

コンクリート画像からのクラック検出におけるフィルタの検討 A Consideration of Local Filters for Crack Extraction from Concrete Surface Image

栗野 直之[†]
Naoyuki Awano

小堀 研一[‡]
Ken-ichi Kobori

1. はじめに

高度経済成長期に建設されたコンクリート建造物は耐用年数の問題から補修や点検作業が急務となっている。点検作業を効率的に行うためには、デジタルカメラで撮影した画像から画像処理によって自動でクラックを検出することが重要である。また、広範囲にわたる検査においては膨大な撮影画像を対象とすることも多いため、高速にクラックを検出できることも重要である。本研究では、画像処理における様々な局所フィルタをコンクリート壁面画像に適用し、クラック検出における有用性を考察する。

2. クラック強調および抽出のためのフィルタ

クラックを抽出するための処理として、画像のノイズを除去する処理、クラック部となる線状成分を強調する処理に分類して以降説明する。

2.1 ノイズ除去

2.1.1 バイラテラルフィルタ

ノイズを除去するための代表的なフィルタは平滑化フィルタである。しかし、ノイズを大幅に除去できるメリットはあるが、同時にエッジまで消滅してしまう。そこで、エッジをある程度維持したまま、エッジ以外の部分を平滑化するバイラテラルフィルタがある。入力画像を $f(i, j)$ 、出力画像を $g(i, j)$ としたとき、任意の $(2w + 1) \times (2w + 1)$ 画素に対するバイラテラルフィルタは式(1)のように表される。

$$g(i, j) = \frac{\sum_{n=-w}^w \sum_{m=-w}^w f(i+m, j+n) e^{-\frac{m^2+n^2}{2\sigma_1^2}} e^{-\frac{(f(i, j)-f(i+m, j+n))^2}{2\sigma_2^2}}}{\sum_{n=-w}^w \sum_{m=-w}^w e^{-\frac{m^2+n^2}{2\sigma_1^2}} e^{-\frac{(f(i, j)-f(i+m, j+n))^2}{2\sigma_2^2}}} \quad (1)$$

ここで、 σ_1 は距離に対する重み、 σ_2 は輝度差に対する重みである。輝度差に対する重みにより、類似した画素値同士での平滑化を行えるため、エッジを維持したままの平滑化が可能である。

2.1.2 輝度差を基にした平滑化フィルタ

一般に、フィルタは注目画素とその近隣画素を利用し、近隣画素は $w \times w$ の矩形領域とする。これは近隣画素をユークリッド距離に基づいて選択しているためである。それに対し、ユークリッド距離ではなく輝度差を基にした新たな距離を定義して近隣画素を選択する Geodesic Filter^[1]がある。本研究では Geodesic Filter を参考に、新たなフィルタを提案する。以下、輝度差を基にした距離をその周辺画素に対して算出する方法を、入力画像の一部の図 1(a)を用い、同図中の中央画像の新たな画素値を求める例を説明する。

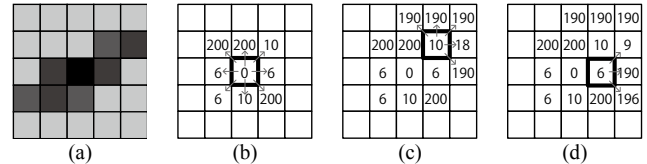


図 1 中央画素からの距離の定義

まず、中央画素を注目画素とし、周囲 8 近傍画素までの距離を、輝度差を基にした距離である式(2)を用いて算出する。

$$d(t+v) = \min(d(t+v), d(t) + |f(c) - f(t+v)| + |f(t) - f(t+v)|) \quad (2)$$

ここで、 $f(p)$ は画素 p の輝度値、 $d(p)$ は画素 p における中央画素からの距離を表し、 c は中央画素、 t は注目画素、 v は注目画素 t の近傍画素までのベクトルを表している。よって、同図(b)のように距離を確定する。次に、同図(c)のように注目画素 t を上述の処理で確定された距離値を持つ画素に変更する。そして、同様に近隣画素までの距離を算出する。この時、近隣画素までの距離を算出する際に既に他の画素から距離が求められている時は、最小距離を保存しておくことで、同図(d)のようになる。この処理を任意の $(2w + 1) \times (2w + 1)$ 画素に対して適用することで、中央画素からの輝度差に基づいた距離が周辺画素に対して算出される。

次に、算出された距離に対して閾値 $T_s (> 0)$ を設定し、 T_s 以下の距離値を持つ画素群の入力画像における輝度値の平均値を算出し、それを中央画素の新たな画素値とする。このように、輝度値が類似した画素だけで平均値を算出するため、例えばクラック以外の画素値の影響を受けることがなく、エッジを維持した平滑化が可能となる。

2.2 線状成分の強調

2.2.1 メディアンフィルタを用いた差分^[2]

メディアンフィルタは現在の画素値を近傍画素の中央値で置き換える処理であるため、ノイズ除去や平滑化の効果がある。特に、クラック部のような線状成分はメディアンフィルタ後に除去されるため、メディアンフィルタを適用後の画像と入力画像との差分画像はクラック部を強調する効果がある。

2.2.2 ヘッセ行列を用いた線強調^[2]

ヘッセ行列とは 2 階偏導関数により求められる正方行列であり、固有値を用いて線、粒、面の構造をおおまかに区別できる。これを利用し、多重スケールで線状成分を求め、線の強度が最も高いスケールでの強度を用いて新たな画素値とすることで、クラックの不均一性に対してロバストな線強調を可能とする。

2.2.3 多方向エンボスを利用した強調

特定方向に対して差分をとるエンボスフィルタを適用することで、輝度差のある個所が強調された画像を生成できる。よって、クラックの線状成分と垂直方向にエンボスフ

[†] 成蹊大学, Seikei University

[‡] 大阪工業大学, Osaka Institute of Technology

フィルタを適用することで、線状成分が強調されたエッジ画像が作成できる。

本研究では上記の特徴を利用し、まず上方向、右方向、右上方向、左上方向の 4 方向で適用することで、それぞれの方向に特化したエッジ画像を作成する。次に、それぞれの方向とは逆方向にエンボスフィルタを適用することで、線状成分がより強調された 4 画像を生成できる。そして、4 画像それぞれの同一座標の画素における最小値を線状成分の強調画像とする。

2.2.4 条件付き共分散行列を用いた線強調

クラックとして線状成分を評価するため、黒色部の形を評価する。具体的には、黒色部の広がり具合を共分散行列の固有値の比率を用い、式(3)によって評価する。ここで、同式中の e_1 と e_2 はそれぞれ式(4)～(5)で求められる共分散行列の第一固有値と第二固有値である。同式中の $p = (p_x, p_y)$ は注目画素、 $s = (s_x, s_y)$ は p の近隣画素を表している。その際、クラック部はその周辺で黒色が連続していると考えられるため、注目画素の画素値 $f(p)$ 以下の画素値を持つ近隣画素のみ共分散行列に加算する。

$$g(p) = \begin{cases} e_2/e_1 & \text{if } f(p) \text{ is NOT minimum} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{cov}(p) = \frac{1}{\sum \omega(s_i)} \left(\begin{array}{cc} \sum \omega(s_i)(s_x - p_x)^2 & \sum \omega(s_i)(s_x - p_x)(s_y - p_y) \\ \sum \omega(s_i)(s_x - p_x)(s_y - p_y) & \sum \omega(s_i)(s_y - p_y)^2 \end{array} \right) \quad (4)$$

$$\omega(s) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{(s_x - p_x)^2 + (s_y - p_y)^2}{2\sigma^2}\right) & \text{if } f(s) \leq f(p) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

3. 検証と考察

前章で説明した様々なフィルタを実際のコンクリート壁面画像に適用し、有効性を検証した。図 2 に処理対象の画像とそのクラックの真値を示す。なお、真値は専門家にクラックと判定された箇所である。

3.1 ノイズ除去について

2.1 節で説明した手法を適用した結果を図 3 に示す。バイラテラルフィルタは若干のノイズを除去できるが、それに伴いクラック部も薄くなる。また、 σ_1 と σ_2 のバランスよく調節することが難しい。しかし、輝度差を基にしたフィルタではバイラテラルフィルタよりもクラック部を維持したままノイズ除去が可能である。また、閾値も T_s のみであるため、直感的に調節できるメリットがある。ただし、クラックではない汚れの部分など、色の境界も明確になる。

3.2 線状成分の強調について

2.2 節で説明した手法を適用した結果を図 4 に示す。メディアンフィルタを用いた差分では図 2 のような明確でないクラックが強調されない。これは、ヘッセ行列を用いた強調でも同様である。それに対し、多方向エンボスではクラック部が戦場として強調されている。条件付き共分散行列を用いた強調では、クラック部だけでなく汚れの部分も強調されていることがわかる。

ここで、藤田らはメディアンフィルタを用いた差分の後にヘッセ行列を用いた強調を行っている。その結果が図

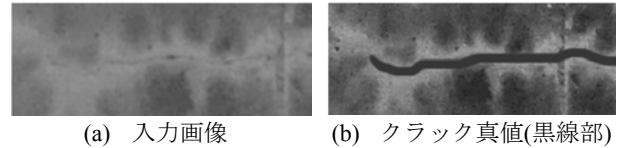


図 2 処理対象

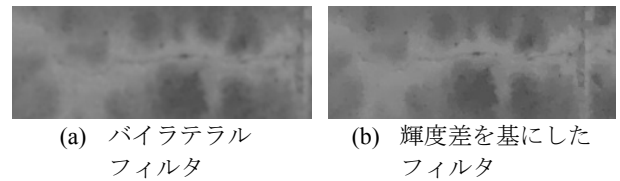


図 3 ノイズ除去

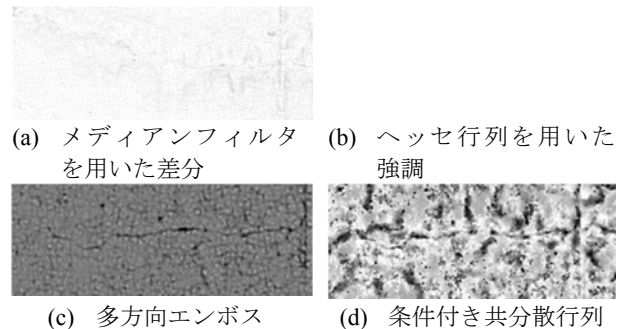


図 4 線状成分の強調

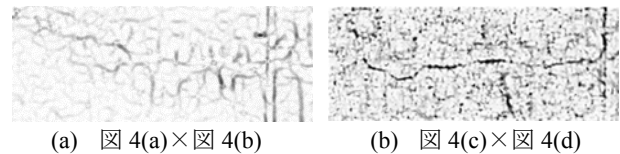


図 5 線状成分の強調の組み合わせ

5(a)であるが、クラック部よりも汚れが強調される結果である。それに対し、多方向エンボスの後に条件付き共分散行列を用いた強調を行うことで、同図(b)のようにノイズが多いもののクラックを強調した結果が得られていることがわかる。

4. おわりに

本研究ではコンクリート画像からクラックを高速に抽出するため、クラック部を明確にするための様々なフィルタを考案して検証した。その結果、従来は前処理として行っていたフィルタ処理において、よりクラックが強調された結果を得ることができることを確認した。

今後の課題として、強調された線状成分から最終的にクラックのみを抽出できるようにするための 2 値化処理を考案する必要がある。

参考文献

- [1] David Mould, "Image and Video Abstraction using Cumulative Range Geodesic Filtering", *Computers & Graphics*, pp.413-430, (2013).
- [2] 藤田悠介, 中村秀明, 浜本義彦, "画像処理によるコンクリート構造物の高精度なひび割れ自動抽出", *土木学会論文集 F*, Vol.66, No.3, pp.459-470, (2010).