

## 論文の内容の要旨

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

我が国の社会基盤は、20世紀後半の建造物や交通ネットワークの建設ラッシュに見られるハードウェア基盤の発展の時代を経て、21世紀は情報化技術に代表されるソフトウェア基盤の確立の時代へと向かいつつある。また、近年、地球環境の抱える問題はその危機的状況をさらに進行させており、世界的に見ても、社会基盤を取り巻くトレンドは確実に短期消却型から長期再生型へ移行している。このような現況において、サステナブルな社会基盤を確立するため、ハード的な長寿命化を可能にする新設技術と新材料の開発に並び重要視されるのが、ソフトウェアの面から構造物の長寿命化を支えるメンテナンス技術である。

我が国において最も多用され、今後も社会基盤の整備、確立において重要な役割を担うものと見られるコンクリート構造物については、多岐にわたる変状に対する維持・管理が必要であるが、特にクラックについては、その発生や進展が、構造物の安全性や機能性に悪影響を及ぼす可能性を有しており、また、構造物の美観を損なう原因ともなるため、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、点検においては、検査員による目視と打音検査による状況の把握が主流となっており、客観的かつ定量的な評価が困難である。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。クラックや空隙の計測・検出では、特別な装置を用いて構造内部まで3次元的に把握する手法や、表面の可視情報を用いた画像解析による手法などが存在する。しかしながら、これら従来の手法では、装置が非常に高価であることや、計測に多大な時間と労力を要すること、評価指標の定量性に欠けることや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、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、道路構造上の欠陥による事故や環境問題の発生を未然に抑制・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、その評価や判断は検査員の経験に基づいた主観によるところが大きく、非効率的であるうえ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い、供用延長は必ず長大化することを考えると、診断システ

ムの現状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望まれる。

第 1 章では、序論として、上述の背景・既往の研究について整理し、これらを踏まえて、本研究の目的として、

- (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。

ことを掲げている。

第 2 章では、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から受ける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ている。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主要な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。また、直列画像フィルタの有用性について考察し、その有用性が期待される事例について言及している。

第 3 章では、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、木構造状の画像フィルタに着目し、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て、フィルタを構築している。システムの改良にあたって、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たといえる。フィルタの頑健性・妥当性については、本研究で対象とした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対して確認している。

第 4 章では、第 3 章で述べた抽出処理では抽出することが困難であった、不明瞭なクラックや微細なクラックの抽出を可能とするアルゴリズムを構築し、広範囲のスケールのクラックに対する抽出の頑健性の向上を図った。まず、低解像度画像におけるフィルタの適用結果を重ね合わせる手法である **Multi-Resolution Filtering** を考案した。この手法によって、クラックの連続性を強調

することが可能となり、ノイズの除去処理において微細なクラックが消失する現象を抑制することが可能となっている。次いで、抽出された主要なクラックの幾何情報をもとに、未抽出の不明瞭なクラックや、消失した微細なクラックが存在する可能性のある領域を自動的に探索し、フィルタを局所的に適用する **Auto-Localized Detection** を考案した。これらのアルゴリズムを用いることで、様々な条件下において撮影された、多様なコンクリート表面の画像において、フィルタを画像全体に一括して適用する方法では抽出することが困難な不明瞭なクラックや微細なクラックを頑健に抽出できることを示している。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確認している。

第 5 章では、構築した木構造状の画像フィルタと、考案したフィルタ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。次いで、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い、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を確認している。さらに、構築した画像処理システムを、実験室環境下でのコンクリート梁の載荷試験におけるクラック計測に適用して手法の検証を行い、その有用性と将来的な実用化への可能性を示している。

第 6 章では、道路舗装の損傷を対象として、第 5 章までに構築した画像処理アルゴリズムを応用し、道路舗装の健全度を評価する画像診断システムを構築している。まず、道路舗装の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、第 4 章において構築したアルゴリズムにもとづいて対象とした路面の画像に適用することで、舗装クラックを頑健に抽出できることを確認している。次いで、クラックを抽出した結果の画像を用いて舗装の健全度を評価する画像診断システムを構築し、画像診断によって取得可能なデータを示すとともに、現行の診断において用いられている舗装の健全度評価指標を迅速に算出可能であることを示し、システムの有用性を示している。また、画像診断システムによって算出可能なクラックに関する諸量を複合的に用いることで新たな評価指標の導入が可能となり、これによって将来的には道路ネットワークの整備計画等への社会的寄与などが見込まれることを述べている。

第 7 章では、本研究の成果をまとめるとともに、得られた知見を述べている。