

審査の結果の要旨

論文題目 構造物におけるクラックの抽出と特徴量把握のための
画像処理システムの構築とその適用

(Detection of Cracks from Surface Image of Concrete and Asphalt
Structure by Image Processing Techniques)

氏名 西川 貴文

我が国の社会基盤において最も多用され、今後もその整備、確立の大部分を占めるものと見られるコンクリート構造物については、定量的で再現性のある診断・点検と早期の対処が求められる。しかし、従来のクラックに関する診断、点検は、迅速性に欠けるうえに検査員の経験的主観に基づく定性的なものである。また、構造解析の分野では、仕様規定型から性能規定型への設計法の移行に伴い、クラックの発生・進展や破壊挙動を精緻に予測できることが望まれ、クラックを直接的に表現できる数値解析手法やクラックの情報を逆解析に用いる手法などが開発・提案されている。これらの手法の妥当性を検討し、信頼性の高い性能予測を行うためには、構造実験等においてクラックを定量的かつ精緻に把握することが望まれているが、従来のクラックの計測・検出手法は、計測に要する時間や労力が多大である点や、評価指標の定量性に欠けること、手法の適用範囲が限定されることなどの課題が残されているのが現状である。

一方、全国的な整備が進められている自動車道路網は、今後もさらなる建設・整備の推進が図られることが明らかである。継続的に安全で安定したネットワークを整備するためには、既設道路網の適切な維持・管理を行い、道路構造上の欠陥が引き起こす事故や環境問題を未然に抑制・防止することが強く求められる。これに対し、現在の道路の維持管理は、検査車を用いた画像集録などの非常に高価な装置を導入しているものの、実際にはその評価方法は検査員の経験に基づいた主観によるところが大きく、迅速性と定量性に欠けるものとなっている。これは、集録した道路面の画像から舗装の損傷を検出することが容易でなく、頑健な画像処理手法が存在しないことに要因があると考えられる。今後、道路網の整備計画の進捗に伴う、供用延長の長大化は明らかであり、上述した現況は決して看過できるものではなく、システムのインテリジェント化による合理的で定量的な診断手法の確立が強く望まれる。

以上の背景、現況を受けて本論文では、社会基盤構造物において発生、進展する顕著な損傷であるクラックを対象として下記を目的として掲げている。

- (1) 様々な条件下で撮影された多様な診断画像に対し、同等に適用可能で頑健な適用結果を得る画像フィルタを生成するシステムを構築する。
- (2) 構築した画像フィルタ生成システムを用いて、コンクリート構造物の表面のクラックを頑健に抽出する画像フィルタを構築する。
- (3) 構築した画像フィルタによるコンクリートクラックの抽出結果を用いて、クラックの特徴量を精度良く把握することを可能とする画像解析アルゴリズムを構築する。
- (4) 道路舗装の健全度診断のインテリジェント化を図るため、画像フィルタ生成システムによって路面の画像から舗装クラックを抽出する画像フィルタを構築する。

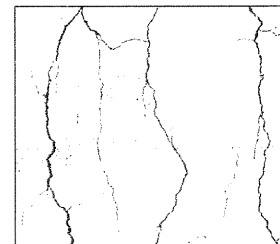
(5) 構築した画像フィルタによる舗装クラックの抽出結果を用いて、道路舗装の健全度を定量的かつ合理的に診断・評価するための画像診断アルゴリズムを構築する。

これらに対する、本論文の結果と成果、得られた知見は以下のとおりである。

第2章において、コンクリート構造の表面を撮影した画像から、表面の汚れや型枠の跡などの不要な情報の影響を抑制しながら、クラックを抽出する直列画像フィルタを構築した。構築したフィルタを適用することで、フィルタの構築に用いた原画像に類似する特徴を有する対象画像から、比較的良好にクラックを抽出することが可能となった。ただし、フィルタの構築に用いた原画像とは特徴の異なる対象画像においては、クラックの未抽出やノイズの発生などの現象が見られたため、これらの現象の要因を見出し、より頑健にクラックを抽出するフィルタに求められる要件を明らかにしている。ただし、探索計算が短時間で済む点や、フィルタ生成システムの構築が簡易である点を考慮すると、対象の可視的特徴に関する情報が予め得られており、またその特徴の時間的変化が顕著でない場合においては、十分に目的の効果を発揮するものと期待できる。

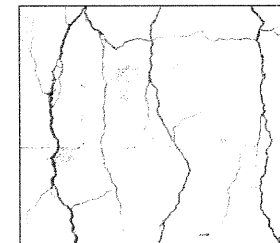


コンクリート表面の画像



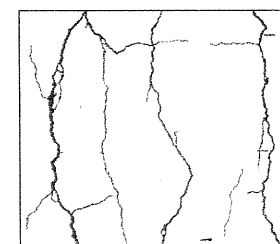
直列画像フィルタによる
クラック抽出結果

第3章においては、直列画像フィルタの適用結果をもとに明示化した頑健な画像フィルタの要件について、フィルタを改善するため、木構造状画像フィルタ生成システムによって、木構造状の複合画像フィルタを構築した。複合画像フィルタは、その適用過程において入力画像を複数回読み込み、画像の加減演算を行う構造を成しているため、クラックの保存とノイズの除去を両立することを可能にしている。さらに、対象画像の多様性に対応するため、複数の原画像を用いてフィルタを生成できるように木構造状画像フィルタ生成システムを改良した。システムの改良にあたり、フィルタの探索方法として、二段階の探索手法を考案した。これにより、計算効率の向上を図りながら、様々な原画像に対して良好な解を得ることが可能となり、大幅な輝度の相違や構造表面の状態に左右されずに主要なクラックを抽出するフィルタを構築することができている。

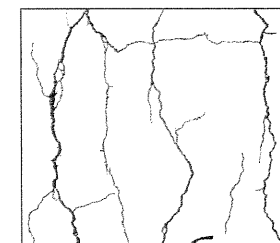


複合画像フィルタによる
クラック抽出結果

次いで、第4章において、低解像度画像によるフィルタ処理結果を重ね合わせる手法である Multi-Resolution Filtering を考案した。また、ノイズの除去処理によって消失したクラックを、局所領域に対してフィルタを適用して再抽出する Auto-Localized Detection を考案した。本論文で対象としている様々な特徴や広範囲のスケールのクラックを有する画像について、これらの手法を用いたクラック抽出処理の妥当性を確認し、その結果、人間の目視によるクラックの抽出精度と同等の結果が得られることを示している。



Multi-Resolution Filtering
による抽出結果



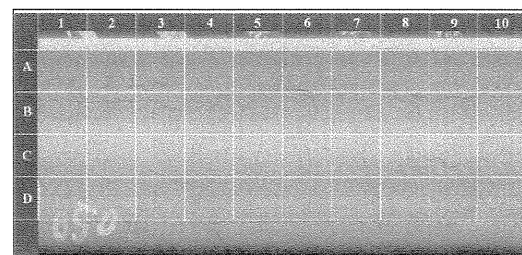
Auto-Localized Detection
による再抽出結果

《本論文において構築した画像処理システムと従来の計測方法の比較》

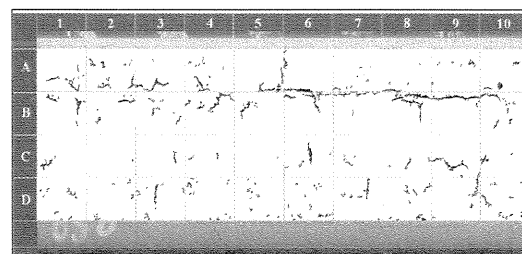
	画像処理システム	従来の計測手法		
		クラックスケール	スケールルーペ	コンタクトゲージ
測定基準	一意	主観的	主観的	一意
測定精度	空間解像度の 1/10	0.1mm	目盛間隔に依存 一般に 0.05mm	0.001mm
測定手法	撮影後に自動計算	目視	目視	基準点の移動量の 測定後に手計算
測定準備時間 [min.]	5	0	0	60
測定時間 [min.]	1	1	1	15
クラックの進展, 分布 状況の記録	撮影後に自動抽出	<ul style="list-style-type: none"> ・ マーキング ・ スケッチ ・ 撮影 	<ul style="list-style-type: none"> ・ マーキング ・ スケッチ ・ 撮影 	<ul style="list-style-type: none"> ・ マーキング ・ スケッチ ・ 撮影

第5章においては、構築した複合画像フィルタと、考案した上述の適用方法によって構造物の表面の画像からクラックを抽出した結果を用いて、クラックの特徴量を把握するためのアルゴリズムを構築した。さらに、精度検証用の画像を用いて、クラックの幅と方向について目視による計測結果と同定結果の比較を行った。その結果、構築したアルゴリズムによって、目視によって測定した結果と同等の精度でクラックの特徴量である幅と方向を算出できることが確認された。そこで、構築した画像処理アルゴリズムを、実験室環境下でのコンクリート梁の破壊試験におけるクラック計測に適用し、計測精度や計測手順、作業性について、従来のクラック計測手法との比較を行い、手法の検証を行っている。その結果、構築した画像処理システムが、非常に短時間で簡易な作業によって高い精度でクラックの幅を同定することがわかり、その有用性と実用化への可能性が十分に示されている。

第6章では、道路舗装に発生、進展する損傷を対象とした健全度評価のインテリジェント化を目的とし、道路舗装の健全度を定量的かつ効率的に診断、評価する画像診断システムの構築を行なっている。まず、路面画像から舗装クラックを頑健に抽出する複合画像フィルタを構築し、多様な路面画像へ適用して、その頑健性を示した。次いで、舗装クラックの抽出結果をもとに、舗装の健全度を評価するために必要な諸量を同定する手法を考案し、実際の診断において撮影された画像を対象とした画像診断システムを構築した。構築した画像診断システムにより、診断対象区間に対する舗装クラックの面積の割合や、線状や面状といったクラックの形状、クラック幅の最大値や平均値、中間値など、クラックに関する総合的な評価指標を算出することが可能であることを示している。



診断画像にグリッド線を描画した画像



診断画像におけるクラックの抽出結果

さらに、現行の診断手法と比較した結果、同等の診断結果を得ることができており、画像診断システムの有用性が確認されたといつてよい。また、システムによって算出可能なクラックに関する

る諸量を複合的に用いることで、新たな評価指標の導入による時系列データベースの構築や未来時刻における危険度評価などが可能となることを述べており、社会基盤としての道路ネットワークの整備計画等への社会的寄与など、システムの将来的な有用性と可能性を見出している。

本論文の新規性および独自性は、構築した手法の対象の抽出における安定性および汎用性が非常に高い点にある。手法は、汚れ、手書きの文字、型枠の跡など、広範囲なノイズをクラックと分離し、クラック部のみを高い精度で安定して抽出することができる。加えて、今後、今回構築した処理で抽出困難な事例に遭遇した場合でも、基本構造はそのままに採用する空間画像フィルタを改良するのみで対応可能であることが期待でき、社会基盤構造物の維持管理や診断・計測技術の分野に大きなインパクトを与えることが予想される。

以上、本論文は、今後ますます重要性が増大する社会基盤施設の維持管理情報の蓄積と利用に関して多大な知見を呈示していると判断される。よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認める。