

走行型計測システムを用いたトンネル点検における AI技術と3次元データ活用に関する検討

榎本真美・服部達也・新田恭士

1. はじめに

トンネル点検を高度化する技術として、走行型計測、AIによる変状検出、3次元データ活用が挙げられる。これらの新技術や今後実用化されるであろうAI技術を十分に活かし、より確実に安全性を担保した維持管理のための点検プロセスが必要である。

現在、土木研究所では、AIを活用した道路橋メンテナンスの効率化に関する共同研究の一環として、パシフィックコンサルタンツ（株）及び三菱電機（株）と共に、トンネル用走行型計測システムを用いたAI点検の活用について検討を行っている。

本報では、カメラ、レーザ、レーダ等の計測機器を搭載した走行型システムの活用と、AI技術や3次元データを活用した点検支援に関する検討状況について報告する。

2. 背景

トンネル維持管理では、利用者被害を未然に防ぎ、通行車両等の安全な通行確保を目的として、日常点検や定期点検が行われている。日常点検では、道路パトロールカーや徒歩巡視での目視点検より要注意箇所、路面損傷、落下物、漏水及び凍結などの状況確認と対応を行っている。日常点検で確認が困難なトンネル本体工の変状、付属物等の取付状態の異常については、定期点検が行われている。定期点検は、道路トンネル定期点検要領に基づき5年に1回の近接目視を基本とする定期点検が義務化されている¹⁾。しかし、市町村など多くの地方自治体においては、厳しい予算制約や技術者不足により、困難を伴っている。

従来からの近接目視点検においては、①手書きスケッチによる記録の曖昧さや客観性確保の難しさ、②点検者の技量や主観的判定によるバラツキ、

③暗く狭い現場作業環境での安全性の確保、④通行止め等の長時間の交通規制による渋滞や迂回の影響に対して、十分な配慮と工夫が求められている。

平成31年2月に、定期点検要領の見直しが行われた。見直しのポイントは、①損傷や構造特性に応じた点検の着目箇所の絞り込み、②新技術の活用による効率的な点検の2点が挙げられる。トンネルについては、うき・剥離、剥落は、その多くが目地部、天端部、過去の変状箇所や補修箇所が発生していることから、二回目以降の点検においては、十分な確認のもと打音範囲の絞り込みが可能である。また、点検支援技術の活用範囲や目的を整理したうえで、適切な技術の選定を行い、走行型計測システム等の新技術活用による状態の把握が可能となった。

3. 走行型計測システムの現状

前述を背景に、効率的かつ確実な手段として、走行型計測システムを用いたロボット点検の導入が進んでいる。代表的な点検ロボットを表-1に示す。これらはいずれも計測時の車線規制が不要である。

例えば、カメラ、レーザ、レーダ全てを搭載した計測車両「MIMM-R」は既に実用化され、これまでに1,000km以上のトンネルで、実際に計測されている²⁾。この走行型計測車両を例に、計測機能の概要を図-1、表-2に示す。

①レーザ計測：100万点/秒の高精度レーザスキャナは、高密度な点群データを取得し、トンネル覆工の形状、覆工の変形（変形モード、目地・ひび割れの段差）を客観的に把握可能である。

②画像計測：速度50～70km/hで走行しながら取得した壁面画像より、0.3mm幅程度以上のひび割れなどの変状を把握できる。客観的、正確な展開図が作成でき、変状進行性の把握や変状原因

表-1 代表的なトンネル点検ロボット一覧

ロボット名	形式	記録項目		カメラ形式	補助照明	その他
		覆工画像	形状計測			
MIMM-R	車両型(専用車)	カラー画像	3次元レーザ点群	ビデオカメラ	可視光	内部欠陥レーダ 背面空洞レーダ
MMSD	車両型(専用車)	白黒画像	3次元レーザ点群	ラインセンサカメラ	不可視光(赤外線)	—
TC3	車両型(専用車)	カラー画像	(なし)	ラインセンサカメラ	可視光	—
トンネルトレーサ	車両型(専用車)	カラー画像	(なし)	ビデオカメラ	可視光	—
トンネルモニタリングシステム	車載型	白黒画像	(なし)	ラインセンサカメラ	可視光	—
eQドクター	車両型(専用車)	白黒画像	(なし)	ラインセンサカメラ	不可視光(赤外線)	—
イーグル	車両型(専用車)	カラー画像	(なし)	ラインセンサカメラ	可視光	—

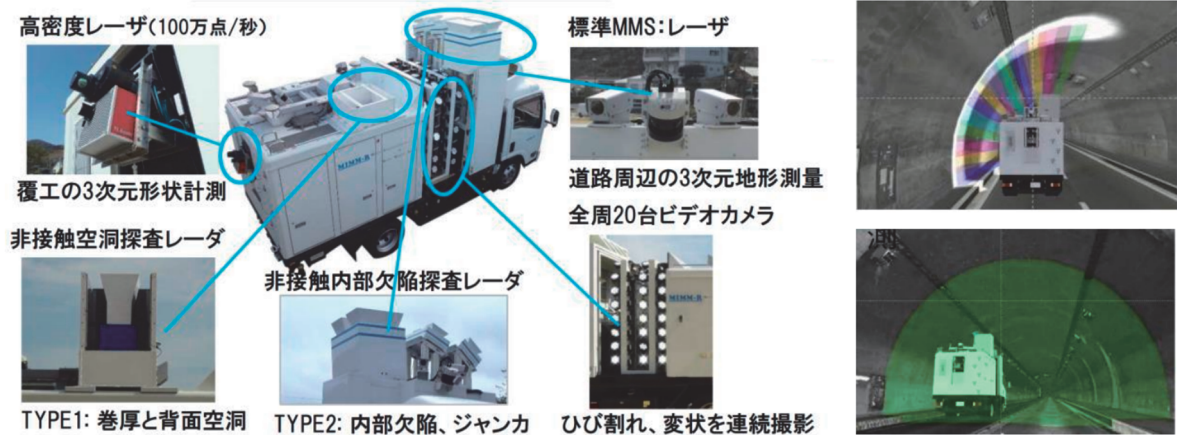
図-1 走行型計測システム（MIMM-R）概要¹⁾

表-2 走行型計測システム（MIMM-R）の機能

機能	計測内容	計測結果を用いた解析内容
①レーザ計測	- 高精度レーザによる3次元の点群データの取得 - 高精度レーザ（100万点/秒）	- ひび割れ変状原因、進行性の推定が可能 - トンネル形状、変形モード解析を行いコンター図作成 - 段差検出
②覆工画像撮影	分解能1.5mm/pxのカラー画像を取得	- 画像解析により0.3mm幅のひび割れを検出 - 正確な位置精度（レーザ点群と位置同期）
③非接触レーダ	- 厚巻・空洞用非接触レーダ探査 - 内部欠陥用非接触レーダ探査	- 覆工厚及び覆工背面空洞の調査 - うき、ジャンカなどの探査 50km/hで走行し、3m程度の離隔で深度40～80cmの確認が可能

推定が可能である。

③走行型非接触レーダ：SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）において開発された走行型非接触レーダを搭載し、壁面までの離隔3m程度で、速度50km/h程度以上で走行しながら、巻厚、背面空洞、内部欠陥を探査できる³⁾。探査可能な深度は巻厚で変化する、40cm～80cm程度である。上下線を往復走行することで、天端部2ヶ所で計測可能。

これらから得られた個々の結果を総合的に判断することで、トンネルに発生している変状原因を推定でき、要注意箇所を抽出し、効率的な近接目視点検・打音検査の支援、および詳細点検・補修

計画の立案が可能となる。

4. 新技術を活用したユースケース

トンネル点検における走行型計測の活用方法として、いくつかのユースケースを整理した。なお、ユースケース実現に必要な、AI技術や3次元データの詳細については、次項以降で述べる。

4.1 目視点検後に走行計測するケース

目視点検チョーキング後に、カメラが搭載された車両で記録として画像撮影を行い、チョーキングを記録に残すという考え方である。その場合、求められるカメラの画像分解能は、幅5mm程度のチョーキングが画像に記録されればよい。変状

自体は必ずしも画像に残らないが、安価に実現できる。撮影後に画像上のチョークをトレースする、あるいは自動抽出することにより、展開図作成作業の効率化が可能である。ただし、従来の近接目視の課題である現場の点検員の安全や作業負担、点検結果の客観性やバラツキには十分な配慮が必要である。現場で手持ちカメラ等を用いた変状撮影や、目視確認による特記事項の記録整理も必要である。

4.2 目視点検前に走行計測するケース

より効果的な方法として、高画質カメラを用いて近接目視前に撮影した覆工表面の画像をもとに展開画像を作成し、その結果に基づいて近接目視を省略する箇所を抽出（スクリーニング）する方法がある。そのフローを図-2に示す。走行型計測車両に搭載されたカメラで取得した画像をもとに、人もしくは機械により展開画像とひび割れ等の変状を抽出した変状展開図を作成したうえで、現場で点検技術者が変状の確認と修正・補完を行う。これにより、正確な変状位置や形状、パターンの記録が可能となるだけでなく、危険な現場での作業時間の短縮を図ることができる。さらに、位置精度が高まることにより時系列的に変状を見比べることが可能となり、変状の比較や進行程度について客観性をもって評価することができる。その時に、展開画像は、過去の変状の有無や状態を確認するための根拠データとして有効である。

このユースケースの長所は、現場の目視点検前に、特に注力して点検を行う箇所や、問題のない箇所の把握が可能となることである。予め作成された変状図をもとに現地で確認し、必要に応じた修正を行うことで、要注意箇所の目視確認や変状

原因の把握に十分な時間を確保できると考えられる。結果的に、より安全な維持管理につなげることができる。

カメラのみを搭載した計測車両の場合は、画像計測の可視範囲かつ目視による判断可能な変状が、スクリーニングの対象となる。つまり、付属物背面などの画像による確認不能な範囲や、浮き・段差等の画像のみでは確認が困難な変状は、近接目視が必要である。一方で、高画質カメラに加えて、レーザやレーダを用いた計測を近接目視点検前に実施する場合、変形モードや浮き、背面空洞の有無を含むよりリッチな情報をもとに総合的に評価し、点検の高度化を図ることができる。画像以外の情報を加えることで、スクリーニング可能範囲を広げて、予め変状要因を推測するなど、現場への支援範囲が広がる。

4.3 緊急時に走行計測するケース

形状計測が可能なロボットでは、地震発生直後の緊急時に走行計測を行い、定期点検で取得したレーザ点群との比較を行うことで、外力による変形や変状を迅速に把握することができる。これは、安全性の確認や必要な対策工の検討を素早く進めることで、通行する利用者の安心に寄与する。

4.4 竣工後（供用前）に走行計測するケース

トンネルの竣工後から付属物等が設置されるまでの間に計測を行うことで、トンネルの初期状態を把握する。これにより、以降の定期点検で確認された変状等が初期欠陥なのか、あるいは供用中に発生したものを把握することが容易となり、健全性の診断や措置の要否の判断に利用することが可能となる。

竣工後計測データが、施工時の BIM モデルや

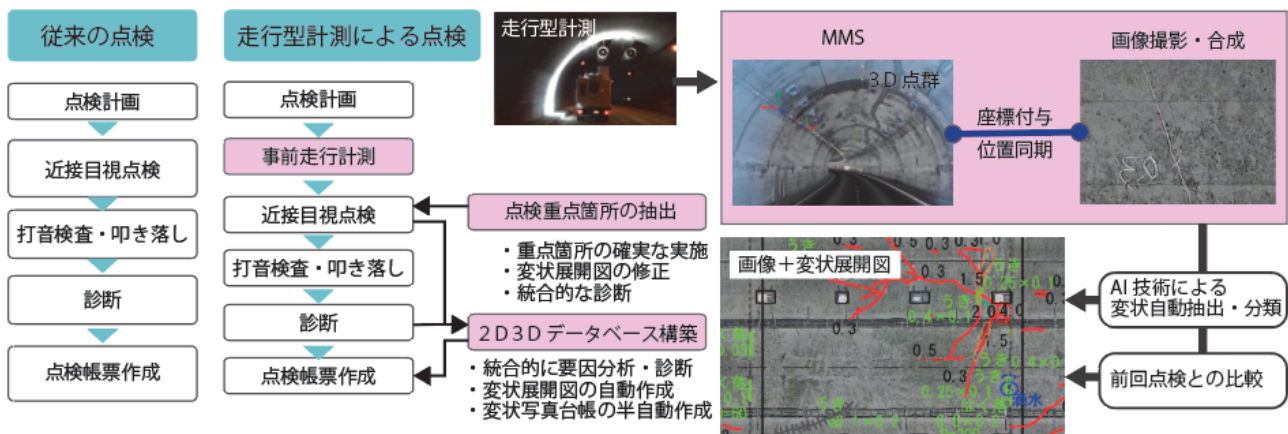


図-2 スクリーニングのフロー

地質データとあわせて、維持管理フェーズに引き継がれる場合には、点検や補修工事などに活用されることが期待できる。このユースケースは、既存のトンネル工事やトンネル点検には組み込まれておらず、新たな業務プロセスとして位置づけられるものである。

5. AI技術による点検支援

5.1 AI技術の活用場面

各ユースケースでは、車両に搭載したカメラでトンネル覆工の全面を撮影し、その画像を確認する必要がある。この膨大な画像の全てを、人間がひび割れを確認できる程度に拡大して変状有無や状態の確認を行うことは、非効率であり、実質的に難しい。

維持管理計画の策定には、継続的な変状の把握と進行性の評価が重要であるが、現場で目視確認を行いながらの手書きスケッチによる記録は、位置情報の正確性と客観性の確認に多大な手間を要している。また、現地作業の後、展開画像から変状図作成にはCADを使ってトレース作業を行うなど、未だ多くの手間と労力を要している。

これらの解決策として、AI技術による人間の支援として、画像処理やAIによる自動化により、作業効率を上げると同時に、見落としなどのヒューマンエラーを防ぐことが期待されている。ここでいうAI技術とは、深層学習・機械学習を含む画像等のデータ解析を行い、機械による作業の自動化あるいは半自動化をいう。大量のデータ処理を正確に行う点においては、機械の方が人間より優れている。

なお、AI技術の導入・実用化を行う前提として、当面のAI技術の適用範囲は、人間の代替ではなく支援と考えており、必ず人間が現地で近接目視、打音検査を行う必要がある。

5.2 自動変状検出AIの開発

現在、トンネル覆工画像から変状を抽出するための様々なAI技術開発が進められている。画像取得後に期待される自動処理としては、主に次の3点が挙げられる。①画像からの変状箇所抽出、②変状種別の分類、③変状展開図の作成支援。なお、画像処理や深層学習技術は日進月歩で発展し、様々な手法が開発されている⁴⁾。

図-3は、畳み込みニューラルネットワーク

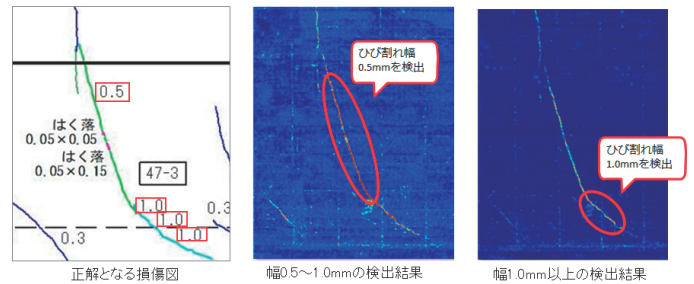


図-3 CNNモデルによるひび割れ幅の推論結果

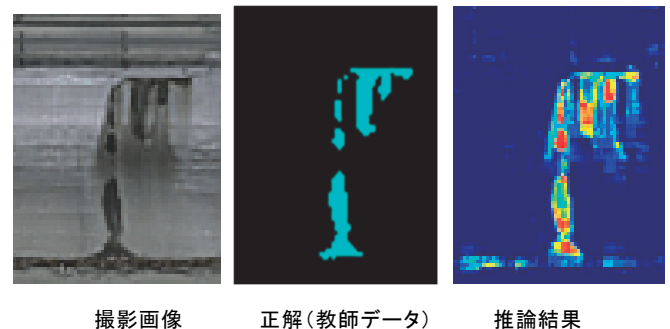


図-4 セマンティックセグメンテーションによる漏水の推論結果

(CNN) を用いて、トンネル内のひび割れ（幅0.5～1.0mm、1.0mm以上）を検出した結果である。変状検出だけでなく、ひび割れ幅の分類への適用性が確認できる。

図-4は、セマンティック・セグメンテーションによる画像認識で、トンネル壁面の漏水検出を行った結果である。セマンティック・セグメンテーションとは、深層学習を用いた画像認識の一種で、画素単位でラベル付けを行い学習させることで、物体検知や分類といった推論を画素単位で行う手法である。変状と推測される箇所がヒートマップで赤く示されており、正解となる漏水範囲と概ね一致する。画素単位で変状の検出を行うことで、変状展開図作成の省力化を図る事が期待できる。

5.3 評価の課題

このようなAI技術を実用化するにあたり、評価基準を設定する必要があるが、考慮すべき点を整理する。

(1) ユースケースを踏まえた評価指標

まず、AI技術の開発や評価は、ユースケースにより要求される性能や精度が異なるため、具体的な利用を想定したユースケースとあわせて議論をする必要がある。さらに、深層学習の各手法の特性を理解し、目的に応じたモデルを構築する必要がある。場合によっては、人間の業務プロセス

を見直すことで、最新技術を最大限活用し、限られた技術者の時間をより重要なプロセスに充てることが可能となる。

(2) 取得画像の品質

次に、取得画像の品質確保が重要である。一般に、モデル構築に使用する画像の品質や特性が、変状抽出結果に大きく寄与する。

トンネル点検画像のスクリーニングには、少なくとも0.3mm幅のひび割れが確認できる画像が求められているが、その品質基準は一概に画素分解能ではない。カラーあるいはモノクロ画像といった画像種別や階調、照度、データの保存形式や圧縮率、トンネルの覆工表面の汚れや色合いなど、様々な要因が画像品質に影響を与えている。また、画像の精細さとデータ量はトレードオフの関係にあり、高精細だが扱いにくいデータでは、実用性に欠けてしまう。画像品質の確認方法や保存方法の議論が必要である。

(3) 評価方法と品質保証の枠組み

評価方法と品質に関する考え方のコンセンサスを作る必要がある。評価結果は、テストデータにも依存しがちであるため、評価データの正確性と十分性をどのように担保するかが重要である。

6. 2次元・3次元データの活用

膨大な画像とAI技術による処理結果を正確に把握し、必要な情報に素早くアクセスできるため

には、データベースの構築管理が重要である。

従来の点検結果は、一般的に帳票（紙やPDF形式データ）に記録として整理されているが、作成コストがかかるだけでなく、紙ベースの帳票は利活用が困難である。そのため、変状把握、健全度診断、次回点検への活用などに十分に生かし切れていない。計測車両を用いて高度なデータを取得した場合でも、点検や診断を支援する情報として活用されるが、その結果のみが帳票に記録され、データのほとんどは利活用されないままである。時系列でデータを蓄積し、施設管理者や維持管理に関わる関係者間で必要なデータを共有し利活用することが求められている。

レーザ計測機器を搭載した形状計測を行い、点群に基づく3次元モデルが構築できると、正確な位置同期による画像合成、および変状位置取得が実現できる。正確な位置情報に基づいた点検データベースを整備・活用することにより、前回点検と同じ位置の写真呼び出し、即時に比較することが可能となる。また、写真台帳や調書作成の自動化など、内業作業の効率化は既に一部で実用化されている。

図-5は、展開画像と重ね合わせた2次元展開図である。前回点検との重ね合わせによる比較をおこなったところ、画像およびレーザ計測を行った点検は、位置正確性に優れている。また、図-6は、2次元展開図と同一箇所を3次元表示したもので

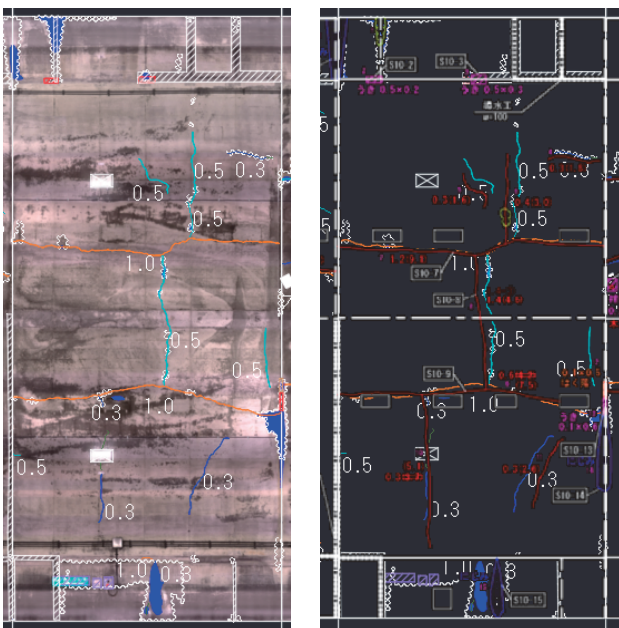


図-5 展開画像を重ねた2次元展開図（左）
前回点検の展開図比較（右）

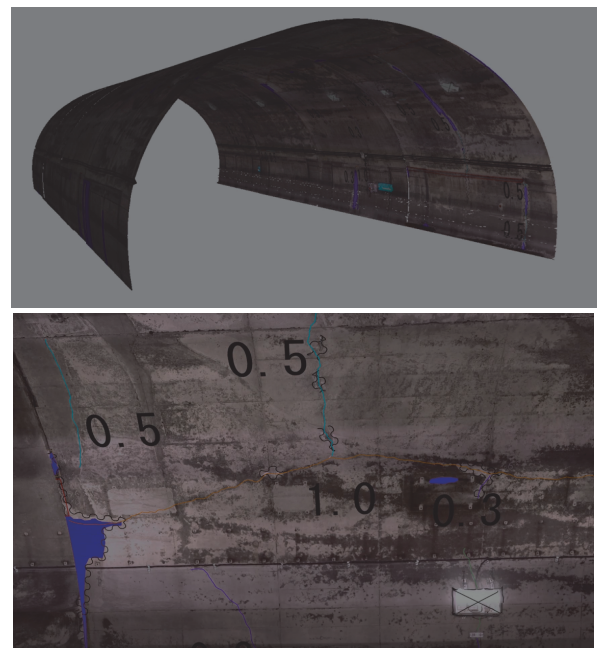


図-6 3次元モデル（上）、一部拡大（下）

ある。ひずみ補正後に画像合成を行った3次元画像に対し、変状検出を行い、見上げ変状展開図を重ね合わせた3次元モデルである。3次元表示により、損傷位置や形状、その他付属物等の位置関係が直観的に把握可能である。

位置情報に紐づいた統合管理を行い、3次元データベースを構築することにより、必要に応じて2次元あるいは3次元で表示することが可能である。また、レーザ点群と紐づいた3次元画像は、変状モード解析のコンター表示や、レーダの空洞探査・内部欠陥と重ねて評価を行うことができる。統合的な診断や変状原因把握、関係者間での共通認識の構築など、多くのメリットがある。

7. おわりに

走行型計測技術は、近接目視や打音検査の完全代替にはならないため、それらを別途実施することが前提である。しかし、走行型計測結果の活用により、近接目視・打音検査前に要注意箇所や健全箇所を抽出すること、点検の客観的・正確性の高い変状展開図の作成支援、変状進行性や原因の把握、健全度診断の支援を行うことは十分に可能である。その際に、2次元の展開画像・変状図だけでなく、必要に応じて時系列比較や3次元モデルで視覚化し、総合的な診断支援を行うことが有効である。

一方で、AI活用による変状自動検出は、一定の成果を挙げつつあるが、その精度やロバスト性（ノイズに対する影響耐性）に課題が残る。

今後の検討項目を下記に示す。

(1) AIによる画像処理技術の開発：変状検出モデルの精度向上、信頼性の担保や、品質確保方法を検討する。

(2) 最適な点検プロセスの検討：技術レベルや施設重要度を鑑みた人間とAIのベストミックスとなる点検プロセスの在り方を整理し、スクリーニングによる近接目視の効率化を定量的に整理する。さらに、災害時の変状の早期把握への適用性を確認する。

(3) 3次元モデルの活用：3次元モデルによる、点検診断でのデータ活用の有効性検証、日常管理や改修時における3Dデータ活用の効率性を検証し、3次元納品マニュアルの拡充を進める。

本研究により、トンネル維持管理関係者全員が、走行型計測技術を用いたAI技術と3次元データ活用の恩恵を受けられるようにしていきたい。

謝 辞

本研究は、「AIを活用した道路橋メンテナンスの効率化に関する共同研究：点検（画像診断）トンネル点検サブワーキンググループ」の一環として実施されたものである。ここに記して、共同研究者の皆様への謝意を表します。

参考文献

- 1) 道路トンネル定期点検要領、国土交通省、2019
- 2) 安田亨：走行型点検手法とAIを活用した健全度診断システムによるスマートトンネルマネジメント、JACIC情報、第119号、2019
- 3) SIPインフラ維持管理・更新・マネジメント技術インフラ技術総覧、2019
- 4) 川城研吾、安田亨、榎本真美：MIMM-Rで取得したトンネル画像へのディープラーニング適用に関する取り組み、土木情報学シンポジウム講演集、Vol.44、pp.197～200、2019

榎本真美



土木研究所技術推進本部
先端技術チーム 交流研
究員
ENOMOTO Mami

服部達也



土木研究所技術推進本部
先端技術チーム 主任研
究員
HATTORI Tatsuya

新田恭士



土木研究所技術推進本部
先端技術チーム 上席研
究員、博士(工学)
Dr. NITTA Yasushi