論文 超解像処理を用いたデジタル画像によるひび割れ同定技術の開発

松本 知浩*1·阪上 隆英*2·佐藤 大輔*3·久保 司郎*4

要旨:本研究ではデジタルカメラで撮影した検査対象の可視画像を用いてコンクリートのひび割れ調査を高 精度に行うための,画像超解像処理を提案する。画像超解像処理を用いることで1画素をさらに細かく分割 した領域での輝度値を推定できるため,1画素の幅より細いひび割れ幅の同定を行うことが可能となる。従っ て本研究成果を用いることにより高所にある構造物のひび割れを遠隔から高精度に検査できるものと考えら れる。

キーワード:可視画像,超解像処理,ひび割れ同定

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の表面をデジタルカメラで 撮影することにより得られる可視画像をもとにひび割 れを調査する技術が開発されてきている¹⁾。高所に存在 するひび割れを検査対象とする場合には、仮設足場や高 所作業車を使用しなければ検査ができないといった作 業上の悪条件が生じる。このため、遠隔から安全かつ迅 速に構造物を検査することができる、 デジタルカメラに よる可視画像に基づく検査への期待は大きい。大型コン クリート構造物のひび割れ調査を実施する場合には、検 査画像は莫大な数となるため、その解析には時間と費用 を要する。このため、デジタル画像からひび割れを正確 に自動評価する技術が必要となる。ひび割れ調査は、単 にひび割れを検出するだけでなく検出したひび割れが 「有害であり補修・補強の必要がある」あるいは「有害 でなく補修・補強の必要はない」か、を判断する必要が ある。このとき、構造物に与える影響を評価するための パラメータとしてひび割れの幅・分布・長さ・貫通や分 岐の有無等がある。特に, ひび割れ幅は, 補修・補強工 法の選定のための重要な判断基準となる。そのため、ひ び割れ幅は構造物の診断における重要かつ最も一般的 な検査項目となっている。

現在, ひび割れ幅の測定には, 主にクラックスケール と呼ばれる定規を用いて目視により行われている。ひび 割れ幅の測定を自動化する試みとして, デジタル画像を 用いた検査手法による取り組みがなされている。坂本²⁾ らは, 画素サイズや画素の輝度値からひび割れ幅を定性 的に測定する手法を提案している。この手法では, 画素 サイズ以下のひび割れについては, 輝度値をデータベー ス化し, 測定された輝度値と照合することでひび割れ幅 を推定しなければならず, 1 ピクセル以下のひび割れ幅 のついては正確な値を得ることができないという問題 点がある。また、山口ら³は、画像内にクラックスケー ルなど、ひび割れ幅の基準となる物体を映しこみ測定す る方法を提案している。この手法では、上述した手法に 比べひび割れ幅をより正確に評価することが可能とな るものの、高所のひび割れなどにおいては基準となるク ラックスケールなどを同時に映しこむことが難しく、実 用上の問題が解決されていない。つまり、可視画像を用 いたひび割れ幅計測について、実際の調査に適用できる 技術は、未だ確立されていないのが現状である。

そこで、本研究では、測定視野の微小平行移動あるい はブレを生じさせることにより得られる複数枚の可視 画像に対して、1 画素をさらに細かく分割したサブピク セルレベルの空間分解能での輝度値を推定する手法で ある超解像処理を適用することにより、正確な微小ひび 割れの同定やひび割れ幅の計測を行う手法を提案する とともに、手法の実現可能性を実験的に検証する。

2. 超解像処理の概要

2.1 画像超解像処理

画像超解像処理は、測定された低解像度画像から高解 像度の画像を生成する技術である。その手法としては、 1 枚の低解像度画像から高解像度画像の情報を推測する 方法や、同一対象が撮影された複数枚の低解像度画像か ら高解像度画像が再構成する技術が提案されている⁴。 本研究では多くの情報量を用いるため、信頼性が高いと される複数画像を利用した超解像処理を使用した。

2.2 複数画像を利用した超解像処理⁴⁾

複数画像を利用した超解像処理の概念図を Fig. 1 に示 す。デジタル画像計測では測定対象の輝度分布がひとつ ひとつの画素単位の輝度として離散的に得られる。今, ある観測画像 1 およびこれと 0.5 ピクセル分だけ位置が

*1 大阪大学大学院 工学研究科機械工学専攻 (正会員)
*2 大阪大学大学院 工学研究科機械工学専攻 准教授 (正会員)
*3 (株) コンステック (正会員)
*4 大阪大学大学院 工学研究科機械工学専攻 教授 (非会員)
-2083-

ずれた画像2が得られている場合を考える。それぞれの 画像は,ピクセル幅の真の輝度値分布(Fig.1(A))の平均値 をピクセルの輝度値として構成されている。したがって, 二つの画像(Fig. 1(B)および(C))を統合することにより 2 倍の高解像度画像(Fig.1(D))を得ることができる。しかし, 複数の測定画像間の位置ずれ量は一般には未知のこと が多い。そのために、まず画像の位置ずれ量をサブピク セル精度で推定しておくことが必要になる。移動量が推 定されたのち,低解像度画像中の輝度値を高解像度画像 の画素に再配列する必要がある。これを,高解像度画像 の再構成と呼ぶ。Fig. 1 の例では位置ずれ量が高解像度 画像 Fig. 1(D)の画素幅に等しかったが、一般には推定さ れた位置ずれ量がちょうど高解像度画像の画素幅にな ることはない。よって、測定された位置ずれ量の情報と 測定された複数画像の画素値の情報から高解像度画像 の各画素に配列するべき値を算出する操作が行われる。



3. SSD-2 次元パラボラフィッティングによる画像の位 置ずれ量測定

2 画像間での輝度値マッチングを利用して移動量を推 定する方法として, SSD-2 次元パラボラフィッティング について述べる。SSD とは残差平方和(Square Sum of Differences)を表す。

比較対象画像 1, 画像 2 のある座標 (x,y) の輝度値を それぞれ $I_1(x,y)$, $I_2(x,y)$ としたとき, 画像 1 に対する 画像 2 のピクセル単位の変位が (dx, dy) であるとき SSD は下式で表わされる。

$$SSD(dx, dy) = \sum_{x, y \in W} (I_1(x, y) - I_2(x + dx, y + dy))^2$$
(1)

ここで、WはSSDを計算する注目領域(subset)を表わす。 ピクセル単位でのずれ量を測定する場合、SSD(dx, dy)が 最小となる(dx, dy)を求めればよい。それに対し、サブ ピクセル単位の移動量を求めるためには、以下のように SSD の値が移動量に対して二次関数に近似できると仮定 したパラボラフィッティングが用いられる。

(dx, dy)を変動させ、SSD(dx, dy)を最小とするピクセル
単位の移動量(dx, dy)を求める。このときの移動量
(dx, dy)を(i, j)(整数)とする。さらにSSD(i - 1, j)、
SSD(i, j - 1)、SSD(i + 1, j)、SSD(i, j + 1)を求める。

(i, j)の近傍ではSSD(dx, dy)はFig. 2 のように二次方程 式 $D_p(dx, dy)$ で表現できるとし,その係数を SSD(i, j), SSD(i - 1, j), SSD(i, j - 1), SSD(i + 1, j), SSD(i, j + 1)から求める。これにより,SSD(dx, dy)を最 小とする(dx, dy)が $D_p(dx, dy)$ の頂点として求まる。これ を平行移動における変位の推定値とすることができる。

次に, SSD を最小とする(dx, dy)である $D_p(dx, dy)$ の頂 点を求める方法について述べる。

ここで、 $D_p(dx, dy)$ は以下のように示されるものとする。

 $D_p(dx, dy) = a_0 dx^2 + a_1 dx + a_2 dy^2 + a_3 dy + a_4$ (2) SSD(*i*,*j*), SSD(*i* - 1,*j*), SSD(*i*,*j* - 1), SSD(*i* + 1,*j*), SSD(*i*,*j* + 1) の値を求めて, 次式に代入し, 係数 a_k (k = 0,1,2,3,4)を算出する。

$$S \cdot A = D \tag{3}$$

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} (i-1)^2 & j^2 & (i-1) & j & 1 \\ i^2 & (j-1)^2 & i & (j-1) & 1 \\ (i+1)^2 & j^2 & (i+1) & j & 1 \\ i^2 & (j+1)^2 & i & (j+1) & 1 \\ i^2 & j^2 & i & j & 1 \end{pmatrix}$$
$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix} \qquad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} SSD(i-1,j) \\ SSD(i,j-1) \\ SSD(i,j+1) \\ SSD(i,j) \end{pmatrix}$$

である。また、式(2)は次のように変形できる。

$$D_p(dx, dy) = a_0 \left(dx + \frac{a_1}{a_0} \right)^2 + a_2 \left(dy + \frac{a_3}{a_2} \right)^2 + k$$

(k 定数) (4)

このとき,係数 a_k が求まれば,サブピクセル単位の移動量を二次関数 $D_p(dx, dy)$ の頂点 $(-a_1/a_0, -a_3/a_2)$ として計算できる。

4. 複数画像からの高解像度画像の再構成手法

4.1 画素ずらし法⁵⁾

高解像度画像のある画素の輝度値を求めるために、測 定された複数枚の低解像度画像の該当する輝度値の平 均をとる方法である。例えば,**Fig.3**のように実線の格 子で示された基準低解像度画像 I_{Ref} に対して,点線で示 されたある低解像度画像 I_f の移動画素量が(k + dx, l + dy) $(k, l \in 整数; dx, dy > 0)$ であるときを考える。この とき, I_{Ref} の画素 $(i, j) \ge I_f$ の画素(i + k, j + l)の重なった領 域である領域Aに含まれる高解像度画像における画素の 輝度値はすべて $\{I_{Ref}(i, j) + I_f(i + k, j + l)\}/2$ で表わす。

Displacement = (k+dx, l+dy)



Fig. 3 Illustration of super resolution using pixel sliding

移動量が1ピクセル以内でさまざまに異なる複数の画 像データを使用すれば,分割数を増やすことができるた め,原理的にはより高解像度な画像が得られる。

4.2 重みを考慮した画素ずらし法

4.1 節に示したような単なる画像の重ね合わせでは, 高解像度画像のある画素の輝度値は,低解像度画像の画 素のうち,影響の大きいものからも小さいものからも同 じ影響を受けて生成されてしまう。例えば Fig. 4 のよう に3枚の参照低解像度画像 A, B, C を用いて,参照画 像 A の各画素を3分割するような高解像度画像を作成す ることを考える。このとき,高解像度画像のある画素 S_1 は A, B, C のある画素 A_2 , B_1 , B_2 , C_1 から影響を受け る。しかし,実際この中で S_1 の輝度値に最も近い値を持 つものは S_1 の画素中心に最も近い画素中心を持つ C_1 で あると考えられる。そこで,高解像度画像のある画素の 輝度値を求める際には画素中心同士が近い低解像度画 像の画素の輝度値がより大きく影響するように重み関 数をかけて平均をとる。





4.3 局所反復演算を用いた方法⁵⁾

Fig.5のように、測定された複数枚の低解像度画像 f_i は、 それぞれが真の高解像度画像 C_{Real} からの標本化により 得られる画像であると考える。



Fig. 5 Principle of reconstruction of high resolution image

Fig. 5の右上図のように低解像度画像の輝度値 $f_i(u, v)$ が真の高解像度画像の輝度値 $C_{Real}(x_u, y_v)$ の近傍 9 点から標本化されるとすると $f_i(u, v)$ は式(5)のように表わされる。ただし、 (x_u, y_v) は高解像度画像にしたときの座標系における $f_i(u, v)$ の中心を含む画素の座標を表すものとする。

$$f_i(u,v) = \sum_{k=-1}^{1} \sum_{l=-1}^{1} C_{Real}(x_u + k, y_v + l) h_{f_i}(k, l)$$
(5)

 $h_{f_i}(k, l)$ は高解像度画像 C_{Real} に対する f_i の標本化関数であり、本研究では (x_u, y_v) から(k, l)だけ離れた高解像度画像の画素が低解像度画像の画素(u, v)に対して接している面積割合とした。

高解像度画像は,次に述べる処理を反復することで構築できる。その概念図を **Fig.6**に示す。

Step 1: 高解像度画像の輝度値の初期値*C*₀(*x*,*y*)を設 定する。初期値の選択は収束結果には影響しないのでど のような画像でもよいが,収束の速さの観点から位置合 わせのために用いた基準画像を線形補間により細分化 した画像を用いた。ここでの,繰り返し回数*n* = 0とする。

Step 2: $C_n(x,y)$ に対し、 C_{Real} に対する測定データ $f_i(u,v)$ の標本化関数 $h_{f_i}(k,l)$ を適用することで、低解像度 画像 $F_i(u,v)$ を作成する。iは観測データ番号を表す。

Step 3: もし $C_n(x, y)$ の値が真の高解像度画像の輝度 値 $C_{Real}(x, y)$ であった場合, Step 2 で生成された低解像 度画像 $F_i(u, v)$ は実際に測定された低解像度画像 $f_i(u, v)$ と一致するはずである。そこで,観測誤差 E_n を式(6)のよ うに定義して、*E_nが最小値をとるときに処理を終了する* ものとする。

$$E_n = \sqrt{\sum_{i} \sum_{u} \sum_{v} \{f_i(u,v) - F_i(u,v)\}^2}$$
(6)

Step 4: E_n が十分に小さくないとき、 $C_n(x,y)$ を修正 して、これを $C_{n+1}(x,y)$ とし、Step 2 に戻る。高解像度画 像の画素(x,y)が影響を与える低解像度画像の画素を (u_x, v_y) としその低解像度画像に関する補正量 $\Delta e_i(u_x, v_y)$ を式(7)のように表わす。

$$\Delta e_i(u_x, v_y) = \{f_i(u_x, v_y) - F_i(u_x, v_y)\}\frac{h_{f_i}(x_u - x, y_v - y)}{\alpha}$$
(7)

このとき,αは適当なスケーリングパラメーターとする。

高解像度画像の1画素が影響を与える低解像度画像の 画素は最大で4画素あるので個々の $\Delta e_i(u_x, v_y)$ に対する 重みを $w_i(u_x, v_y)$ としたとき、それらの重み付き平均を高 解像度画像の画素(x, y)に対する総修正量 $\Delta e_i(x, y)$ とす ると、 $C_{n+1}(x, y)$ は式(8)のように表わされる。

$$C_{n+1}(x, y) = C_n(x, y) + \Delta e_i(x, y)$$
$$= C_n(x, y) +$$
$$\frac{1}{\sum_i \sum_{u_x} \sum_{v_y} w_i(u_x, v_y)} \sum_i \sum_{u_x} \sum_{v_y} w_i(u_x, v_y) \Delta e_i(x, y)$$
(8)

ここで、重み関数 w_i として、 C_{Real} に対する測定データ $f_i(u,v)$ の標本化関数 h_{f_i} を使用することにする。 w_i の候補 として平滑化フィルタ、鮮鋭化フィルタを使用すること も提唱されている⁵⁾。このとき、式(8)を書き直すと、式 (9)のようになる。

$$C_{n+1}(x,y) = C_n(x,y) +$$

 $\sum_{i} \sum_{u_x} \sum_{v_y} \{f_i(u_x, v_y) - F_i(u_x, v_y)\} \frac{h_{f_i}^2(x_u - x, y_v - y)}{\alpha \sum_i \sum_{u_x} \sum_{v_y} h_{f_i}(x_u - x, y_v - y)}$

(9)
Obseved images
fither resolution images
fither resolution images
Co
Co</p



operation

5. コンクリートのひび割れに対する超解像処理結果 5.1 測定対象

コンクリート壁面に発生したひび割れを高速度カメ ラにより視野を移動させながら撮影することにより,得 られたデジタル画像に対して超解像処理を行った。これ は、実際の走行中の車内から高速度カメラにより道路や コンクリート壁面を撮影し,超解像処理によりひび割れ 測定を行う場合を模擬している。使用したカメラの撮像 条件を Table 1 に示す。ひび割れの画像を Fig. 7 に示す。 このとき, Fig. 7 の画像を始点とし,上方にカメラを移 動させて撮影した。



Fig. 7 Original image of crack

Table 1 Imaging condition by

ingh speed camera		
Imaging pixel	125×96	
Frame rate	500 fps	
Shutter speed	1/1000 s	
Camera speed	12.6km/h	
Spatial	1.331	
resolution	mm/pixel	

5.2 画素コントラストデータに基づくひび割れ幅の同定

ある点をレンズによって結像したとき、収差や回折の 影響が、注目している画素の隣の画素にまで及んでしま う⁵⁾。この現象を実験的に確認するために Fig.8 に示す ようなクラックスケールを実験で使用したカメラによ って撮影した。Fig.8 に示した横線上で得られた輝度値 のラインプロファイルを Fig.9 に示す。このとき、クラ ックスケールの黒線は低輝度のため、ラインプロファイ ルのくぼんだ部分にあたる。また黒線幅に相当する画素 幅を Fig.9 中に数値で示した。



Fig. 8 Image of crack scale



Fig. 9 Line profile of crack scale

Fig.9から分かるように実際の黒線幅に相当するのは 上部の開口している幅ではなく、矢印で示した底部の画 素幅に相当することがわかる。よって、画像内でひび割 れ幅を測定する際は底部の画素幅を数えることにする。

5.3 重みを考慮した画素ずらし法を用いた超解像処理

Fig. 7 に対して重みを考慮した画素ずらし法を用いた 方法で超解像処理を行った。行った処理は以下のとおり である。

- (a) 生データの画素数を単に増すだけの処理,
- (b) 3 枚の画像を用いた 3 倍の超解像処理,
- (c) 5 枚の画像を用いた5 倍の超解像処理,
- (d) 8 枚の画像を用いた 5 倍の超解像処理,
- (e) 3枚の画像を用いた5倍の超解像処理,

Fig.7に示した黒枠内の超解像処理結果をTable2に示 す。画像を見る限り,明らかに超解像処理をしたものの 方がひび割れが顕著に現れていることがわかる。(d)は(c) に対して画像改善はほとんど見られない。それに対し, (e)は(c)に対して画像の粗さが目立つ。これより,処理枚 数は倍数程度必要であることが分かる。

次に Table 2(a)の画像中の点線上ラインプロファイル を(a)生データ,(b)3枚の画像を用いて3倍に超解像処理 した画像,(c)5枚の画像を用いて5倍に超解像処理した 画像の3種類に対して求めた。それらとクラックスケー ルによって計測したひび割れ幅を比較した結果を Fig. 10に示す。さらに横軸の座標と1pixel あたりの距離を考 慮してひび割れ幅を求めた結果を Table 3に示す。ひび 割れ幅の画素数は超解像処理した後の画素数である。こ れより,分割数を増すことにより,実際のひび割れの幅 の値に近づいていることがわかる。

5.4 局所反復法を用いた超解像処理

Fig. 7 に示した画像に対して局所反復法による超解像 処理を行った。行った処理は以下のとおりである。 (a) 生データの画素数を単に増すだけの処理,

- (b) 2 倍に超解像処理,

(c) 4 倍に超解像処理,

このとき,超解像処理に使った画像枚数は10枚とした。 結果を Table 4 に示す。この結果から,ひび割れは生デ ータよりも超解像処理を行ったほうが細く鮮明に映っ ていることがわかる。

次に Table 3(a)の画像中の点線上ラインプロファイル を(a)生データ,(b)2倍に超解像処理した画像,(c)4倍に 超解像処理した画像の3種類に対して求めた。それらと クラックスケールによって計測したひび割れ幅を比較 した結果を Fig.11に示す。横軸の座標と1pixel あたりの 距離を考慮してひび割れ幅を求めた結果を Table 5に示 す。この結果から,特に生データでは実際より太く検出 されていた左側のひび割れを精度よく評価できた。

 Table 2 Results of super resolution by weighted pixel

sliding method Processed image (a) 5 fold (nearest neighbor interpolation) Reference line for line profile (b) 3 fold (super resolution with 3 images) (c) 5 fold (super resolution with 5 images) (d) 5 fold (super resolution with 8 images) (e) 5 fold (super resolution with 3 images) • (a)Raw data (b)3 fold image ---- (c)5 fold image Pixel number



Table 3 Crack widths obtained from super resolution images by weighted pixel sliding method

Image	Crack width(mm) - (pixel)		
Image	Left crack	Right crack	
(a) Raw data	1.33 - 1	1.33 - 1	
(b) 3 fold image	0.877 - 2	0.887 - 2	
(c) 5 fold image	0.798 - 3	0.798 - 3	
Actual value	0.4mm	0.6mm	

Table 4 Results of super resolution by local iterative

operation			
	Processed image		
(a) 4 fold (nearest neighbor interpolation) Reference line for line profile			
(b) 2 fold (super resolution using Local Iterative Operation)			
(c) 4 fold (super resolution using Local Iterative Operation)			

6. まとめ

本論文では超解像処理を用いて、1 画素幅より細いひ び割れ幅の同定を画像内で行うことを検討した。また実 際のコンクリートひび割れに対し、超解像処理を行うこ とにより、生データよりも正確なひび割れ幅の評価が可 能であることがわかった。この技術を使用すれば、遠隔 からのひび割れ幅同定に加え、解像度の低い高速度カメ ラを用いて走行しながら道路のひび割れ検出を行うこ となど、土木構造物の健全性評価に有用なひび割れ測定 が可能になるものと考えられる。また、超解像処理の画 像位置ずれ推定や高解像度画像再構成処理の高精度化⁴⁾ によりさらに高精度なひび割れ幅同定が可能になると 考えられる。



Pixel number

Fig. 11 Line profiles of super resolution images by local iterative operation

Table 5 Crack widths obtained from super resolution images by local iterative operation

Image	Crack width(mm) - (pixel)		
	Left crack	Right crack	
(a) Raw data	2.66 - 2	1.33 - 1	
(b) 2 fold image	0.665 - 1	0.665 -1	
(c) 4 fold image	0.333 - 1	0.333 - 1	
Actual value	0.4mm	0.4mm	

謝辞

本研究の遂行にあたり日本学術振興会科学研究費基 盤研究(A)の援助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 丸屋剛, 堀口賢一, 小山哲, 澤健男:ウェーブレット変換を用いた床板コンクリートのひび割れ調査の実用化:コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.691-696, 2007
- 2) 公開特許公報:特開 2005-241471, 微細ひび割れ幅 検量方法
- 山口友之,橋本周司・既設コンクリート構造物にお けるひび割れ幅の実画像計測:電気学会論文誌 C, Vol.127, No.4, pp.605-614, 2007
- 奥富正敏,田中正行:画像超解像処理:ViEW2008 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集 pp.377-385,2008
- 高木 幹雄,下田 陽久編:新編 画像解析ハンド ブック,東京大学出版会,2004