

道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成果報告レポート
No. 31-6

研究テーマ

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

研究代表者： 東京大学教授 石田 哲也
共同研究者： 東京大学准教授 水谷 司
 首都高技術株式会社 安中 智
 朝日航洋株式会社 鈴木 清

令和4年5月

新道路技術会議

目次

研究概要	3
第1章 はじめに	5
1. 1 研究の概要	3
1. 2 研究の背景、目標	5
1. 3 研究目標の達成状況	5
1. 4 実施体制	6
第2章 計測技術の研究開発	7
2. 1 Mobile Mapping System の概要	7
2. 2 計測車両システムの構築	7
2. 3 計測データの最適化	11
2. 4 実証用データの取得	13
2. 5 解析学的信号処理までの処理過程の実装	14
第3章 解析技術の研究開発	15
3. 1 解析学的信号処理の概要	15
3. 2 ヒルベルト変換による各側線の包絡線推定とうき・剥離検知	15
3. 3 基準線による損傷区間長推定	16
3. 4 各損傷の面的な領域推定	17
3. 5 損傷の寸法および最大深度の評価	19
3. 6 基準面による三次元凹凸形状の推定	19
3. 7 準リアルタイム処理への応用	23
第4章 技術実証	25
4. 1 技術実証の概要	25
4. 2 本解析アルゴリズムの適用範囲の検証	25
4. 3 本解析アルゴリズムの実運用性の考察	26
第5章 点検支援技術性能カタログ（案）への掲載検討	37
5. 1 カタログ掲載に向けた検討	37
5. 2 類似技術にたいする優位性の整理	37
5. 3 カタログ掲載項目の内容検討	37
参照	41

**「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。

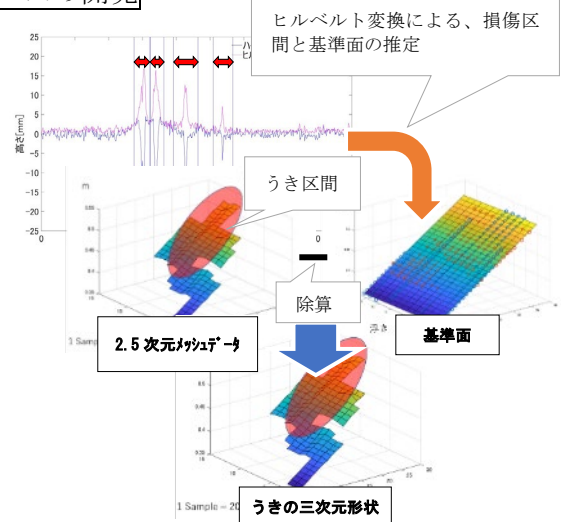


図 2. 損傷の三次元形状抽出

(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。

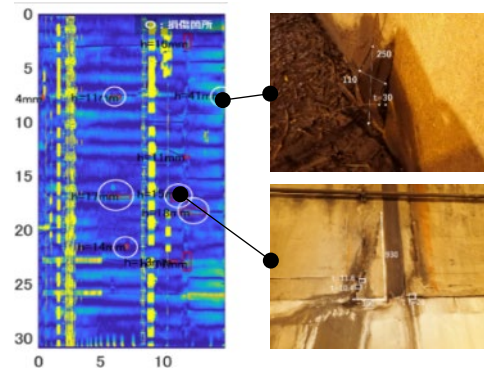


図 3. 実証フィールドでの検証

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, 工藤真嗣, 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>

第1章 はじめに

1.1 研究の概要

本研究は、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。

1.2 研究の背景、目標

(1) 研究の背景

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ている。国土交通省は、平成24年12月に発生した笹子トンネル天井版落下事故などを踏まえ、5年に1回のトンネル定期点検での近接目視点検を義務化するなど、インフラメンテナンスを強化推進している。しかし、道路管理者の負担の増加や、高齢化による点検技術者の減少などの課題から、従来までの人手による点検の効率化が求められている。

本研究では、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高精度・高速に検出可能とし、トンネル点検作業の効率性と生産性の向上を目的とした新技術の開発を行った。

(2) 研究の目標

「計測技術」、「解析技術」、「技術実証」の3つの項目について目標を設定した。

計測技術は、厚さ1,2mm以上のうき・剥離を捉えることのできる高精度レーザ測距装置を活用した計測技術の開発を行うことを目標とする。

解析技術は、損傷検出率8割程度を有する点群情報からうき・剥離を高精度に検出する解析技術の開発

を行うことを目標とする。また、計測から2日程度で解析が完了するよう処理の高速化を図る。

技術実証は、地域・施工法等の異なる条件下において、開発した計測技術と解析技術の両面を適用させ、本技術の適用性・適用範囲の検討を行うことを目標とする。

1.3 研究目標の達成状況

1.2節で設定した目標に対する達成状況について下記の通り報告する。

(1) 計測技術の研究成果

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) 解析技術の研究成果

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) 技術実証の研究成果

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。

1.4 実施体制

本研究の実施体制を図-1に示す。

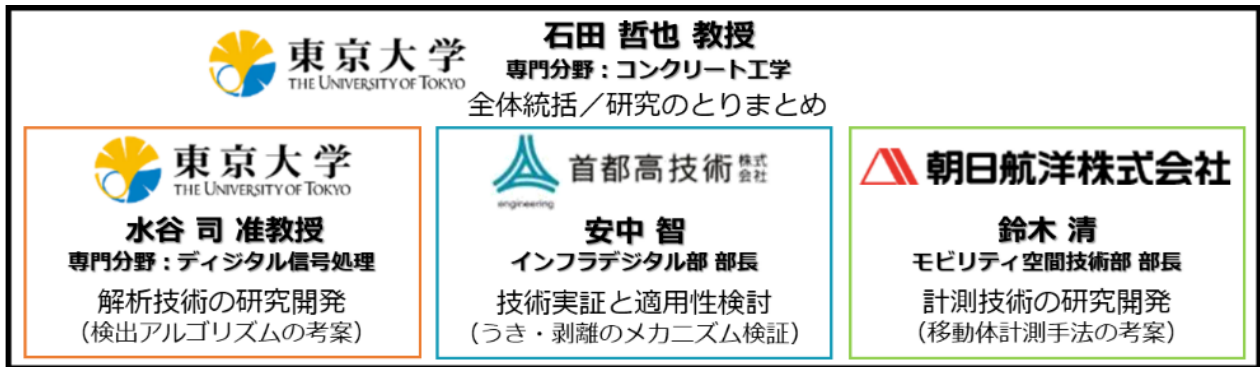


図-1 研究実施体制

第2章 計測技術の研究開発

2.1 Mobile Mapping Systemの概要

自動車に GNSS (Global Navigation Satellite System) アンテナ、IMU (慣性維持装置)、DMI (距離計)、レーザスキャナ、デジタルカメラなどの複数機器を搭載して走行することで、道路及び沿道の3次元デジタルデータを取得する移動体計測システムを Mobile Mapping System (以下、MMS) と呼ぶ。道路法面や建物側面など、航空レーザ並びに航空写真などの上空からでは計測できなかった地物の情報が取得可能であり、さらに取得対象物までの計測距離が短いため、高繊細な (解像度の高い) 計測が可能である。道路地物を例に挙げると白線 (外側線など) やマンホール、電柱、ガードレールなど、比較的小さい道路地物も計測が可能である。



図-2 MMS の概要

2.2 計測車両システムの構築

(1) 計測機器の選定

本研究では、MMS にレーザ測距装置を搭載し、得られる3次元点群データを活用して、トンネル坑内におけるうき・剥離を高精度に捉えることを目的としており、1, 2mm の厚みを検知できる装置が必要となる。なお、レーザ測距装置の測定方式は、表-1 の

通り、代表的なものとして「①位相差距離方式」、「②タイムオブフライト方式」、「③三角測距方式」の3方式が挙げられ、その測定方法と特性から「①位相差距離方式」のレーザ測距装置にてプロトタイプ機器を構成することとした。

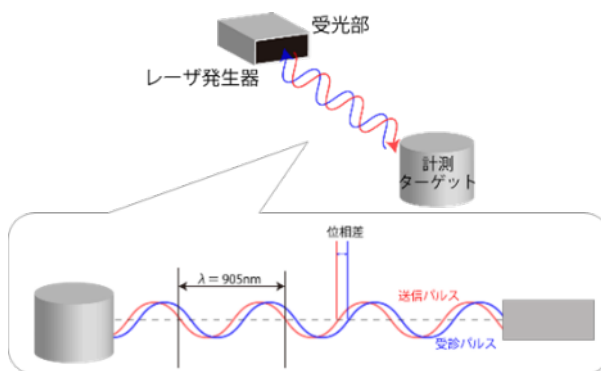


図-3 位相差距離方式レーザの測定イメージ

(2) 計測車両の構築

位相差距離方式レーザ測距装置をメインセンサとして表-2 の構成にて計測車両システムを構築した。構築した車両は図-4 の通りであり、レーザ測距装置の設置角度を可変できるような設置架台を採用した。

(3) レーザ測距装置の精度テスト

レーザ測距装置によるうき・剥離の検出には、レーザ照射方向の精度 (以下、測距精度) が大きく影響する。うき・剥離を模した厚さ別供試体 (厚さ: 0.5mm~10mm) の計測テストを実施し、選定したレーザ測距装置が目標である 1, 2mm の損傷を捉えることのできる測距精度を有するか検証を実施した。なお、比較のためタイムオブフライト方式レーザでも同テストを実施した。

図-5、6 は計測風景と計測結果であるが、タイムオブフライト方式より、位相差距離方式レーザ精度の方が良好であり、その計測精度は厚さ 1mm の供試体の検知を可能とすることを確認した。これは、目標である 1, 2mm のうき・剥離の検出に十分な精度を有するものと考えられる。

表-1 レーザ測距方式による特性一覧

	位相差距離方式 (PS 方式)	タイムオブフライト方式 (TOF 方式)	三角測距方式 (BGS 方式)
測距精度※1	高 (0.4mm※2)	中 (3.0mm※3)	非常に高い (0.1~2mm)
解像度 (密度)	高	高	(条件次第)
測定距離 (範囲)	中距離 (1~119m 程度)	遠距離 (1~800m 程度)	近距離 (1~800m 程度)
リアルタイム性能	高	中	低
機材サイズ	コンパクト	コンパクト	大きい
機材構成 (キャリアブーション性能)	シンプル	シンプル	複雑

表-2 車両搭載機器

センサ名称	必要台数	用途
レーザスキャナ	1 機以上	トンネル内の距離データを取得する装置。位相差方式
計測車両	1 台	各種機材を搭載するベース車両。 機材の設置位置・角度等を調整可能とする。
GNSS アンテナ	1 機以上	自己位置を測定する装置。
IMU 装置	1 機	車両の傾きを検知し、自車姿勢を補完する装置。
DMI (車速計)	1 機	車両タイヤの回転数を検知し、自車位置を補完する装置。

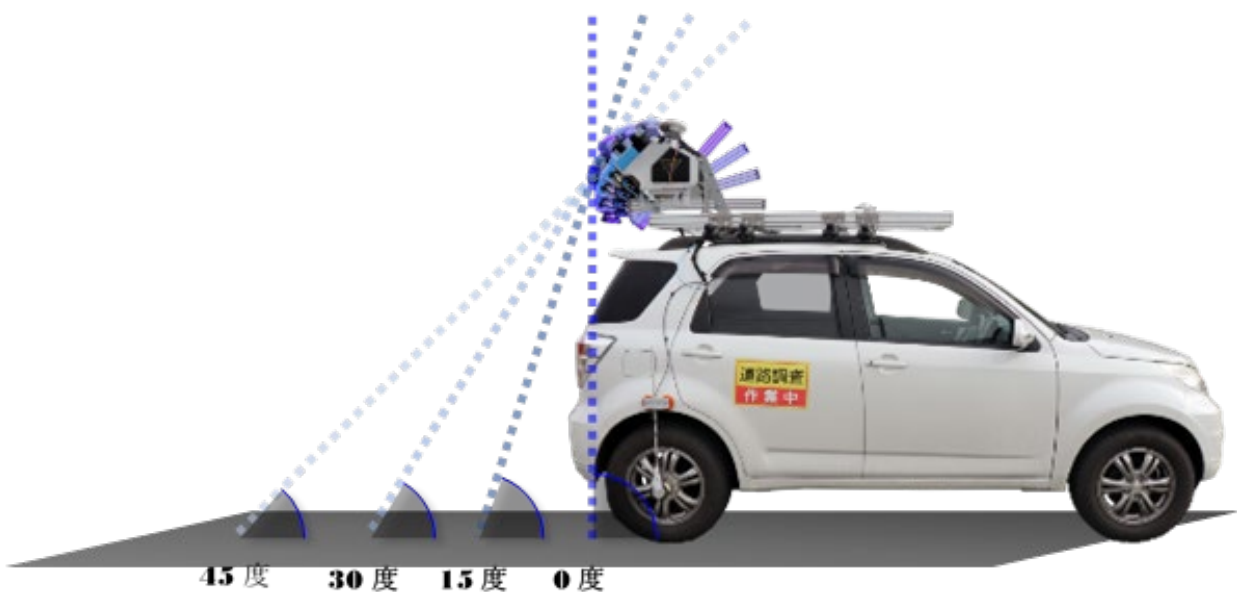


図-4 構築した車両 (外観)

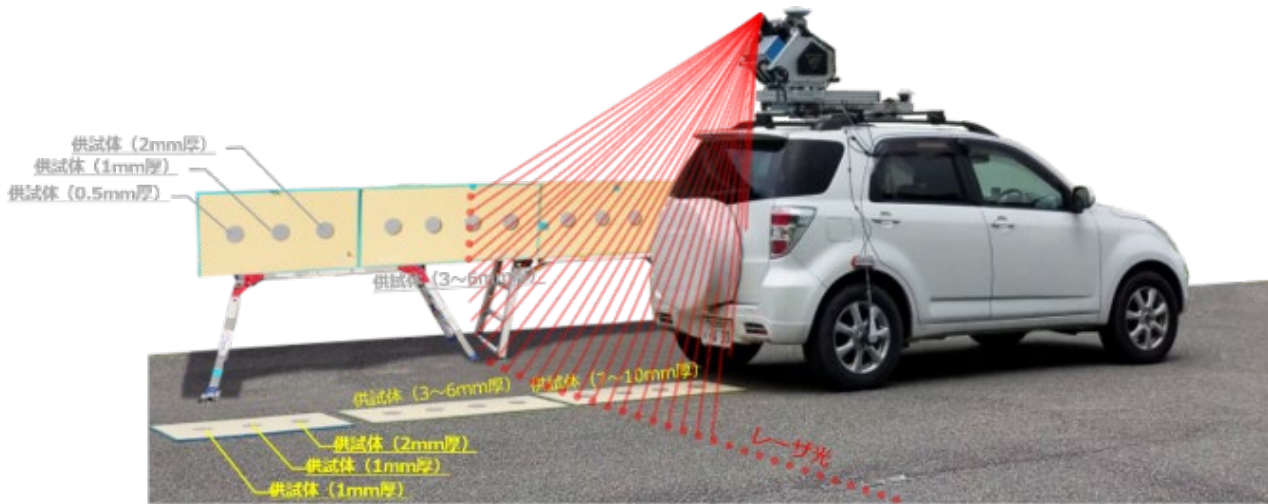


図-5 厚さ別供試体計測テスト

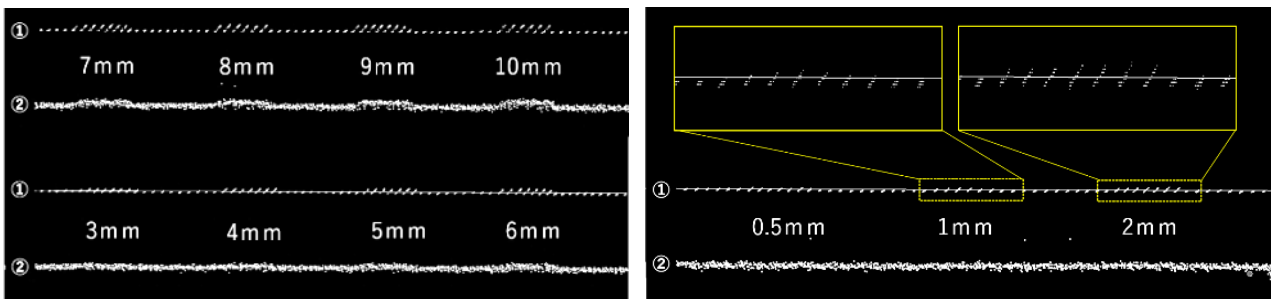


図-6 供試体計測テスト結果 (①：位相差距離方式、②：タイムオブフライト方式)

(4) 計測車両によるテスト計測 (GNSS 受信区間)

計測システムのテストとして GNSS 衛星が十分に受かる道路にて、計測データが問題なく取得できるか精度点検を行った。

検証場所は、実測にて道路地物の座標を取得している直線区間約 300m程度を計測し、計測した点群データの精度点検を 51 点にて実施した。検証結果は、「標準偏差 4.9cm」と精度に問題のないことを確認した。

(5) 計測車両によるテスト計測 (GNSS 非受信区間：トンネル)

GNSS 衛星が受からないトンネル区間において、計測システムの動作確認、精度検証を実施した。

動作確認の基準として、トンネル計測等で精度点検が実施済みの MMS 車両 (タイムオブフライト方式レーザ機器搭載) を用いて、断面などの相対位置精度を比較して点検を行った。

図-7 は、計測結果を比較した結果 (上図：タイムオブフライト方式、下図：位相差距離方式) であるが、トンネルの高さ、幅共にミリ精度で一致しており、精度に問題のないことを確認した。

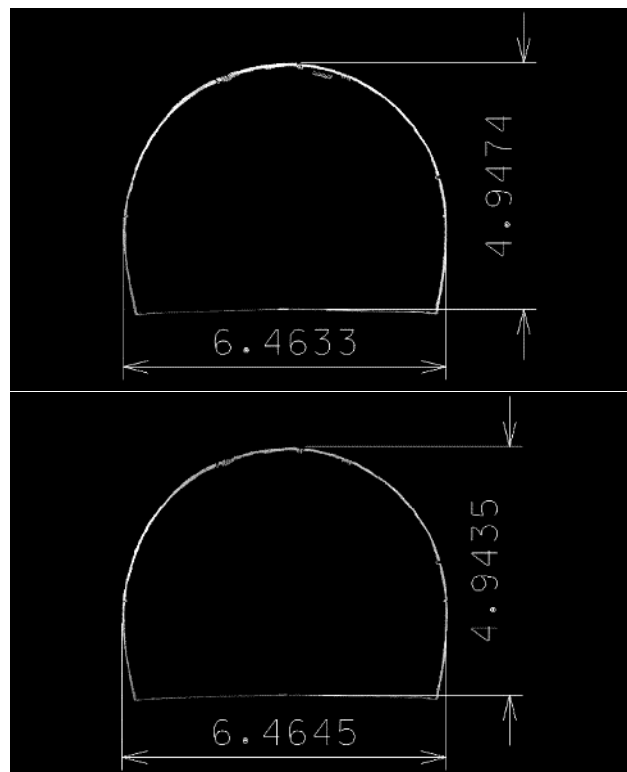


図-7 トンネル内点群データ断面模様

(6) 計測仕様の検討

計測パラメータと取得データとの関係を整理し、計測方法によりうき・剥離の検出にどのような影響を及ぼすか検討を行った。具体的には、スキャンレート値、パルスレート値の選定と、スキャン角、車両速度を変更したときの計測ピッチ（点密度）についての関連性を整理した。

設定値は表-3の通りとし、スキャン角は多様な方向に生じた損傷を捉えるべく、最もロバストな45°とし、また、「スキャンレート」および「パルスレート」はデータを取得する速度に影響することから、機材の最パフォーマンス値を設定した。

次に、スキャン角、および車両速度と計測ピッチの関連性について示す。スキャン角を変更しトンネル内を計測した場合、1 スキャンあたりの計測断面はスキャン角が大きくなるほど楕円体の形状を成す。トンネルの形状を半真円と仮定した場合、半円の中心から計測を行うと仮定すると、スキャン角0°、および45°の形状（縦断方向視点）は図-8のようになる。円の半径を3mと仮定すると、トンネル横断方向から見た計測断面は、図-9の通りスキャン角45°の場合は半径4.24mと3mの半楕円形となり、スキャン角0°の場合は半径3mの半新円となる。このとき、スキャンレート200Hzで100万発のレーザー光を発射する場合、1秒間に5000発のレーザー光を360°照射するため、単純計算で考えると180°あたりに2500発のレーザーを照射することとなる。以上から、計測断面の半円周と180°あたりのレーザー照射数により、スキャン方向における平均計測ピッチr1は式(1)にて算出することができる。

$$r1 = \frac{\text{半円周}}{180^\circ\text{あたりのレーザー照射数}} \quad (1)$$

なお、実際にはトンネル覆工面までの距離も変わることから、本結果はあくまで一つの指標として取り扱うこととする。

また、トンネル縦断方向の計測ピッチr2は車両速度に影響し、式(2)により算出することができる。

導出したトンネル縦横断方向の計測ピッチとスキ

ャン角、車両速度の関連性を表-4に示す。スキャン角に比べ、車両速度は計測データの密度（精度）に大きく影響するため、要求精度に応じた車両速度の設定が必要である。

$$r2 = \frac{\text{車両速度}}{\text{スキャンレート}} \quad (2)$$

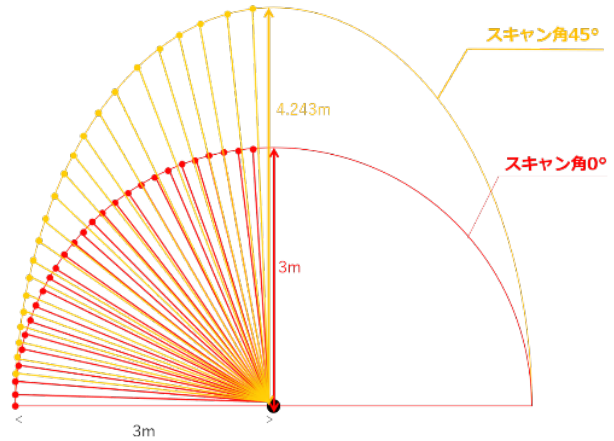


図-8 スキャン角別計測断面(1 スキャンあたり)

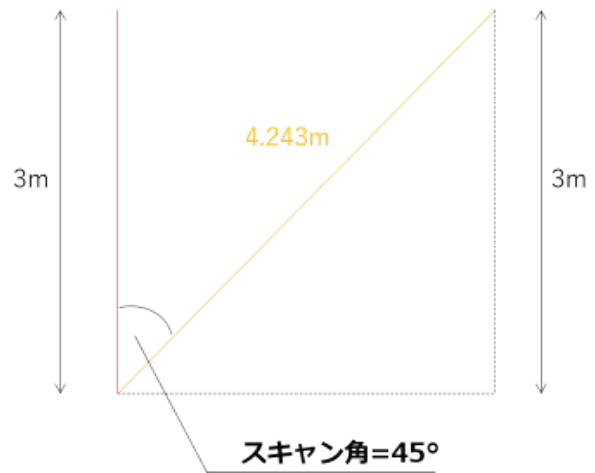


図-9 スキャン角別計測断面（横断方向から見た図）

表-3 計測仕様設定値

設定検証項目	設定範囲	設定値
スキャン角	トンネル横断方向の計測方向	45°
スキャンレート	車両進行方向にスキャンする速さ (トンネル横断方向の点群発射数)	200Hz (最パフォーマンス値)
パルスレート	点群の発射数 (トンネル横断方向)	100万発 (最パフォーマンス値)

表-4 計測設定値と計測ピッチ（点密度）の関連性

計測ピッチ(点密度) [mm] (横断方向、縦断方向)		車両速度			
		5km/h	15km/h	30km/h	50km/h
スキャン角	0°	(3. 770, 6. 944)	(3. 770, 20. 83)	(3. 770, 41. 66)	(3. 770, 69. 44)
	15°	(3. 836, 6. 944)	(3. 836, 20. 83)	(3. 836, 41. 66)	(3. 836, 69. 44)
	30°	(4. 067, 6. 944)	(4. 067, 20. 83)	(4. 067, 41. 66)	(4. 067, 69. 44)
	45°	(4. 584, 6. 944)	(4. 584, 20. 83)	(4. 584, 41. 66)	(4. 584, 69. 44)

2.3 計測データの最適化

3次元点群データは、計測したレーザデータと位置・姿勢データ（車両軌跡データ）を整合させることで、ある時間の特定の位置に3次元の点情報として生成することで作成されるが、図-10 に示すように、整合性が上手くいかない場合には、生成されたデータのノイズが生じる場合がある。これは、本計測システムにて計測したトンネルの3次元点群データであるが、スキャン方向に縞状のノイズが確認できる。これは、微小な損傷を検出するにあたって、大きな障害になる恐れがあるため、本現象の原因究明と対策を講じた。

(1) 縞状ノイズの原因究明

本現象の原因究明、並びに、再現性の確認のため、図-10 とは別フィールドにて計測を実施した。図-11 に示すように、図-10 と同様のノイズが生じることを確認した。なお、計測諸元は表-3 と同様とした。

図-12 に示すように、レーザスキャン角度が45°の場合は、トンネル横断面を斜めに切るようにスキャンを行う。ノイズの生じたトンネルはいずれもスキャン角45°で実施しており、縞状ノイズの形状と1スキャンで取得した3次元点群データの形状が類似していることから、スキャン毎のデータ間にノイズが生じているものと予測される。

続いて、ノイズが生じているタイミングであるが、図-11 からわかるように、縞状ノイズ付近では走行方向のスキャン間隔に疎密が見られる。これについて、車両の傾き（ ω 方向）に起因するスキャン間隔の疎密であると仮定したときに、例えば路面に凹凸がある場合、トンネルの上部は図-13 のように走行方向に疎密が発生する。そこで、車両の傾き角と走行方向のスキャン間隔の相関性を検証し、上記仮定の妥当性を確認した。図-14 の検証結果の通り、縞状ノイズ発生時のスキャン間隔の疎密と車両の傾きには関連性があり、これにより、路面に凹凸があるタイミングでノイズが生じていることを確認した。

最後に、ノイズに該当する値であるが、図-15 の通

り、スキャン毎の高さの値に該当することを確認した。3次元点群データの作成時には、IMUを原点とした各種センサ（レーザ測距装置、GNSS等）の位置・姿勢を定め、たとえ路面の凹凸が存在する場合においても、ある瞬間の位置・姿勢から計測対象物の正確な形状を再現するよう補正を行う。その補正が不十分な場合、ある瞬間におけるレーザの照射距離のズレ等により、計測対象物を正確に再現することができなく、車両の角度が大きく変化するようなエリアはズレが顕著に生じる可能性がある。加えて、GNSS衛星の非受信区間であるトンネル内は、位置情報を取得することが難しく、よりノイズが生じてしまっているものと推測した。

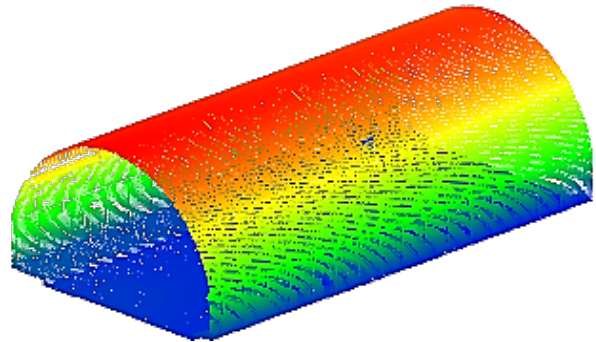


図-10 実証フィールド①トンネル内の縞状ノイズ

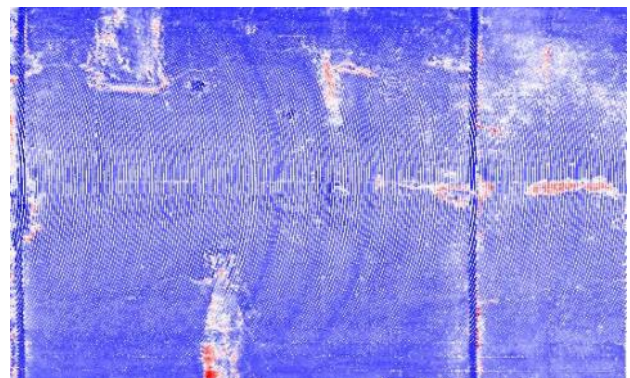


図-11 実証フィールド②のトンネル内の縞状ノイズ
(真上から見た図)

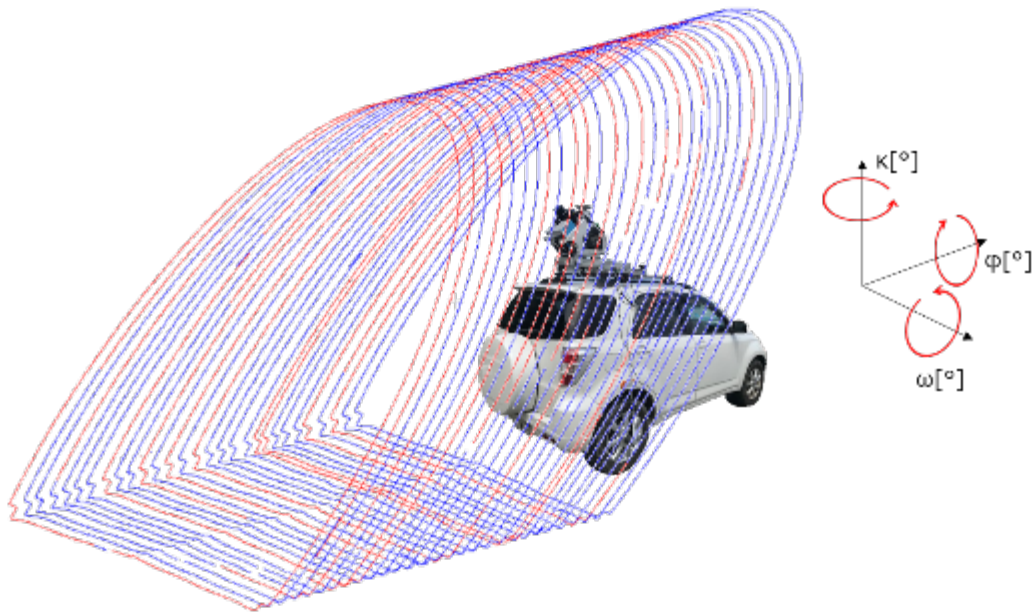


図-12 トンネル内におけるレーザスキャンイメージ (スキャン角度: 45°)

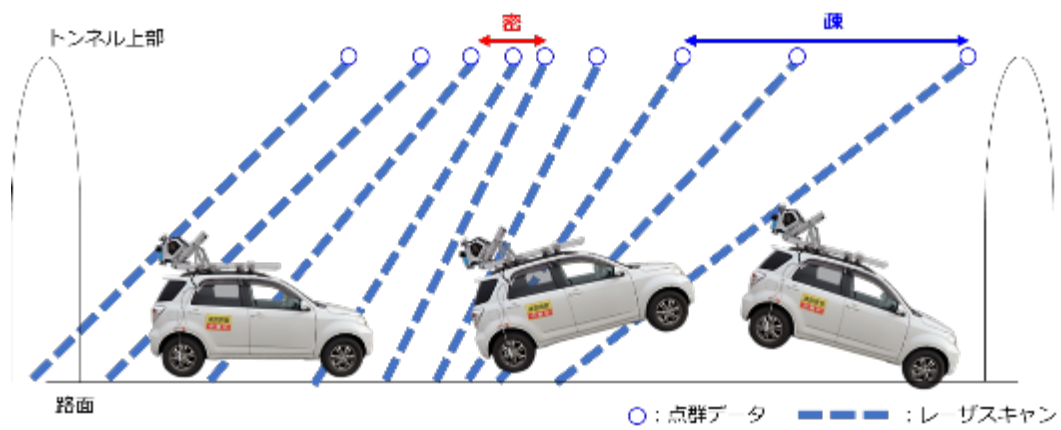


図-13 車両の傾きによる走行方向のスキャン間隔イメージ

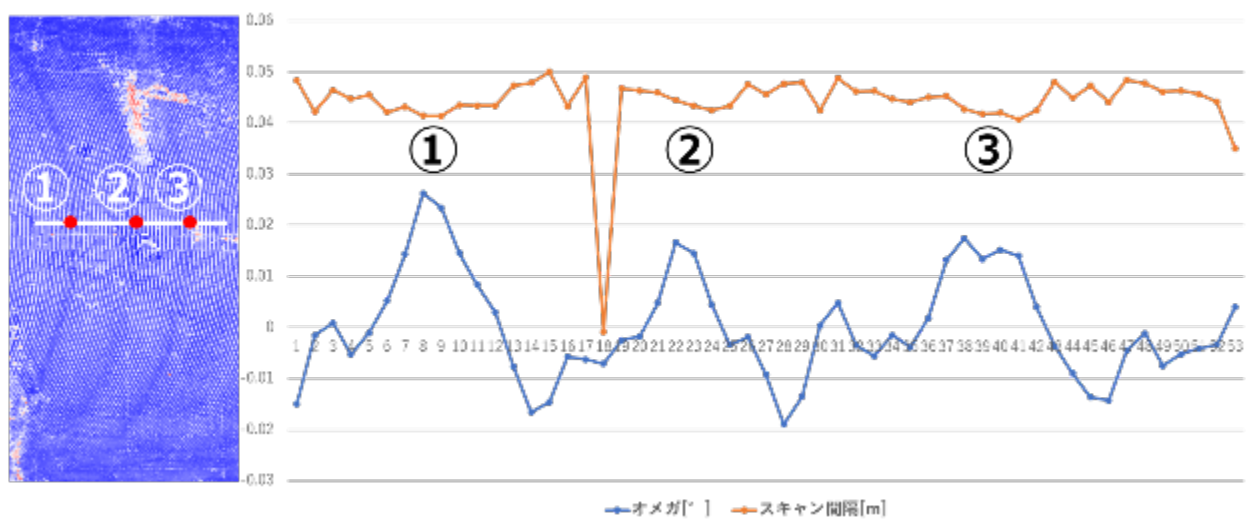


図-14 車両の傾き角 (ω) と走行方向のスキャン間隔 [m]

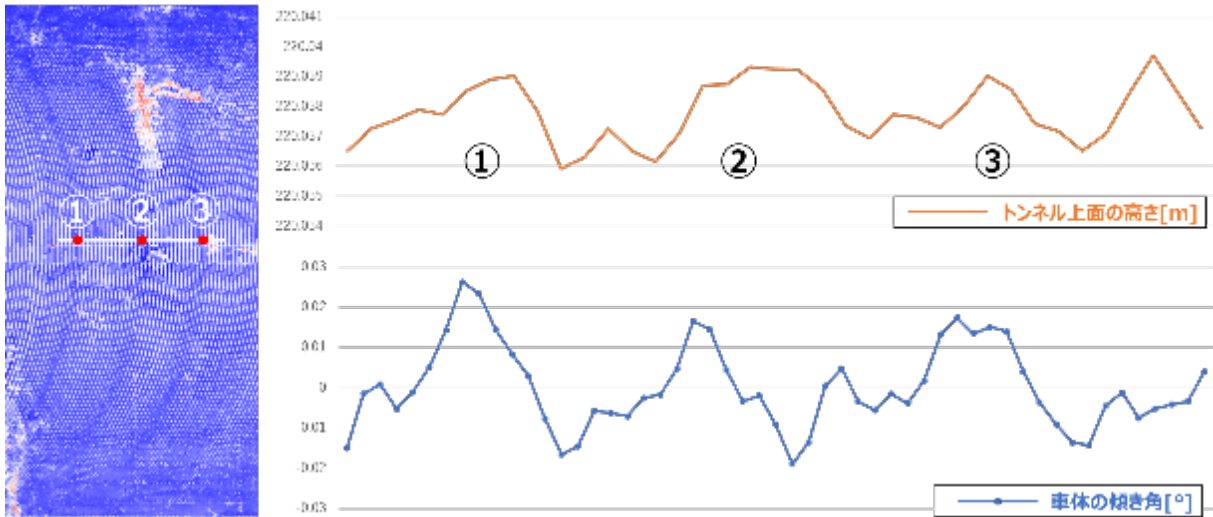


図-15 車両の傾き角 (ω) とスキャン毎の高さ[m]

(2) 縞状ノイズの対策

前項の推測から、IMU を原点とした各種センサの設置位置・角度を測量機器トータルステーション等で高精度に再算出し最適化を実施した。図-16 は、図-10 と同じトンネルを最適化後に計測した3次元点群データであり、縞状ノイズが削減されたことが外観からもわかる。また、図-17 は、図-11、図-16 の任意の一側線をトンネル縦断方向にプロットした図であるが、2, 3mm 程度のノイズが削減され、ノイズに埋もれていた損傷や目地等のピークが見て取れるようになっていることがわかる。

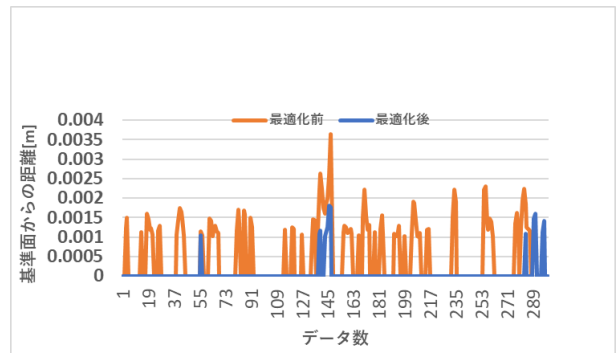


図-17 実証フィールド①プロット図

2.4 実証用データの取得

多様な施工法、トンネル覆工面の表面状態を有するフィールドでの検証を行うため、首都高速道路、並びに関東地方整備局管理のフィールドにて、MMS 計測を実施した。なお、計測仕様は表-3 の通りとし、計測速度は 5km/h、10km/h、20km/h、30km/h、40km/h とした。各フィールドで取得した 3 次元点群データは図-18～図 21 の通りである。



図-18 護国寺補修基地 3 次元点群データ

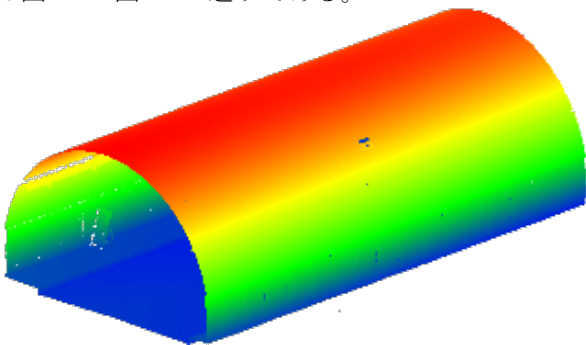


図-16 実証フィールド① 3次元点群データ
(ノイズ削減後)



図-19 生坂トンネル三次元点群データ



図-20 池沢隧道 3次元点群データ



図-21 橋沢隧道 3次元点群データ

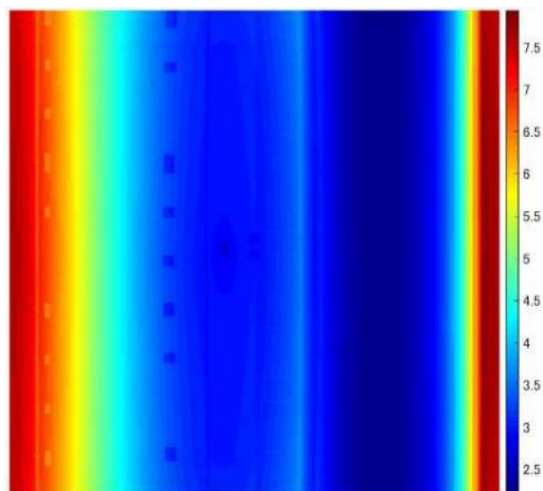


図-23 生坂トンネル2.5次元メッシュデータ

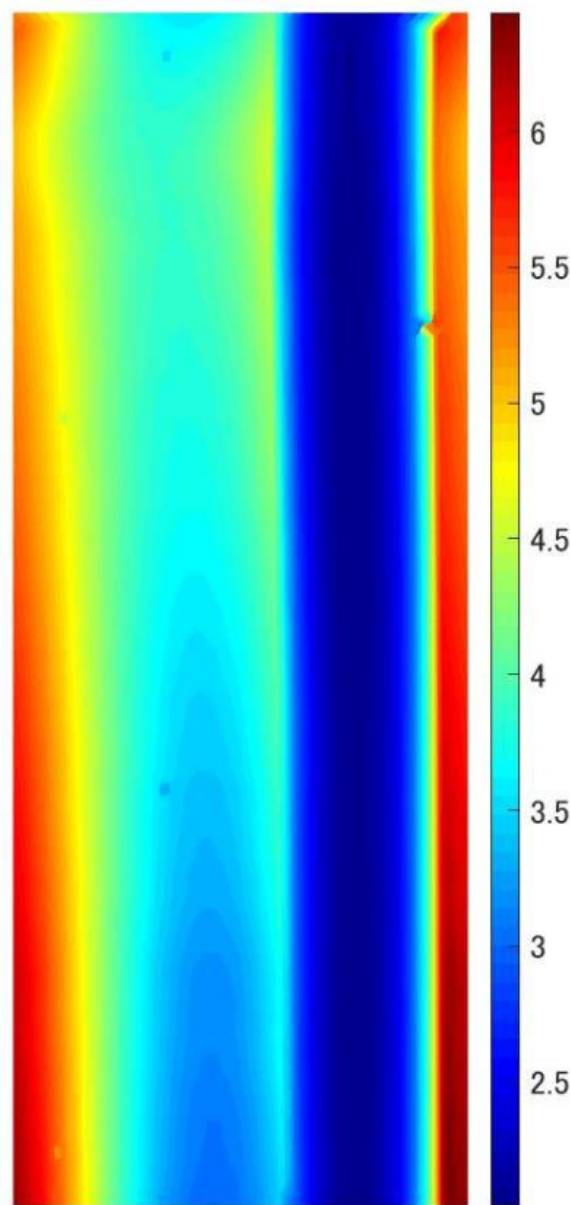


図-24 橋沢隧道2.5次元メッシュデータ

2.5 解析学的信号処理までの処理過程の実装

トンネル点検において、変状の種類や寸法、附属物等の情報を記載するために、トンネル覆工表面を2次元に展開したデータが利用される。また、次章の「解析技術の研究開発」においては、トンネル内の凹凸形状をZ軸を持つ2次元のマトリックスデータを入力データとして必要とする。そこで、車両軌跡データから見た3次元点群データまでの相対距離をトンネル覆工表面の凹凸形状とみなし、連続的に算出した値をZ軸を持つ2次元のマトリックスデータ（以下、2.5次元メッシュデータ）を作成するロジックを構築した。なお、2.5次元メッシュデータの縦横軸はトンネルの縦横断距離であり、メッシュ間隔は表-4から、計測速度に応じた計測ピッチを選定することとした。

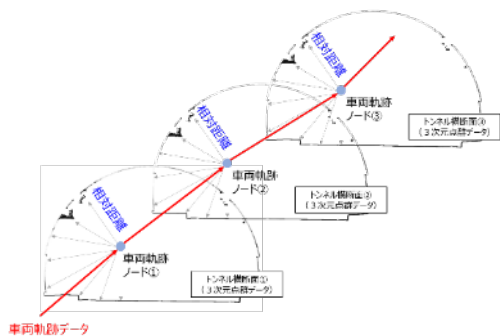


図-22 2.5次元メッシュデータの生成概念

第3章 解析技術の研究開発

3.1 解析学的信号処理の概要

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）」を各側線で計測し、包絡線の値がある閾値以上の箇所は損傷、その閾値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、局所極大推定により得た基準線を構成する損傷候補区間の端を通るような近似曲面を基準面として推定し、元波形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、三次元形状の高さ・外接四角形との面積比等を利用して特徴量解析を行い、トンネル内に散在する附属物や構造物等と損傷の判別を可能とした。また、三次元形状のZ軸最大・最小値を各損傷の最大厚み・深度として算定することで、損傷深度推定を可能とした。

3.2 ヒルベルト変換による各側線の包絡線推定とうき・剥離検知

まずは側線ごとに一次元分析を行う。元データには損傷と無関係の低周波のトレンドが存在するので、ハイパスフィルタによりトレンドを除去することを考える。空間波形を離散フーリエ変換により空間周波数領域に変換し特定のカットオフ周波数以下はゼロにして、厳密にハイパスフィルタリングをした。離散フーリエ変換は解析する信号が周期性をもつことを前提とするため、周期間で不連続的な変化が生じさせないように、元波形を反転させたものを元データの前に挿入する。また、離散フーリエ変換において高速フーリエ変換アルゴリズムを利用するため、データ点数が2のべき乗点になるようにデータの末尾に0を挿入するゼロパディングを行ってから上記の処理を行った。

次に、ハイパスフィルタを適用しドリフト成分を除去した後の波形に対して、側線ごとに損傷区間の推定を行う。損傷の深度および大きさを正確に定義するためには、損傷の始点および終点を結ぶ基準線を正確に定義する必要がある。そして、その基準線を引くためには、損傷があるエリアを推定する必要がある。このような損傷エリアを推定する方法として、ハイパスフィルタ適用後の波形及びハイパスフィルタ適用後の波形に対して生成する包絡線の接点によりエリアを区切り、損傷箇所を推定できると考えた。

損傷箇所では波形の振幅が大きくなるため、元の信号の振幅変調特性が得られるヒルベルト変換による解析信号を包絡線として採用した。ヒルベルト変換は因果信号のフーリエ変換領域において、実数部と虚数部の可逆変換として定義され、一般には単側波帯信号の解析に利用される¹⁾。解析する信号を交流信号と捉えると、正の変位を持つ浮きおよび負の変位を持つ剥離はいずれも振幅が大きくなる箇所であり、振幅が大きい箇所を検出することができれば剥離・浮きといった損傷がどこにあるのかを推定することが可能になる。そのため、解析信号の最大値が一定以上になっている区間を抽出し損傷区間の推

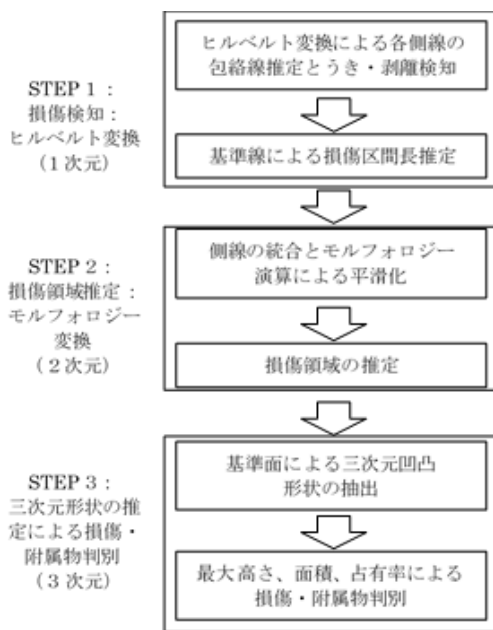


図-25 解析学的信号処理フロー

定を行った。

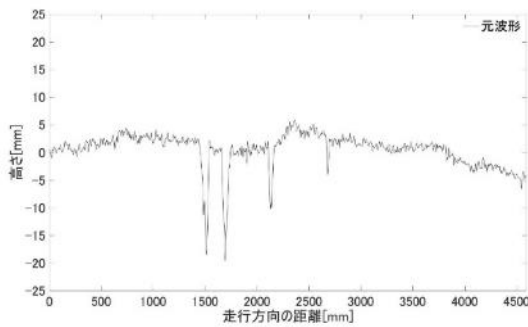


図-26 元波形

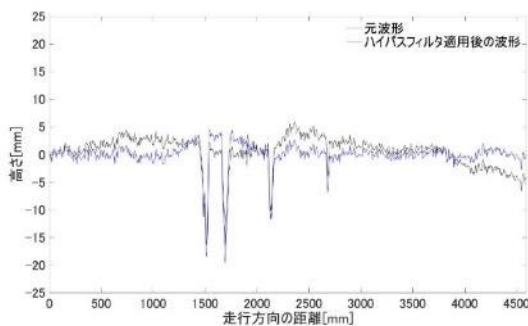


図-27 ハイパスフィルタ適用後の波形

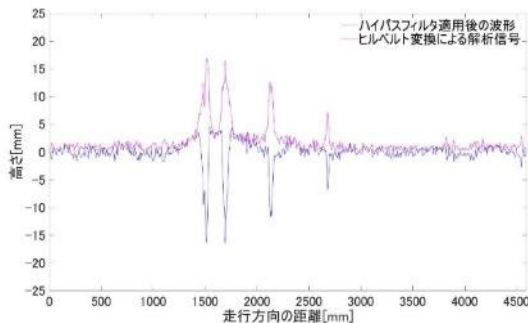


図-28 ハイパスフィルタ適用後の波形およびヒルベルト変換による解析信号

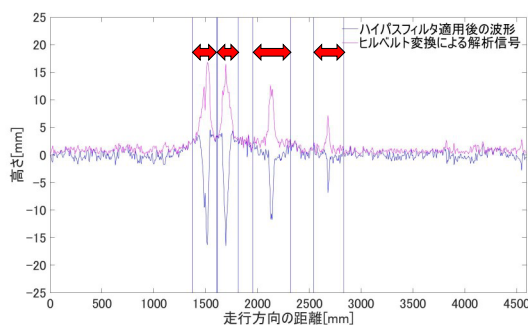


図-29 ヒルベルト変換により推定した損傷区間

3.3 基準線による損傷区間長推定

損傷区間を推定した後、各側線の各損傷区間において基準線の推定を行う。人間が目視で損傷の大きさ・深度を評価する際、無意識的に損傷の端同士をつないでいると考えられる。これを機械的に設定するために、変化点検出および局所極大値推定を行う。変化点検出および局所極大値を推定する際は、高周波成分の細かい変化を取り除くために、図-30 のようにハイパスフィルタ適用後の波形に対しローパスフィルタを適用した波形を用意する。

まず、各損傷区間において、ローパスフィルタ適用後の波形の最小値を検出する。次に、最小値を基準として損傷区間を2つに分割する。そして、分割された2つの区間それぞれに対し、図-31 に示すように平均値の変化が最も大きくなる点、すなわち変化点を以下に示すアルゴリズムにより検出する²⁾。

ある1点を選択し、信号を2つのセクションに分割する。各セクションの平均値を計算し、セクション内の各点での偏差を計測した上で偏差を全て足し合わせる。セクション間の偏差を合計することで残差誤差の合計を求める。残差誤差の合計が最小となるまで分割点の位置を変化させる³⁾。

そしてそれぞれの変化点を基準として、左側の区間においてはx軸負の方向に点を動かし単調減少の区間が始まる点、右側の区間においてはx軸正の方向に点を動かし単調増加の最大値となる点、すなわち局所極大値をそれぞれ検出し、損傷の始点・終点とする。図-32 のように始点・終点を最終的に決定した後、始点・終点を線形で内挿することによって得られた基準線と元波形の差分値が最も大きくなる箇所を検出し、その差分値を損傷区間における最大深度と定義する。この基準線が最終的なものとなり、損傷がある区間のみ値をもつ信号である。図-33 は元波形に対して正の変位を浮き、負の変位を剥離と単純に定めたときの様子であるが、ドリフト成分などの変化もとらえてしまうため、単純な閾値判定では損傷の厳密な推定が難しいことが分かる。

上記の処理は剥離・浮きが隣接していない場合には問題なく基準線を推定することができるが、図-34 のように浮き・剥離が隣接している場合、剥離のみを検出したいにも関わらず浮きのピークを剥離の始点としてしまうケースがある。これは剥離の大きさ・深度を過大評価することになってしまうため、最終的な基準線を推定する前に以下の処理を行う。

ヒルベルト変換による解析信号は、正の変位(浮き)・負の変位(剥離)の両方に対し反応を持つため、解析信号がある一定値以上であれば浮き・剥離のいずれかが存在することになる。そこで、図-35 で検出した損傷区間について、隣接する非損傷区間のトレンドを推定しノイズを除去した上で、損傷区間内を線形補間することで基準線を生成した。非損傷区間

においてローパスフィルタを適用する理由は、いかなるデータにおいても同一の条件で高周波成分を取り除くことができるノンパラメトリック法であるからである。基準面上側は浮き、下側は剥離とし、また各損傷エリア内において基準面からの最大変位を推定することで、浮きの厚さ、剥離の深度を推定することとした。

また、ローパスフィルタ適用後の波形とヒルベルト変換による解析信号の接点によってエリアを区切ると、図-37 に示すように、本来とらえたい損傷ではなく、正の変位が大きい箇所で接点を持ってしまう場合がある。なお、図-37 において青線が最終的な基準線であり、円周方向で 0.8 m 付近で基準線が生成されていることがわかる。また、接点は図-36 のようにハイパスフィルタ適用後の波形と解析信号をもとに定義されている。接点をもとに損傷区間を推定しているため、そのままでは正の変位が大きい箇所もとらえるべき損傷と判定され基準線の推定が行われてしまう。そこで、線形補間による基準線からの距離が一定値以上の接点については接点として採用しない判定を行い、残った接点をもとに改めて損傷区間を推定し、側線ごとの基準線の推定を行う。その処理を行った後の接点および最終的な基準線が図-38 である。これにより、検出したい損傷のみを取り扱うことが可能になる。

上記の処理を各側線に対し行った後、図-35 に示すように、トンネル走行方向・トンネル円周方向それぞれで生成された最終的な基準線を統合し、二次元的な基準面を生成する。これは、一方向の解析のみでは検出できない損傷を検出しやすくし、二方向で解析を行うことにより二次元的な形状をより正確にとらえるという目的がある。

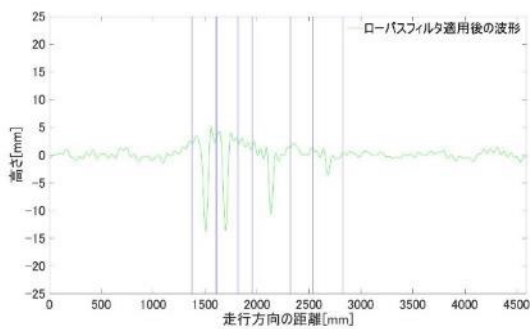


図-30 ローパスフィルタ適用後の波形

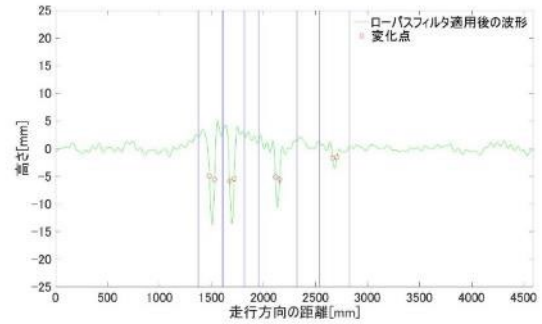


図-31 ローパスフィルタ適用後の波形における変化点検出

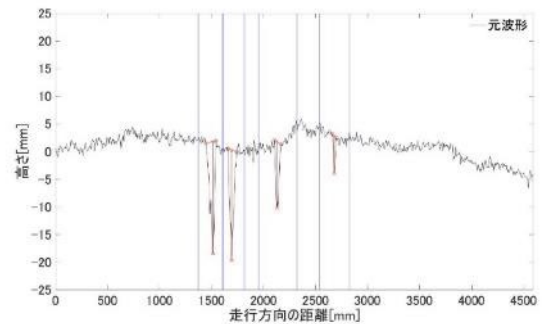


図-32 推定された基準線

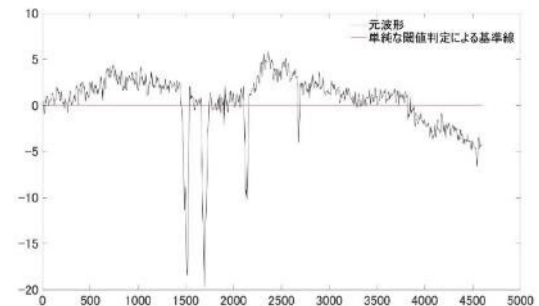


図-33 単純な閾値判定による基準線の様子

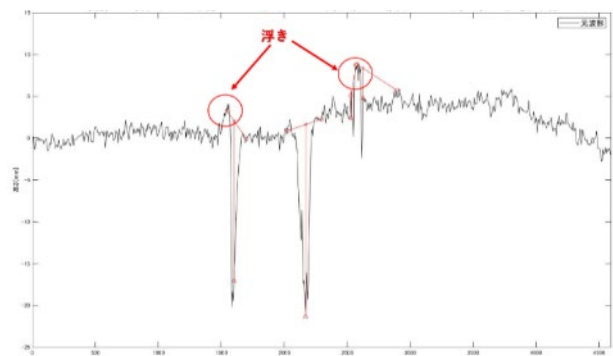


図-34 うきのピークを検出してしまっている例

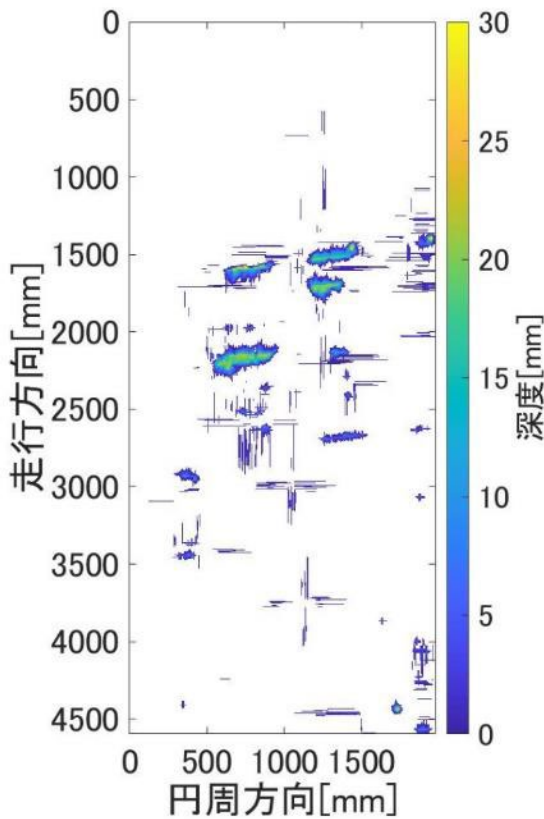


図-35 走行方向・円周方向それぞれの基準線を統合した結果（基準面）

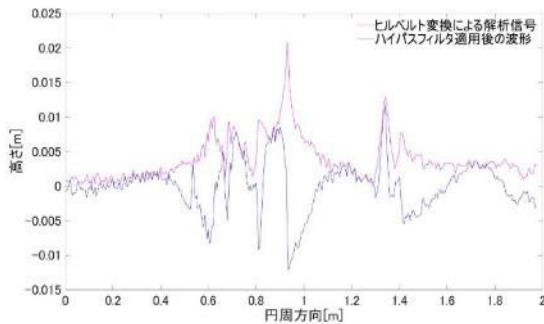


図-36 正の変位が大きい箇所を持つ場合のハイパスフィルタ適用後の波形および解析信号

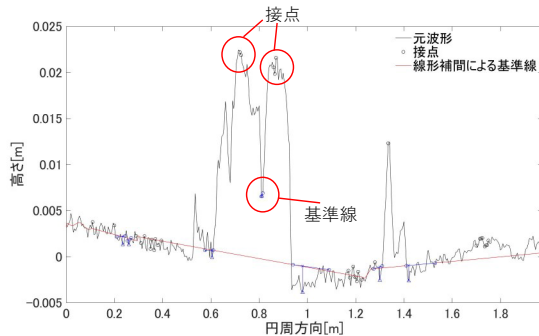


図-37 正の変位が大きい箇所に接点がある場合の最終的な基準線

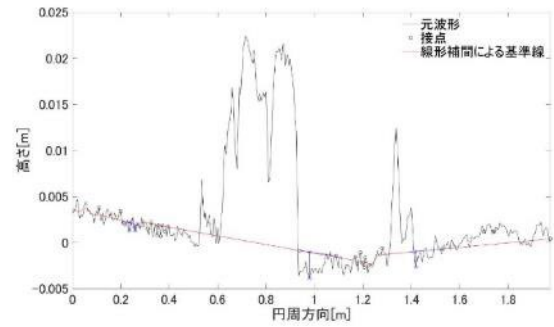


図-38 正の変位が大きい箇所の接点を削除した後の最終的な基準線（青線部分）

3.4 各損傷の面的な領域推定

図-35 は剥離の基準線を推定した結果であり、損傷があるインデックスにのみ基準線と元波形の値の差分値が収納されている。これを本論文では基準面マトリックスとよぶ。このように基準線を統合することによって、疑似的に二次元的な基準面を生成することができる。しかし、図-35にあるように、側線に沿って細かいノイズが発生する場合や本来損傷であるにも関わらず抜け落ちてしまう場合も存在する。また、一方向のみで強い反応が出ている部分は、コンクリートの継ぎ目など損傷とは無関係の変状である可能性が高いと考えられる。そこで形状のより厳密な推定を二次元的に行うために、主に画像処理で適用される手法であるモルフォロジー演算を用いる。モルフォロジー演算とは、主にバイナリデータに適用される演算であり、イメージを処理する過程において、形状ベースで画像処理操作を行うことである。

モルフォロジー演算においては構造化要素と呼ばれるものを入力イメージに適用し、同サイズの出力イメージを生成する。具体的には、あるピクセルとその近傍のピクセルの値を比較し、各種の変換を行っている。

最も基本的な変換は膨張と収縮である。膨張とは、近傍のピクセルの最大値をそのピクセルに適用する操作である。バイナリイメージの場合、近傍のピクセルに値 1 のものが存在すればそのピクセルの値は 1 になる。膨張は濃淡画像に対する穴埋めや太め処理を行うために用いられる。反対に収縮は、近傍のピクセルの最小値をそのピクセルに適用する。バイナリイメージであれば、近傍のピクセルに値 0 のものが存在すればそのピクセルの値は 0 になる。収縮は濃淡画像のノイズ除去や画像の細め処理に用いられる。これらの操作を組み合わせることにより、境界を滑らかにすることや、途中で抜けてしまっている部分を補間することが可能になる⁴⁾。

基準面は 3 次元マトリックスになっており、損傷があると判定されたピクセルのみ値を持つ。モルフォロジー演算を適用するために、損傷がある箇所は

1、損傷がない箇所は 0 に変換しバイナリデータ化する。生成されたバイナリデータに対し、収縮した後に膨張を実施するオープニングと呼ばれる方法を実行する。これは、収縮を先に行うことで画像上のノイズを除去し、そのあとに膨張を行うことで領域の形をより滑らかにする目的がある。このオープニングを画像データに変化がなくなるまで実行する。

またさらに平滑化を行うため、上記のように決定された各領域に対し、面積の合計が小さいものは除去する。各ピクセルは縦横の長さが同じであるため、面積はピクセルの数によって決定される。これにサンプリング間隔の二乗を乗じたものが各エリアの面積となる。図-35 に上記のモルフォロジー演算を適用し、かつ面積が一定の閾値以下のものを除去した結果が図-39 である。これは、元の基準面マトリックスに対し、モルフォロジー演算により求めた形状を適用したものである。このように、損傷領域のノイズが除去されていることが分かる。

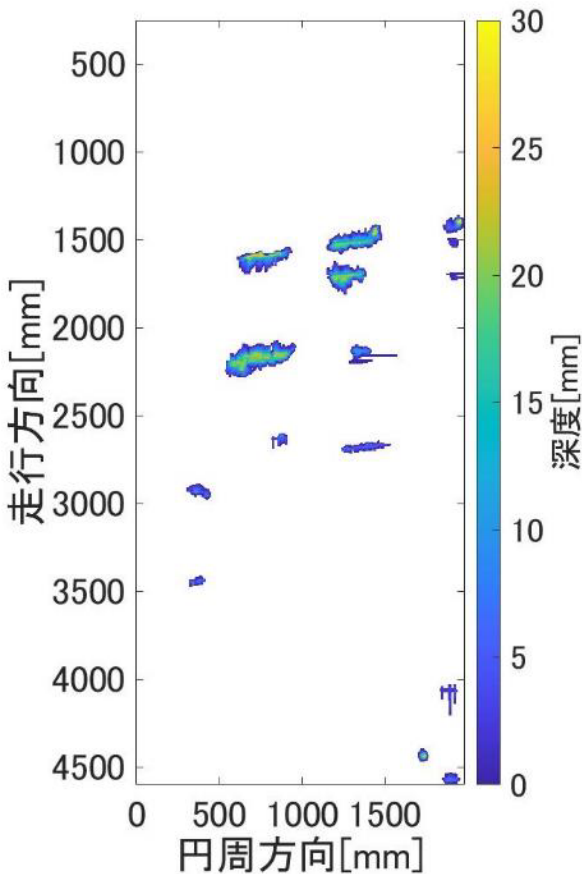


図-39 モルフォロジー演算適用後の基準面

3.5 損傷の寸法および最大深度の評価

先述の方法により、損傷の領域が決定される。実際のインフラ表面の修繕においては、損傷の形に沿って補修を行うのではなく、損傷に外接する四角形

に切り抜いて損傷の補修を行う場合がある。このため、まず各損傷に外接する矩形パッチの推定を行う。矩形パッチの推定は、各損傷エリアにおいてx座標およびy座標がそれぞれ最小・最大となる点を推定することによって行った。

矩形パッチの推定を行った後は、STEP1 で検出した各側線における最大深度を用いて、各パッチ内における損傷の最大深度を算出する。矩形パッチの縦横の長さおよび最大深度が推定できているので、補修に必要となる補修体積を推定することができる。以上で説明した STEP1～STEP2 の処理はトンネルの剥離検出を例にしているが、道路のポットホールについても同様の処理で検出が可能である。また、浮きについては、元波形の符号を反転させたマトリックスに対して同様の処理を行うことで検出が可能である。このように、本項で説明したアルゴリズムは特定の損傷だけではなく、インフラ表面の様々な損傷に対して利用可能なロバストなアルゴリズムである。具体的な損傷の検出結果については第3章にて述べる。

3.6 基準面による三次元凹凸形状の推定

図-40 の通り、実際のトンネル内には損傷よりも比較的大きな振幅を持ち、かつ、損傷と類似した波形を持つ附属物等が存在し、また、附属物の形状も様々にあることから単純な閾値フィルタによる附属物除去は難しく、うきと附属物が混在することが予測される。

そこで、トンネル縦横断方向に作成した基準線を通るような近似曲面を基準面として推定し、トンネルのトレンド除去後の波形から基準面を減算することで、トンネル覆工表面の三次元形状を抽出するよう解析アルゴリズムを改良した。また、抽出された三次元形状のZ軸最大・最小値を各損傷の最大厚み・深度として算定することで、損傷深度推定を実施可能とした。これにより、各損傷、および、附属物の実際の形状を定量的かつ三次元的に捉えることができ、それぞれの三次元形状の特徴から、より忠実な損傷エリア検出、および、損傷深度推定が可能となった。

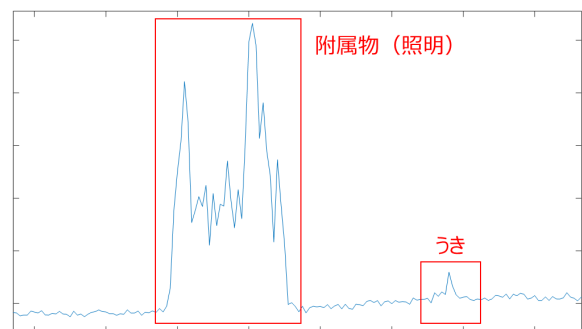
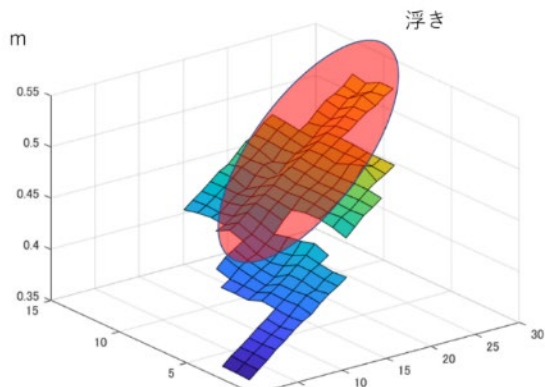
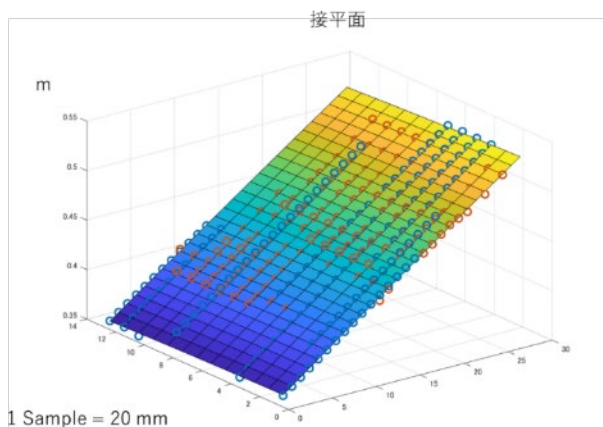


図-40 損傷（うき）と附属物の波形



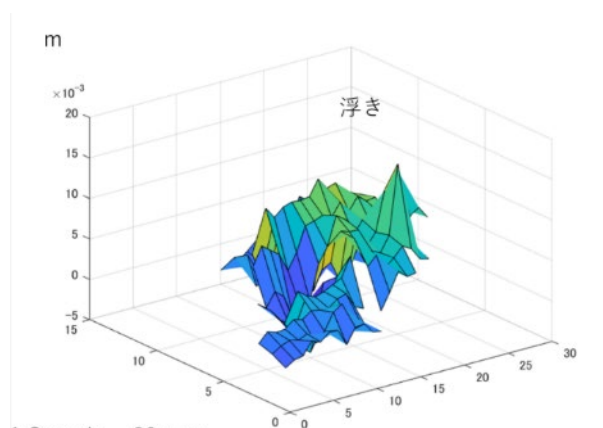
1 Sample = 20 mm

図-41 トренд除去後波形から捉えた損傷（うき）の3次元データ



1 Sample = 20 mm

図-42 トンネル縦横断方向の基準線から推定した基準面



1 Sample = 20 mm

図-43 損傷の3次元データから基準面を減算した3次元データ

これまでに抽出したトンネル内の三次元形状から、各損傷を検出するための解析パラメータの調整を実施した。図-44～49の通り、各損傷、および、附属物の三次元形状には、疑似的な二次元解析では見られなかった形状の特徴が見られる。前述の通り、トンネル内の損傷のみを検出するためには、トンネル内に存在する附属物と損傷との区別をつける必

要があるため、それぞれの特徴を表す簡易的な特徴量を用いることにより、損傷と附属物の判別を可能とした。なお、本解析に用いる特徴パラメータは下記の5つの通りである。

- h : 三次元形状の最大高さ
- s : 三次元形状の面積
- $r1$: 三次元形状を鉛直方向に投影した図形と外接四角形との面積比
- $r2$: 三次元形状を走行方向に投影した図形と外接四角形との面積比
- $r3$: 三次元形状を走行直角方向に投影した図形と外接四角形との面積比

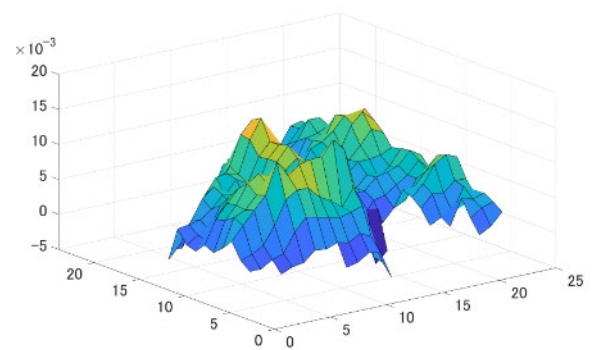


図-44 うきの三次元形状①

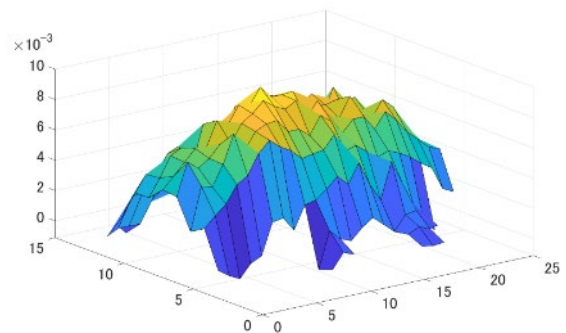


図-45 うきの三次元形状②

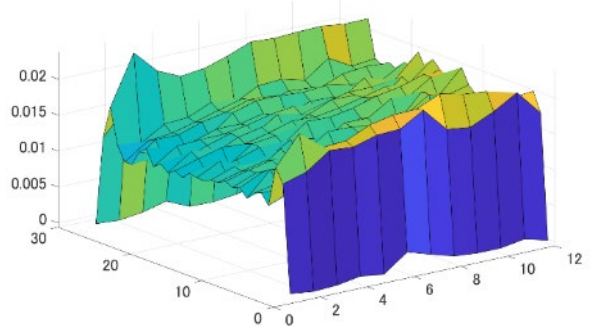


図-47 附属物（導水工）の三次元形状

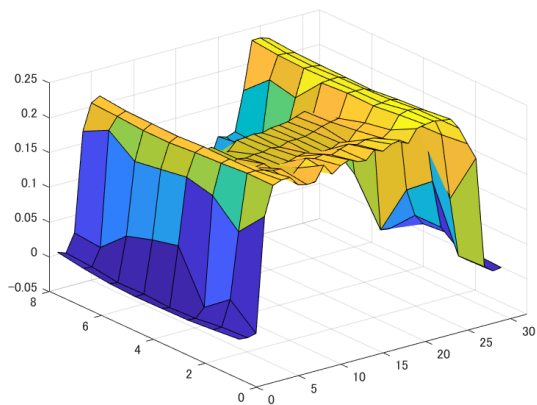


図-48 附属物（照明）の三次元形状

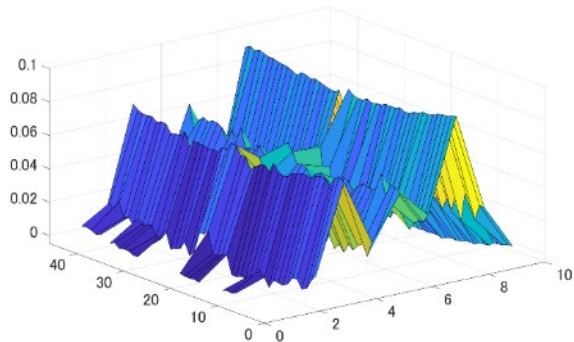


図-49 附属物（ケーブル）の三次元形状

上記の通り、附属物に比べ、うきの最大高さ、および、面積は小さいことがわかる。また、図-50～53は、各損傷、附属物の三次元形状を鉛直方向、走行方向に投影した例であるが、うきは各投影面の占める割合差が少ないことに対し、附属物は鉛直方向への投影面に対する割合は高く、走行方向への投影面に対する割合は少ない。なお、走行方向直角方向に対しても走行方向と同様のことが言えることも確認された。これは、一般的なうきは各投影面に対して一定の厚みと広がりを持つことに対して、附属物は比較的直角構造が多いことに由来すると考えられる。特に、3次元点群データ上においては、附属物とトンネル覆工表面間にデータ漏れが生じることが多く、また、レーザ測距装置の特徴から、附属物の内面は計測することができないために、走行方向への投影面に対する割合が少なくなると考えられる。

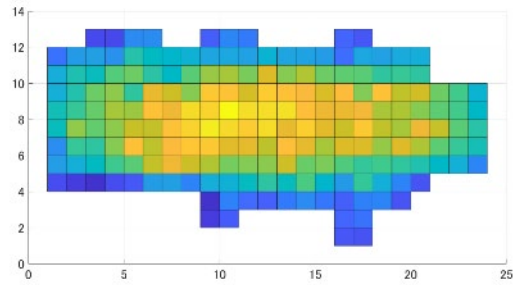


図-50 鉛直方向から見た投影面（うき）

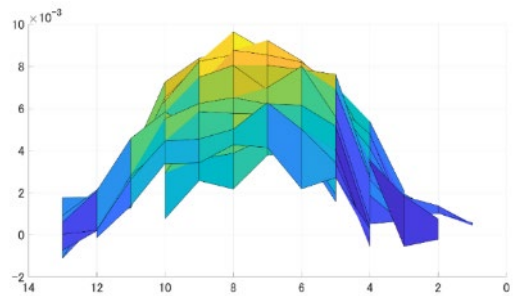


図-51 走行方向から見た投影面（うき）

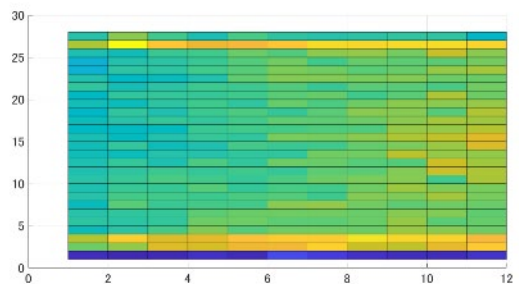


図-52 鉛直方向から見た投影面（導水工）

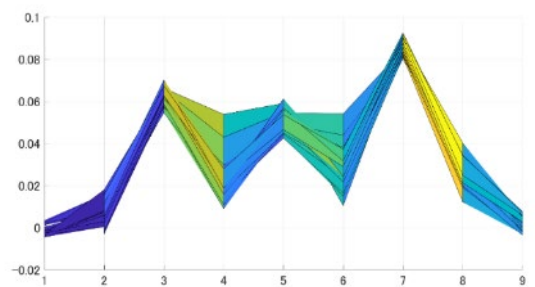


図-53 走行方向から見た投影面（ケーブル）

以上の特徴から、次に示す特徴量を用いて、うきと附属物の判別を行った。

下図は、うきと附属物の h に対する s の散布図であるが、うきは一定以下の高さで一定以上の面積に集中していることに対して、附属物はその多様な形状から、広い範囲に分布していることがわかる。そこで、実測値から算出したうきの最大高さ閾値 h_{max} 、

最小面積閾値 s_{min} を特徴量として、式(3)(4)の通り、うきに関する特徴条件を定めた。

$$h < h_{max} \quad (3)$$

$$s > s_{min} \quad (4)$$

なお、一定以上の高さを持つうきは剥離することを考慮し、剥離の検出には、最小高さ閾値 h_{min} を用いて、式(5)の特徴条件を使用することとした。

$$h_{min} < h < h_{max} \quad (5)$$

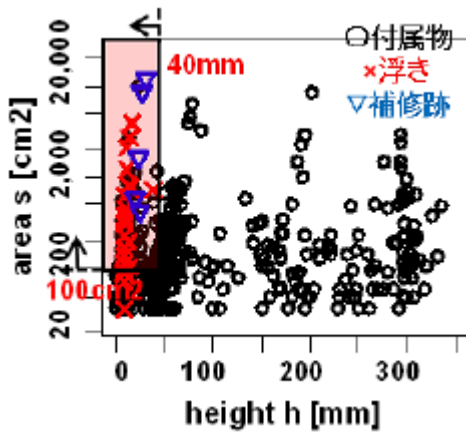


図-54 うき・付属物の高さ・面積比率

また、うきと付属物の各投影面に対する割合の特徴から、うきは r_1 、 r_2 、 r_3 共に同程度の値を持ち、付属物は、 r_1 の値が大きく、 r_2 、 r_3 いずれかの値が小さい傾向にある。なお、付属物の r_2 、 r_3 の値は付属物の向きやレーザの計測方向によって変動するため、 r_2 、 r_3 の値ではなく、両者の比率に特徴があると考えられる。そこで、式(6)(7)(8)に示す特徴量を定め、それぞれの比率をうきと付属物の判別利用することとした。

$$R_s = r_1 \quad (6)$$

$$R_{max} = \max(r_2, r_3) \quad (7)$$

$$R_{min} = \min(r_2, r_3) \quad (8)$$

図-55, 56 に、うきと付属物の R_s に対する R_{max} 、 R_{min} の分布図を示す。上述の通り、付属物は $R_s = 1$ 付近に多く分布しており、また、 R_{min} の低い箇所にも点在していることがわかる。さらに、 R_{max} と R_{min} の組合せは多様であり、一方が低く一方が高い場合も見受けられる。それに対して、うきは R_{max} 、 R_{min} 共に、 R_s の値に関係なく中央付近に分布しており、それぞれの分布も似ている傾向にある。以上の結果から、 R_s の最大値、 R_{max} の最大値、 R_{min} の最大値を

定め、式(9)(10)(11)に示す特徴条件からうきと付属物の判別を実施した。

$$R_s < R_s^t \quad R_s^t \dots R_s \text{の最大値} \quad (9)$$

$$R_{max} < R_{max}^t \quad R_{max}^t \dots R_{max} \text{の最大値} \quad (10)$$

$$R_{min} > R_{min}^t \quad R_{min}^t \dots R_{min} \text{の最小値} \quad (11)$$

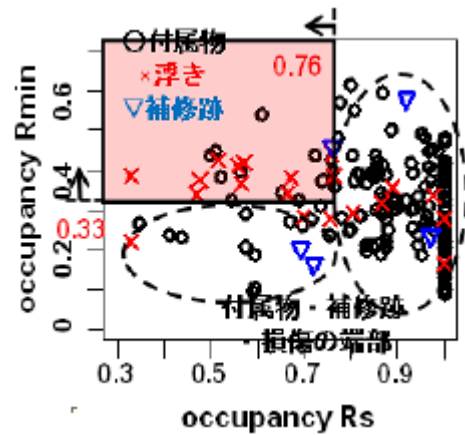


図-55 うき・付属物の占有率比率 ($R_s - R_{min}$)

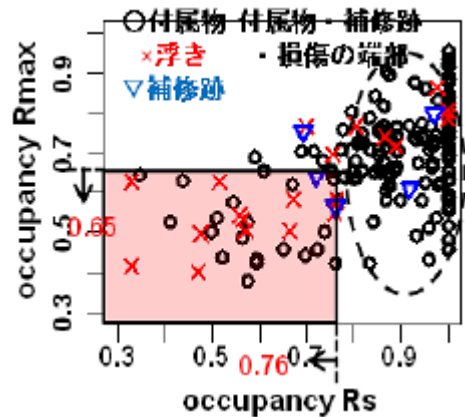


図-56 うき・付属物の占有率比率 ($R_s - R_{max}$)

以上により、付属物と損傷の識別を行い、かつ損傷のエリア、深度、および、三次元形状を検出することを可能とした。図-57,58 は、検出結果の二次元プロット図、および三次元プロット図である。

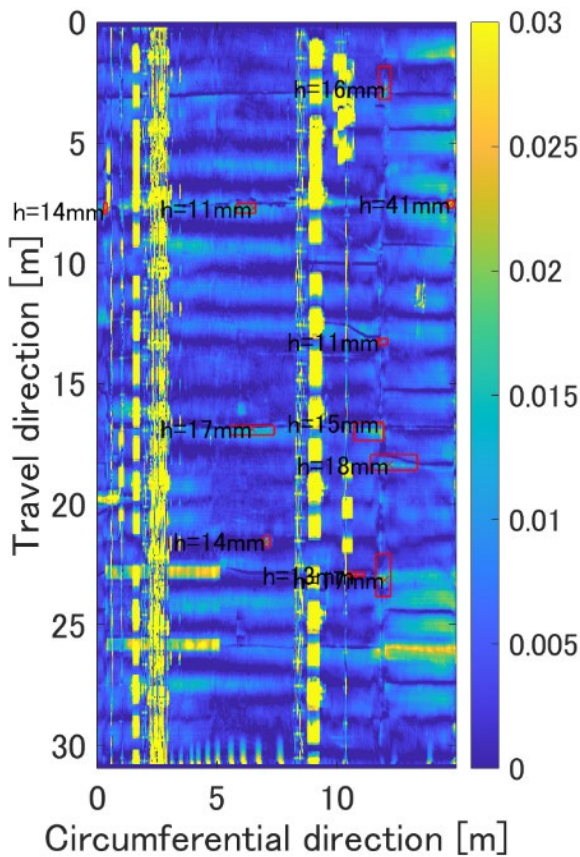


図-57 損傷検出結果 (二次元プロット)

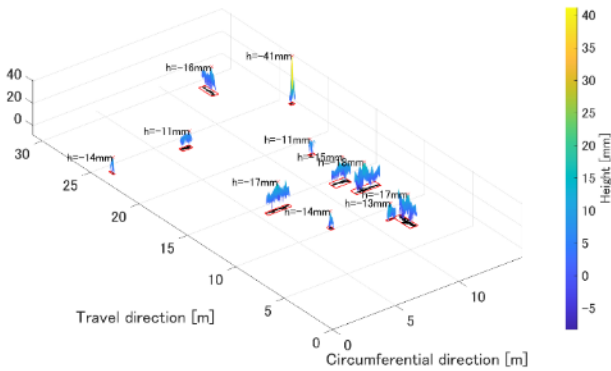


図-58 損傷検出結果 (三次元プロット)

3.7 準リアルタイム処理への応用

上記のアルゴリズムは、データの計測が全て完了した後にすることを前提としている。すでにこの時点でも短時間で損傷を厳密に推定することが可能であるが、実運用を見据えるとデータを取得しながら損傷の推定を同時すなわちリアルタイム的に行うことがより望ましい。損傷の推定をリアルタイムで行えることにおけるデメリットは存在せず、時間的・人的コストの大幅な削減につながるからである。そこで、本項目では上記のアルゴリズムをリアルタイム処理に最適化した場合のフローについて述べる。

MMS 車両の点群取得は、走行直角方向（トンネル円周方向）のデータ点数は一定で走行方向のデータ点数が増えていく。仮に走行方向に 115 点ずつの区間を考え、各列に対して処理を行うことを考える。今回アルゴリズム作成に使用した護国寺補修基地の三次元点群データは 920×396 の三次元マトリクスであり、走行直角方向が 396 列存在する。

まず、図-59 のように 115×396 のマトリクスを一律で動かしていくことを考える。MMS 車両でデータを取得しながら解析するにあたって考慮しなければならないのは、損傷の途中でデータが途切れてしまう場合である。この場合、計算区間を一切オーバーラップせずに処理を行うと正しく評価できない損傷が発生してしまうため、計算区間を動かす際はある程度のオーバーラップを設ける必要がある。進行方向に対するオーバーラップが大きいほど計算の精度は向上するが、一方で計算回数が増加するため処理により時間がかかるようになってしまう。そのため、計算するマトリクスを一律で動かす場合は、計算精度およびコストを両立でき、かつ検出したい損傷の大きさを捉えることができるようなオーバーラップ率を検討する必要がある。また、図のように、オーバーラップさせても損傷の途中から区間が始まってしまう場合もあり、できるだけそのようなことが起こらないようなオーバーラップ率にしなければならない。

上記の手法でも比較的高速にリアルタイム処理を行うことができるが、損傷が存在しない部分などオーバーラップをさせなくていい部分についても一律にオーバーラップして計算を行うため、計算コストの観点から無駄が多い。そこで、さらに計算コストを抑える手法を次に述べる。この項目では、必要な部分についてはオーバーラップをさせようとして計算をし、それ以外の部分については最小限の計算時間で済むようなアルゴリズムを提案する。

図-60 において、一律でマトリクスを動かす場合と同様に、各側線 115 点に対して処理を行っていくことを考える。切り出したデータの最後端の区間において、ヒルベルト変換による解析信号の最大値が閾値よりも小さいものは損傷がないと考えられるので、この側線についてはオーバーラップさせて計算する必要がない。逆に、最後端の区間において解析信号の最大値が閾値よりも大きく、ハイパスフィルタ適用後の波形と解析信号が接点を持っていない場合は、損傷の途中で区間が途切れてしまっている可能性が高いと考えられ、この場合は損傷が収まるようにオーバーラップさせて次の処理を行う必要がある。このアルゴリズムは無駄な計算を一切省くことが可能になり、またオーバーラップ率を検討する必要がないというメリットがある。本論文ではこのアルゴリズムを最適化されたリアルタイム演算と呼ぶことにする。

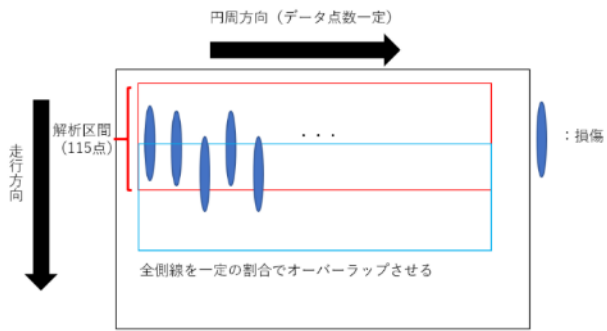


図-59 全側線を一律でオーバーラップさせる場合

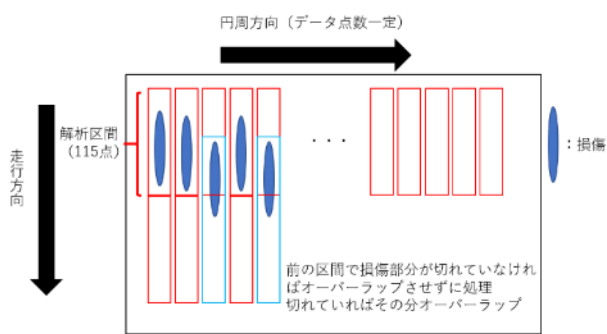


図-60 最適化されたリアルタイム処理のイメージ

第4章 技術実証

4.1 技術実証の概要

表-5に示す異なる施工法・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範囲の検証を実施した。また、損傷検出精度と処理時間の観点から、本技術の実運用性についても考察を行った。

4.2 本解析アルゴリズムの適用範囲の検証

異なる施工法、表面状態を持つフィールドに対する損傷エリア検出能（損傷検出可否）について整理し、適用範囲の検証を実施した。なお、損傷エリア検出能は損傷検出率（ R ）として評価し、式(12)により算出した。また、コンクリート表面に損傷形状が確認されないもの、および、附属物等の背面に位置する損傷は検証対象外とし、また、段差に関しては、便宜上うきとして捉えることとした。

$$R = \frac{\text{損傷検出数}}{\text{損傷総数}} \times 100 \quad (12)$$

表-6の通り、検証フィールドトンネルにおいて、いずれも約80%程度の損傷検出率を確認することができ、施工法、および、表面状況に大きく依存することはないことがわかる。

本解析アルゴリズムは、当初表面の平滑なコンクリート表面を対象と指定が、採択後に要望のあった表面状態の悪いフィールドに置いても同様の結果が得られている。これは、上手くトンネルの形状を除去し、損傷のみを検出したと判断した。また、点検員による打音検査にて確認されなかった損傷や、施工由来の凸形状の検出に成功していることや、損傷が存在しない箇所は該当損傷なしの結果が得られていることから、解析アルゴリズムの妥当性が伺える。

また、図61～66は、各フィールドの解析結果（二次元プロット、三次元プロット）と、打音検査の結

果を図示したものである。また、表7は、上記の結果を集計した結果である。

一部微弱かつ面積の小さい損傷の検出漏れが見られるが、そもそも3次元点群データとして損傷を捉えることができていない箇所や、ご検査と未検出のバランスを考え、解析パラメータを変えた結果であり、狩猟な損傷については検出できていることは確認済みである。

以上の結果から、本解析アルゴリズムの適用範囲としては、施工法や表面の凹凸形状に大きな影響を受けることなく、表7を指標とした適用が可能であると考えらえる。

表-5 検証フィールド一覧

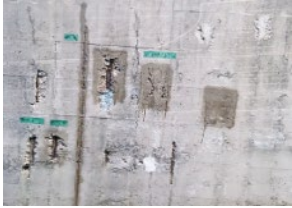



トンネル名	写真	施工法	表面の状態
護国寺 補修基地		擁壁 (BOXカルバート)	十分平滑
生坂 トンネル		NATM工法 1991年建設	十分平滑
池沢隧道		矢板工法 1975年建設	平滑
橋沢隧道		矢板工法 1963年建設	非損傷由来 の凹凸

表-6 実証フィールドにおける損傷検出結果の1例 (計測ピッチ10mm・20mm時)

検証フィールド	施工法・状態	損傷	損傷数	損傷検出数	検出率
首都高速道路 護国寺補修基地	施工法…BOXカルバート 状態…十分平滑	うき	13	12	92%
		剥離	9	9	100%
関東地方整備局 生坂トンネル	施工法…NATM 状態…十分平滑	うき	-	-	-
		剥離	8	6	75% (主要損傷は全て検知)
関東地方整備局 池沢隧道	施工法…矢板 状態…平滑	うき	8	8	100%
		剥離	1	1	100%
関東地方整備局 橋沢隧道	施工法…矢板 状態…凹凸が激しい	うき	4	3	75% (主要損傷は全て検知)
		剥離	21	16	76% (主要損傷は全て検知)

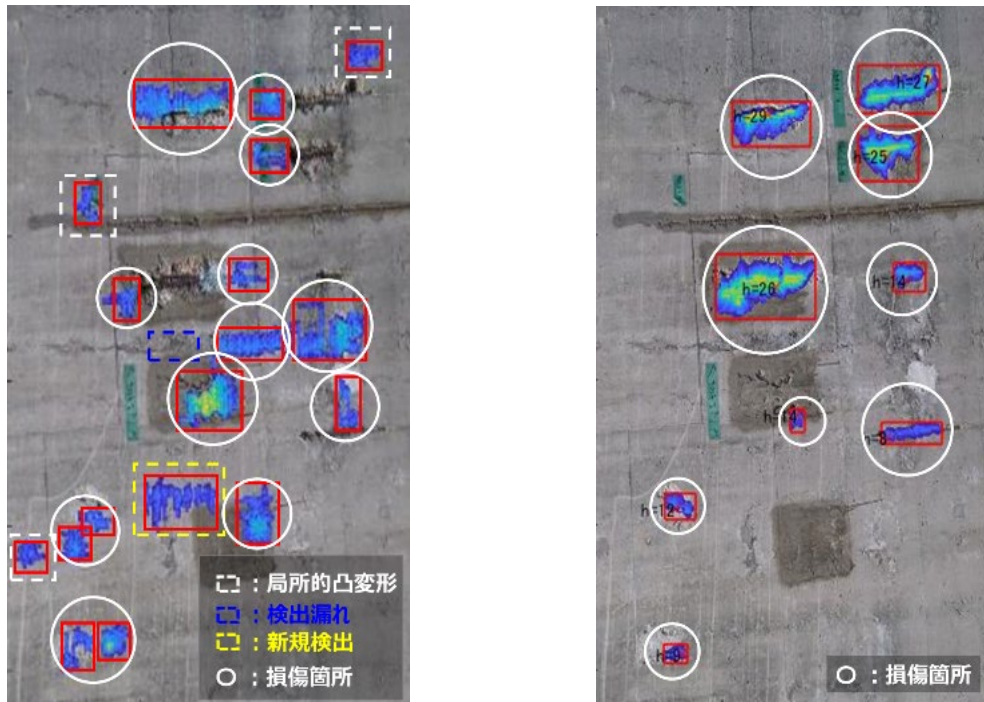


図-61 護国寺補修基地 検証結果（2次元マッピング、左図：うき、右図：剥離）

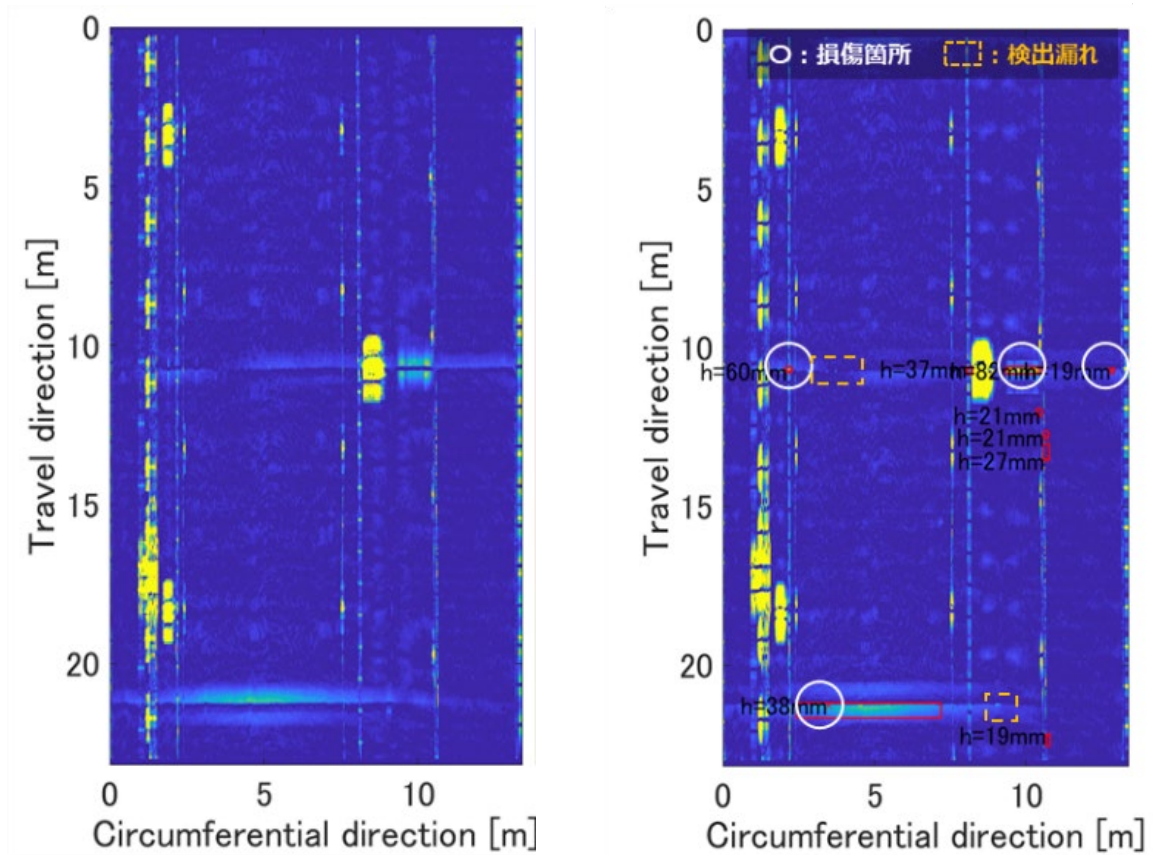


図-62 生坂トンネル 検証結果（2次元マッピング、左図：うき、右図：剥離）

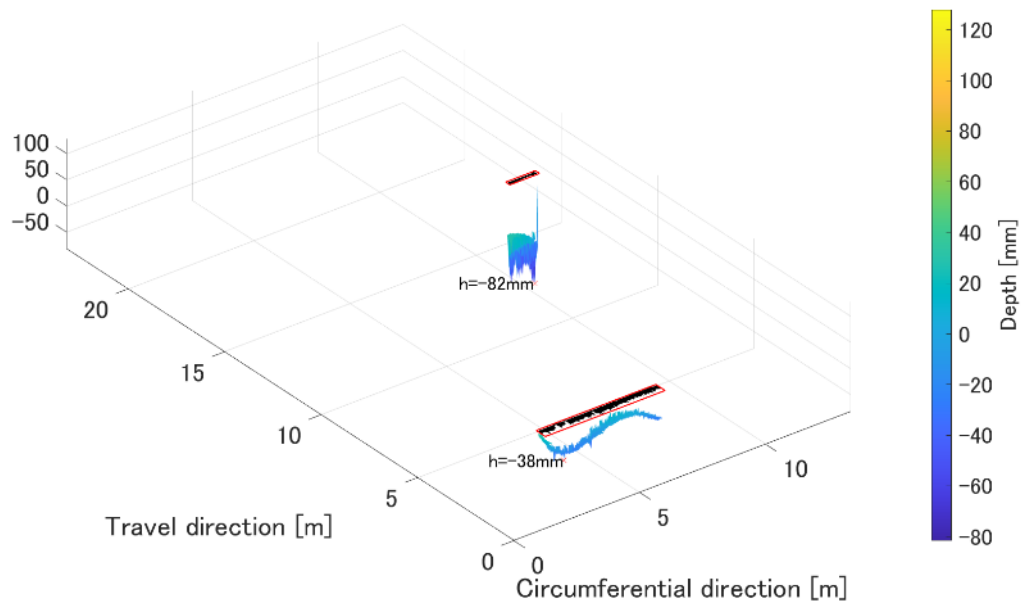


図-62 生坂トンネル検証結果（3次元マッピング、剥離）

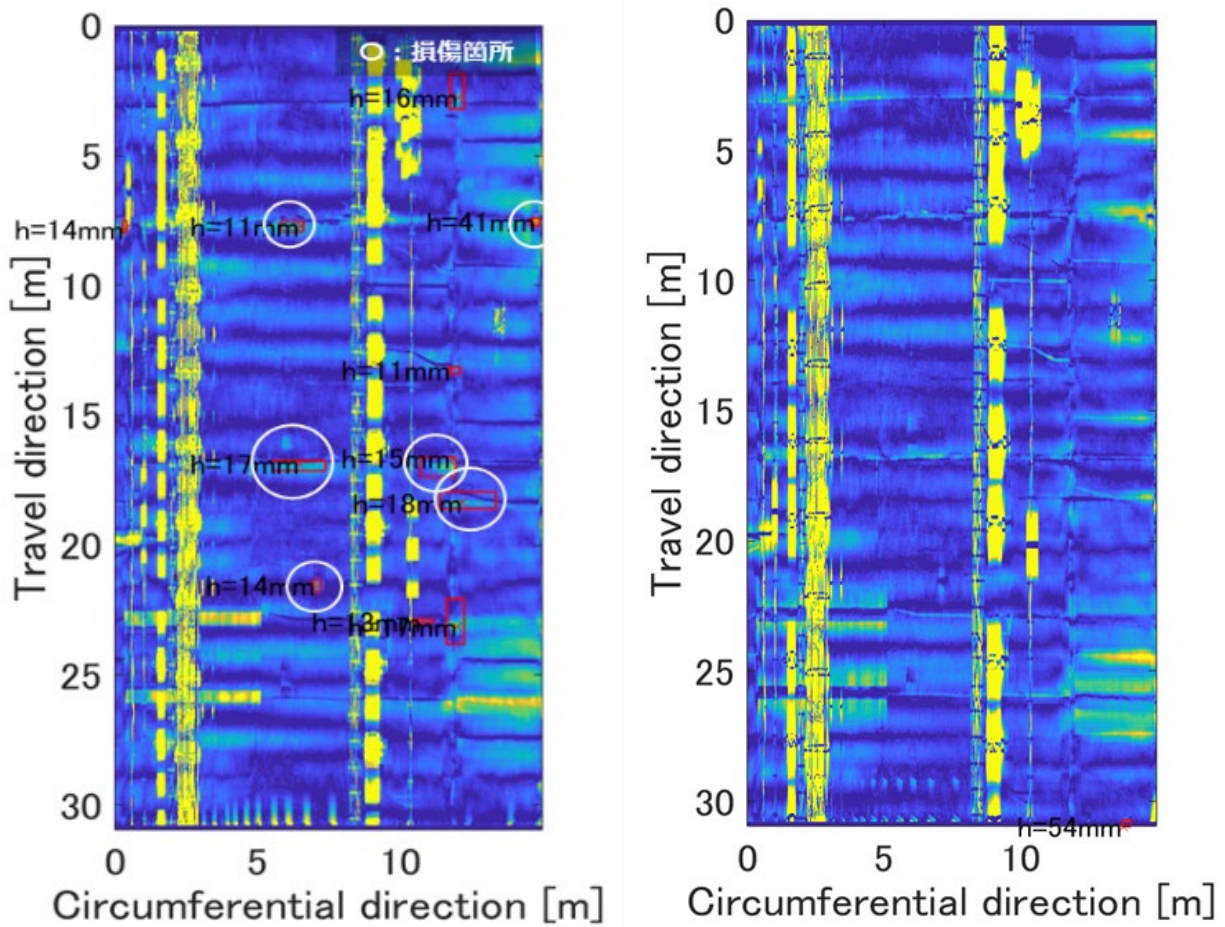


図-63 池沢隧道 検証結果（2次元マッピング、左図：うき、右図：剥離）

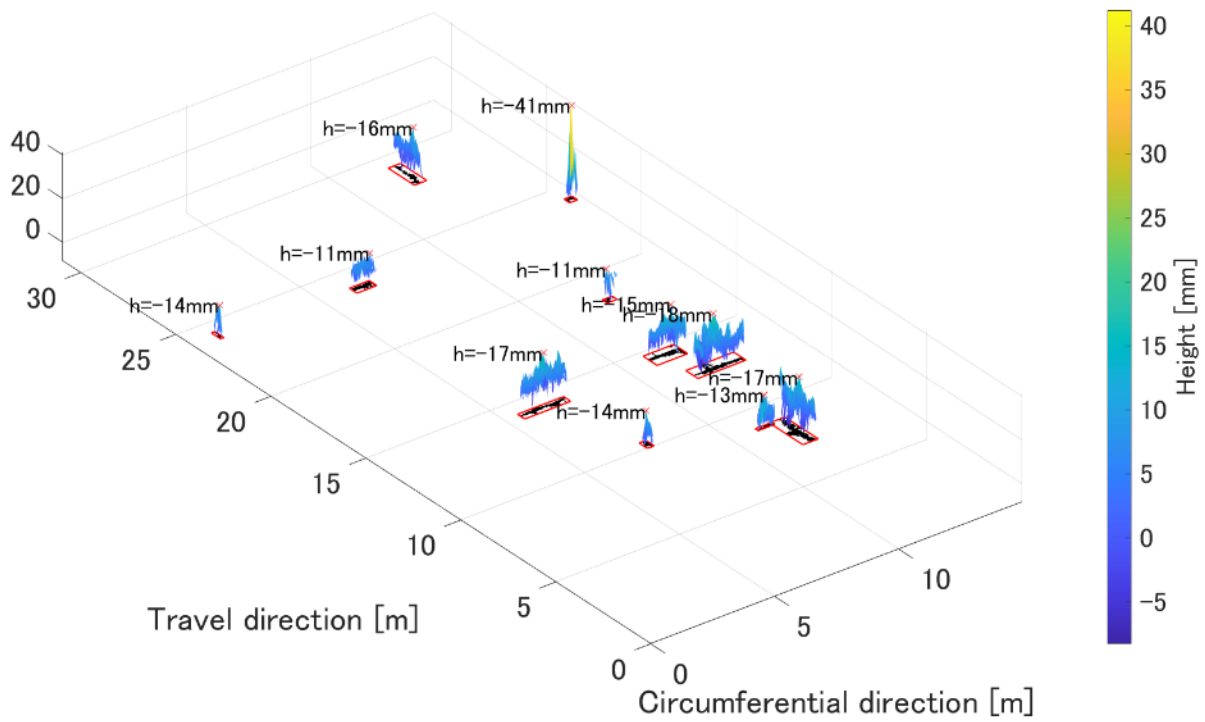


図-64 池沢隧道 検証結果（3次元マッピング、うき）

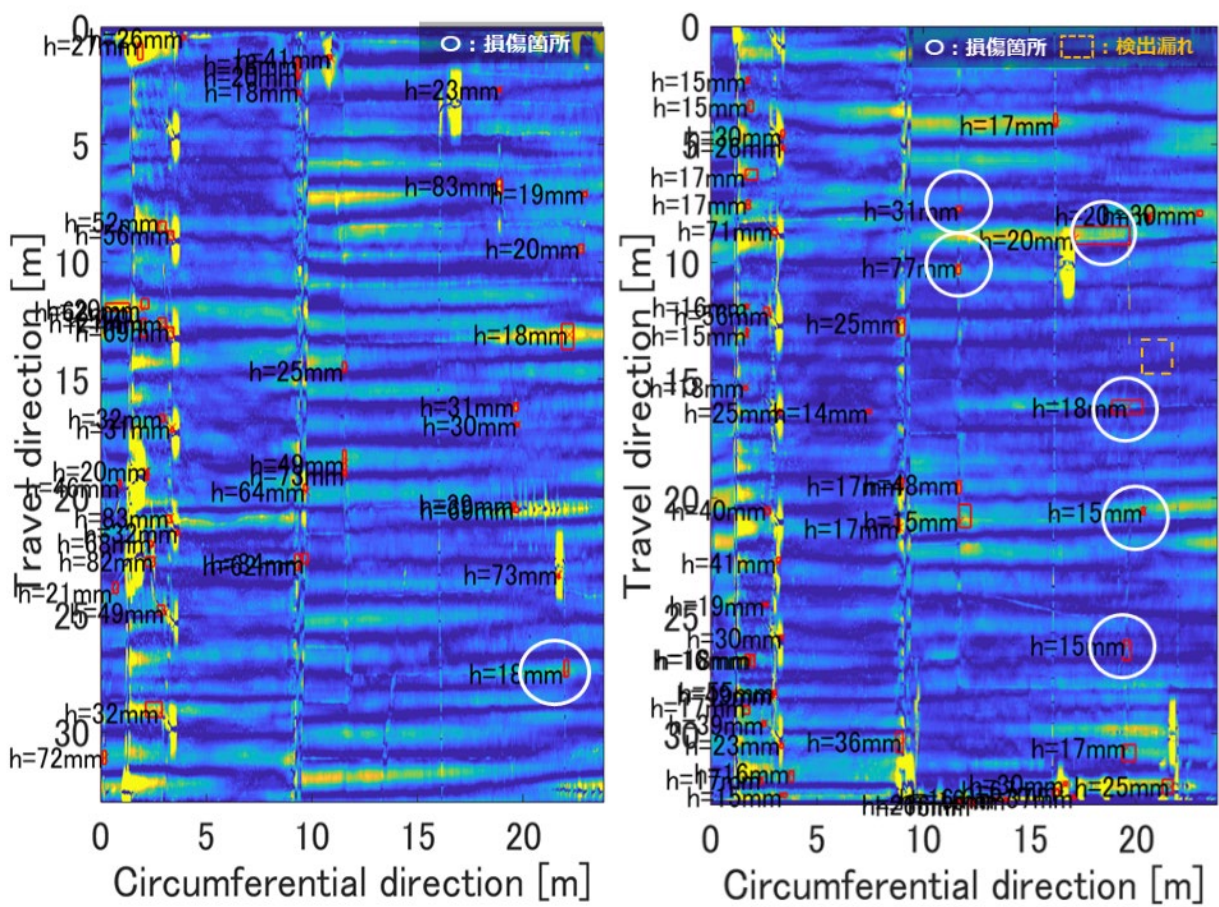


図-65 橋沢隧道 検証結果（2次元マッピング、左図：うき、右図：剥離）

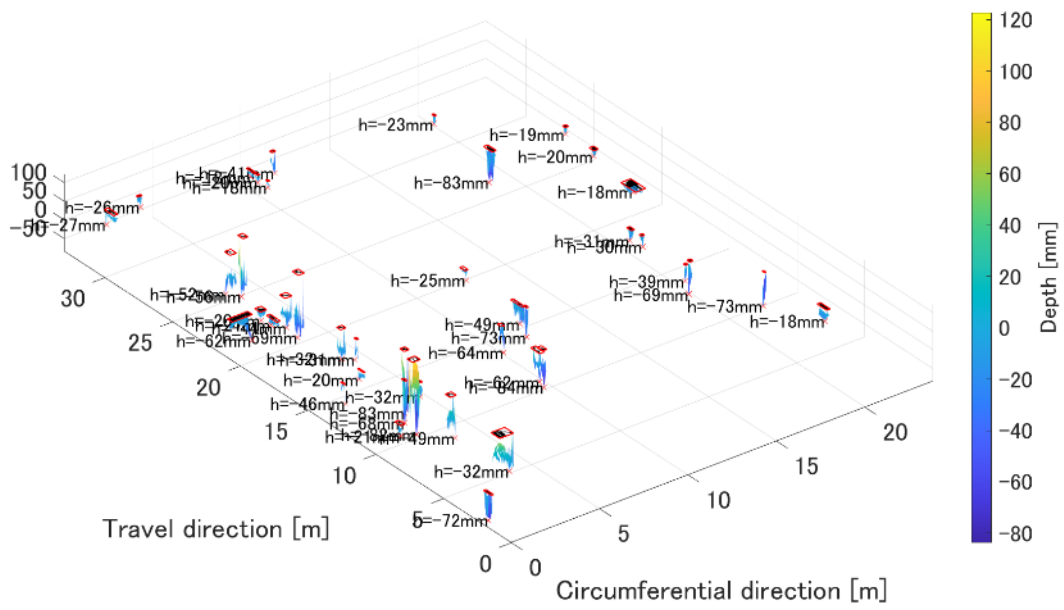


図-66 池沢隧道 検証結果 (3次元マッピング、うき)

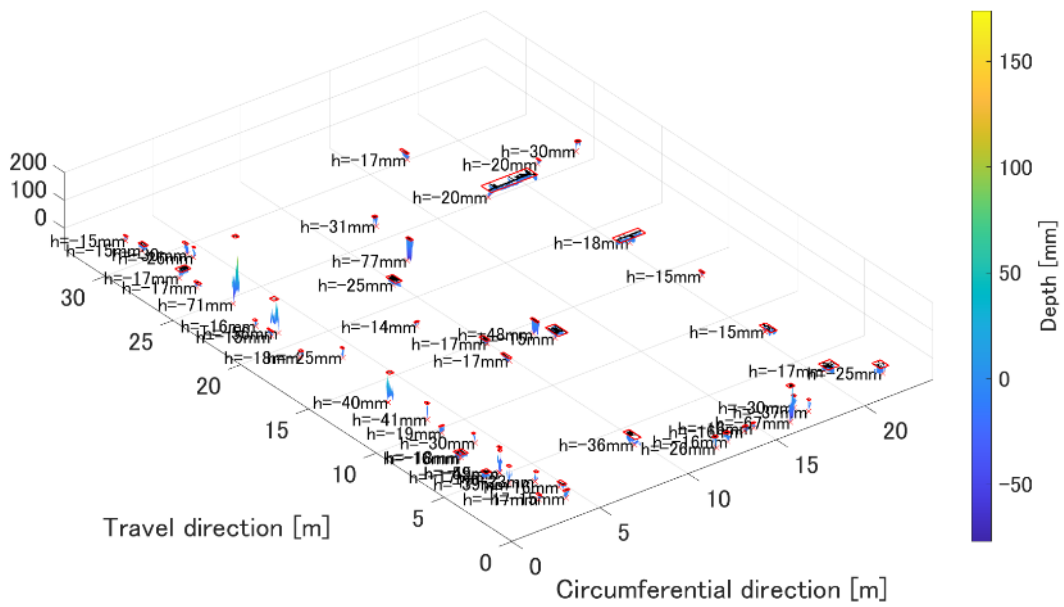


図-66 池沢隧道 検証結果 (3次元マッピング、剝離)

表-7 実証フィールドにおける損傷検出可否検証結果

トンネル名	損傷				検出可否
	種類	幅	高さ	深度	
護国寺補修基地	うき	100	250	2	○
	うき	100	300	2	○
	うき	150	230	1	○
	うき	180	300	2	○
	うき	-	-	2	×
	うき	-	-	1	○
	うき	-	-	2	○
	うき	200	380	4	○
	うき	-	290	6	○
	うき	70	130	1	○
	うき	-	-	5	○
	うき	100	160	5	○
	剥離	100	250	29	○
	剥離	100	300	20	○
	剥離	150	230	20	○
	剥離	180	300	25	○
	剥離	60	120	9	○
	剥離	200	380	16	○
	剥離	-	290	6	○
	剥離	70	130	5	○
	剥離	100	160	2	○
	生坂トンネル	剥離	-	-	60~270
剥離		-	-	-	○
剥離		-	-	10~35	×
剥離		35	260	-	○
剥離		100	300	77	×
剥離		40	350	-	○
剥離		30	370	-	○
剥離		70	300	-	○
池沢隧道	うき	-	-	15	○
	うき	-	-	7	○
	うき	-	-	10	○

	うき	300	930	10~20	○
	うき	110	250	30	○
	うき	-	40	3	○
	うき	-	-	-	○
	うき	2000	1500	~5	○
	剥離	100	100	12	○
橋沢隧道	剥離	160	80	30	○
	剥離	600	200	90	○
	剥離	70	70	15	×
	うき	-	-	-	×
	剥離	400	200	10~30	○
	剥離	100	300	15	○
	剥離	300	150	2~10	×
	剥離	150	150	30	○
	剥離	1100	100	30	○
	剥離	170	300	60	○
	剥離	150	340	10~20	○
	剥離	150	550	10~15	×
	剥離	70	150	60	○
	剥離	150	970	10~20	×
	剥離	150	150	5~15	×
	剥離	100	700	27~40	○
	剥離	-	-	-	○
	剥離	350	200	70	○
	剥離	100	150	43	○
	うき	-	-	10	○
	剥離	300	100	80	○
	うき	-	-	3	○
	剥離	100	50	-	×
	うき	-	-	12	○
	剥離	80	50	40	○
	剥離	300	100	55	×

4.3 本解析アルゴリズムの実運用性の考察

密な計測データは細かい損傷まで検出が可能である一方計測を高速化する必要があり、逆に疎な計測データは計測を低速化することができる一方で細かい損傷の検出が困難となると予想される。つまり計測速度と検出精度（検出率）は単調増加の関係にあると考えられる。ここでは、本予想の妥当性を検証し、ニーズに応じて計測ピッチを選定することで、精度コントロール可能な運用を実現できるのか考察を行った。

(1) 解析精度の検証

計測ピッチと検出率、損傷深度誤差平均、検出可能な損傷スケール（最小値）の関連性について検証を行った。図-67は、図70、表8、9に示す異なる計測ピッチの計測データの解析結果と打音検査結果を比較から、計測ピッチと解析精度の関連性について図示したものである。なお、計測ピッチ20mm～50mmは池沢隧道、10mmについては護国寺補修基地の解析結果を参照している。

検証結果より、密度が上がるほど微小な損傷を捉えることができ、その結果、検出率は向上し、損傷深度誤差も小さくなる傾向にある。逆に密度を下げるほど比較的大きな損傷を検出し、微小な損傷は検出されていない。その結果、検出率は下がり、また損傷深度誤差は大きくなる。密度1111点/m（計測ピッチ30mm時）では高さ40mmの損傷は捉えていないことから、捉えたい損傷スケールの2倍の計測ピッチを有するように調整を行う必要がある。

また、図71、72は計測ピッチ20mm、50mmの損傷の3次元点群データであるが、本データからも上記の通り、計測ピッチにより損傷の捉え方が変わることが良く見てとれる。

(2) 処理時間の検証

計測ピッチと処理時間（計測完了～損傷検出）の関連性について検証を行った。図68は、計測ピッチ毎と処理時間の関連性を図示したものである。なお、検証フィールドは前項と同様、池沢隧道の25m区間とした。

検証結果より、密度を下げるに従って処理時間は早くなり、点密度400点/m（計測ピッチ50mm）では延長1mあたり10秒で処理を行うことが可能である。逆に、密度を上げるほど計測データ容量は重くなり、処理時間は遅くなる傾向にあることがわかる。

以上の結果から、前述の仮定が正しいことを確認することができた。これは、要求される点検の品質に応じて、精度コントロールが可能な実運用性の高い技術であると言える。例えば、日常点検のような一次スクリーニング的な要素の高い点検においては、計測ピッチを粗くし、リードタイムの削減や低コストにも貢献し、また、定期点検のような詳細な

品質を要する場合には、計測ピッチを密にし、処理時間はかかるが高品質な点検結果を提供するような運用が可能と考えられる。

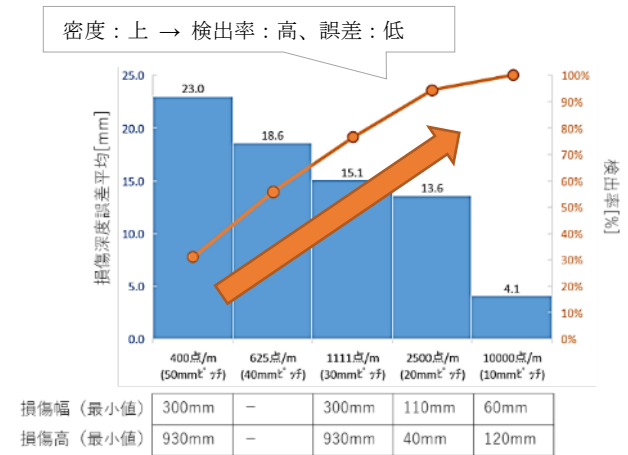


図-67 計測ピッチ（点密度）毎の解析精度

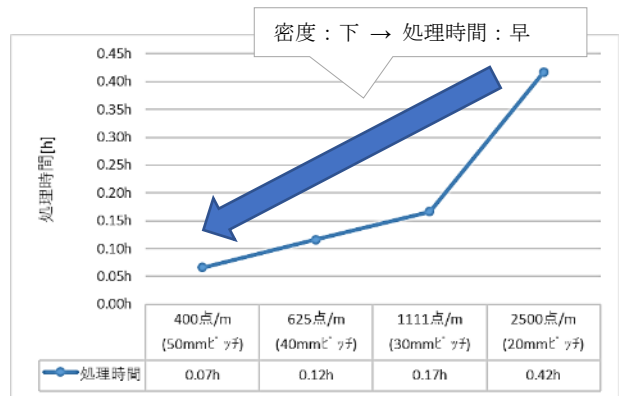


図-68 計測ピッチ（点密度）毎の処理時間

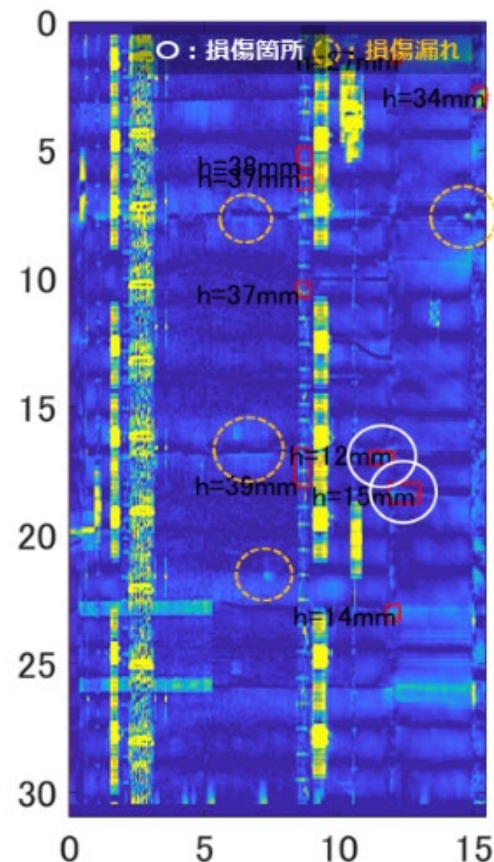
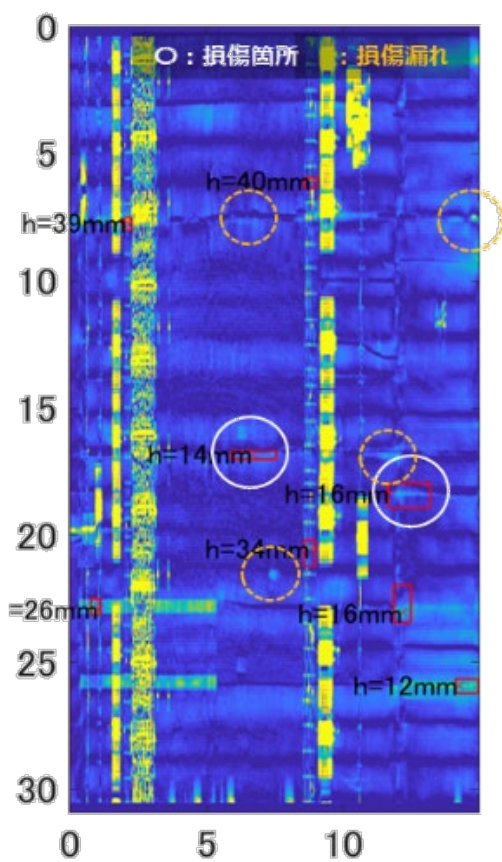
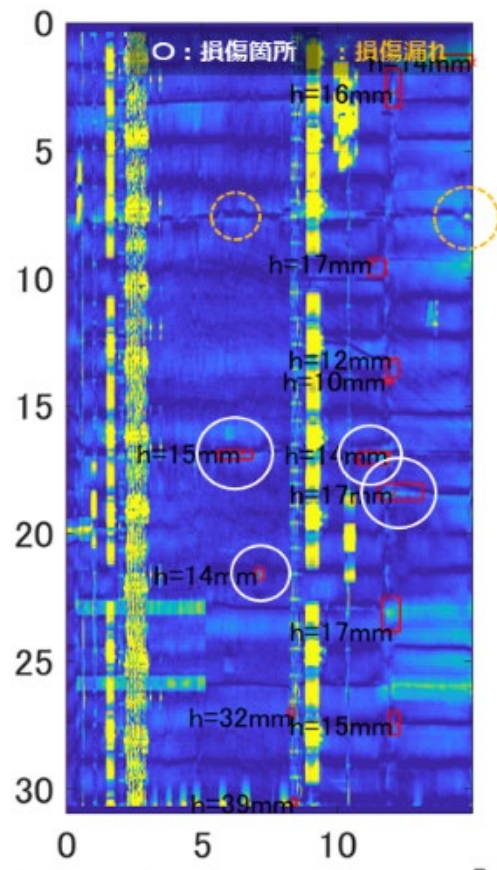
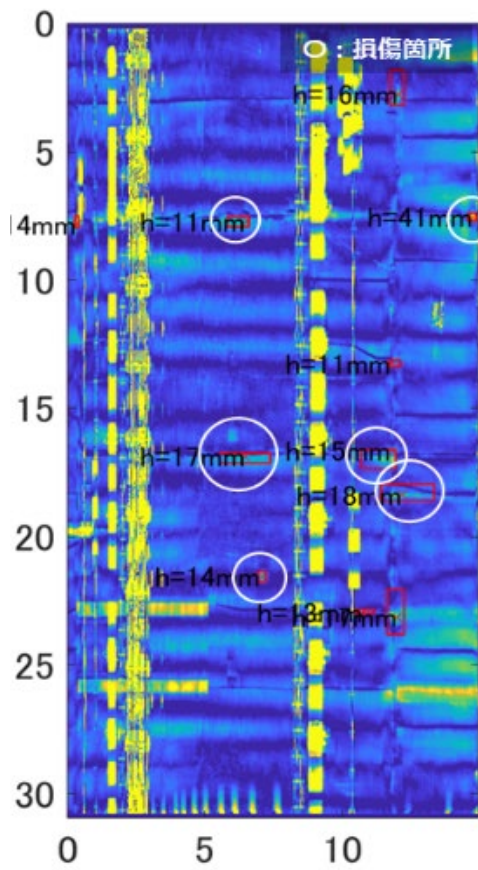


図-70 計測ピッチ毎の損傷検出精度 (池沢隧道、左上 : 20mm、右上 : 30mm、左下 : 40mm、右下 : 50mm)

表-8 計測ピッチ毎の損傷抽出性能（池沢隧道）

トンネル	点間隔	#	損傷(点検結果)				検出可否
			種類	幅	高さ	深度	
池沢隧道	20mm	②	うき	-	-	15	○
		③	うき	-	-	7	○
		④	うき	-	-	10	○
		⑤	うき	300	930	10~20	○
		⑦	うき	110	250	30	○
		⑧	うき	-	40	3	○
	30mm	②	うき	-	-	15	○
		③	うき	-	-	7	○
		④	うき	-	-	10	○
		⑤	うき	300	930	10~20	○
		⑦	うき	110	250	30	×
		⑧	うき	-	40	3	×
	40mm	②	うき	-	-	15	○
		③	うき	-	-	7	×
		④	うき	-	-	10	○
		⑤	うき	300	930	10~20	×
		⑦	うき	110	250	30	×
		⑧	うき	-	40	3	×
	50mm	②	うき	-	-	15	×
		③	うき	-	-	7	×
		④	うき	-	-	10	○
		⑤	うき	300	930	10~20	○
		⑦	うき	110	250	30	×
		⑧	うき	-	40	3	×

表-9 計測ピッチ 10mm 時の損傷抽出性能（護国寺補修基地）

損傷 箇所	大項目	①	②	③	④		⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪		⑫	⑬	
	小項目	—	—	—	④-1	④-2	—	—	—	—	—	—	⑪-1	⑪-2	⑫	⑬-1	⑬-2
	うき(最大値)	2mm	2mm	1mm	2mm	2mm	—	2mm	1mm	2mm	4mm	3mm	1mm	5mm	—	5mm	—
	剥離(最大値)	29mm	20mm	20mm	25mm		9mm	—	—	—	16mm	6mm	10mm	5mm	—	2mm	7mm
	寸法(縦)	250mm	300mm	230mm	300mm		120mm	—	—	—	380mm	290mm	130mm		—	160mm	
	寸法(横)	100mm	100mm	150mm	180mm		60mm	—	—	—	200mm	—	70mm		—	100mm	
	検出可否	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

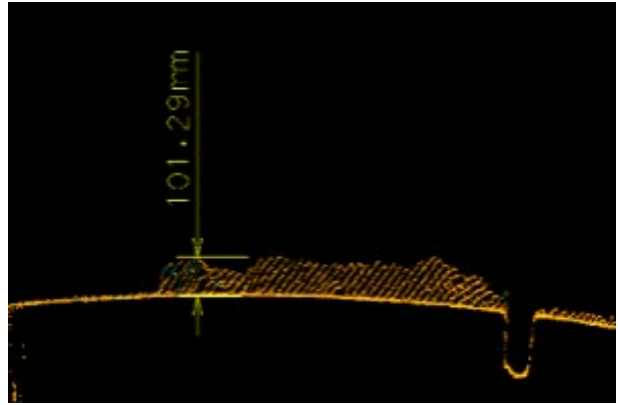
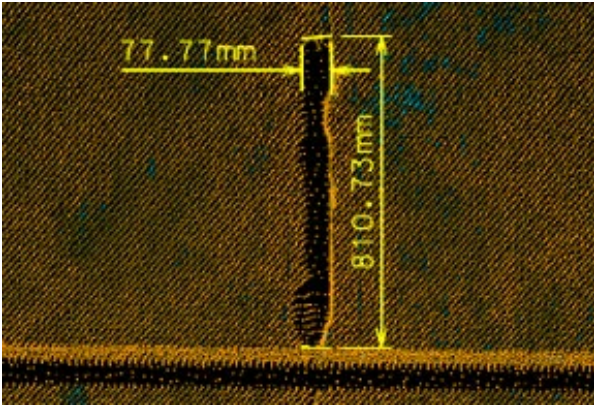


図-71 計測ピッチ20mmの損傷（3次元点群データ、剥離）

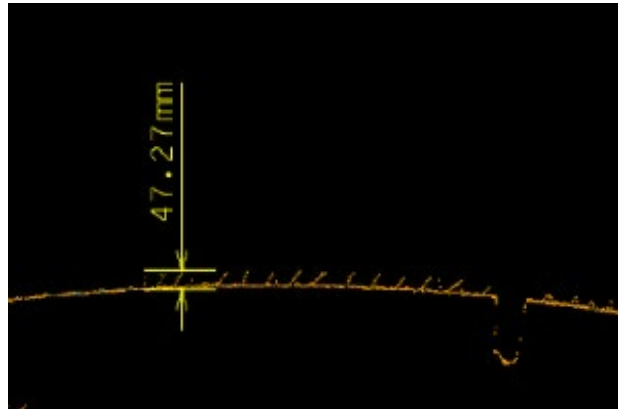
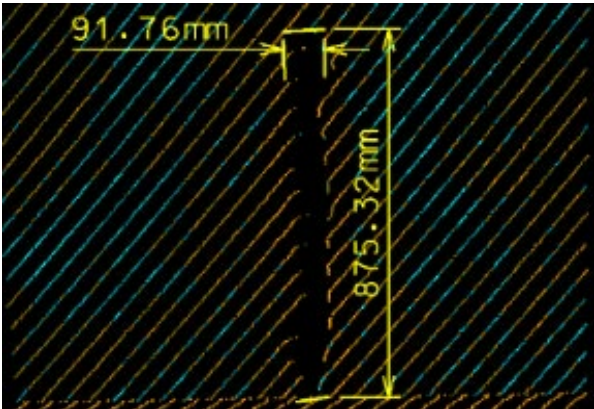


図-72 計測ピッチ50mmの損傷（3次元点群データ、剥離）

第5章 点検支援技術性能カタログ（案）への掲載検討

5.1 カタログ掲載に向けた検討

社会実装に向けた一つの検討事項として、本技術を国土交通省の定める「点検支援技術性能カタログ（案）」へ掲載するための検討を行った。なお、本技術の特徴を考慮し、「非破壊検査技術（トンネル）」カタログへの掲載を検討することとした。

5.2 類似技術に対する優位性の整理

本技術の優位性について、「非破壊検査技術（トンネル）」における類似技術との比較を行った。

表-10に類似技術の概要を示す。打音による振動情報や、レーダによる電磁波の伝播誤差等からトンネル表面内の空洞を検出する技術が多く、いずれも計測機器と一体型の構成となっており、特に打音を要する場合には停止や低速による計測を要することが見受けられる。

本技術は、レーザ測距装置を活用した技術であるため、レーダのようにトンネル壁面内部までの探査は難しいが、1mm以上の形状が表面に現れている損傷に関しては、検出が可能と実証されている。また、車両搭載型の場合、基本的に交通規制を伴わない計測を可能とするため、低コストかつ計測から点検までのリードタイム削減に大きく貢献できると考えられる。さらに、本研究では車両搭載型のレーザ測距装置にて検証を行い、計測速度（計測ピッチ）と解析性能・処理時間との一つの指標となる関連性を示したが、必要となる入力データさえ揃えば、計測方法に条件はないこともメリットと言える。最後に、自動的に損傷候補区間や点検員が無意識に設定する基準線を推定し、損傷と深度推定や附属物との区別を行うと共に、トンネルの形状の依存しない本来の損傷の三次元形状を捉えることは、本技術の最大のアピールポイントと言える。

以上から、本技術の優位性は以下のような項目が挙げられると考える。

- 計測手段（車両搭載型、地上設置型等）に囚

われず、レーザ測距装置による3次元点群データと軌跡データがあれば適用可能

- 要求される点検の品質によって、解析精度・処理時間等をコントロールし、点検の効率化に貢献
- 損傷と附属物を区別して検出し、かつ、検出結果を二次元の俯瞰図と三次元形状の両面で提供可能

5.3 カタログ掲載項目の内容検討

本技術に相当するカタログの種類、および標準項目について整理を行った。

本技術は、計測機器にて計測した3次元点群データと車両軌跡データを入力としたうき・剥離を検出する解析技術（ソフトウェア）が主である。本技術を道路管理者等に評価していただくため、従来のカタログ内容に解析技術に関する内容を記載するに必要な標準項目を検討した。

新たに追加検討した項目を表11に示す。解析装置の構成、解析原理やプロセス、精度に影響する要因等を記載する解析装置、並びに、解析技術の性能を記載する項目を検討した。

また、全章までの研究内容と検証結果を反映させた本技術の点検支援技術性能カタログ（案）を図●に示す。

表-10 類似技術の概要

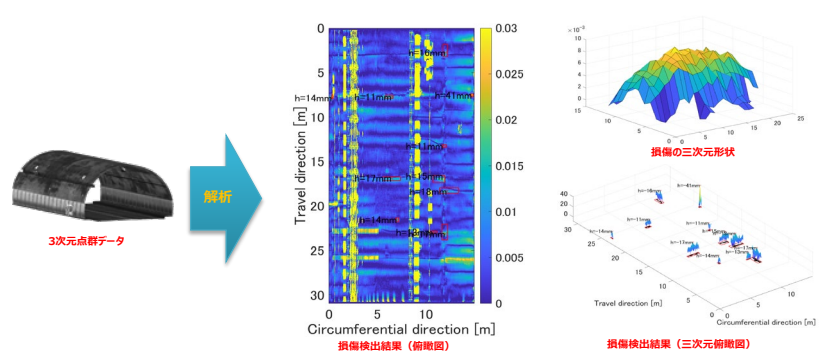
技術 No.	技術の概要	
①	計測機器	ハンマーによる打音(人の手)と打音計測装置
	検出技術	デジタル化された振動情報からうき・剥離・空洞を検出
②	計測機器	カメラや非接触型レーザを搭載した車両
	検出技術	トンネル覆工の3次元形状スリットを取得し、剥離の前兆である段差を検出
③	計測機器	2種類の非接触型レーザ(振動励起、振動計測)を搭載した車両
	検出技術	計測した覆工表面の振動からうき・剥離・空洞を検出
④	計測機器	接触型地中レーダを搭載した車両
	検出技術	反射した電磁波からうき・剥離・空洞を検出
⑤	計測機器	打音ユニット(打音装置、点検ハンマ、マイク等)を搭載した移動型フレーム、および車両
	検出技術	マイクにより収集した打音情報から、音響解析とAIによりうき・剥離・空洞を検出
⑥	計測機器	非接触型レーダを搭載した車両
	検出技術	反射した電磁波からうき・剥離・空洞・背面空洞等を検出
⑦	計測機器	地中レーダを搭載したドローン
	検出技術	地中レーダアンテナを覆工面に押し当てて時速2km程度で走行しながらデータを取得し、取得したデータから空洞や内部欠落を検出
⑧	計測機器	電磁波と超音波を発生させる機器、人手による移動
	検出技術	電磁波と超音波を発生させる機器をアンカー一部に設置し、取得した信号からアンカーの健全性、長さを計測

表-11 標準項目の新規追加検討項目

大項目	大項目	小項目	記載内容
2. 基本諸元	解析装置の構成	—	解析装置の構成(ソフトウェア、ハードウェア等)
	解析装置	設置方法	解析装置の設置方法(インストール方法、環境設定等)
		解析デバイス	解析装置に含まれるデバイスの有無・仕様・用途
		解析原理	解析技術の原理
		精度と信頼性に影響を及ぼす要因	解析を行う上での精度に影響する要因(解析パラメータ、入力データの仕様など)
		解析プロセス	解析のプロセス(入力データ、出力データ、各解析の概要等)
		アウトプット	解析後に出力されるファイル概要(仕様、形式等)
4. 解析性能	—	解析精度	本技術によって検出できる損傷の目安(エリア、深度等)
	—	解析条件	任意の損傷を検出するための条件(計測諸元等)

性能カタログ(案) ■非破壊検査技術 (トンネル)

1. 基本事項

技術番号	(指定された番号)		
技術名	解析学的信号処理によるトンネル等 うき・剥離の高精度・高速検出技術		
技術バージョン		作成	2021年3月
開発者	東京大学/朝日航洋株式会社/首都高技術株式会社		
連絡先等	TEL : 03-5841-6100	E-mail : tetsuya.ishida@civil.t.u-tokyo.ac.jp	東京大学 石田哲也
現行台数・基地	検討中	基地	検討中
技術概要	<p>トンネル内表面の3次元点群データに対して信号処理を行い、うき・剥離を自動的にかつ二次元・三次元的に検出を行う技術である。</p>  <p>3次元点群データ → 解析 → 損傷検出結果(前縮図) / 損傷検出結果(三次元前縮図)</p>		
対象部位	覆工表面/覆工の横断目地/覆工の水平打継ぎ目/覆工天端/その他覆工面/内装板/吸音板/天井板/はく落防止対策工/漏水対策工/その他補修箇所		
変状の種類	本体内におけるうき/はく離/劣化/巻戻の不足または減少/表面遊離の空洞・ならびに附属物本体・取付部材等の破損/腐食/変形/欠損/がたつき/その他 (具体名を記載する) ※複数可能		
物理原理	レーザー		
検出項目	対象物表面の凹凸/凹凸の深さ		

2. 基本諸元

センシングデバイス	レーザースキャナ【非接触タイプ】
計測原理	レーザースキャナからレーザを照射し、反射してきた信号と入力信号の時間差や位相差等からトンネル内表面の3次元座標を取得すると共に、GNSS/IMUと距離計による車両自己位置・姿勢を記録する。
計測の適用条件	<p>計測原理に照らした適用条件</p> <p>※測距精度は測距方式により異なる(車両搭載型レーザ、地上レーザ等) ※測距精度は: 計測手段…位相測距方式レーザ測距測100mm 測距精度…0.4mm (85m先のターゲット計測精度) スキャン角…45°、スキャンレート…200Hz、パルスレート…100pps</p>
検出	アウトプット 2.5次元メッシュデータ (トンネル内の形状を二次元にプロットしたデータ) [*、mat]
解析装置設置の構成	ソフトウェア1件 3次元点群データと車両軌跡の距離をZ軸に持つ2.5次元メッシュデータからうき・剥離を検出するソフトウェア
設置方法	ソフトウェアのインストールと環境設定 (依存ツール等のインストール)
解析デバイス	Windows10以降 64bitオペレーティングシステム
解析原理	<p>・車両軌跡と3次元点群データとの相対距離 (レーザ照射距離) をトンネル表面の相対的な凹凸情報として動的な交差波形とみなしたときの、正負の符号が異なる「振幅」が大きい箇所をうき・剥離のスクリーニングエリアとして捉える</p> <p>・点検員が目で損傷の深さを評価する際の基準線をうき・剥離の波の局所最大値としてみなし、それらを二次元に結んだ線を通るような曲線を基準面として捉える</p> <p>・元の波形から基準面を減算した三次元形状から、ある程度正規化された直方構造を持つ三次元形状を附属物、それ以外を損傷として捉え、また、各損傷の最大・最小値を損傷深度として捉える。</p>
解析精度	<p>精度と信頼性に影響を及ぼす要因</p> <p>・3次元点群データの計測ピッチ (点密度) 計測ピッチ20mm: 車両速度10km/h相当 計測ピッチ30mm: 車両速度20km/h相当 計測ピッチ40mm: 車両速度30km/h相当 計測ピッチ50mm: 車両速度40km/h相当</p>
解析プロセス	<p>①: 2.5次元メッシュデータの値を波形とみなし、損傷と思われる振幅の大きな箇所をヒルベルト変換により推定を行う。</p> <p>②: 推定箇所におけるトンネル縦断方向の基準線を算出し、それらを通るような曲線を基準面として推定を行う。</p> <p>③: 推定した基準面を2.5次元メッシュデータから減算することで、各損傷の三次元形状を抽出する。</p> <p>④: 抽出した三次元形状の特徴から、うき・剥離を推定する。</p> <p>⑤: 推定したうき・剥離の最大値・最小値を推定した三次元形状から算出し、算出した値を損傷深度として出力する。</p>
アウトプット	うき・剥離の検出エリア、および、損傷深度を表示した二次元のカラー俯瞰図と三次元俯瞰図

4. 解析性能

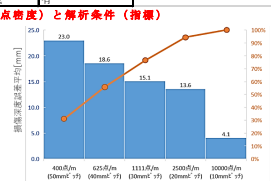
項目	性能	性能 (精度・信頼性) を確保するための条件																																																			
解析精度	<p>検証の有無の記載 有</p> <p>・損傷の検出率 (指標)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>トンネル</th> <th>施工法</th> <th>トンネル表面状況</th> <th>損傷</th> <th>損傷数</th> <th>損傷検出数</th> <th>損傷検出率</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">①</td> <td rowspan="2">ボンプ 掘削</td> <td rowspan="2">十分平滑</td> <td>うき</td> <td>13</td> <td>12</td> <td>92%</td> </tr> <tr> <td>剥離</td> <td>9</td> <td>9</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">②</td> <td rowspan="2">NATM 工法</td> <td rowspan="2">十分平滑</td> <td>うき</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>剥離</td> <td>8</td> <td>6</td> <td>75%</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">③</td> <td rowspan="2">矢板工法</td> <td rowspan="2">平滑</td> <td>うき</td> <td>8</td> <td>8</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td>剥離</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">④</td> <td rowspan="2">矢板工法</td> <td rowspan="2">施工由来の凹凸</td> <td>うき</td> <td>4</td> <td>3</td> <td>75%</td> </tr> <tr> <td>剥離</td> <td>21</td> <td>16</td> <td>76%</td> </tr> </tbody> </table>	トンネル	施工法	トンネル表面状況	損傷	損傷数	損傷検出数	損傷検出率	①	ボンプ 掘削	十分平滑	うき	13	12	92%	剥離	9	9	100%	②	NATM 工法	十分平滑	うき	-	-	-	剥離	8	6	75%	③	矢板工法	平滑	うき	8	8	100%	剥離	1	1	100%	④	矢板工法	施工由来の凹凸	うき	4	3	75%	剥離	21	16	76%	<p>・検出率: 損傷検出数/損傷総数×100[%]</p> <p>・左表に示す検出率 (指標) を要する場合は該当する計測ピッチを選定すること</p> <p>・即時性を重要視する場合には、下表を参照の元該当する計測ピッチを選定すること</p>
	トンネル	施工法	トンネル表面状況	損傷	損傷数	損傷検出数	損傷検出率																																														
①	ボンプ 掘削	十分平滑	うき	13	12	92%																																															
			剥離	9	9	100%																																															
②	NATM 工法	十分平滑	うき	-	-	-																																															
			剥離	8	6	75%																																															
③	矢板工法	平滑	うき	8	8	100%																																															
			剥離	1	1	100%																																															
④	矢板工法	施工由来の凹凸	うき	4	3	75%																																															
			剥離	21	16	76%																																															
解析条件	<p>検証の有無の記載 有</p> <p>・計測ピッチ (点密度) と解析条件 (指標)</p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>計測ピッチ (mm)</th> <th>検出率 (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>400</td> <td>23.0</td> </tr> <tr> <td>625</td> <td>38.6</td> </tr> <tr> <td>1111</td> <td>75.1</td> </tr> <tr> <td>2500</td> <td>93.6</td> </tr> <tr> <td>5000</td> <td>99.9</td> </tr> </tbody> </table>	計測ピッチ (mm)	検出率 (%)	400	23.0	625	38.6	1111	75.1	2500	93.6	5000	99.9	<p>・3次元点群データが損傷によるコンクリート表面形状を捉えていることが大前提</p> <p>・トンネル覆工表面に損傷由来の形状が表れていない場合は検出対象外</p> <p>・漏水等によりトンネル覆工表面が濡れていること</p> <p>・附属物等の背面に位置する損傷は検出対象外</p>																																							
計測ピッチ (mm)	検出率 (%)																																																				
400	23.0																																																				
625	38.6																																																				
1111	75.1																																																				
2500	93.6																																																				
5000	99.9																																																				

図-73 点検支援技術性能カタログ 検討案

参考文献

- 1) 電子情報通信学会, デジタル信号処理ハンドブック, オーム社, 1993.
- 2) MathWorks, “ findchangepts 信号の急激な変化の検出,” [オンライン]. Available: <https://jp.mathworks.com/help/signal/ref/findchangepts.html>. [アクセス日: 26 1 2021].3) Shepard, F. P. and Inman, D. L. : Nearshore water circulation related to bottom topography and wave refraction, *Trans. AGU.*, Vol. 31, No. 2, 1950.
- 3) Killick, Rebecca, Paul Fearnhead, and Idris A. Eckley, “Optimal detection of changepoints with a linear computational cost,” *Journal of the American Statistical Association*. Vol. 107, No. 500, 2012.
- 4) 仁保 勉, 江 浩, 山本 眞司, “Mathematical Morphology 演算の高速化アルゴリズムの比較,” *情報処理学会論文誌*, Vol37, No.10, 1996.

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

成果報告レポート

No.316

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

2022.05