

コンクリートクラック計測および路面状態判断への ウェーブレット変換の応用

青木 広宙 (慶應大学大学院) 中島 真人 (慶應大学)

堀井 清之 (白百合女子大学) 斎藤 兆古 (法政大学工学部)

Application of Wavelets to Measurement of Concrete Cracks and Discrimination of the Road Condition

Hirooki AOKI*, Masato Nakajima (Keio Univ.),

Kiyoshi HORII (Shirayuri Collage) and Yoshifuru SAITO (Hosei Univ.)

ABSTRACT

In this paper, we propose a method for image processing by applying vector field theory and vector wavelets transform. The process of this method consists of making vector data from pixel value and multi resolution analysis for the vector data. The method is applied to measurement of concrete cracks and discrimination of road condition. The method can reduce the quantity of information about spots and texture of illumination, resulting in exactly extracted cracks. With the method, we can decide the surface condition of road quantitatively.

Keywords: Wavelets, Vector Field, Visualization by differential equations, Image processing, Optical measurement

1. 緒言

最近のコンピュータテクノロジーの目覚ましい発展を背景に、画像処理の工業的応用が盛んに行われている。コンピュータビジョンやロボットビジョンという言葉に代表されるように、CCD等から入力される画像情報をコンピュータにより自動的に認識させる試みも活発に行われ、実用化されているものも少なくない。これらは、これまで人間が手間隙を欠けていた作業の省力化、省時間化に貢献する技術として、今後もその応用分野は拡大していくものと考えられる。

建設業においては、建築構造物などに対する各種調査の効率化、高精度化が求められており、また、調査の定量的な評価が可能となると考えられることから、画像処

理を用いた調査法に対する期待が高まっている[1]。

我々は、CCDカメラ等により取得された画像に対して処理を行い物体の表面状態を評価・判断する手法に関する研究を行ってきた。今回は、コンクリート表面のクラック計測とアスファルト道路の路面状態判断を例にとり、これらに対するウェーブレット変換応用の有用性について検討する。

以下に、画素の濃淡値をベクトルポテンシャルの1成分と見なし、ベクトル場の概念を画像に適用する方法について示す。この方法によりベクトルデータとして再構成された画像データに対する2次元ベクトルウェーブレット変換の適用について論じる。以上を用いたコンクリート表面画像からのクラック抽出およびアスファルト道路路面状態を定量的に扱う方法について検討する。

2. 画像のベクトル化

画像データは、濃淡値をマトリックス状に配置した画素から構成されており、画素の濃淡値はスカラー量と見なされる。これをベクトルポテンシャルの1成分と解釈することも可能である[2]。Fig. 1 に示すような隣接する4つの画素がそれぞれ持つ濃淡値を、画素に垂直なベクトルポテンシャルの成分 H と見なすと、画素の濃淡値の変化率は勾配演算でなく、回転演算で計算される。回転演算により、濃淡値の変化率は、画素平面 x 方向 y 方向それぞれのベクトル成分 J_x 、 J_y として表わされ、 H との間に以下の式が成り立つ[3]。

$$\nabla \times \mathbf{H} = J_x \mathbf{i} + J_y \mathbf{j} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & H \end{bmatrix} = \frac{\partial H}{\partial y} \mathbf{i} - \frac{\partial H}{\partial x} \mathbf{j} \quad (1)$$

4つの隣接する画素を考えると、式(1)は中心差分を用いて離散値として以下の式に近似される。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \begin{pmatrix} \frac{H_{i+1,j} + H_{i+1,j+1} - H_{i,j} - H_{i,j+1}}{\Delta y} \\ \frac{-H_{i+1,j} + H_{i+1,j+1} + H_{i,j} - H_{i,j+1}}{\Delta x} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式(1)(2)より、隣接する4つの画素を1つの単位として考えれば、 x 、 y は画素間の単位長であるから、座標 (M, N) におけるベクトル成分 J_x 、 J_y は、周辺における4つの画素の濃淡値 $H_{i,j}$ 、 $H_{i+1,j}$ 、 $H_{i,j+1}$ 、 $H_{i+1,j+1}$ を用いて、次式で表わされる。

$$\begin{aligned} J_{x(M,N)} &= H_{i+1,j} + H_{i+1,j+1} - H_{i,j} - H_{i,j+1} \\ J_{y(M,N)} &= -H_{i+1,j} - H_{i,j+1} + H_{i+1,j+1} + H_{i,j} \end{aligned} \quad (3)$$

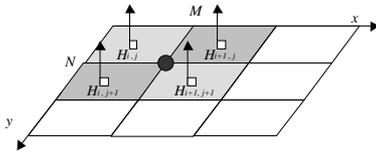


Fig. 1 Vector potential of pixel

式(3)で得られるベクトルは、画素間の濃淡値の差が大きい部分ではその大きさは大きく、差が小さい部分ではその大きさは小さくなる。また、ベクトルの向きに関して、式(3)で得られるベクトルは、濃淡の差によって境界が生じると考えるならば、その境界の連続する方向と等しい

方向を持つ。

3. ベクトルウェーブレット変換

2次元に分布するベクトルデータに対して、離散値系ウェーブレット変換を実施する方法について述べる[3]。

画像は xy 座標系であるから、 x 方向の基底 \mathbf{i} と y 方向の基底 \mathbf{j} は直交する。したがって、座標 (M, N) におけるベクトル \mathbf{Z} の各成分 J_x 、 J_y とウェーブレット変換行列 W 間の内積は、

$$W \cdot \mathbf{Z} = W \cdot J_{xM,N} \mathbf{i} + W \cdot J_{yM,N} \mathbf{j} \quad (4)$$

となる。したがって、ベクトルのウェーブレット変換は、ベクトルを構成する成分ごとに2次元ウェーブレット変換を実施することによりなされる。

$n \times n$ の2次元座標に存在するベクトルに対して多重解像度解析を行う方法について示す。まず、 xy 各成分 J_x 、 J_y からなる n 行 n 列の行列 M_x 、 M_y より、次式より n 行 n 列のウェーブレットスペクトラム行列である S_x 、 S_y をそれぞれ求める。ただし、 n は2のべき乗の整数であり、行列 M_x 、 M_y は $\log_2 n$ レベルの解像度に分解される。

$$\begin{aligned} S_x &= W M_x W^T \\ S_y &= W M_y W^T \end{aligned} \quad (5)$$

ウェーブレットスペクトラム行列 S_x 、 S_y それぞれを構成する要素の中から、各解像度レベルに対応する要素のみを残しそれ以外の要素を0と置いた n 行 n 列のウェーブレットスペクトラム行列 $S_{x,l}$ 、 $S_{y,l}$ を、次式によりウェーブレット逆変換することにより、多重解像度解析が行われ、各解像度レベルの行列 $M_{x,l}$ 、 $M_{y,l}$ が構築される。ただし、 l は解像度レベルを示し、 $1 \leq l \leq \log_2 n$ である。

$$\begin{aligned} M_{x,l} &= W^T S_{x,l} W \\ M_{y,l} &= W^T S_{y,l} W \end{aligned} \quad (6)$$

各解像度レベル l に対応するウェーブレットスペクトラム行列を構成する要素 $s_l(M, N)$ は、元のウェーブレットスペクトラム行列を構成する要素 $s(M, N)$ の値を用いて、以下のように決定される。

$$s_l(M, N) = \begin{cases} s(M, N) & \dots \begin{cases} 1 \leq M \leq 2^l, 1+2^{l-1} \leq N \leq 2^l \\ 1+2^{l-1} \leq M \leq 2^l, 1 \leq N \leq 2^l \\ 1+2^{l-1} \leq M \leq 2^l, 1+2^{l-1} \leq N \leq 2^l \end{cases} \\ 0 & \dots \text{それ以外} \end{cases} \quad (7)$$

4. コンクリートクラック検出

式(1)を用いて、Fig. 2 に示したサンプル画像のベクトル化を行う。サンプル画像は 32×32 画素であり、ベクトル化された画像データは、 32×32 要素である。サンプル画像は、コンクリートクラック画像を簡略化したものである。一般に、CCDカメラにより撮影されたコンクリート壁面は、クラックの他に汚れや照明によるテクスチャを含む画像である。

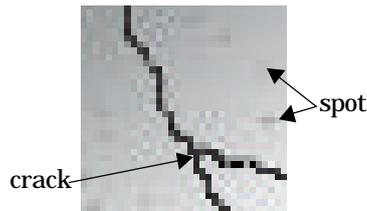


Fig. 2 Sample data of a crack in the wall

ベクトル化された画像を構成するベクトルは、以下の特徴を持つことがわかる。

- ・クラックの部分において、ベクトルの方向はクラックの伸びる方向と等しい。
- ・コンクリート面におけるテクスチャの部分ではベクトルの大きさ、方向が等しい。
- ・汚れの部分では、汚れの部分で円を描くように分布している。

以上の特徴に着目し、ベクトル画像に対してウェーブレット変換による多重解像度解析を施し、画像中からテクスチャおよび汚れを除去し、クラックの抽出を行う。

Fig. 4 に多重解像度解析の結果を示す。

解像度レベルの低い画像は、ベクトルの向きが低い空間周波数で変動する成分を多く含んでいる。特に解像度レベル1は、そのベクトルの向きから、テクスチャの持つ面情報を多分に含んでいると考えられる。

汚れの情報を多く含有する解像度レベルは5および6であるが、これらのレベルは同時にクラックの情報も含んでいる。しかし、レベル4には汚れの情報はほとんど含まれていない。そこで、レベル4から6の行列を構成するベクトルの大きさについて、各要素ごとに掛け算することにより、要素ごとに3つのレベル全てに含まれる情報のみが残り、汚れのようにすべてのレベルに存在しない情報が削除された行列が作成される。この新たに作成された行列に対して、さらに、レベル6のベクトルの大きさを足し算することにより、汚れの情報量が少ないクラック画像を描画することができる (Fig. 5)。

実際に CCD で撮影したコンクリート壁面の画像に対して、ベクトル化を施し、更にベクトルウェーブレット変換による多重解像度解析を行い、その結果得られたコンクリートクラック画像 (128×128 画素) を Fig. 6 に示す。

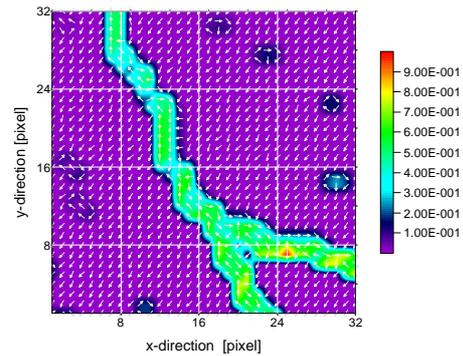


Fig. 3 Rotation vector of sample data

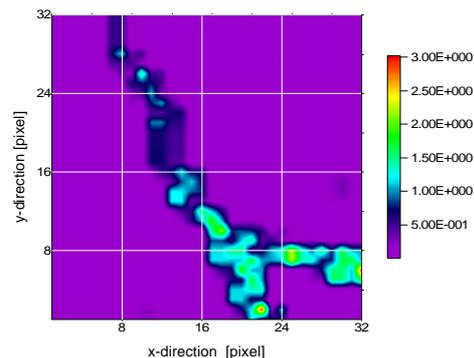


Fig. 5 Extracted crack

5. 道路状態の把握

以上で示した方法を、アスファルト道路路面の老朽化状態判別に適用する。アスファルト道路は、同じ時期に舗装されたものであっても、自動車のタイヤが通過する部分としない部分で老朽化に差が生じる。Fig. 7 に示すように、交通量の大きい部分 (左) は少ない部分 (右) と比較して、骨材が露出している。アスファルト道路路面の老朽化状態判別を自動化するためには、老朽化状態を表わす特徴量が必要である。ここでは、路面画像をベクトル化し、さらにベクトルウェーブレット変換により多重解像度解析を行い、各解像度レベルの分散をアスファルト道路路面の老朽化状態判別のための特徴量として用いる手法を提案する。

Fig. 8 に示したとおり、交通量の大きい部分と少ない部分では、解像度レベルにおける分散の分布が異なる。これは、交通量の大きい部分においては、露出した骨材により、濃淡値の乱れが大きいためである。

6. 結論

本研究では、コンクリート表面のクラック調査およびアスファルト道路路面状態判別に対して画像のベクトル化およびベクトルウェーブレット変換を応用することの有効性を検討した。それぞれの方法において、判別の自動化を行うためには、基準となる特徴量の抽出が重要であり、画像のベクトル化およびベクトルウェーブレット変換は、特徴量の抽出にも有効であると考えられる。

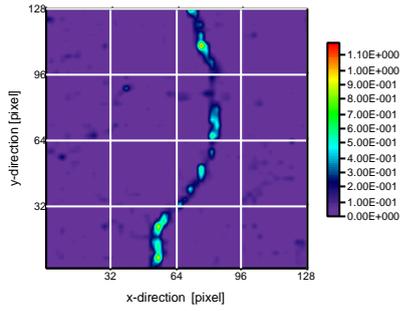


Fig. 6 Extracted crack

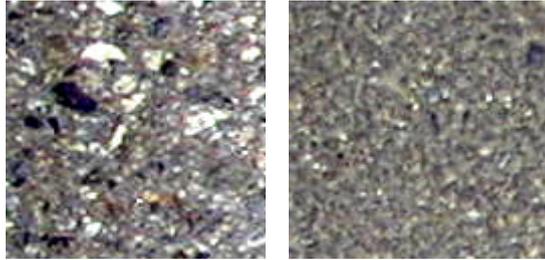


Fig. 7 Graphics of road

参考文献

- [1]三浦正之他:“画像処理技術を利用したコンクリートひびわれ計測法の研究”, 鹿島建設技術研究所年報第36号
- [2] Yoshifuru Saito and Tosiyasu L. Kunii," Field Theory of Computer Graphics and Its Potentials," *IEEE Visualization '99* to be submitted
- [3]斎藤兆古:"ウェーブレット変換の基礎と応用 - Mathematica で学ぶ - ", 朝倉書店, 1998

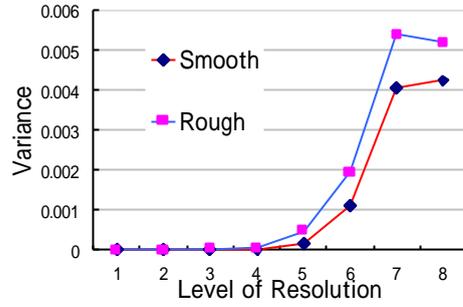
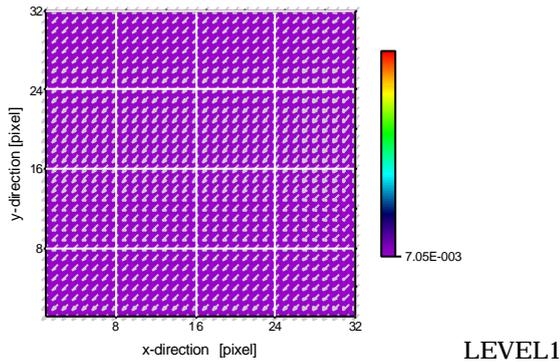
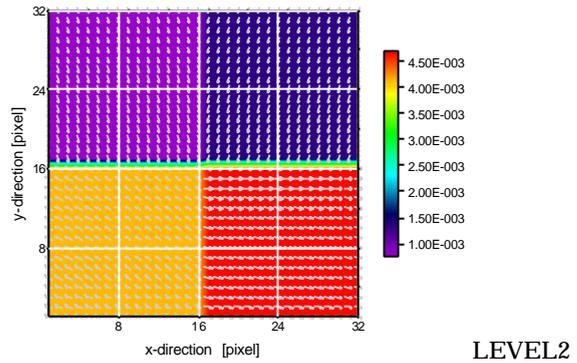


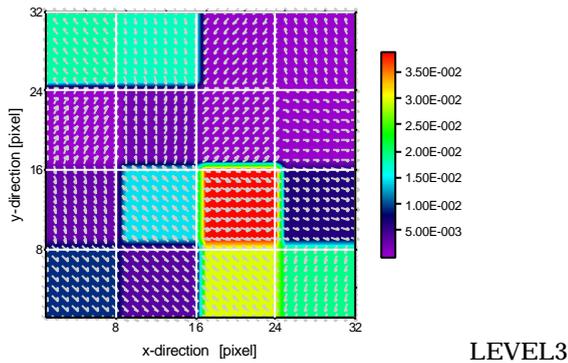
Fig. 8 Variance of each resolution level



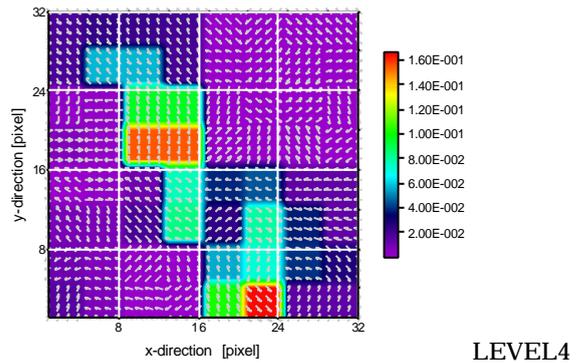
LEVEL1



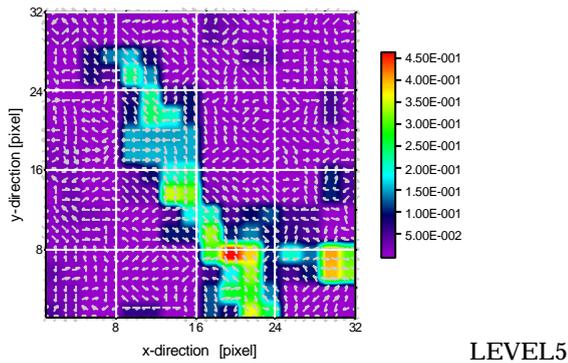
LEVEL2



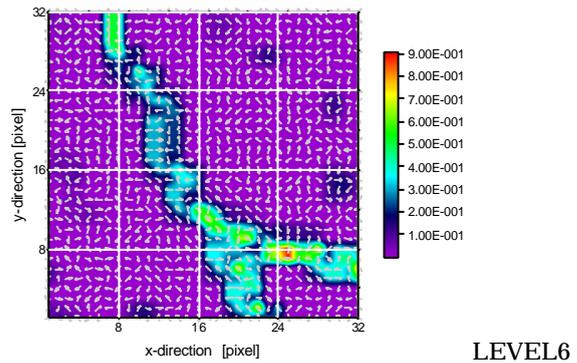
LEVEL3



LEVEL4



LEVEL5



LEVEL6

Fig. 4 Multi resolution analysis of vector graphics data