画像解析による自動損傷検出システムを応用したひび割れ率推定の試み

Trial of Crack Detection on Road Surface by Image Analysis using SIFT

石井詩穂 Shiho ISHII 伊東達彦 Tatsuhiko ITO 栗原大 Ooki KURIHARA

一井康二 Koji ICHII 玉木徹 Toru TAMAKI (広島大学大学院工学研究科) (広島大学大学院工学研究科) (広島大学大学院工学研究科) (広島大学大学院工学研究院) (広島大学大学院工学研究院)

舗装路面の点検は、目視や路面性状測定車によって実施されている。しかし、路面の点検項目のうち、ひび割れ率の算定は、簡易であるが膨大な時間と労力を要する目視に頼ることが多い。このため、種々の画像解析技術によるひび割れ検出が試みられている。本研究では、ひび割れ周囲の画像の特徴を SIFT 特徴量でとらえることを試みた。検討の結果、ひび割れ周辺の画像の特徴を量的に把握することができた。そして、撮影時の影の影響等でひび割れ検出の正答率は未だ 50~55 %と低いものの、SIFT 特徴量によるひび割れ検出の実現可能性を確認した。

キーワード:舗装路面,画像解析,ひび割れ検出 (IGC: C-7, C-9)

1. はじめに

舗装路面の維持管理における路面状態の主要な点検項目は、ひび割れ率、平坦性、轍掘れの3項目である¹⁾.これらの点検は、主に目視と路面性状測定車によって実施されている.目視は安価だが、膨大な時間と労力を要する手法である.路面性状測定車は、走行中に複数の項目について情報が得られるので時間と労力は目視に比べて少ないが、実施費用が高価な手法である.そのため、全国各地に存在する道路の点検の効率化には、短時間・少労力で実施でき、且つ安価な手法の開発が望まれている.

このような点検の効率化には、種々の画像解析技術が有望視されている。例えば、コンクリートを対象として、画像解析のひとつであるエッジ強調を利用したひび割れ検出が研究されている²⁾. 道路路面の異常検出についても、レーザー画像に基づく処理³⁾や画像の2値化処理⁴⁾に基づく方法が提案されている。しかし、これらの手法は、エッジ等の選別や強調の程度などを指定するパラメータによってノイズの程度が変動するため、撮影状況に応じた最適なパラメータの設定が困難であるという問題がある。

一方、栗原らは SIFT⁵⁾と呼ばれる特徴量を利用したパターン認識によって、撮影画像から自動で損傷個所を検出するシステムを開発した⁶⁾. このシステムにおいて、画像は「異常なし」、「構造物」、「異常あり」の 3 区分に識別され、識別結果が目視と一致する確率である正答率は最大で90%である. このシステムは、家庭用デジタルカメラとノートパソコンで構成されていることから、安価に実施できる手法である. しかし、異常もしくは構造物の検出のみが

対象で、ひび割れ率等の現状の路面の点検項目を定量的に 把握できるまでには至っていない.

本研究では栗原らの方法を改良し、ひび割れ箇所の抽出を試みた。画像からのひび割れ箇所の抽出ができると、ひび割れを含む画像の全撮影画像中の割合から、主要な点検項目の一つであるひび割れ率を算定できると考えている。なお、SIFTによる画像識別は、大腸癌検出⁷⁾などの応用も研究されているが、対象物により適用性が異なるため種々の工夫が必要となる場合がある。そこで、本報では道路路面のひび割れ検出に特化した検討結果を報告する。

2. 損傷検出システム

2.1 目標とするシステムの概要

路面画像の撮影から画像の識別までの流れを図-1 に示す. データ処理の流れは,路面撮影,データ転送,データ解析の3つからなる.このデータ処理は連続で行うことができ,撮影した画像を即時転送することができると,原理的には動画でのリアルタイム解析が可能である.しかし,今回の検討では,路面撮影を屋外,データ転送と解析を屋内で実行している.

2.2 デジタルカメラの設置位置

画像を撮影するためのデジタルカメラは、**図-2** のように、軽自動車の上部に梯子を設置し、梯子の先端部に取り付けて撮影した。このとき、デジタルカメラは、レンズ面が走行方向に対して下向き 45 度となるように調整した。

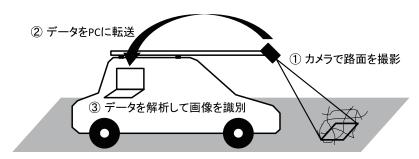


図-1 損傷検出システムの概要





図-2 損傷検出システムにおけるカメラの設置状況

また、全撮影画像の自動データ転送は未完成のため、レリーズを接続することで、走行中に車内からシャッターを押し、後でデータ解析することにした。今回使用した軽自動車では、デジタルカメラは路面から約1.7mの位置である。

3. 路面のひび割れ画像がもつ特徴

3.1 SIFT 特徴量

SIFT 特徴量 ⁵⁾とは、図-3 に概念図を示すが、輝度変化の大きな点(特徴点)周囲の輝度勾配の分布を、16 ブロックのそれぞれの 8 方向の輝度勾配の大きさとして、128 次元のベクトルで示したものである.この特徴量の特長として、撮影時の照明の影響やスケール変化、画像の回転の影響を受けにくいことが知られている.したがって、適切なパラメータの設定が難しいというエッジ強調等の他の手法の問題を回避できると考えている.

3.2 ひび割れの有無による特徴量の差

図-4 はひび割れ画像からトリミングした範囲を示し、図-5 は SIFT によって特徴をもつと判断された箇所である特徴点の位置を黒丸で示している。図-5 より、ひび割れがある画像では、ひび割れの近傍に特徴点が集中していることがわかる。ひび割れ近傍ではない特徴点は骨材によるものと考えられる。骨材による特徴点は、図-5(b)左上部のように連続した分布に見えるときがあるが、この場合は元画像を用いてひび割れ近傍かどうかを確認した。図-6 は特徴点がもつ特徴量(128 次元ベクトル)を示したもの

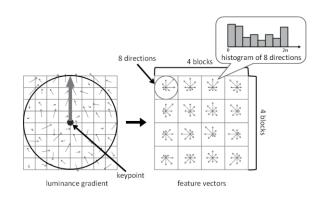


図-3 SIFT特徴量の概要

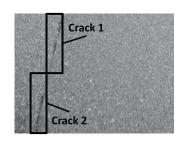


図-4 ひび割れ画像のトリミング範囲

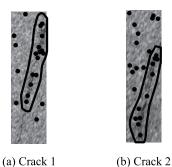
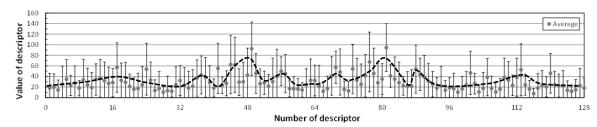
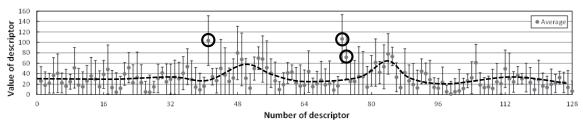


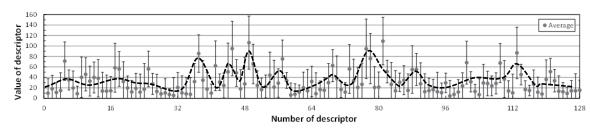
図-5 ひび割れ周辺における特徴点の位置



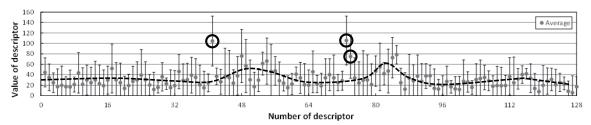
(a) Crack 1 のひび割れ近傍の特徴点における特徴量ベクトルの各成分の値の分布



(b) Crack 1 のひび割れから離れた位置の特徴点における特徴量ベクトルの各成分の値の分布



(c) Crack 2 のひび割れ近傍の特徴点における特徴量ベクトルの各成分の値の分布



(d) Crack 2 のひび割れから離れた位置の特徴点における特徴量ベクトルの各成分の値の分布 図-6 ひび割れとの位置関係に応じた特徴点の SIFT 特徴量の特徴

である. 横軸は図-3 に示す 128 個のベクトルのいずれであるかを示し、縦軸は輝度変化の程度を最大の輝度変化に応じて正規化した値を示している. 図-6 より、ひび割れ近傍以外の特徴点の特徴量の成分には大きな変化が見られないが、ある特定の成分の値が突出することがわかる.

図-6 中の丸で囲った部分は他の成分より値の大きな成分で,ひび割れから離れた位置の特徴点に共通する特徴である. なお, SIFT 特徴量は最大輝度変化に対して正規化した値で示されているため,他の成分より値の大きなこれらの成分は,きわめて近い値を示している.

一方で、ひび割れ近傍の特徴点は、ひび割れ近傍以外の特徴点に比べて特徴量の値にばらつきがあり、小刻みなピークを示しながら値が変化している。このように、ひび割れ近傍の特徴点とひび割れ近傍以外の特徴点は、異なる特徴量の傾向を示すことがわかる。



図-7 路面画像の撮影位置(国土地理院地図に加筆)

表-1 使用したデジタルカメラの性能

| 製品 | | Nikon COOLPIX P7700 | |
|----------|-------|--|--|
| 有効画素数 | | 1219万画素 | |
| 撮像素子 | | 1/1.7減色CMOS | |
| レンズ | 焦点距離 | 6.0 - 42.8 mm (35 mm判換算28 - 200 mm 相当) | |
| | 解放F値 | f/2 - 4 | |
| | レンズ構成 | 10群13枚 (EDレンズ2枚) | |
| ISO感度 | | ISO 80 – ISO 1600 | |
| 絞り羽根枚数 | | 7枚 | |
| オートフォーカス | | コントラスト検出方式 | |

4. 路面画像の撮影と識別実験

4.1 路面画像の撮影

路面画像の撮影は,広島大学東広島キャンパス近郊の道路で実施した.撮影した路線を図-7に示す.撮影当日は天候が晴れていたため,道路路面には影が発生していた.

撮影に使用したデジタルカメラの性能を表-1 に示す. 撮影は、シャッタースピード 1/4000 s と固定したうえで、 毎秒 60 フレームの連写機能を用いて行った. なお、画像 サイズ 1280 pixel×960 pixel、走行速度は 20 km/h とした. なお、撮影された画像は、そのまま解析に入力せずに、 前処理を施した.

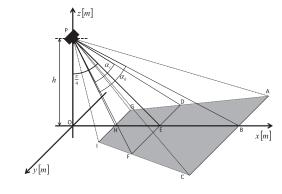
撮影された画像は、上部と下部において、対応する実路面の範囲が異なる。すなわち、カメラは車両上から前方下方を向いているため、図-8(a)に示すように、撮影される画像は道路の台形上の範囲となる。そこで、1 画素に写る実路面上の距離を等しくなるように、透視投影により撮影画像を補正した。その上で、実路面 50 cm 四方に相当する範囲を写す画像をトリミングにより作成した。画像処理の各段階の概要を図-8(b)に示す。これらの画像処理により、撮影画像が疑似的に真上から撮影した画像になると同時に、カメラレンズ中央部で撮影された実路面 50 cm×50 cmの範囲を解析対象範囲としてする。この当該範囲のひび割れの有無を多くの地点で判定し、ひび割れありと判定された地点の比を求めることでひび割れ率の算出が可能となる。なお、トリミング後の画像サイズは 120 pixel×120 pixel である。

4.2 ひび割れ検出の流れ

路面の画像の識別は次の手順で行う.これは、参考文献6)および7)の手法に準拠している.

- (1) 学習画像すべてから特徴点を抽出し、各特徴点における特徴量を算出する
- (2) 特徴量をもとに、特徴点のクラスタリングを行う
- (3) 各学習画像について、クラスタ毎の特徴点の相対度数ヒストグラムを作成する
- (4) 未知画像から特徴点を抽出し、各特徴点における特徴量を算出する
- (5) クラスタ毎の特徴点の相対度数ヒストグラムを作成 する
- (6) 未知画像と学習画像のヒストグラムを比較して、未 知画像がどのカテゴリに属するかを識別する

(1)~(3)を事前に行っておくことで,(4)~(6)の処理は高速に実行でき,走行中の車両においてリアルタイムでの評価が可能となる.特徴点のクラスタリングには k-means クラスタリング法を用いた.基本的に,特徴点のクラスタリングの分割数であるクラスタ数が大きくなるほど性能は上がるが,処理に時間が掛かる.したがって,実務では,



(a) 画像中の実路面範囲



(b) 各段階の概要

図-8 ひび割れ検出実験に使用した画像の補正

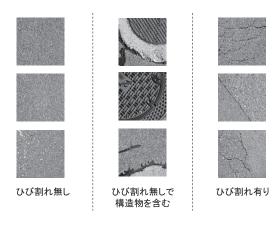


図-9 Case 1 の画像例

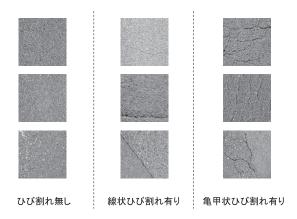


図-10 Case 2 の画像例

表-2 使用画像枚数

| | 学習画像 | | | 入力画像 | | |
|--------|--------|-------------------|---------------|--------|-------------------|---------------|
| Case 1 | ひび割れ無し | ひび割れ無しで 構造物を含む | ひび割れ有り | ひび割れ無し | ひび割れ無しで 構造物を含む | ひび割れ有り |
| | 10 | 10 | 10 | 20(10) | 20(2) | 20(9) |
| Case 2 | ひび割れ無し | 線状ひび割れ 有り | 亀甲状ひび割 れ有り | ひび割れ無し | 線状ひび割れ 有り | 亀甲状ひび割 れ有り |
| | 10 | 10 | 10 | 20(10) | 20(9) | 20(10) |

※()は影を含む画像

表-3 実験結果

(a) Case 1

| | システムによる識別 | | |
|-------------------|-------------------|----------------------------|---|
| | ひび割れ無し | ひび割れ無しで 構造物を含む | ひび割れ有り |
| ひび割れ無し | 12 | 2 | 6 |
| ひび割れ無しで 構造物を含む | 3 | 8 | 9 |
| ひび割れ有り | 3 | 7 | 10 |
| | ひび割れ無しで 構造物を含む | ひび割れ無し12ひび割れ無しで 構造物を含む3 | ひび割れ無しで構造物を含む ひび割れ無しで構造物を含む ひび割れ無しで構造物を含む 3 8 |

| ٤ | ステムロ |
|---|------|
| | 絡 |

| | | システムによる識別 | | |
|------|---------------|-----------|--------------|---------------|
| | | ひび割れ無し | 線状 ひび割れ有り | 亀甲状 ひび割れ有り |
| 带 | ひび割れ無し | 10 | 8 | 2 |
| 目視判断 | 線状 ひび割れ有り | 4 | 15 | 1 |
| | 亀甲状 ひび割れ有り | 1 | 11 | 8 |

(b) Case 2



(a) 撮影用の機材 (梯子, カメラ)



(b) 標識や樹木

図-11 撮影画像に写りこむ影の例

円滑に処理ができるクラスタ数(今回は 48) までを用い ることになる. なお, 栗原らの方法 ⁶と異なり, 識別機と して参考文献 7)の方法と同じ Support Vector Machine⁸⁾を用 いたほか,特徴点の抽出は画像内の格子状の点における SIFT 特徴量を算出する Grid-SIFT(5x7)を用いた.

4.3 識別実験

画像の区分として,「ひび割れ無し」,「ひび割れ無しで 構造物を含む」,「ひび割れ有り」の 3 区分とした Case 1 と,「ひび割れ無し」,「線状ひび割れ有り」,「亀甲状ひび 割れ有り」の3区分とした Case 2の2種類を設定した. 各 Case の画像例を図-9 と図-10 に示す.

Case 1 および Case 2 の使用画像枚数を表-2 に、実験結 果を表-3に示す.表-2において、学習画像は画像区分毎 の傾向を把握するために使用した画像, 入力画像は解析に 識別を行わせた画像である. なお,表-2 における画像の 区分は目視で判断している. また, 学習画像はすべて影の 無い画像から構成され,入力画像は影の有無にかかわらず 画像を選別している.表-3は、システムによって識別さ れた各区分の枚数と,目視で判断した各区分の枚数をまと めてある. なお, 双方の区分が一致した画像枚数を, 入力 した全ての画像枚数で除した値を正答率とする.

表-3より, Case 1の正答率は50%, Case 2の正答率は 55 %となった. ランダムによる識別の正答率が 33 %であ ることを考えると低い値ではなく, SIFT 特徴量の特長は ひび割れ検出に寄与していることがわかる,しかし,識別 結果を基にひび割れ率算定を行うという目標からすると, いまだ十分な精度ではない.

ここで、識別に失敗した画像を整理すると、Case 1 で

30 枚中 14 枚, Case 2 で 27 枚中 17 枚の画像が影を含んでいた. 影を含む路面撮影画像の例を図-11 に示す. このような画像では, 影の境界部をひび割れとして誤判断した可能性がある. そこで, 影の含まない画像のみで正答率を計算したところ, Case 1 では 60 %, Case 2 では 68 %となった. 実験に使用した画像の枚数が少ないため, 定量的な評価にはより多くの試験が必要であるが, 影の影響により正答率が 10 %程度低下したといえる. しかし, 影を含まない画像における 60~70 %弱の正答率も, 実務的なひび割れ率算定に適用するには十分な値とは言えず, 今後の改良が必要である.

識別失敗画像の内訳を詳細にみると, Case 1 では, 構造 物とひび割れの区別における誤判断が多い(構造物をひび 割れと判断したものが20枚中9枚、ひび割れを構造物と 判断したものが20枚中7枚).構造物あるいはひび割れを ひび割れ無しと判断したものは、40枚中6枚に過ぎず、 異常検出という観点では、85%の精度を有しているともい える. ただし、異常なしを異常と判断したものが 20 枚中 8枚:40%もあるという問題はある. Case 2では, 亀甲状 ひび割れを線状ひび割れと誤判断したものが 11 枚と多い. ひび割れの種類の分類となるとひび割れ近傍の特徴点の 特長だけでなく,特徴点の分布状況や連結状況の分類が必 要になるとも思われ,この点はやむを得ない.しかし, Case 1 と同様に、ひび割れをひび割れ無しと判断したもの は、40枚中5枚に過ぎず、異常検出という観点では、高 い精度を有しているともいえる. ただし, ひび割れ無しを 異常と判断したものが 20 枚中 10 枚:50 %もあるという問 題はある.

5. 結論

今回の検討によって,次の結果が得られた.

- (1) ひび割れ部分とひび割れの無い部分の画像の違いを, SIFT 特徴量の違いとして把握できることがわかった.
- (2) 「ひび割れ無し」,「ひび割れ無しで構造物を含む」, 「ひび割れ有り」の3区分では正答率50%,「ひび 割れ無し」,「線状ひび割れ有り」,「亀甲状ひび割れ 有り」の3区分では正答率55%で路面の画像の識別 が可能であった.
- (3) 識別に失敗した画像には識別範囲内に影を含んだも のが多く、影を含まない画像だけに着目すると、正 答率は10%程度向上する.
- (4) 実験結果をひび割れや構造物の有無だけに着目すると,85%以上の割合で、ひび割れや構造物を含む画

像を抽出できる. ただし, ひび割れや構造物を含まない画像を抽出する割合も高い.

なお一般に、識別に用いたクラスタ数や、学習画像数を増加させることで、正答率の向上することが知られている。このことは、ひび割れに関する結果ではないが、路面異常の検出⁶⁾や、大腸癌の検出⁷⁾においても同様の傾向が示されている。そのため、本研究においても、クラスタ数や学習画像数の増加により、正答率の向上が期待できる。これらの検討は今後の課題である。

謝辞

本研究には、平成 24 年度及び平成 26 年度公益社団法人 地盤工学会の道路保全研究助成の支援を得た.ここに記し て謝意を表す.

参考文献

- 1) 財団法人道路保全技術センター 道路構造物保全研究会:アスファルト舗装保全技術ハンドブック,2010.
- 2) 岡田正美,米澤敏男,大野定俊,小出博,朝倉俊弘: 走行式トンネルコンクリート点検システムに関する研究(その3)—ハイビジョン画像からひび割れを抽出するための最適画像処理方法の検討,土木学会第56回年次学術講演会,pp.832-833,2001.
- 3) 田中直樹: レーザー画像を用いた路面からのクラック検出, 土木学会論文集 E, Vol. 62, No. 4, pp.631-640, 2006.
- 4) 広井智, 樅山好幸, 仲田慶正, 内田勇治: ハイビジョンカメラを用いた舗装ひび割れ検出システムの開発と現状, 土木学会第 64 回年次学術講演会, pp.133-134, 2011.
- 5) D. Lowe: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60, No. 2, pp. 91-110, 2004.
- 6) 栗原大,角田光法,一井康二,玉木徹:画像解析を 用いたリアルタイム路面損傷検出システムの開発, 第48回地盤工学研究発表会,pp.307-308,2013.
- T. Tamaki, J. Yoshimuta, M. Kawakami, B. Raytchev, K. Kaneda, S. Yoshida, Y. Takemura, K. Onji, R. Miyaki and S. Tanaka: Computer-Aided Colorectal Tumor Classification in NBI Endoscopy Using Local Features, *Medical Image Analysis*, Vol. 17, No. 1, pp. 78-100, 2013.
- 8) 栗田多喜夫: サポートベクターマシン入門, http://hom e.hiroshima-u.ac.jp/ ~ tkurita/lecture/svm/ (2015/09/28 accessed)

(2015年6月22日 受付)