

# Gray-scale Hough 変換を用いたコンクリート表面の ひび割れ検出

山口 友之<sup>†</sup>      橋本 周司<sup>††</sup>

本報告は、鉄筋コンクリート構造物の代表的な破損であるひび割れの画像検査の高精細化を実現する手法に関するものである。コンクリート表面を撮影したデジタル画像からひび割れを検出するために、2値画像を対象とする Hough 変換をグレースケール画像に拡張した Gray-scale Hough 変換(GSHT)を適用し、ひび割れを局所的に直線近似する。GSHT を用いることにより、ひび割れの局所的な直線性と方向性を考慮した検出が可能になる。GSHT を画像の局所領域で行うことにより、光ムラ、シミ等のノイズを多く含む画像に対しても、ロバストにひび割れを検出することができた。

## Crack detection on concrete surface image using gray-scale Hough transform

Tomoyuki Yamaguchi<sup>†</sup>      Shuji Hashimoto<sup>††</sup>

This paper proposes a new crack detection technique to promote the efficiency and laborsaving for visual inspection of concrete surface. The crack is typical breakage of a reinforced concrete structure. In order to detect a crack on a concrete surface image, we assume that a crack can be approximated with a straight line in a local domain. Gray-scale Hough transform(GSHT) is applicable for gray-scale image gives crack features with regard to the linearity and orientation in the local domain. The proposed method realizes crack detection robustly in the concrete surface image which includes noises, such as an irregular shading and a blem.

### 1. 緒言

本報告は、鉄筋コンクリート構造物の代表的な破損であるひび割れの画像検査の高精細化を実現する手法を提案するものである。

近年、土木・建築分野において、構造物の安全性を検討し維持するために画像処理による外観検査が強く求められている。構造物に最も幅広く使用される材料である鉄筋コンクリートの表面には、構造物の耐震性や材料の劣化等を推定する上で極めて重要となるひび割れが発生する。従来のコンクリート表面のひび割れ抽出には、人間による目視・スケッチ等の手法が主流であったが、近年、画像処理により効率化・省力化を実現する手法もいくつか提案されている。

筆者らは、いくつかの画像処理技術を組み合

わせることにより、コンクリート表面を撮影したデジタル画像から自動的にひび割れを抽出・解析するシステムを提案している[1][8]。河村は、対話型 GA を用いて画像処理の際のパラメータを最適化し、ひび割れ抽出の半自動化を図っている[2]。両方の手法とも複数の画像処理を組み合わせることによってひび割れを検出することを可能としているため、複雑な処理を必要とする。また、既存の画像処理手法の組み合わせであるためにひび割れ独自の特徴を十分には考慮していない。

本報告ではひび割れの幾何学的特徴を考慮したひび割れ検出手法を提案する。提案手法では、まず、コンクリート表面を撮影したデジタル画像からひび割れを検出するために、前処理としてひび割れの存在する領域(ひび割れ領域)を検出する。次に、検出された領域のみに2値化処理を施す。ひび割れ領域の検出には、2値画像を対象とする

<sup>†</sup> 早稲田大学大学院理工学研究科  
Graduate School of Science and Engineering, Waseda University  
<sup>††</sup> 早稲田大学工学部応用物理学学科  
Dept. of Applied Physics, Waseda University

Hough 変換をグレースケール画像に拡張した Gray-scale Hough 変換(GSHT)を適用し, ひび割れを局所的に直線近似する.

GSHT を用いることにより, 従来はひび割れの輝度値に注目して画像処理を行っていたのに対し, ひび割れの局所的な直線性と方向性(GSHT で検出された直線の投票値と方向)を特徴量として付加することが可能になる. GSHT はノイズを多く含む画像に対しても, ロバストにひび割れを検出することができるばかりでなく, 処理の簡略化も図れる.

## 2. Gray-scale Hough 変換

Gray-scale Hough 変換(GSHT)は, 2 値画像に行う Hough 変換[3][9]をグレースケール画像に拡張した Hough 変換である. Lo and Tsai[4]は 4 次元のパラメータ空間で GSHT を行っている. Kesidis[5]は, パラメータ空間は通常の Hough 変換と変わらないが, 複数の閾値で制限されたテーブルを用意することによって GSHT を実現している. しかし, 両方の手法とも同じ輝度値で構成される直線を検出することを想定しているため, ひび割れのような輝度値が滑らかに変化している場合に適用させるには不向きな手法である.

本報告における GSHT は投票値を工夫することにより, 次元数を拡大することなく, テーブルを用意せずに直線を検出する. 投票値には,

- 輝度値
- 輝度値と平均輝度値の差分
- を標準偏差で除算した値

の 3 つの手法を検討した.

### 2.1 量子化誤差

$\rho - \theta$  パラメータ空間で行う 2 値画像の Hough 変換の直線式は, デジタル画像の座標値( $x, y$ )を用いると式(1)で表される.

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta. \quad (1)$$

Hough 変換の基本的な投票方法は, 入力画像内の黒画素の座標値( $x, y$ )を式(1)に代入したと

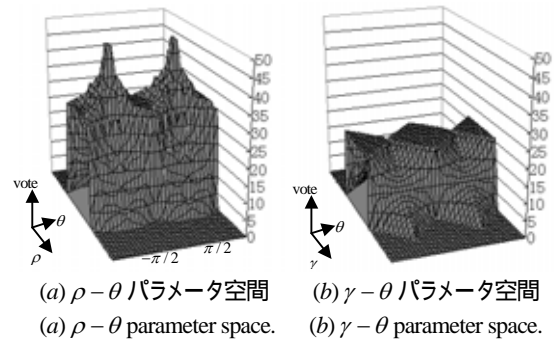


図1 パラメータ空間の比較(M=10)  
Fig.1 Comparison of parameter space(M=10).

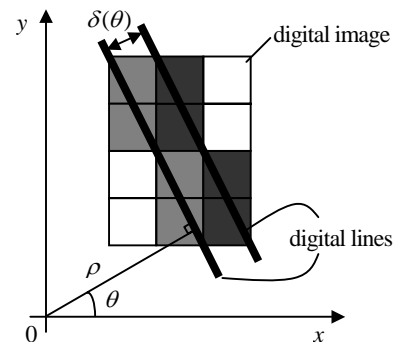


図2 デジタル直線の間隔  
Fig.2 Distance of digital line.

き, 式(1)を満たすような  $c(\rho_i, \theta_j)$  の投票数を 1 増加させるものである. ここで,  $c(\rho_i, \theta_j)$  はセルと呼ばれるパラメータ空間上の 2 次元領域である.

全画素を黒画素とみなして  $\rho - \theta$  パラメータ空間に投票を行った結果を図 1(a)に示す. ここで, 画像サイズは  $(2M+1) \times (2M+1)$ [pixel]( $M=10$ )とし, 画像中心を中心座標とする. 今回は  $\rho$  方向の標本化幅  $\Delta\rho$  は 1.0,  $\theta$  方向の標本化幅  $\Delta\theta$  は式(2)とした.

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta &= \arctan(1/M), \\ (-\pi/2 \leq \theta < \pi/2). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

この場合, 図 1(a)のように  $\theta = \pi/4$  毎にピークが生じる. これは画像がデジタルデータであることに起因する. 隣り合うデジタル直線の間隔は  $\theta$  に依存し,  $\theta$  毎に間隔は異なる. 図 2 に示すように, この間隔を  $\delta(\theta)$  とすると,  $\delta(\theta)$  は式(3)から算出できる.

$$\delta(\theta) = \max(|\cos \theta|, |\sin \theta|). \quad (3)$$

式(3)を用いて,  $\rho$  を  $\delta(\theta)$  で規格化して, 新しいパラメータ  $\gamma(\theta)$  を式(4)のように定める.

$$\gamma(\theta) = \frac{x \cos \theta + y \sin \theta}{\delta(\theta)}. \quad (4)$$

式(4)を用いて, 図 1(b)に図 1(a)と同条件で Hough 変換を行った結果を示す. 図 1(b)では, 投票値のピーク値は線分の角度のところになる [6][7].

このように,  $\gamma - \theta$  パラメータ空間を用いて Hough 変換を行うと投票空間のひずみが緩和できる. この手法は GSHT においても効果的なパラメータ空間である.

## 2.2 Gray-scale Hough 変換の原理

ひび割れはひび割れ方向に滑らかに輝度変化するため, 輝度値を投票する GSHT が有効であると考えられる. そこで, GSHT における投票値として, 以下のような 3 種を検討した.

$$S = \sum s$$

$$S = \sum (s - ave)$$

$$S = \sum (s - ave) / \sqrt{\sigma^2}$$

ここで,  $S$  は投票値,  $s$  は輝度値,  $ave$  は領域の平均輝度値,  $\sigma^2$  は領域内の分散である.

以上の投票値を用いて GSHT を行うことを考える. この投票値 GSHT の直線式は式(4)を用い,  $\gamma - \theta$  パラメータ空間で投票を行う. まず, 画素  $(x_i, y_j)$  を用いるとは式(5)となる.

$$\gamma(\theta) = \frac{x_i \cos \theta + y_j \sin \theta}{\delta(\theta)}. \quad (5)$$

式(5)により描かれた軌跡の通るパラメータ空間のセル  $c(\gamma_k, \theta_l)$  に  $s_{ij}$  を投票する. セル内に蓄積された投票値が最大となるセル  $c(\gamma_{\max}, \theta_{\max})$  を求め, 式(6)を用いて直線を検出する.

$$\gamma_{\max}(\theta_{\max}) = \frac{x \cos \theta_{\max} + y \sin \theta_{\max}}{\delta(\theta_{\max})}. \quad (6)$$

本報告では,  $c(\gamma_{\max}, \theta_{\max})$  に蓄積された  $S$  を「ひび割れ値」と呼ぶ. , , の各投票値によるひび割れ値の比較は 4 章で行う.

## 3. ひび割れの方向性

コンクリート表面を撮影したデジタル画像内に存在するひび割れは, 局所的に見ると 1 本の直線で近似できる. 従って, 画像全体のひび割れは直線を接続したものと考えられる(図 3). そこで, 画像を格子状の小領域に分割し, 小領域毎に GSHT で直線を検出し, ひび割れ値を算出する. また, ある領域  $A$  で検出された直線を延長した方向の隣接領域  $B, C$  には, その直線と接続するような直線がひび割れとして存在する可能性が高い.

デジタル画像を小領域に分割することを考える際には, 小領域のサイズが重要になる. 文献[1]のひび割れ自動計測システムを用いて, ある建造物のコンクリート表面を撮影した  $3040 \times 2008$ [pixel] のデジタル画像 1 枚に存在するひび割れ 1 本の長さ[pixel]のヒストグラムを図 4 に示す. また, 図 5 に示すように, 連続するひび割れの角度差  $\alpha$  は, 図 6 に示すような分布になった. ここで, ひび割れの分岐点は, 幾何学的な分岐と輝度変化で評価している.

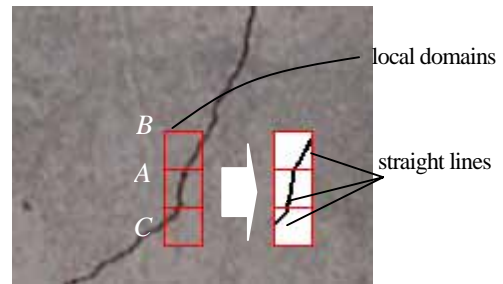


図 3 局所領域内のひび割れ  
Fig.3 Crack of local domain.

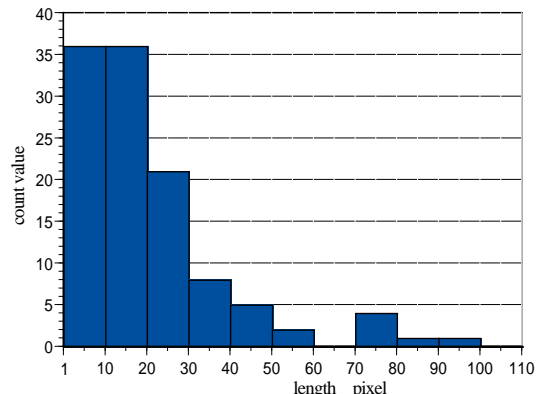


図 4 ひび割れ長さのヒストグラム  
Fig.4 Histogram of crack length.

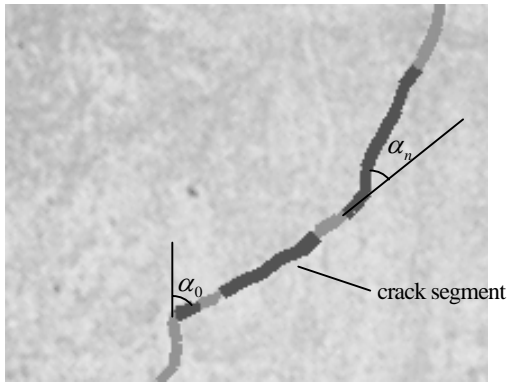


図5 連続するひび割れの角度差  
Fig.5 Angle difference of continuous cracks.

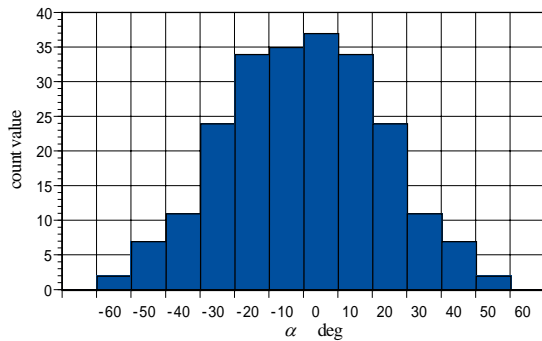


図6 角度差のヒストグラム  
Fig.6 Histogram of angle difference.

図4から、ひび割れ1本の長さは20[pixel]までが多く、平均長さは20.447[pixel]となった。これにより、小領域のサイズはGSHTでは奇数がよいため、今後用いる窓サイズは21×21[pixel]とした。

次に、図6から連続するひび割れの角度差の関係が分かる。図6の縦軸の頻度を正規化し、隣接する領域間の角度差による重み付けパラメータ $w_\theta$ を決定する。

次に、重み付けの手順について述べる。まず、21×21[pixel]の小領域に画像全体を分割する。分割後に各領域でGSHTを行い、ひび割れ値と検出された直線の $\gamma$ 、 $\theta$ を抽出する。各領域のひび割れ値が最大の領域から処理を実行する。ここで、図3を参考にして領域A、Bを考える。領域A、Bの角度差 $\alpha$ はGSHTによるパラメータ $\theta$ を用いると式(7)から算出できる。

$$\alpha = \theta_A - \theta_B. \quad (7)$$

ここで、領域A、Bの $\theta_{\max}$ を各 $\theta_A$ 、 $\theta_B$ とする。

式(7)で算出された $\alpha$ を図5に示すヒストグラムを参照し、 $\theta$ に対する重み付け量 $w_\theta$ を決定する。

GSHTはひび割れを近似して直線を検出するため、領域間の接続点が不連続になるが、通常、ひび割れは必ず繋がっているため、領域間の接続点は連結している。接続点のずれ、すなわち $\gamma$ 方向のずれは一定範囲での一様分布で与えられるものとした。

$\gamma$ 方向のずれを考慮するには、まず、領域Aの直線 $l_A$ と領域Bの境界との接続点 $p(x_s, y_s)$ を算出する。次に、すでに領域BにおいてGSHTで検出した直線 $l_B(\gamma_B, \theta_B)$ を $p(x_s, y_s)$ に平行移動させ、式(8)を用いて平行移動後の直線 $l_{B'}(\gamma_{B'}, \theta_B)$ を算出する。

$$\gamma_{B'} = \frac{x_s \cos \theta_B + y_s \sin \theta_B}{\delta(\theta_B)}. \quad (8)$$

式(8)で求めた $\gamma_{B'}$ と領域Bの元の $\gamma_B$ のずれによる重み $w_\gamma$ は、一様分布から式(9)を用いて決定する。今回はブレの程度を $10\delta(\theta_B)$ とした。

$$w_\gamma = \begin{cases} 1, & (|\gamma_{B'} - \gamma_B| \leq 10\delta(\theta_B)), \\ 0, & (|\gamma_{B'} - \gamma_B| > 10\delta(\theta_B)). \end{cases} \quad (9)$$

式(7)と式(9)から領域Bへの重み付け量 $w_{tB}$ は、領域Aのひび割れ値 $W_A$ を用いて式(10)とした。

$$W_{tB} = W_\theta \times W_\gamma \times W_A \times 0.5. \quad (10)$$

式(10)の0.5は経験値である。ここで、式(10)が非0である場合に、領域Aにも重み付けを行う。

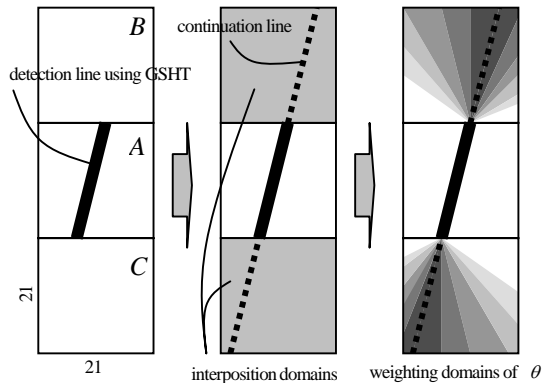


図7 方向性による重み付け  
Fig.7 Weighting by directivity.

領域  $A$  の直線が隣接領域と干渉する数は複数である. 干渉する領域数を  $N$  として, 領域  $A$  への重み付け量  $W_{IA}$  は式(11)から算出する. また,  $W_{\theta}$  と  $W_{\gamma}$  は式(10)と同様の値を用いる.

$$W_{IA} = (W_{\theta} \times W_{\gamma} \times W_B \times 0.5) / N. \quad (11)$$

以上の手順を図 7 にまとめて示す.

## 4. 実験

### 4.1 GSHT の投票値の比較

2章で述べた GSHT における 3 つの投票値の比較を行う.

#### (1) 投票値 と の比較

投票値の比較を行う際に, テスト画像として図 8 の 4 つを用いる. 画像サイズは  $21 \times 21$  [pixel] とし, それぞれ原画像とシェーディング補正画像の組み合わせである. シェーディング補正とは, 画像に生じる光ムラやシミ等を除去するために背景を補正したものである. ここでは文献[1]に提案されている Wavelet 変換等を用いて光ムラやシミ等を除去し, シェーディング補正を行うシステムを用いてシェーディング補正画像を作成した.

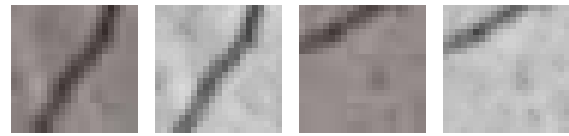
GSHT の  $\gamma$ - $\theta$  パラメータ空間の形状で投票値の評価を行う. 図 8 に対して と の投票値を用いて GSHT を行ったときのパラメータ空間の形状を図 9 に示す.

図 9(e) から, 投票値 の場合には原画像で GSHT を行うとピーク値の形状が判断できない. 一方, 投票値 の場合には原画像とシェーディング補正画像の形状はほぼ同じである. 従って, 投票値 を用いると画像の状態に左右されずにピーク値を検出することが可能である.

#### (2) 投票値 と の比較

投票値 と を比較する際のテスト画像を図 10 に示す. 投票値 と は領域の平均輝度値との差分を用いているため, (1)より, シェーディング補正を行っていない原画像をテスト画像とした.

図 10 に投票値 と で GSHT を行い算出した領域毎のひび割れ値の分布を図 11 に示す.



(a) original 1 (b) shading 1 (c) original 2 (d) shading 2

図 8 テスト画像

Fig.8 Test image.

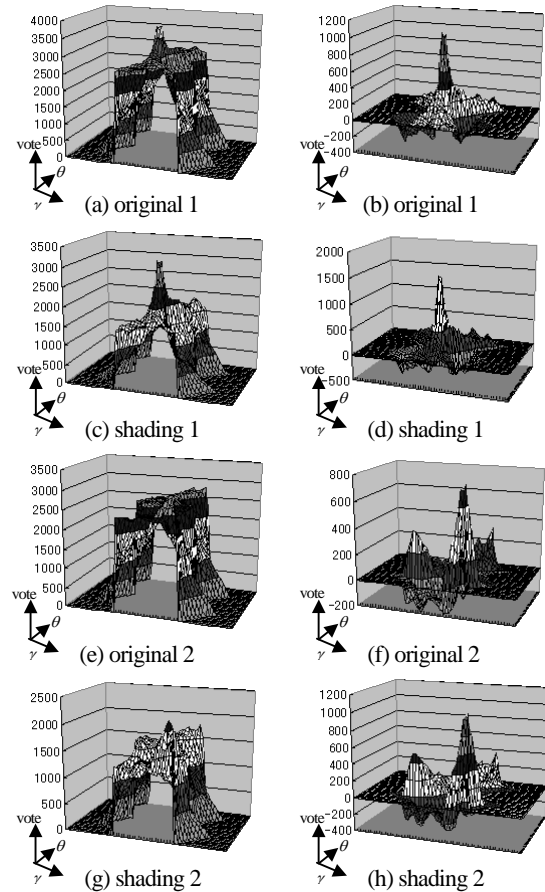


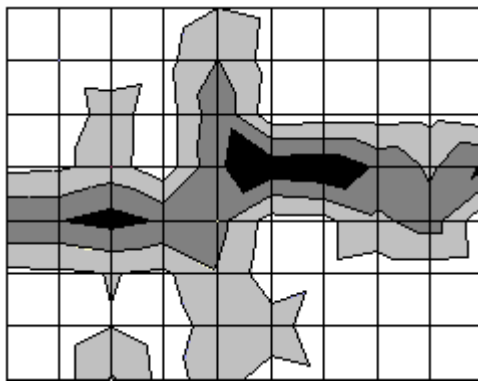
図 9 投票値の違いによるパラメータ空間の形状

Fig.9 Parameter space form by voting difference.



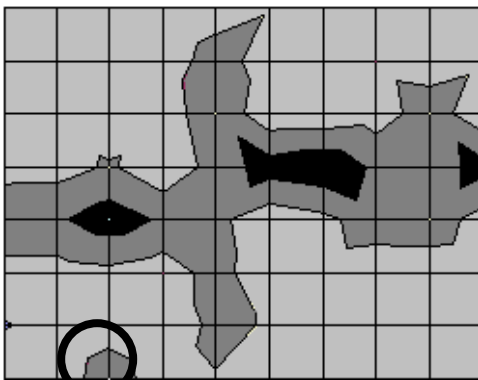
図 10 テスト画像

Fig.10 Test image.



□ 0 - 15 □ 15 - 30 ■ 30 - 45 ■ 45 - 60

(a) vote



same area

□ 0 - 15 □ 15 - 30 ■ 30 - 45 ■ 45 - 60

(b) vote

図 11 領域毎のひび割れ値

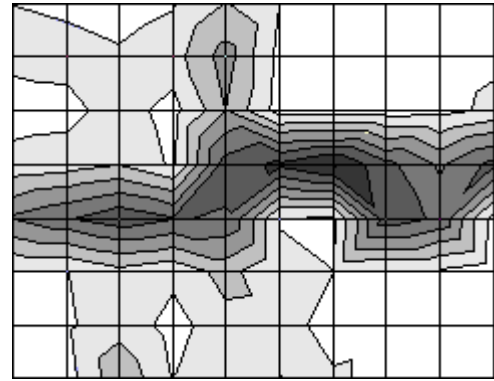
Fig.11 Crack value in each domain.

投票値 を用いると、各領域の標準偏差で除算を行うため、ひび割れ領域と背景の差が小さくなっている。ひび割れ検出には背景との差が大きい方がよい。また、背景にひび割れ領域と同程度の30~45のひび割れ値を持つ部分が生じてしまった(図11(b)の黒円部分参照)。従って、投票値には領域平均輝度値との差分が望ましいことが分かった。

## 4.2 ひび割れ検出実験

4.1 節で GSHT における投票値を選定することができた。そこで、2章と3章の理論に基づいてひび割れ領域を検出する実験を行った。さらに、ひび割れ領域の検出後に2値化処理を施しひび割れを検出した。

まず、図10を入力画像としてGSHTを行い、方



□ 0 - 15 □ 15 - 30 □ 30 - 45 ■ 45 - 60 ■ 60 - 75 ■ 75 - 90 ■ 105 - 120 ■ 120 - 135 ■ 135 - 150

図 12 重み付け後の領域毎のひび割れ値

Fig.12 Crack value of every domains after weighting.

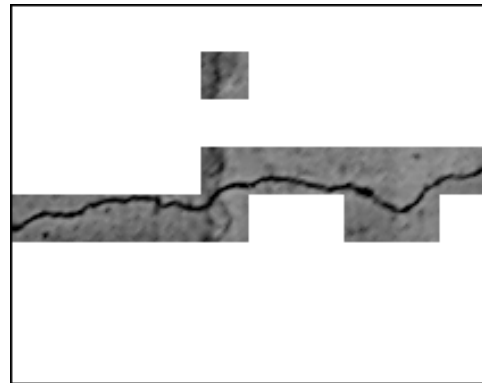


図 13 ひび割れ領域の検出

Fig.13 Crack domain detection.

向性の重み付けを行う。図12に重み付け後のひび割れ値の分布を示し、図13にひび割れ値に閾値を設け、ひび割れ領域と背景を分別した結果を示す。

また、図14にGSHTを用いて検出した直線を示す。図15に図13を図10に重ねたものを示す。

図12から、ひび割れ方向の重み付けにより図11(a)よりもひび割れ値45~60の領域が拡大していることが確認できる。また、図13、図14、図15から、ひび割れの幾何学的特徴を考慮することによって、ひび割れ領域を検出することが可能であることが分かる。しかし、直線的なノイズを誤検出する部分も存在した。これは、局所領域サイズの変更や隣接領域を考慮することによって、除去できると考えている。

図13で検出した領域に2値化処理を施したものを

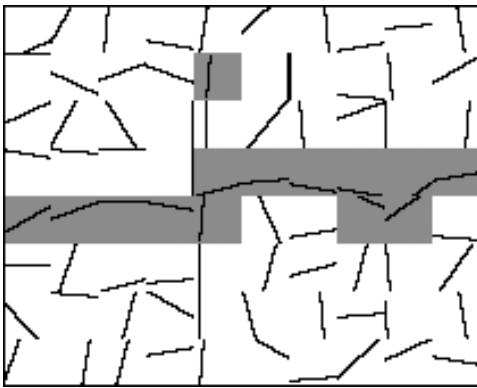


図 14 直線検出  
Fig.14 Line detection.

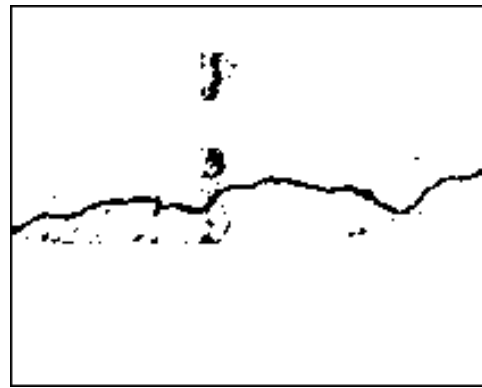


図 16 ひび割れ領域の 2 値化  
Fig.16 Binarization of crack domains.

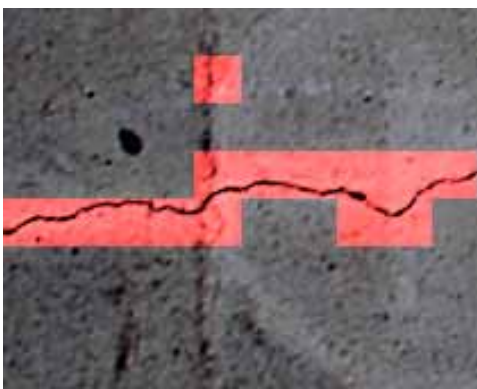


図 15 ひび割れ領域の重ね合わせ(gray domain)  
Fig.15 Crack domain superposition.

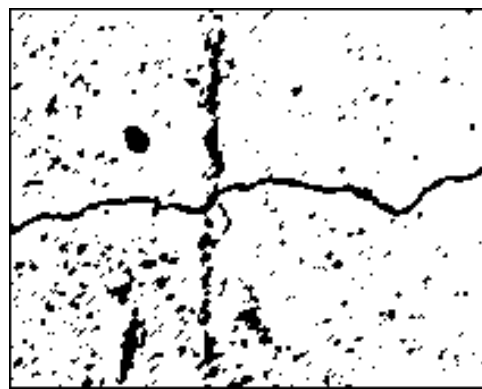


図 17 従来手法の結果  
Fig.17 Result of existing algorithm.

図 16 に示す . 比較のため , 図 10 にシェーディング補正を行った後に 2 値化処理する従来手法の結果を図 17 に示す . ここで , 2 値化処理の閾値は , 2 値化後のひび割れが途切れない最適な値に設定した .

図 16 , 図 17 を比較すると図 17 は原画像にそのまま 2 値化処理を行ったため , 光ムラや壁の汚れ等の原因によりノイズが非常に多い . 一方 , 図 16 はひび割れ領域のみ 2 値化処理を行っているためノイズを押さえることができた .

## 5. 結言

本報告では , コンクリート表面を撮影したデジタル画像に , ひび割れの局所的な直線性と方向性を考慮し , Gray-scale Hough 変換を行うことによってひび割れを検出する手法を提案した . 実際のひび割れ画像で実験を行うことによって本手法の

有効性を示せた .

得られた結論は以下のとおりである .

- (1) GSHT の投票値に領域の平均輝度値との差分を用いることにより , シェーディング補正を行わずに , 原画像にそのまま適用させることが可能になる .
- (2) ひび割れの方向性を考慮し , 実データに基づいた領域間の直線の変化角度によって , ひび割れ値の重み付けを行うことにより , ひび割れ領域の検出精度が向上する .
- (3) ひび割れ領域の検出後に単純な 2 値化処理を施すだけで , ひび割れを検出することが可能になる .

今後の課題として , 現状は原画像を小領域に分割して GSHT を行い , ひび割れ領域を検出しているが , 領域ではなく , そのままのひび割れを検出する手法を検討する必要がある . また , ひび割れ

を直線近似せずに，別の幾何学的手法も検討したいと考えている．

**謝辞** 本研究の一部は，文部科学省 21 世紀 COE プログラム(研究拠点形成費補助金)「超高齢化社会における人とロボット技術の共生」の研究助成により行われました．厚く御礼申し上げます．

## 参考文献

- [1] 伊藤厚史, 橋本周司, コンクリート表面の高精細画像計測, 第 66 回情報処理学会全国大会公演論文集, pp.565-566, 2004
- [2] 河村圭, 宮本文穂, 中村秀明, 佐藤亮, 対話型遺伝的アルゴリズムによるデジタル画像からのひび割れ抽出, 土木学会論文集, No.742/VI-60, pp.115-131, 2003
- [3] P.V.C.Hough, Method and means for recognizing complex pattern, U.S.Patent No.3069654, 1962
- [4] R.Lo, W.Tsai, Gray-scale Hough transform for thick line detection in gray-scale images, Pattern Recognition, 28, pp.647-661, 1996
- [5] A.L.Kesidis, N.Papamarkos, On the gray-scale inverse Hough transform, Image and Vision Computing, 18, pp.607-618, 2000
- [6] 和田俊和, 藤井高広, 松山隆司,  $\gamma - \omega$  ハフ変換-可変標本化による  $\rho - \theta$  パラメータ空間のひずみ除去と投票軌跡の直線化, 電子情報通信学会論文誌, D- , Vol.J75-D- , No.1, pp.21-30, 1992
- [7] 森本正志, 尺長健, 末永康仁, 量子化を考慮した Hough 変換, 電子情報通信学会技術研究報告, PRU89, pp.1-8, 1989
- [8] A.Ito, Y.Aoki, and S.Hashimoto, Accurate Extraction and Measurement of Fine Cracks from Concrete Block Surface Image, Proc.of IECON2002, 2002
- [9] 松山隆司, 輿水大和, Hough 変換とパターンマッチング, 情報処理, 30, 9, 1989