao***, Member, Noriyuki Harimoto***, Non-member

This paper proposes a method to detect cracks in the inner side of a drain by using the edge detection techniques. Cracks can be recognized as lines with a thin width. Therefore a method for extracting edges is assumed to be useful to detect cracks. To detect a crack with an arbitrary global form, the variable-sized directional filter is applied. This filter can be set at every pixel with an optimal size and with an optimal direction. After the filter process, the threshold technique that determines a threshold to detect a crack by using its global feature is processed. The experimental results show that the proposed variable-sized directional filter and the threshold technique were effective to detect cracks in the images of inner side of drain.

キーワード：ひび割れ，下水道，線検出フィルタ

Keywords : crack, drain, line detection filter

1. はじめに

コンクリートによって作られた構造物は頑強であるが、老朽化や地震等の災害により、ひび割れが生じる。下水道もコンクリートで建造されたものであり、その維持のためには、定期的な検査が必要となる。目視によって検出されたひび割れを分析し、診断するシステムは、いくつか提案されているが⁽¹⁾⁽²⁾、ひび割れの検出精度は、検査者の熟練度でばらつきが生じることや、検出の再現性が問題となるため、ひび割れ検出は自動化が望まれている。

コンクリート構造物からのひび割れ検出を自動化したシステムとして、レーザーを用いた検出システムが既に実用化されているが⁽³⁾、トラック型のレーザー計測車を用いるため、大型のセンシング装置が必要になる。本論文で対象と

図1 下水道内面画像の撮影

Fig. 1. Image recording of a drain.

する下水道の場合は、人間が入ることができない程度の細い管もあるため、大型のシステムは利用できない。現状の検査工程では、単眼カメラによる映像から検査員が目視によってひび割れを検出している。従って、カメラ映像による目視検出を自動化することを最終的な目的とする。

下水道内面画像は、まず、図1に示す様に全方位の可視光 CCD カメラを装着した走行ロボットによって撮影する。そして、動画画像内の各フレームに映っている下水道を、円周上に切り出し、展開した各フレーム画像を連結することで、図2に示す様な静止画像が得られる⁽⁴⁾。従って、図2に示した画像に下水道内面全体が撮影されている。静止画像より、ひび割れ候補画素を検出する手法として、画像をブロック領域に分割し、各ブロックについて Hough 変換⁽⁵⁾⁽⁶⁾を拡張した GSHT(Gray-scale Hough Transform)を適

* 岐阜大学工学部応用情報学科
 〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1
 Department of Information Science, Faculty of
 Engineering, Gifu University
 1-1 Yanai, Gifu City, Gifu 501-1193

** 東京都下水道サービス株式会社
 〒100-8699 東京都千代田区大手町 2-6-2
 Tokyo Metropolitan Sewer-pipeline Service CO., LTD.
 2-6-2 otetmachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8699

*** 日本工営株式会社
 〒102-0083 東京都千代田区麹町 5-4
 Nippon Koei Co., Ltd.
 5-4 Koujimachi, Tiyoda-ku, Tokyo 102-0083

用することで、直線的なひび割れを部分ごとに検出手法⁽⁷⁾が提案されているが、GSHT⁽⁸⁾では、全画素に対して投票処理を行うため、多くの計算コストを必要とする。

下水道には、汚れや水面の反射等、ひび割れ検出の妨げとなるものが多く、また、ひび割れそのものについても、濃度値が一定でなく形状も不定である。誤検出を抑えるためには、下水道内面に発生するひび割れに特化した手法が必要となる。本論文で提案する手法では、ひび割れの線幅が比較的細いことより、線検出を基本とする。線検出手法として、零交差法⁽⁹⁾や、Wavelet 変換による多重解像度解析を用いる手法⁽¹⁰⁾等が提案されているが、零交差法では微分値が変化する 1 画素幅の線が検出されることから、もともと極めて線幅の狭いひび割れの検出には向いていない。また、ひび割れの方向や線幅が不規則に変化するため、Wavelet 変換による手法では、多重解像度画像の解析の際に、基底関数の設定が困難と考えられる。提案手法では、線検出フィルタを適用した後に、閾値処理を施す流れを取る。ひび割れの方向や長さの変化に対応するために、方向、及びサイズを適応的に変化させる方向サイズ可変フィルタによって、ひび割れの部分ごとの不規則な変化に対応し、その処理結果を大域的に扱う閾値処理によって、ひび割れ候補画素と背景領域を識別する。

2. 下水道画像からのひび割れ候補画素検出手法

ここでは、ひび割れの特徴について述べた後、ひび割れ候補画素の検出手法について述べる。

〈2・1〉 ひび割れの特徴 図 2 に、本論文で扱う対象画像例を示す。画像中央の矢印付近に、ひび割れが確認でき、特徴として以下の 4 項目が挙げられる。

- (1) 周辺部よりも濃度値が低い
- (2) 細い線幅である
- (3) 背景構造物に対して長さがある

図 2 下水道内面画像
Fig. 2. Images of drains.

(4) 局所的には不定形状だが、大域的には方向性を持つ
(1)より、濃度値を閾値とした閾値処理手法が利用できると考えられる。しかし、図 2 から明らかである様に、背景構造物にも濃度値が低いものが含まれるため、濃度値のみを用いた閾値処理では不十分であることが予想される。

(1)に加え、(2)を併せると、ひび割れは線と見なすことができ、その検出手法には、線検出手法を用いることができると考えられる。線検出手法では、線検出フィルタによって、線を構成する画素におけるフィルタ反応値が高くなることから、原画像へ直接に濃度値による閾値処理を施す場合に比べ、誤検出の抑制が期待できる。しかし、ひび割れを線として捉えるだけでは、背景構造物のエッジ部分との識別は困難であり、フィルタ処理と閾値処理のそれぞれについて、特徴(3)、(4)を用いる手法が必要となる。

〈2・2〉 従来の線検出フィルタの問題点 広く知られた線検出フィルタとして、Prewitt フィルタ⁽¹⁰⁾、Sobel フィルタ⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾等が挙げられる。これら既存の線検出フィルタは、サイズ 3×3 画素の微分フィルタであり、それぞれを F と表記した場合、対象画像 I の座標 (i, j) における、フィルタの出力値 $O(i, j)$ は、次式で求められる。

$$O(i, j) = \sum_{u=0}^2 \sum_{v=0}^2 I(i+u-1, j+v-1) \cdot F(u, v) \dots\dots\dots (1)$$

式(1)から出力値 $O(i, j)$ は、重畳する 3×3 画素の局所領域中の濃度のみに依存し、その外側領域の濃度に影響されない。よって、狭い領域範囲で重畳するフィルタでは、〈2・1〉節で挙げた特徴(3)を利用できず、ひび割れも、背景構造物のエッジ部分と同程度に検出される。

方向性を考慮したフィルタとして、図 3 に示すように、フィルタを取り得る方向分用意し、画素ごとに方向角度を変化させる方向可変フィルタが考えられる。図 3 は、サイズ 3×3 画素の方向可変フィルタの例である。各画素について、図 3 のフィルタ(a)から(d)を、式(1)の F として対象画像に適用し、その最大値を記録したフィルタの出力を、座標 (i, j) の出力とする。画素ごとに線方向に最適なフィルタが

$\begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -2 & -2 & -2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \\ -2 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$
(a)	(b)	(c)	(d)

図 3 方向可変フィルタ
Fig. 3. Directional filter.

図 4 方向サイズ可変フィルタの概念
Fig. 4. Concept of variable-sized directional filter.

選択されるが、フィルタのサイズは一定なため、特徴(3)を十分に利用することはできない。

〈2・3〉 方向サイズ可変フィルタ 以上に述べた点から、〈2・1〉節で挙げた特徴を全て利用するには、ひび割れの形状に動的に適應するフィルタが有効と考えられる。〈2・2〉節で述べた方向可変フィルタは、画素ごとに方向を変化させることにより、特徴(1)、(2)、(4)を利用できるが、フィルタの重量可能なサイズが不明であるために、特徴(3)に対応できない。そこで、本論文では方向だけでなく、サイズも画素ごとに変化させることで特徴(3)に対応する手法を提案する。このフィルタの概念を図4に示す。灰色の長方形はフィルタを、その右隣の矢印がフィルタの方向を表す。図4(a)と(b)について、フィルタの方向が、それぞれのひび割れ部分に合わせて変化し、またサイズについては、(b)では(a)よりも、ひび割れの直線形状部に伴って長くなっている。方向とサイズの2つのパラメータを適應的に変化させるので、この手法を方向サイズ可変フィルタと呼ぶものとし、次章で処理の具体的な内容について述べる。

〈2・4〉 フィルタ出力の統合による閾値処理 方向サイズ可変フィルタは、フィルタ反応値の他に、動的に決定された方向、及び、サイズの各パラメータ値も出力する。フィルタサイズを大きくしても、フィルタ係数がひび割れに適合しなければ、反応値の向上には効果が表れず、逆に誤検出を招く可能性が考えられるため、その適用サイズには限界がある。特徴(4)より、方向性は、ひび割れの大局的な特徴であることから、画素ごとに得られた方向パラメータ値は、ある程度の領域ごとに扱うことで、背景構造物の領域との差が見出せられると考えられる。提案手法では、方向サイズ可変フィルタの適用後画像をブロック領域に分割し、それぞれのブロックについて、フィルタの出力を統合した結果を用いることで、フィルタ適用後画像に対する濃度の閾値を決定する。そして、画素ごとに設定した閾値によって、ひび割れ候補画素を検出する。詳しい処理の流れについては、4章で述べる。

3. 方向サイズ可変フィルタ

ここでは、方向サイズ可変フィルタの処理手順について述べる。フィルタの方向とサイズを決定する最も単純な方

図5 方向・サイズ可変フィルタのフローチャート
Fig. 5. Flow-chart of variable-sized directional filter.

法として、全ての組み合わせについて試すことが挙げられる。しかし、全方向について、あらゆるサイズのフィルタをテストすることは、計算コストの点から望ましくない。

方向サイズ可変フィルタでは、図5に示すように、まず、座標 (i, j) について用いるフィルタの方向を決定し、その方向についてフィルタサイズを徐々に伸長させ、適切なサイズを決定する。フィルタサイズの伸長とは、ひび割れの方向性により、角度決定で得られた角度 $\phi = \theta(i, j)$ に延長した先に、ひび割れ画素が連続している可能性が高く、逆にこの角度に対して垂直な方向については、ノイズとなる背景領域である可能性が高いことに着目し、単純に角度 ϕ の線を検出するよう、サイズを拡大するのではなく、角度 ϕ について両端に1ずつ、フィルタの長さとしては2ずつ伸長させる処理である。これにより、サイズは $l_0 \times l_0$ から、 $(l_0+2) \times l_0$, $(l_0+4) \times l_0$, ..., $(l_0+2 \times k) \times l_0$ という具合に変化し、初期サイズを除いて形状は長方形となる。図6に、サイズを 3×3 画素から 5×3 画素、 7×3 画素へと伸長する例を示す。

方向パラメータを d とし、フィルタサイズは $l \times l_0$ 画素の様に記述できるので、サイズのパラメータを l と表記するものとして、以下に具体的な処理手順を述べる。

〈3・1〉 フィルタサイズと方向分解能の関係 まず、フィルタのサイズと、方向分解能の関係について述べる。用いるフィルタは、方向可変フィルタと同様に、直線状に負の係数、その周辺に正の係数を設定する。図7中の番号を n とすると、各 n から、中央座標へ向かって引ける直線の数、一辺が l の場合 $(l+1)/2$ となり、この数がフィルタの分解能に対応する。よって、サイズ $l \times l$ 画素のフィルタにおける方向分解能 $D(l)$ は、次式で表される。

$$D(l) = l + (l - 2) \dots \dots \dots (2)$$

フィルタを伸長した場合でも、分解能は、サイズ $l \times l$ 画素の正方領域内で考えるものとし、式(2)で計算される。

x 軸が右向き方向に正、 y 軸が下向き方向に正となる座標系を用いた際の、フィルタ番号 n に対応する実際の角度は、

図6 フィルタサイズの伸長過程

Fig. 6. Expansion process of filter size.

図7 フィルタサイズ
Fig. 7. Filter size.

l を用いて、次式の関数 $R(l, n)$ で表される。

$$R(l, n) = \left(\frac{1}{4} - \frac{n}{D(l)} \right) \cdot \pi \dots\dots\dots (3)$$

〈3・2〉 角度の決定 用いるフィルタの角度は、線の方向に沿う角度、即ち、反応値が最大をとる角度となる。サイズ $l \times l$ 画素、方向 $R(l, n)$ のフィルタを $F_{l, R(l, n)}$ と表記すると、座標 (i, j) における反応値 $O_{l, R(l, n)}(i, j)$ は、式(1)を一般化した、次式によって計算される。

$$O_{l, R(l, n)}(i, j) = \sum_{u=0}^{l-1} \sum_{v=0}^{l-1} I\left(i+u-\left\lfloor \frac{l}{2} \right\rfloor, j+v-\left\lfloor \frac{l}{2} \right\rfloor\right) \cdot F_{l, R(l, n)}(u, v) \dots\dots\dots (4)$$

座標 (i, j) の画素において、反応値が最大となるフィルタの角度 $\theta(i, j)$ は、次式によって表される。

$$\theta(i, j) = R(l, n_{\max}) \\ n_{\max} = \max_n (O_{l, R(l, n)}(i, j)) \quad (n = 0, 1, \dots, D(l) - 1) \dots\dots\dots (5)$$

〈3・3〉 フィルタの伸長と角度の微調整 次に、得られたフィルタの角度について、サイズを $l_0 \times l_0$ から徐々に伸長する。フィルタは直線状の線画素を検出するものであるから、あるサイズパラメータ l について、伸長後のサイズパラメータを l' とし、フィルタの角度を ϕ とすると、伸長先の領域に線が連結している場合、次の関係式が成立し、フィルタ伸長が適切であるかを判断する基準となる。

$$O_{l', \phi}(i, j) > O_{l, \phi}(i, j) \dots\dots\dots (6)$$

式(6)の条件は、背景構造物の中に、極端に長い直線状構造物が含まれている場合も満たされるため、誤検出を防ぐために、フィルタの最大サイズ L を決めておく。また、式(2)より、伸長前のフィルタの方が、伸長後よりも方向分解能が小さいため、一方向分のフィルタで比べた場合、伸長後よりも広い角度についての情報を含んでいると考えられる。そこで角度 ϕ について、分解能 $D(l)$ で前後の角度 $(\phi - \phi'), (\phi + \phi')$ それぞれを持つフィルタとの反応値を求め、それらとの平均を、式(7)の $O_{l', \phi}(i, j)$ の代わりに用いる。これらより、サイズの伸長の継続を決定する条件式は、式(6)を改め、次式となる。

$$\left. \frac{O_{l', (\phi - \phi')}(i, j) + O_{l', \phi}(i, j) + O_{l', (\phi + \phi')}(i, j)}{3} > O_{l, \phi}(i, j) \right\} \dots\dots\dots (7) \\ l' \leq L$$

式(7)が成り立つ間、 l を l' で更新し、フィルタの伸長を

図8 フィルタ処理画像のブロック分割

Fig. 8. Block separation of filter processed image.

続ける。伸長の際には、 $O_{l', (\phi - \phi')}(i, j)$, $O_{l', \phi}(i, j)$, $O_{l', (\phi + \phi')}(i, j)$ の中で最大値を取った角度を用いて ϕ を更新し、伸長で角度分解能が増したことに對する角度の微調整を行う。最終的に得られたサイズ $l' \times l_0$ 画素のフィルタについて、その時の ϕ で $\theta(i, j)$ を更新し、 $O_{l', \phi}(i, j)$ の値を座標 (i, j) におけるフィルタ反応値とする。全画素に対して得られた $O_{l', \phi}(i, j)$ は、線検出フィルタの適用後画像であり、表記を I_F と改める。

4. フィルタ出力の統合処理を用いた閾値処理

方向サイズ可変フィルタを対象画像 I に適用して得られた濃淡画像 I_F から、ひび割れを白、背景を黒とした二値画像を求めるため、 $I_F(i, j)$ と $\theta(i, j)$ を統合した結果より濃度閾値を決定し、 I_F に二値化を施す。〈2・1〉節で挙げた特徴(4)を利用するため、フィルタの出力画像 I_F を図8に示すように、 $B_s \times B_s$ 画素の方形領域によって、 $X_b \times Y_b$ 個のブロック領域 $B(s, t)$ ($0 \leq s < X_b$, $0 \leq t < Y_b$) に分割し、各ブロック $B(s, t)$ ごとにフィルタの出力 $I_F(i, j)$ と $\theta(i, j)$ を扱う統合処理を行う。ここで統合処理とは、ある画素が、ひび割れ画素であるかどうかをブロックという大域的な領域内の情報を用いて識別する処理である。即ち、ブロック内における各々の画素を、ブロックという大域的な領域内のフィルタ反応値や、方向の連続性を評価することで、ひび割れ候補画素かどうかを識別する閾値をブロック単位に決定する処理である。 $B(s, t)$ ごとには、以下の特徴量を計算する。図8中のヒストグラムは、横軸に角度、縦軸をその頻度とした角度ヒストグラム $h(s, t)$ であり、角度の分解能は $D(L)$ である。大きいフィルタ反応値を重視するため、頻度は $I_F(i, j)$ を重みとする。図8(b), (c)に示すひび割れ領域では、図8(a)に示すノイズ領域に対し、角度ヒストグラムのばらつきが小さくなる。また、ノイズ領域はエッジが局所的に集中するため、濃度値の合計値が大きくなる傾向にある。これら特徴から、 $B(s, t)$ ごとの角度分散 $V(s, t)$ 及び、反応値の合計値 $B_{\text{sum}}(s, t)$ をパラメータとして、濃度の閾値決定を行う。閾値決定では、 $B(s, t)$ ごとに得たヒストグラムで角度分散を計算する手法と、 $B(s, t)$ と、その周辺ブロック $B(s', t')$ の情報を併せて角度分散を求める手法の2種類を〈4・4〉節と〈4・5〉節で検討する。

〈4・1〉 フィルタの角度の周期性 方向サイズ可変フィルタでは、フィルタ係数を直線状に設定するため、角度 α のフィルタと、角度 $\alpha \pm k\pi$ ($k = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$) のフィルタは等価である。よって、フィルタの角度は周期性を持つ。

〈4・2〉 重み付き角度ヒストグラム 角度ヒストグラム $h(s, t)$ を求める際には、ブロック内の座標 (i_b, j_b) について、角度 $\theta(i_b, j_b)$ から次式を満たすインデックス値 i_h を求め、 $h(s, t)[i_h] \sim I_F(i_b, j_b)$ を重みとして累積する。

$$R(i_h, L) \leq \theta(i_b, j_b) < R(i_h + 1, L) \dots\dots\dots (8)$$

但し、 $I_F(i_b, j_b)$ がブロック内での平均値より小さい場合は、有効性が低いものとして、 $h(s, t)$ に対する操作は行わない。また、対象画像には、動画像から静止画像を生成した際に生じた結合部に、縦方向の線上ノイズが含まれることから、 B_s に対して 80%以上の長さを持つ縦方向の直線はノイズと

見なし、この場合も $h(s, t)$ に対する操作を行わない。

このようにして求めた $h(s, t)$ について、高い濃度値の画素から得られたピークを重視するため、重みを 1 としたもう一つのヒストグラム $h(s, t)$ も求め、次式によってヒストグラム $h(s, t)$ の全インデックス値について、1 画素あたりの重みを掛け合わせてから正規化したヒストグラム $h'(s, t)$ を求め、以後の処理で用いる。

$$\left. \begin{aligned} h'(s, t)[i_h] &= \frac{h_{\text{temp}}(s, t)[i_h]}{\sum_{n=0}^{D(L)-1} h_{\text{temp}}(s, t)[n]} \\ h_{\text{temp}}(s, t)[i_h] &= h(s, t)[i_h] \cdot \frac{h(s, t)[i_h]}{h_i(s, t)[i_h]} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

〈4・3〉 フィルタの角度分散 $h(s, t)$ から分散 $V(s, t)$ を求める計算式は、 $B(s, t)$ での平均角度 $\phi_m(s, t)$ を用いて、次式で表される。

$$V(s, t) = \sum_{n=0}^{D(L)-1} S(R(L, n), \phi_m(s, t))^2 \cdot h'(s, t)[n] \dots\dots\dots (10)$$

但し、関数 $S(\alpha, \beta)$ は、フィルタ角度の周期性を考慮し、二つの角度 α 、 β の角度差を $\pi/2$ 以内で求める関数である。

$$S(\alpha, \beta) = \begin{cases} \pi - |\alpha - \beta| & (\text{if } |\alpha - \beta| > \frac{\pi}{2}) \\ |\alpha - \beta| & (\text{otherwise}) \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

また、平均角度 $\phi_m(s, t)$ は、図 9 の場合のように、ピークが両端にあるヒストグラムの場合は、単純計算では平均の意味合いより、ヒストグラム中央の角度 $R(L, D(L)/2)$ となるが、実際には $R(L, 0)$ か、 $R(L, D(L)-1)$ のいずれかとなる。そこで、フィルタの周期性を利用し、ピークがヒストグラム中央となるよう、ヒストグラムをシフトして平均角度 $\phi_m(s, t)$ を求め、その後にシフトした分の角度を戻す。

〈4・4〉 閾値決定法 前節で求めた角度分散値 $V(s, t)$ に加えて、章の始めで述べたように、ノイズの局所性を用いるため、 $B(s, t)$ での濃度値の合計値 $B_{\text{sum}}(s, t)$ の値も閾値決定のパラメータとし、それぞれの最大値に対する割合を用いた次式で、 $B(s, t)$ ごとの閾値 $T(s, t)$ を決定する。

$$T(s, t) = 255 \cdot \frac{V(s, t)}{(\pi/2)^2} \cdot \frac{B_{\text{sum}}(s, t)}{255 \cdot B_s} \cdot c \dots\dots\dots (12)$$

c は対象画像に応じて設定する定数であり、壁面の濃度やコントラストといった要素で決定される。 $T(s, t)$ のとりうる範囲 $[0, 255]$ で求め、これによってブロック間の閾値の差を大きくとるために、 c を加算ではなく乗算とした。ここで $T(s, t)$ が 255 を超えた場合は、255 へと抑える。 $T(s, t)$ は、ブロックの境界では不連続となるため、 $T(s, t)$ をブロックの中心に

図 9 角度ヒストグラム例
Fig. 9. Example of direction histogram.

おける閾値とし、周辺座標については、隣接ブロックの値を線形補間をした値を閾値とする。この処理を、画像 I_F 上の全ての座標について行い、二値の出力画像 I_T を得る。

〈4・5〉 周辺ブロックの情報をういた閾値決定法 ヒストグラムのピークは、ひび割れ領域で鋭く、ノイズ領域では不明瞭となるので、 $h'(s, t)$ に周辺ブロックのヒストグラム $h'(s', t')$ を $h'(s, t)$ とピークが揃うようにシフトしてから累積し、正規化したヒストグラム $h'_a(s, t)$ のピークは、ひび割れ領域ではより鋭く、ノイズ領域ではより不明瞭になると考えられる。そこで累積する際は、 $h'(s, t)$ 自体の情報を重視し、次式で求められる重み W を $h'(s', t')$ に掛け、 $h'(s, t)$ 自体には W_s を掛ける。累積先の対象は、 $B(s, t)$ での I_F の平均値 $B_{\text{mean}}(s, t)$ を距離とした範囲内のブロックとし、特徴量をより大局的に扱い、ひび割れとの差を見出すことを図る。

$$W(s', t', s, t) = \begin{cases} 0 & (\text{if } s' = s \text{ and } t' = t) \\ \frac{\cos\left(\phi_m(s, t) - \tan^{-1} \frac{t' - t}{s' - s}\right)}{\sqrt{(s' - s)^2 + (t' - t)^2}} & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

$$W_s(s, t) = \sum_{u=-B_{\text{mean}}(s, t)}^{B_{\text{mean}}(s, t)-1} \sum_{v=-B_{\text{mean}}(s, t)}^{B_{\text{mean}}(s, t)-1} W(u, v, s, t) \dots\dots\dots (13)$$

式(10)の $h'(s, t)$ を $h'_a(s, t)$ と置き換えることで $V_a(s, t)$ を求め、式(12)の $V(s, t)$ を $V_a(s, t)$ と置き換えて得た $T_a(s, t)$ を用いて〈4・4〉と同様に閾値処理を行い、出力画像 I_T を得る。〈4・4〉で述べた閾値決定法との比較は、次章にて述べる。

5. 評価実験

以上に述べた提案手法を実際の下水道内面画像に適用した結果について述べる。

〈5・1〉 実験条件 実験に用いる対象画像は、図 2 に示す解像度が 800(W)×1280(H)の、濃淡レベルが 8 ビットの画像 Image1, Image2 である。それぞれの画像について、予め目視により、ひび割れ画素を白(1)、背景画素を黒(0)としてトレースした二値画像 $I_d(i, j)$ を用意し、評価基準として用いる。方向サイズ可変フィルタにおける、サイズパラメータ l_0 及び L は、細かなエッジや、非ひび割れの直線構造物の影響を避けられる値として $l_0=7$ 、 $L=17$ とし、フィルタ係数は、実験で用いたひび割れ画像の全域について得られた平均的な濃度プロファイルから図 10 に示した値に設定した。尚、図 10 は $l=7$ 、 $n=3$ のフィルタ $F_{7,R(7,3)}$ の場合である。 l_0 を小さくすると、細かい線に強く作用し、逆に大きくする

2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
-7.0	-7.0	-7.0	-7.0	-7.0	-7.0	-7.0
-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

図 10 フィルタ係数例

Fig. 10. Example of coefficients of the variable-sized directional filter.

表 1 フィルタ反応値の結果比較

Table 1. Comparison of filter responded values.

Filter Image	Prewitt	DF	VSDF
Image1	3.06	3.43	7.60
Image2	2.54	3.04	5.52

図 11 フィルタ出力画像

Fig. 11. Output images by variable-sized directional filter.

と、長い線に作用する。 l_0 が小さいと、どの構造物に対しても、フィルタの出力が大きくなり、フィルタの伸長方向が、ひび割れに対して正しく決定されない恐れがある。 L を小さくすると、細い線のみに作用し、大きくすると、長い線まで検出される可能性がある。今回は、 l_0 を 3 から 31 まで、 L を、7 から 49 までの範囲で実験を行ったが、点状の構造物ではなく、方向性をもった構造物に対して反応値が高くなる点で、 $l_0=7$ 、 $L=17$ の場合に最も良好な結果が得られた。閾値処理のパラメータは、ブロックサイズ B_s を、ひび割れ、及び局所的なコントラストの高い背景構造物を捉えられるサイズとして $B_s=32$ と決定し、 c の値は、経験的に $c=35$ とした。これらのパラメータは、Image1, Image2 共に共通の値とする。

〈5・2〉 フィルタ処理の評価 Image1, Image2 を対象画像 I とし、方向サイズ可変フィルタと、比較対象として、〈2・2〉節で述べた Prewitt フィルタで得られる出力画像 I_F を計算し、分子にひび割れ画素、分母に背景画素それぞれの $I_F(i,j)$ の合計値とした値 E_F を次式で求め評価値とする。

$$E_F = \frac{\sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{H-1} I_F(i,j) \cdot I_c(i,j)}{\sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{H-1} I_F(i,j) \cdot (1 - I_c(i,j))} \quad (14)$$

以下、方向のみ可変フィルタを DF(Directional Filter)、方向サイズ可変フィルタを VSDF(Variable-sized Directional Filter) と表記し、フィルタそれぞれについて求

表 2 識別率結果比較

Table 2. Comparison of discernment rates.

Method Image	MT(I)	MT(I_F)	PT1	PT2
Image1	86.01	99.19	99.49	99.64
Image2	72.54	97.90	99.38	99.63

めたフィルタ反応値比 E_F を評価値として、対象画像ごとに表 1 に示す。定量的には、Prewitt フィルタに対して、DF は良好な結果値となり、方向性を考慮した成果が表れていると考えられる。VSDF では、更に良好な結果となり、DF に対して、Image1 では 2.2 倍、Image2 については 1.8 倍の向上が見られた。表 1 に示したフィルタ反応値は、背景構造物とひび割れを正しく識別しているほど高くなる。上記の結果から、VSDF はサイズを可変にした効果が見られ、DF と比較しても、ひび割れ画素の検出に、より適したフィルタであると考えられる。VSDF を施した出力画像を図 11 に示す。Image1 及び Image2 共に、ひび割れに対しての反応値が高いことが確認できるが、Image2 においては、画像下部のノイズに高い反応値を示していることが確認された。この部分の影響により、表 1 における評価値が、Image1 よりも Image2 の場合に低くなったと考えられる。

〈5・3〉 閾値処理についての評価比較 閾値処理の出力画像 I_T は、ひび割れ候補画素検出としての出力であり、その位置精度について、ある程度の誤差が許容される。ここでは、真のひび割れ画素について、8 近傍の範囲内までを許容する。ひび割れ検出では、真のひび割れ画素を検出することが重要であるが、一方で、非ひび割れ領域については、ひび割れ画素として誤検出される画素数は少ない方が良く、どちらの要素もひび割れ検出の出力としては重要である。ここでは、ひび割れの画素の検出漏れと、背景に発生する誤検出の双方を評価するために、真のひび割れ画素の 8 近傍領域に検出された画素数をひび割れ画素数 E_{TC} 、背景を背景として正しく識別した画素数を背景識別画素数 E_{TB} とし、次式により識別率 $E_T(0 \leq E_T \leq 100)$ を計算する。ひび割れ画素を検出し、かつノイズ画素を背景から検出しなければ、 E_{TC} と E_{TB} が共に大きくなり、全体の評価値 E_T が大きくなる。逆に、ひび割れ画素が検出されない場合やノイズが検出される場合、 E_T は小さくなる。

$$E_T = \frac{E_{TC} + E_{TB}}{W \cdot H} \cdot 100 \quad (15)$$

評価値 E_T は、全画素数に対して、ひび割れをひび割れ、背景を背景と正しく識別した画素数の割合を表している。比較対象として、目視で最適な閾値決定をする手法 MT(Manual Thresholding method) を挙げる。対象画像 I に直接 MT を用いる場合を MT(I)、フィルタ出力画像 I_F に対して用いる場合を MT(I_F) と表記するものとする。また、フィルタ出力画像 I_F に対して用いる、〈4・4〉節で述べた閾値処理を PT1(Proposed Thresholding 1)、〈4・5〉節で述べた閾値処理を PT2(Proposed Thresholding 2) と表記し、 E_T を、MT(I)、MT(I_F)、PT1、PT2 それぞれについて計算した結果を表 2 に示

図 12 ひび割れ検出結果(Image1)

Fig. 12. Detected crack (Image1).

図 13 ひび割れ検出結果(Image2)

Fig. 13. Detected crack (Image2).

し、出力画像 I_F を図 12, 図 13 に示す。MT(I) で用いた閾値は、Image1 について 167, Image2 について 172, MT(I_F) では、Image1 について 63, Image2 について 53 とした。

MT(I) は定量的に最も悪く、視覚的にも、ひび割れと背景とが混在してしまっている。他の手法については、MT(I_F), PT1, PT2 の順に、定量的は僅かながら向上し、視覚的には、はっきりとした向上が認められる。

MT(I_F) は目視で閾値を決定したものの、画像全体に一定の閾値を用いるため、フィルタ処理で高い反応値を示した背景構造物が検出されている。PT1 では、ブロックごとの統合処理によって閾値を決定することで、ノイズを MT(I_F) よりも抑えられたと考えられる。更に、PT2 では、PT1 で局所的に誤検出される条件を満たしていたブロックが、周辺ブロックの情報を利用することで検出条件を満たさなく

なり、ノイズを減少させる効果が得られたと考えられる。しかし、PT1, PT2 いずれについても、ブロックのサイズよりも小さい領域、即ち 32×32 画素よりも狭い範囲で、ひび割れの方向が特に複雑に変化している部位や、ひび割れ上にノイズが確認できる部位にて欠落箇所も見られる。

〈5・4〉 処理時間 CPU: Pentium4 2.8GHz, OS: LINUX の環境下で、方向サイズ可変フィルタの処理時間は 18 秒であった。対象画像中の直線状構造物の量によって、フィルタの伸長回数が異なるため、画像ごとに処理時間の変動が予想されるが、実験画像の 2 枚については、ほぼ同じ時間であった。閾値処理は 1 秒未満となり、全体の合計処理時間は、18 秒であった。下水道の検査では、夜間に一区間の下水道全体の検査完了が求められる。一区間の下水道から得られる画像枚数は約 2000 枚である。従って、一枚

あたり 18 秒の処理時間であれば、10 時間で全ての処理が完了し、現状でも検査時間の要求は満たすと言える。

2. ま と め

ひび割れの大局的な方向性に着目し、画素ごとにフィルタの方向とサイズが変化する方向サイズ可変フィルタを適用した出力に、統合処理を施すことで、下水道内面画像から、ひび割れ候補画素を検出する手法を提案した。実験結果から、提案手法のフィルタ処理によって、ひび割れに対する背景領域との反応の割合が、従来のフィルタに対し 2 倍近く向上したことが確認された。また、フィルタの出力である、反応値及びフィルタ方向を統合することで、フィルタ出力画像への一律の閾値設定を施した場合よりも、ノイズを減少させることができた。しかしながら、ひび割れの一部が、 32×32 画素より狭い領域で特に複雑に方向が変化している場合や、ひび割れのコントラスト低い部位では背景構造物と誤識別された部分も見られ、これらを改善するため、より大局的な方向特徴を用いる更なる改良が、今後の課題として考えられる。

(平成 17 年 2 月 21 日受付, 平成 17 年 9 月 15 日再受付)

文 献

- (1) T. Yasuda, S. Taniguchi, S. Kamewada, and G. Okano : "Development of a crack evaluation system for superannuated tunnels.", *J. of Construction Management and Eng.* VI, 435/VI-15, pp.139-144 (1991)
安田 亨・谷口親平・亀和田俊一・岡野吾一:「老朽トンネルにおけるクラック診断システムの開発」, 土木学論 VI, 435/VI-15, pp.139-144 (1991)
- (2) R. Kuroki and H. Yoshikawa : "Crack Diagnosis Expert System by Introducing Fuzzy Measure", *Proc. of Annual Conference of the Japan Soc. of Civil Eng.*, Vol.52, pp.248-249 (1997)
黒木礼則・吉川弘道:「ファジィ測度を用いたひび割れ診断エキスパートシステムの構築」, 土木学会年次学術講演会講演概要集共通セッション, Vol.52, pp.248-249 (1997)
- (3) K. Terada and N. Hatami : "An Automated Crack Analysis Sytem", *J. of the Japan Soc. of Civil Eng.*, Vol.83, No.3, pp.25-26 (1998-3) (in Japanese)
寺田啓治・梶見尚彦:「自動ひび割れ解析システム」, 土木学誌, **83**, 3, pp.25-26 (1998-3)
- (4) 脇川武美:「下水道管渠内面展開図化システムの開発」, 第 35 回下水道研究発表会講演集, pp.312-314 (1998)
- (5) 興水大和:「直線パターン検出のための HOUGH 曲線追跡型アルゴリズム」, 信学技報, PRL85-2 (1985)
- (6) 中川雅通・佐藤俊輔:「Hough 変換によるパターン特徴抽出」, 信学技報, MBE87-139 (1988)
- (7) 山口友之・橋本周司:「Gray-scale Hough 変換を用いたコンクリート表面のひび割れ検出」, 信学技報, PRMU2004-61 (2004-09) pp.57-64 (2004)
- (8) H. Okuda and K. Deguchi : "Gray Level Edge Behavior for the Gaussian Blurring Filters and Its Application to Edge Extractions", *ISPIJ Trans.*, Vol.36, No.10, pp.2244-2251 (1995-10)
奥田浩人・出口光一郎:「ガウシアンフィルタによる濃淡エッジの振舞いとエッジ抽出」, 情報学論, **36**, 10, pp.2244-2251 (1995-10)
- (9) S. Mallat and S. Zhong : "Characterization of Signals from Multiscale Edges", *IEEE Trans. on PAMI*, Vol.14, No.7, pp.710-732 (1992)
- (10) I. E. Abdou and W. K. Pratt : "Quantitative Design and Evaluation of Enhancement/Thresholding Edge Detectors", *Proc.*

of the IEEE, Vol.67, No.5, pp.753-763 (1979-5)

- (11) L. Kitchen and A. Rosenfeld : "Edge Evaluation Using Local Edge Coherence", *IEEE Trans. on SMC*, Vol.11, No.9, pp.597-605 (1981-9)

幡 田 敏 行

(非会員) 2005 年 3 月岐阜大学卒業。現在、同大学工学研究科博士前期課程在学中。画像処理の応用技術に関する研究に従事。

後 藤 邦 博

(学生員) 2001 年岐阜大学工学部応用情報学科卒業。2003 年同大学院工学研究科博士前期課程修了。現在、同大学院工学研究科博士後期課程在学中。遺伝的アルゴリズム、画像処理の研究に従事。

斉 藤 文 彦

(正員) 1981 年慶応義塾大学工学部数理学科卒業。日本 IBM(株)等を経て、現在、岐阜大学工学部応用情報学科教授。博士(情報科学、工学)。マシンビジョン、視覚情報処理の研究に従事。精密工学会、電子情報通信学会、画像電子学会等会員。

大 坂 昂 資

(非会員) 1974 年東京都下水道局入局。2006 年東京都下水道サービス株式会社派遣。現在、技術部技術開発課課長補佐、下水道管路内調査技術開発に従事。

沼 尾 信 二

(正員) 1978 年宇都宮大学大学院工学研究科修了。日本工営株式会社入社、現在に至る。地中線・監視制御・画像処理の研究開発に従事。技術士(電気・電子部門、総合技術監理部門)。

張 本 紀 行

(非会員) 1993 年武蔵工業大学大学院工学研究科修了。日本工営株式会社入社、現在に至る。画像処理・監視制御の研究開発に従事。技術士(情報工学部門、総合技術監理部門)。情報処理学会会員。