

**「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(令和元年度採択)
研究概要**

番号	研究課題名	研究代表者
No.31-6	解析学的信号処理によるトンネル等のうき・剥離の高精度・高速検出に関する研究開発	東京大学 教授 石田 哲也

舗装の変状検出で実証された研究成果を計測技術と解析技術の両面で応用・発展させ、トンネル等におけるコンクリートのうき・剥離を点群情報から検出可能とすることを目的とする。本研究成果は、高精度であるだけでなく、処理の自動化により高速にうき・剥離を検出することで、点検→診断→補修を準リアルタイムに連続的に行い、トンネル点検においてより効率的かつ生産性の向上につながる技術として社会実装を目指す。

1. 研究の背景・目的

日本におけるインフラ構造物の老朽化、少子高齢化に伴う生産人口の減少に伴い、維持管理には更なる効率化が求められ、中でもトンネルの点検は、定期点検における近接目視点検の義務化により、点検作業の効率化は急務となっている。

本研究は、トンネル等におけるコンクリートのうき・剥離を点群情報から検出可能とする新技術の開発を目的とし、技術分類ごとの目標を以下の通り設定した。

- 計測技術：厚さ1,2mm以上の損傷を捉えるレーザ測距装置を活用した計測技術の開発
- 解析技術：検出率8割程度を有する点群情報からうき・剥離を検出する解析技術の開発
- 解析技術：計測から2日程度で解析が完了する技術の開発
- 技術実証：地域・施工法等の異なる条件下における適用性・適用範囲の検討

2. 研究内容

(1) 計測技術 (ハードウェア)

サブミリの厚さ検知能力を有する高精度なレーザ測距装置を選定し、本機器をベースとした車両搭載レーザ計測システムの構築を進めてきた。複数の実証フィールド計測に導入済みであり、1mm以上のうき、2mm以上の剥離を捉えることに成功した。

(2) 解析技術 (ソフトウェア)

既往の研究で本研究チームが開発してきた路面の凹凸性状評価アルゴリズムをベースに改良を進めてきた。複数の実証フィールドで改良した解析アルゴリズムを適用させ、いずれのフィールドにおいても約8割以上の検出率(検出した損傷数/打音検査により確認された損傷数)を確認した。また、高速な信号処理+行列演算により、最速10秒/1mで損傷検出を可能とした。

(3) 技術実証

複数の施工法・表面状態の実フィールドにて打音検査を実施し、解析結果との比較検証を進めてきた。当初予定をしていた表面状態の滑らかなフィールドと、研究着手後に要望のあった表面に非施工由来の激しい凹凸形状を有するフィールドにて適用性を検証し、様々な条件化でも大きな影響を受けず高精度な検出を可能とする技術であることを確認した。

3. 研究成果

(1) レーザ測距装置の選定と車両システムの構築

レーザ測距装置によるうき・剥離の検出は、レーザ測距精度(照射方向精度)に大きく依存し、厚さ1,2mmの損傷を移動体計測にて取得するためには、サブミリの測距精度を有するレーザ測距装置が必要である。図1は、測距精度0.4mm※1の位相距離方式レーザによる厚さ別供試体の移動体計測結果であり、厚さ1mmの検知能力を確認した。また、本センサを搭載した車両システムを構築し、各実証フィールドにてレーザ計測を実施した。

レーザ測距方式	1mm厚	2mm厚
位相距離方式 (Phase Shift)		
タイムオブフライト (Time Of Flight) ※従来方式		

図1. レーザ測距装置による供試体計測結果

(2) 解析学的信号処理によるうき・剥離検出アルゴリズムの開発

静的な変位データを動的な交流波形とみなすと、うき・剥離は正負の符号は異なるものの、「振幅」が大きいことが共通点として挙げられる。そこで、振幅が大きい波形の区間を検出するために、振幅変調特性を推定できる「ヒルベルト変換により得られる解析信号の絶対値（波形の包絡線）」を各側線で計算し、包絡線の値がある閾値以上の箇所は損傷、未満では非損傷とすることで、ロバスト・効率的に損傷候補区間を推定した。これらの処理をトンネル縦横断方向に連続的に行い基準面を推定し、元データから基準面を除算することで、トンネル覆工面の三次元形状を抽出した。さらに、三次元形状の特徴から附属物と損傷を判別して検出することまでを可能とした。

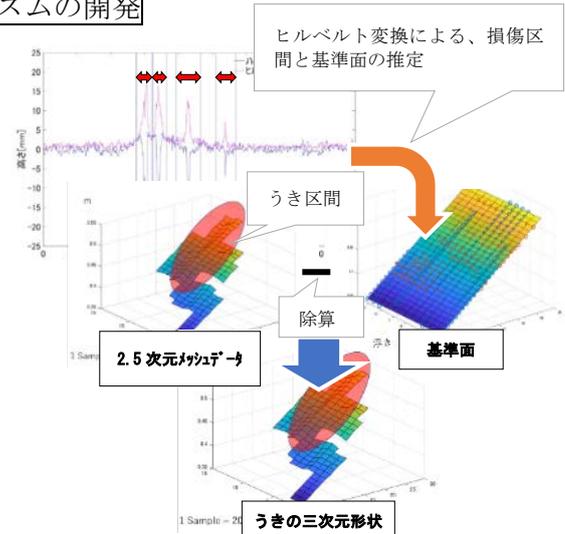


図 2. 損傷の三次元形状抽出

(3) 本解析アルゴリズムの適用性・実運用性検証

異なる施工法・表面状態を持つトンネルにおいて、解析結果と打音検査の結果を比較し、本解析アルゴリズムの適用性・実運用性について検証を実施した。施工法・表面状態に大きく影響することなく検出率約8割以上の結果が得られていることを確認した。また、3次元点群データの計測ピッチ（点密度）を変更することにより、解析精度と処理時間をコントロールすることのできる実運用性の高さについても実証することができた。

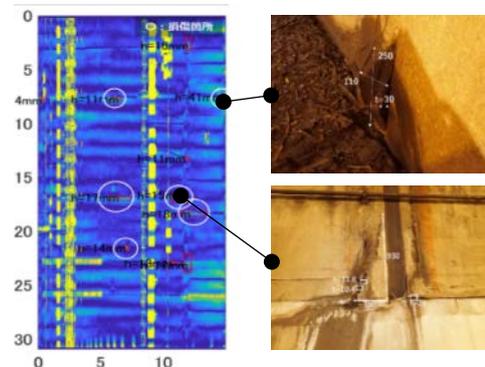


図 3. 実証フィールドでの検証

4. 主な発表論文

- T. Mizutani, T. Yamaguchi, T. Kudo, K. Yamamoto, T. Ishida, Y. Nagata, H. Kawamura, T. Tokuno, K. Suzuki, and Y. Yamaguchi, “Quantitative Evaluation of Peeling and Delamination on Infrastructure Surfaces by Signal and Image Processing of 3D Point Cloud Data,” Automation in Construction (Elsevier), pp.1-10, 2021. (DOI: 10.1016/j.autcon.2021.104023) (Impact Factor: 7.700, Cite Score:12.0)
- Tomoaki Tokuno, Yoshifumi Nagata, Hinari Kawamura, Tetsuya Ishida, Tsukasa Mizutani, Junko Yamashita, 2-Dimensional Innovative Pavement Evaluation via Mobile Mapping System, 第16回 REAAA 道路会議, 2021年6月15日~17日, マニラ
- 水谷司, 工藤寅嗣, 山本和朋, 山口貴浩, 石田哲也, 永田佳文, 川村日成, 得能智昭, 山口裕哉, 鈴木清, MMS 点群データの解析学的信号処理によるインフラ表面のうき・剥離の検出, 第34回道路会議, 点検セッション709, No.6035, 2021.

5. 今後の展望

本技術を他の国へも展開できるよう、様々な地域のデータを蓄積し、よりロバストなアルゴリズムへの改良が必要である。例えば、発展途上国は日本よりもインフラ表面に形状変化があると考えられ、それらに対応するためには、データ計測・解析・検証を繰り返し、改良することで、本技術が他国で使われるようになる可能性は大いに秘めていると思われる。

6. 道路政策の質の向上への寄与

1次スクリーニング点検のような低コストで日常的に行う点検や、定期点検のように近接目視点検が義務化された詳細な点検等、要求される精度やコスト、迅速性に合わせて本技術を切り替えることで、多様な運用が可能であると考えられる。

7. ホームページ等

<https://mizutanilab.iis.u-tokyo.ac.jp/archives/602>