

UAV を用いたデジタルカメラ画像による ひび割れ幅計測手法の構築

1170142 本光 利章

高知工科大学 システム工学群 建築・都市デザイン専攻

近年、点検にかかる作業時間とコストを削減するため、デジタルカメラ画像を用いて、ひび割れ幅の計測を行う研究・開発が行われている。金子¹⁾は、ひび割れ幅検出手法を構築し、焦点距離を長くすることで、撮影距離が長くとも、精度を保つことが可能になると予測した。本研究では、まず、望遠レンズにより得られるデジタルカメラ画像を用いて、ひび割れ幅を計測し、検証を行った。結果は、静止状態で約30mの距離からクラックスケールを撮影したところ、最大誤差0.06mm、RMSE0.03mmという精度を示した。また、UAVにより得られるデジタルカメラ画像を用いた実際のひび割れ計測の手法についての検討も行った。指標となる位置合わせのため、特徴点が描かれたクラックスケールを作成した。クラックスケールをひび割れ周辺に貼ることで、画像マッチングにより射影変換し、重ね合わせによるノイズ除去が可能となった。結果は、UAV搭載を想定した状態で約7mの距離からひび割れを計測したところ、最大誤差0.04mm、RMSE0.06mmという精度を示した。

Key Words: 橋梁点検, ひび割れ幅計測, UAV, デジタルカメラ

1. はじめに

現在、橋梁の老朽化が進み、維持管理の重要性が高まっている。近年では、点検にかかる作業時間とコストを削減するため、望遠レンズや UAV を用いたデジタルカメラ画像により、ひび割れ幅を計測する研究・開発が行われている。本研究では昨年度、金子¹⁾が、ひび割れ幅検出手法を構築し、室内、静止状態、焦点距離55mmで、約5mの距離から0.1mm～1.5mmのひび割れを、最大誤差0.13mm、RMSE0.07mmという精度で検出した。望遠レンズにより焦点距離を長くすることで、撮影距離が長くとも、精度を保つことが可能になると予測された。そこで、本研究では、まず、室外で望遠レンズにより得られたデジタルカメラ画像を用いて、ひび割れ幅を計測し、検証を行った。さらに、昨年度の最終目標であった UAV により得られるデジタルカメラ画像を用いた実際のひび割れ計測について検討を行い、手法を構築した。

2. 望遠レンズを用いた遠距離からの計測

(1) 使用した機材

撮影に使用したカメラはSONYのα7、レンズは1.4倍のテレコンバーターを使用し、焦点距離490mm相当の天体望遠鏡を使用した。カメラとレンズの仕様

を図-1に示す。カメラ設定は絞り優先モードで、出力フォーマットはRAW画像である。手ブレを抑えるため三脚とタイマーコントローラを使用した。



本体	SONY α7
有効画素数	2430万画素
撮影素子	35.8mm × 23.9mm
RAW画像の分解能	14bit

レンズ	BORG 60ED
焦点距離	350mm
口径	60mm
テレコンバーター	1.4倍

図-1 カメラとレンズの仕様

(2) 画像処理

カメラ付属の現像ソフト Image Data Converter を使用し、RAW画像を16bitのTIFF画像にデジタル現像した。次に、画像解析ソフト HyperCube を使用し、撮影した5枚の画像を重ね合わせによりノイズ除去を行った後、グレースケール変換を行った。

(3) ひび割れ幅算出手法

本研究は金子¹⁾が構築した手法を用い、各プロセスの自動化をPythonにより行った。図-2に算出イメージを示す。あるピクセルがひび割れの影響を受けている割合 $(s(i))$ は、影響を最も受けているピクセルの輝度 (b_{min}) 、各ひび割れ両端の受けていな

いピクセルの輝度 (b_{max}), 対象とするピクセルの輝度 ($b(i)$) を用いて式 (a) から算出できる.

$$s(i) = 1 - \frac{b(i) - b_{min}}{b_{max} - b_{min}} \quad (a)$$

したがって, ひび割れ幅 ($W(\text{mm})$) は式 (b) により算出できる. このとき w は 1mm あたりのピクセル数である.

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n s(i)}{w} \quad (b)$$

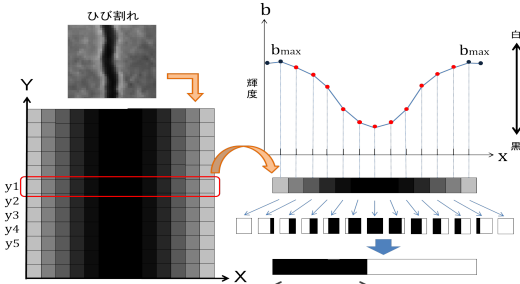


図-2 ひび割れ幅算出イメージ

(4) クラックスケールでの精度検証

クラックスケールの間隔が狭いと正確な計測ができないため, CAD ソフトにより 10mm 間隔で作成した. 作成したクラックスケールをコンクリート壁面に貼り付け, 10m から 30m まで 5m ごとに 10 枚ずつ撮影し, 重ね合わせには 5 枚を使用した. 図-3 に作成したクラックスケール, 図-4 に結果を示す. 約 30m の距離からでも最大誤差が 0.06mm , RMSE が 0.03mm になり, $1/10\text{mm}$ 以下の精度で計測できた. 焦点距離を長くすることで, 撮影距離が長くとも, 精度を保つことができると思う. 30m の撮影距離では $\alpha 7$ 独自のピーキング機能を使用した, ピント合わせは困難であった. ピント合わせができれば, さらに撮影距離を長くしての計測が可能になると考える.

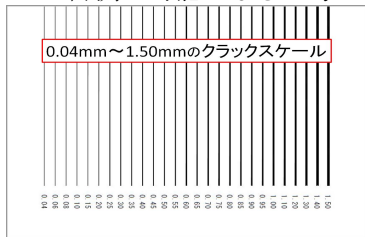


図-3 作成したクラックスケール

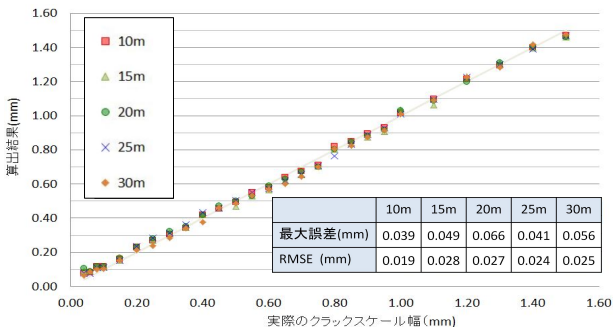


図-4 望遠レンズの距離別算出結果

3. UAV を用いたクラックスケールの計測

(1) 使用した機材

撮影に使用した UAV(Unmanned Air Vehicle)はジューイング社の Boomerang で, カメラは SONY の $\alpha 7$, レンズは焦点距離 50mm を使用した. レーザー距離計とデジタル顕微鏡を UAV に搭載し, 対象物との距離および, カメラが対象物を捉えているかの確認をしながら撮影を行った. 使用した機材の仕様を図-5 に示す.



名称	Boomerang
重さ	9.5kg
飛行時間	約12分
翼	回転翼
本体	SONY $\alpha 7$
撮影素子	35.8mm × 23.9mm
RAW画像の分解能	12bit(連続撮影時)
シャッタースピード	1/2000
ISO感度	1600
レンズ名	SEL50F18
焦点距離	50mm
F値(絞り)	18-22



図-5 使用した機材の仕様

(2) 画像処理

望遠レンズを用いた計測同様に RAW 画像をデジタル現像した. UAV に搭載したカメラで撮影した画像であるため位置ズレが大きく, 撮影されたままの状態では重ね合わせるのには困難である. そこで, 画像の位置合わせのために特徴点を 4 ヶ所配置したクラックスケールを用いた (図-6). まず, 撮影した複数の画像をグレースケール変換する. そのうち 1 枚をベース画像とし, その 4 ヶ所の特徴点をテンプレートとする. ベース以外の画像の指定した範囲から, テンプレートとマッチングするポイントを求める. 求めたマッチングポイント 4 点を用い, 二次元射影変換により, 各画像の位置合わせを行う. これらの処理は, 画像処理ライブラリーである Open CV2 を Python プログラムに組み込むことで自動化を行った.

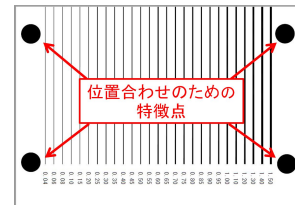


図-6 クラックスケールの特徴点

(3) クラックスケールでの精度検証

撮影方法は高さ 2.5m 以上の壁面に作成したクラックスケールを貼り付け, 3m から 7m まで 2m ごとに

約 50 枚ずつ撮影し、重ね合わせには 30 枚使用した。結果を図-7 に示す。約 7m の撮影距離では、最大誤差が 0.22 mm、RMSE が 0.07mm となった。UAV に搭載した状態で撮影した画像からでも 1/10mm 以下の精度で計測できたが、クラックスケール 0.10mm ~ 0.50mm は過大評価、0.75mm ~ 1.00mm は過小評価となるような系統的誤差が見られた。

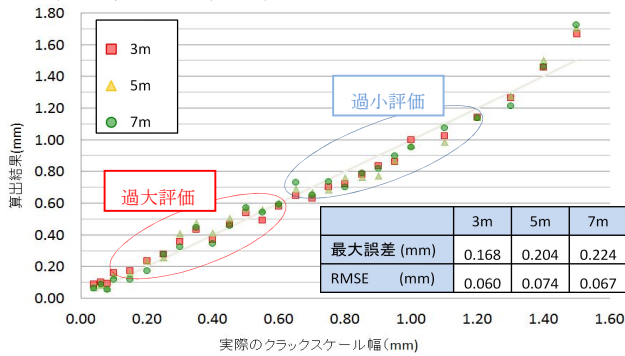


図-7 UAV の距離別算出結果

4. 系統的誤差の要因抽出

系統的誤差の要因抽出のため、カメラの違いによる比較を行った。α7 と K-30 の比較を同じレンズ(焦点距離 55mm) で三脚を使用し、撮影距離は 1.1m ~ 3.4m で行った。カメラの仕様を表-8 に示す。

表-8 カメラ仕様

SONYα7	本体名	PENTAX K-30
6000 × 4000pixel	記録サイズ	4928 × 3264pixel
35.8 × 23.9mm	センササイズ	23.7 × 15.7mm
14bit	Rawビット数	12bit

結果を図-9, 図-10 に示す。K-30 の方が良い精度で計測でき、系統的誤差も見られなかった。精度が良かった原因は、CMOS の画素間の距離が α7 よりも K-30 の方が細かいことが挙げられる。次に、ひび割れ画像と輝度のイメージを図-11 に示す。この図は、ひび割れ画像の 1 測線の輝度の変化をグラフで表現している。ベイヤー配列の性質上、撮影した画像の 1 ピクセルは、周辺の画素情報を重複させながら作り出されているため、K-30 のように徐々に輝度値が変動する。しかし、α7 はひび割れの中心や両端の輝度値が大きく変動しており、シャープ処理が行われていることがわかる。このことから、α7 による系統的誤差は、カメラ内部での画像処理が 1 つの要因になっていると考えられる。しかし、カメラ内部でのシャープ処理手法のアルゴリズムが公開されていないため、カメラごとに検証する必要がある。

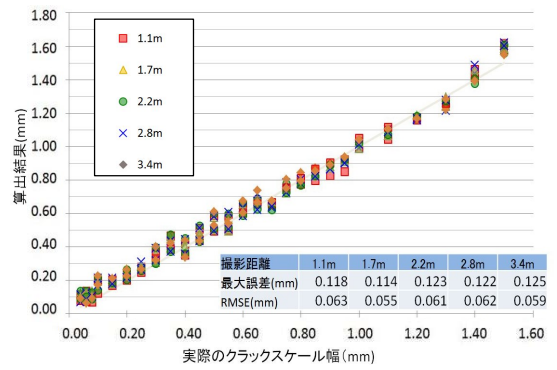


図-9 SONY α7 の距離別算出結果

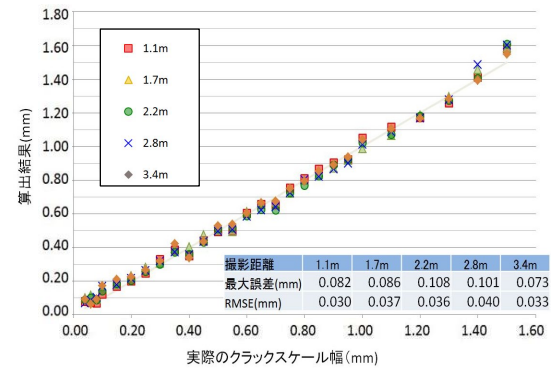


図-10 PENTAX K-30 の距離別算出結果

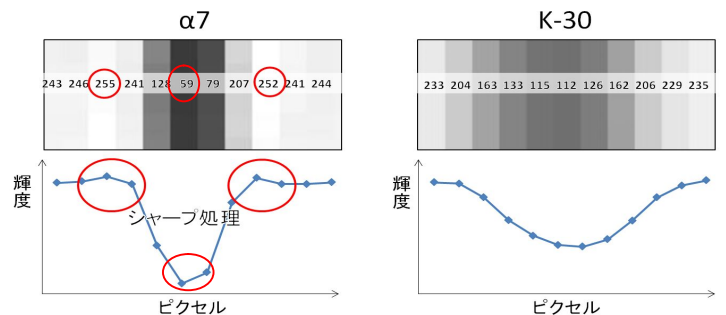


図-11 ひび割れ画像との輝度のイメージ

5. 実際のひび割れ計測

(1) 指標とするクラックスケールの作成

実際のひび割れ幅を計測する際にも、画像の重ね合わせ処理をするための特徴点と、ひび割れ算出のための既知のクラックを実際のひび割れと一緒に撮影する必要がある。そのため、特徴点があり既知のクラックも描かれた新しいクラックスケールを作成した。撮影に使用したクラックスケールとひび割れを図-12 に示す。使用したクラックスケールは、四隅に特徴点を配置し、特徴点 1 つにつき、色違いの 3 つの円を配置した。マッチングする特徴点を指定した範囲から求める際に、色によって区別するためである。射影変換に用いる 4 点は、この 3 つの円の中心座標から求めた図心を使用した。特徴点を増や

すことで、マッチングポイントが増え、変換の精度がよくなると考えたためである。また、ひび割れ算出に用いる5種類の線幅のクラックスケールも4ヶ所に配置した。さらに、新しいクラックスケールの背景の輝度と実際のコンクリートの輝度に差があると正確な計測が行えないため輝度を合わせる必要がある(図-13左)。そのためにまず、白から黒2階調ずつ変化させたパレットを作成し、計測するひび割れのあるコンクリートに貼り付け撮影する(図-14)。その後、グレースケール変換を行い、画像上でそれぞれのパレットと実際のひび割れの背景の輝度を比較し、最も類似したパレットの輝度を新しいクラックスケールの背景の輝度とした(図-13右)。

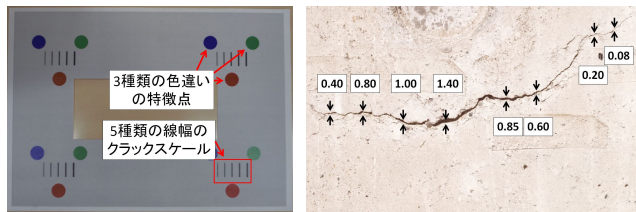


図-12 クラックスケールと撮影したひび割れ

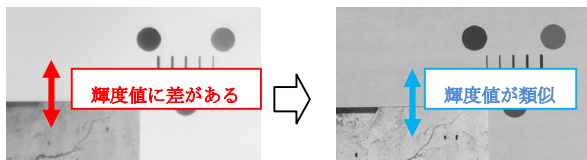


図-13 クラックスケールとコンクリートの輝度値

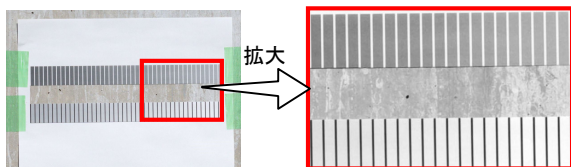


図-14 背景の輝度を定めるためのパレット

(2) 計測結果

カメラはシャープ処理が行われない K-30 を使用した。UAV には搭載できなかったため、UAV 搭載を想定し、三脚を使用せず手持ちで撮影を行った。結果を図-15 に示す。約 7m の距離からでも最大残差が 0.06 mm、RMSE が 0.04mm となった。手持ち撮影で目視による実測値との比較ではあるが、画像マッチングを用いた射影変換により 1/10mm 以下の精度で計測できた。撮影距離 10m、15m では、残差の大きい箇所が多い結果となった。画像に対し鉛直や水平方向のひび割れの残差は大きくないが、斜めのひび割れは残差が大きくなった。原因として、撮影距離が長くなり、分解能が低くなったため目視により計測した位置を画像上で正確に計測できていないことが考えられる。

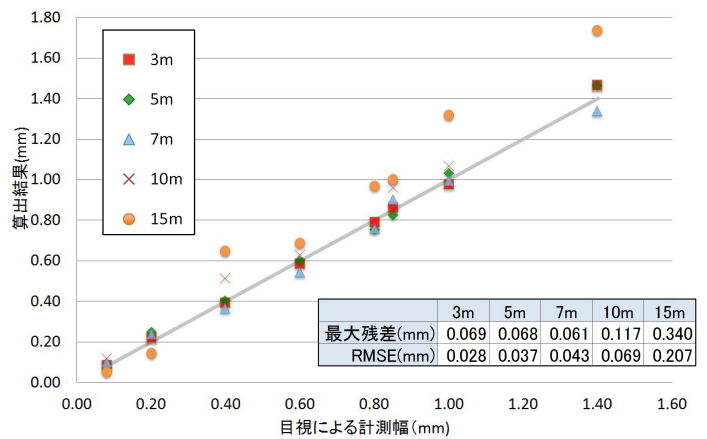


図-15 ひび割れ算出結果

6. 考察

焦点距離 490mm の望遠レンズを用いた場合、撮影距離約 30m で、最大誤差が 0.06 mm、RMSE が 0.03mm という精度を示した。よって、焦点距離を長くすることで、撮影距離が長くとも、精度を保つことができると考える。

次に、UAV 搭載カメラで撮影した画像の位置合わせのために、特徴点が描かれたクラックスケールを作成した。クラックスケールをひび割れ周辺に貼ることで、正確な計測が可能になった。画像マッチングを用いた射影変換をすることで、重ね合わせによるノイズ除去が可能になった。画像マッチングと射影変換は Python により自動化を行った。UAV 搭載を想定した手持ち撮影では、撮影距離約 7m で、シャープ処理が行われないカメラ画像を用いれば、最大誤差 0.06 mm、RMSE 0.04mm という精度を示した。性能が良いカメラでもカメラ内部で画像処理が行われ、正確に計測できないカメラもあることが分かった。本研究では、昨年度の計測手法を UAV に応用したため、クラックスケールを貼り付けての撮影により計測を行ったが、今後は、クラックスケールなしでの計測が求められる。

参考文献

- 金子貴之：デジタルカメラ画像を用いたコンクリート構造物のひび割れ幅検出手法の構築 (2015)
- 高木方隆：国土を測る技術の基礎，pp. 289-290
- 竹田宜典：画像処理によるコンクリート構造物のひび割れ計測 (2015)