高性能カメラと画像解析による道路インフラ点検の効率化

Efficient Road Infrastructure Monitoring System Using Unique Camera and Image Analysis

平井　秀明* Hedeaki HIRAI　伊藤　泉* Izumi ITO　菊地　太郎* Taro KIKUCHI　辰野　響* Hibiki TATSUNO　押切　幸治* Koji OSHIKIRI

要　旨

老朽化が進む道路インフラの維持管理が大きな社会課題となっている．道路インフラは，国土交通省が定めた点検要領に基づいて点検が行われている．しかしながら，交通規制をしたうえで，高所作業車を利用し目視での確認を行うため手間がかかるもの，高額な計測機材を必要とするものや，大型車両をベースとした専用の計測車両を必要とするものであった．我々は低コストで効率的な点検を目指し，独自の光学系と人工知能（AI: artificial intelligence）などのデジタル技術を用いた撮影システムで点検作業を自動化する道路インフラモニタリングシステムの開発を進めてきた．本稿では，道路，道路トンネル，のり面の各モニタリングシステムの開発結果を説明する．

ABSTRACT

Infrastructure maintenance and management of deteriorating roads is a major concern in Japan. Japan's Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) has established procedures for inspecting road infrastructure. However, conventional inspection methods require traffic flow to be stopped and special vehicles are required for high-lift work, with individuals on board visually inspecting the surfaces. Such work is dangerous and strenuous. To keep workers safe, all essential elements, e.g., road surfaces, tunnels, and roadside slopes, must be thoroughly inspected. Ricoh has automated inspection systems by combining our original optical systems with AI digital technologies, offering cost-effective, efficient solutions. In this paper we introduce an overview of our monitoring systems for road surfaces, tunnels, and roadside slopes.

*　社会インフラ事業センター
Social Infrastructure Buseiness Center

本稿の2章の一部は，日本画像学会誌，第60巻，第1号, pp. 85-89 (2021) を基に作成した．

1. はじめに

道路，トンネル，橋梁，道路土工構造物などの道路インフラは，日本の基幹インフラとして整備されてきた．既設の道路インフラの多くは，戦後の高度経済成長期に建設されたもので老朽化が進み，その維持管理コストは増大している．また少子高齢化に伴う維持管理の人的リソース不足，自然災害の頻発・激甚化に伴う被害など，道路インフラの整備は様々な社会課題を含んでいる．安全・安心を確保し，人や地域を相互につなぎ人々の生活や産業に活力を与え続けるために，持続可能な道路インフラの維持管理が望まれる．

道路インフラは，国土交通省が定めた点検要領に基づいて，各地方整備局や地方自治体によって維持管理が行われている．点検要領は，道路インフラの安全性の向上および効率的な維持修繕を図るため，その変状を把握するとともに，措置の必要性の判断を行うことを目的に，道路インフラごとに発行されている．

この点検要領に基づき，道路点検については路面性状調査車両を用いた点検が行われている．またトンネル，橋梁，のり面などの土工構造物については近接目視による点検が行われている．これらの点検は，交通規制をしたうえで，高所作業車を利用するため手間がかかるものであった．また，撮影や計測したデータについては人手による解析作業や，目視判読を行う必要があり，内業についても業務の効率化が求められてきた．

点検要領には，「新技術による代替が可能である」と記されている．新技術の活用により，必要な点検基準を満たすことは当然のこととして，点検業務の効率化が期待されている．

我々は，これら道路インフラの安全を保つための点検に対して，独自の撮影装置，AI，画像処理の技術を活用し，必要とされる点検精度を満たしながら，効率的な道路インフラ点検を実現するための技術開発に取り組んできた．

本稿では，各種のカメラを組み合わせた独自の撮影装置と，画像処理やAI技術を使用した，道路，道路トンネル，道路のり面の変状をモニタリングする各システムについて説明し，これらを併用して網羅的，相互的な道路インフラ点検を実現することを提案する．

2. 道路モニタリングシステム

2-1　道路モニタリングシステム

2-1-1　道路点検におけるリコーの取組み

道路は，国土交通省から2016年に発行された舗装点検要領[1)]，日本道路協会が取りまとめた舗装調査・試験法便覧[2)]に従い，ひび割れ・わだち掘れ・平たん性などの変状の点検が行われている．

道路点検においては，後述するトンネル点検やのり面の点検より先行して，交通規制不要な車両走行による走行計測が実現されている[3)]．一方で，ひび割れ，わだち掘れ，平たん性それぞれの点検項目に応じた計測器を備える必要があり，車両の大型化やコスト増という問題がある．

日本国内に存在する約120万kmの道路は，生活道路や山間部の道路など，狭隘な道路が多くを占め，それらは十分に点検が行われていない．我々は，これらの道路の計測も視野に入れた一般車両搭載型の撮影装置を開発した．撮影装置は，一般財団法人土木研究センターが毎年実施している「路面性状自動測定装置の性能確認試験」に，初回受検以降5年連続で合格しており十分な精度を有している．また，従来は走行型計測装置で撮影された画像の目視判読により変状抽出されているケースが多いが，我々は画像処理やAI技術で自動化し，作業の効率化と安定化を実現している．これらの開発結果について，以下では，撮影装置と，変状の判読・算出方法について説明する．

2-1-2　一般車両搭載型の撮影装置

撮影装置はステレオカメラを用いたもので，車両後部に取り付けられている．ステレオカメラとは，左右に並べられた2台のカメラそれぞれから出力される撮影画像から，視差情報を抽出することで，前方の対象物の奥行き・形状情報（3次元情報）を得られるカメラである．ステレオカメラで道路表面を撮影した画像からひび割れ，わだち掘れ量，平たん性が算出可能である．Fig. 1は，現在，サービスを行っている撮影装置を搭載した車両の外観図である．ステレオカメラ3台で1車線分の幅員を撮影できるように設置されている．一般車両に搭載可能な撮影装置となっており，日本の道路の多くを占める生活道路や山間部などの狭隘な道路にも対応可能である．

Fig. 1　Exterior of road surface monitoring system by using stereo cameras.

2-1-3　路面形状計測とAI技術

路面形状の計測は，走行しながら連続して路面を撮影し，撮影した画像を結合し道路面を再現した後に，ひび割れ，わだち掘れ量，平たん性の各変状に応じた判読処理を行う．

ひび割れは，走行した距離，かつ幅員1車線分の結合済み輝度画像を用いて判読する．ひび割れの判読は，舗装調査・試験法便覧[2)]に準拠して行われる．従来は，道路面を撮影した画像を50 cm×50 cmに切ったメッシュ1つ1つに対して目視で行っていた．我々は，ステレオカメラで撮影した結合済み輝度画像を前述のメッシュに区切り，舗装調査・試験法便覧[2)]に基づいてひび本数のラベル付けを行い，AI技術を用いてひび割れ画像を分類する識別器を構築し，目視判読を機械判読に置き換えて効率化を図った．判別結果の例をFig. 2に示す．図中のメッシュ右上の数値は各々，無表示はひび割れ0本，表示「1」は1本，表示「2」は2本以上を表している．

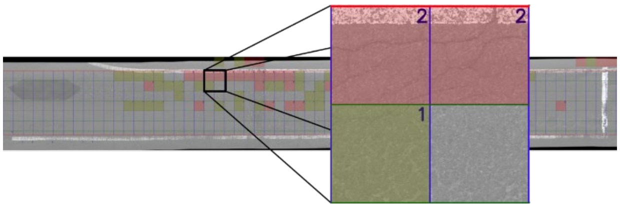

Fig. 2　Road surface image and result of auto crack detection.

有効性検証として，都市部や郊外，多様な路線を含み，総距離10 kmを超える走行撮影データ群を用い，目視判読結果と，機械判読の出力を比較した．その結果をFig. 3に示す．各点の結果は，測定対象路線における基準区間長（例：100 m）ごとのひび割れ率出力結果を示しており，それらにおける目視判読で得た値と機械判読で得た値の相関係数は0.986であった．

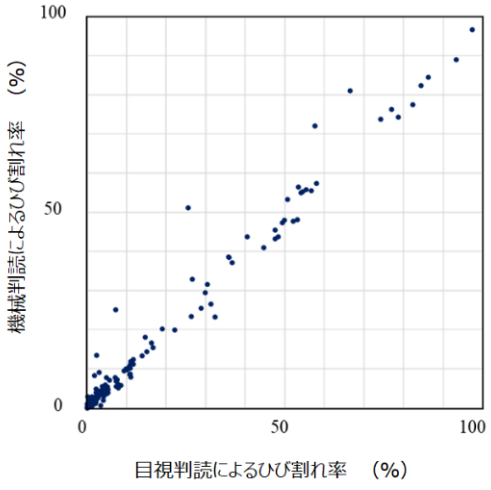

Fig. 3　Result of Crack rate output.

わだち掘れ量は，道路横断方向の路面凹凸を示す指標となっている．わだち掘れ量の測定には，前述した3台のステレオカメラの距離画像を用いる．3台

のステレオカメラは，隣接するステレオカメラの距離画像同士が部分的にオーバラップするように，幅員方向に並置されている．各ステレオカメラの距離画像の撮影後，画像結合処理を行うことにより，幅員4.0 mの結合済み距離画像が形成される．この結合済み距離画像から，横断（幅員）方向断面データを取り，わだち掘れ量測定を行う．

平たん性は，縦断方向の路面凹凸を示す指標となっている．平たん性の測定には，前述した3台のステレオカメラのうち，幅員方向，車両中心から左右1 mの位置を撮影可能なカメラの距離画像を用いる．走行中，当該のステレオカメラで撮影を行う際，隣接フレームの距離画像同士が部分的にオーバラップするタイミングで，各フレームの撮影が行われる．距離100 mを走行した場合には，各フレームの距離画像の撮影後，画像結合処理を行うことにより，距離100 mの「結合済み距離画像」が形成される．この結合済み距離画像から縦断方向断面データを取り，これを用いて平たん性測定を行う．

わだち掘れ量，平たん性の算出は，舗装調査・試験法便覧[2)]に準拠して行われる．わだち掘れ量については断面上側に凸包線を設定し，断面底部との高低差を以って求められる．平たん性については，進行方向に1.5 m隔てた3点の路面高さを$X1$，$X2$，$X3$とし，式(1)によって，$X1$と$X3$の平均値とその中間位置$X2$の差を式(1)の通り計算して路面凹凸量dとし，標準偏差を取ることで算出される．

$$d = \frac{X_1 + X_3}{2} - X_2 \qquad (1)$$

上記の手法により，わだち掘れ量，平たん性を算出した結果の例をFig. 4，Fig. 5に示す．有効性検証のため，参照値として据置型3Dレーザスキャナ（FARO社製　FOCUS350）との測定断面の比較を行った．わだち掘れ量，平たん性測定値における参照値との差異は，わだち掘れ量2.3 mm，平たん性2.4%であり，一般財団法人土木研究センターが実施している「路面性状自動測定装置の性能確認試験」における誤差許容値として提示実績のある，わだち掘れ±3 mm，±30%に収まっている．

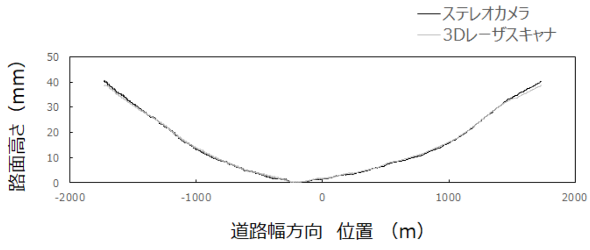

Fig. 4　Measurement result of road rut.

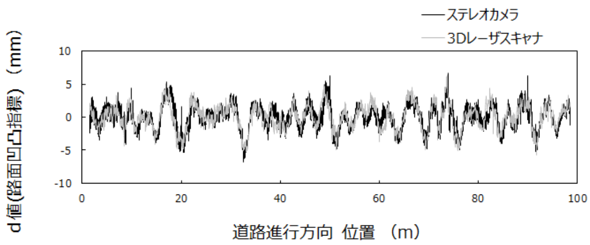

Fig. 5　Measurement result of road unevenness.

2-2　トンネルモニタリングシステム

2-2-1　トンネル点検におけるリコーの取組み

日本国内には約1万本の道路トンネルがあり，2014年に国土交通省から出された道路トンネル定期点検要領[4)]に従い，5年に1度の定期点検が行われている．従来の点検方法では，交通規制をしたうえで，高所作業車を利用し，目視で点検を行うため，手間がかかっていた．これに対して，カメラや照明を搭載した計測専用車両により，従来法を補完・代替する走行型計測方法が適用され始めている[5)]．交通規制をせずに走行撮影を行うことで，現場での作業が低減もしくはなくなり，点検工数を削減できる．また従来まで現場で行われていたトンネル覆工面のひびなどの変状部のスケッチ作業や変状部の撮影作業がなくなり，安全性を向上できかつ点検工数を削減できる．しかしながら，既存の走行型計測車両は，トンネル内という暗所においてひび割れなどの変状を近接目視による点検相当で走行撮影するために，カメラや照明を多数搭載している．一般に，0.3 mm程度のひび割れを撮影できるようにカメラの解像度を上げると，カメラ1台あたりの撮影範囲が狭くな

るため，撮影装置には多数のカメラが搭載されている．また0.3 mm程度のひび割れをブレなく撮影するためには露光時間を短くして撮影する必要があり，露光時間を短くした分の光量を確保するために多数の照明が搭載されている．カメラや照明を多数搭載するために，機器を搭載した車両は大型の専用車両となり，小径のトンネルの撮影が困難なケースや，コストの面での課題があった．

2-2-2　一般車両搭載型の撮影装置

我々の撮影装置は，被写界深度拡大カメラとライン照明の5つのセットを備えたもので，一般車両のルーフキャリア部に搭載し，トンネル壁面を走行しながら撮影可能である．撮影装置を取り付けた車両の外観をFig. 6に示す．

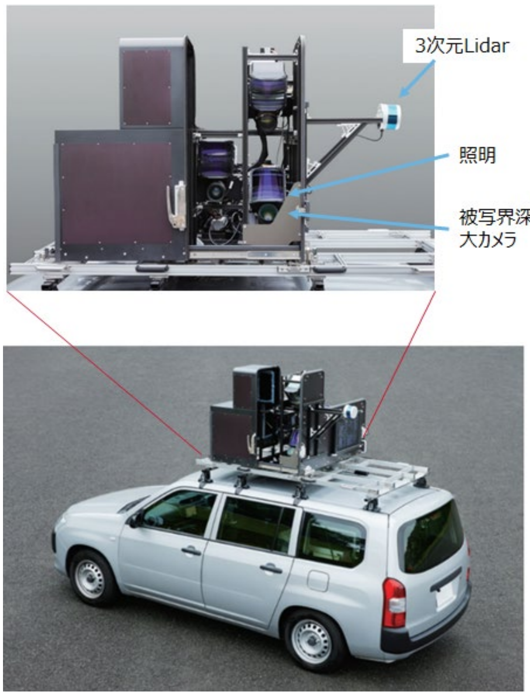

Fig. 6　Exterior of tunnel monitoring system by using line sensor camera with extended depth of field.

ここで被写界深度拡大カメラについて説明する．被写界深度とは，撮影画像の焦点が合っているように見える被写体の距離の範囲を指す．被写界深度拡大カメラは，専用に設計された特殊なレンズと画像処理の組み合わせで，解像度と明るさを犠牲にすることなく被写界深度を拡大するカメラで，レンズとの距離や角度などを調整することなく被写体を明瞭に撮影することができる．リコーの被写界深度拡大カメラは，専用レンズと，センサを有するカメラと画像処理を内蔵したカメラ制御装置から構成される．一般的なカメラでは，絞りを絞ることにより被写界深度を伸ばせるが，画像が暗くなってしまう．被写界深度拡大カメラは，被写界深度拡大ではない従来のカメラに比べ被写界深度が4～5倍になるため，薄暗いトンネル履工面の画像も，解像度と明るさを犠牲にせずに鮮明に撮影することができる．被写界深度拡大カメラの受光素子はラインセンサを用いており，その撮影範囲はライン状となる．このライン状の撮影範囲に合わせて最適な照明がなされるようにライン照明を用いている．ライン照明は，プロジェクタ照明を，ライン状になるようビーム整形を行っている．電源については，これまでの専用車両では大型の発電機で大容量の電力を供給しているものが多いが，我々の装置では消費電力が小さいためトランクに収納可能なサイズのバッテリーで賄えている．これらにより一般車両に搭載可能な撮影装置となっている．また，撮影装置を取り外して他の車両や台車などに取り付けることも可能である．台車などに取り付けられれば，自動車が走行できないような歩行者専用や導水路などの小径のトンネルの撮影も可能となる．

2-2-3　展開画像の自動作成

走行しながら5台のカメラで連続して撮影し，撮影した画像を結合してトンネル覆工面の展開画像を得る．この際，トンネル覆工面の形状に応じた画像処理を行うことで展開画像の精度を高めている．具体的には，被写界深度拡大カメラで撮影した画像データを各カメラ間で結合，および上り・下りの往復間の計10カメラ分の画像データを結合することで作成される．単純に画像結合を実施しても，カメラからのトンネル壁面の距離は等距離ではなく斜めに撮影されているため，正確な画像にはならない．そ

こで，3次元LiDAR (Light Detection And Ranging) を基にトンネルの3次元座標と車両の位置姿勢を算出し，トンネル断面形状に従って画像を変形させている．なお3次元LiDARは，レーザ光を対象に照射し，反射散乱光を検出して距離を算出する技術である．また，出入り口とトンネル内とで明るさが大きく異なるような場合に対応した自動露光補正処理（AE: Auto Exposure）を用いて白飛び・黒つぶれしない画像を生成しているが，その一方でAEの追従時の輝度段差が生じる．さらに，照明と曲面であるトンネルの距離の違いにより均一な明るさにはならない．この2つを解決するために，覆工面全体で均一になるように輝度補正処理を行っている．このように，上り・下りの往復間の計10カメラ分の画像データ結合処理，トンネル形状に従う画像変形処理，輝度補正処理を実施することで，展開画像を生成している．

Fig. 7に展開画像の一部を抜粋した事例を示す．Fig. 8はFig. 7の一部であり，0.3 mmのひび割れや，ボルトの取り付け箇所の撮影画像を示す．近接目視によるトンネル点検では，0.3 mm程度のひび割れや合いマークによるボルトの緩みなどを確認している．本装置でも，Fig. 8に示すように近接目視同等の判読が可能である．

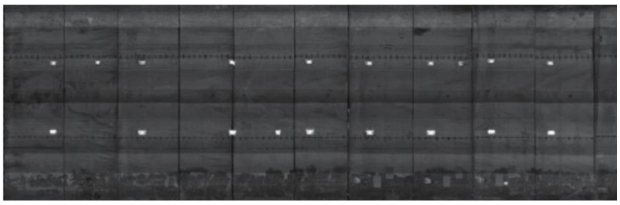

Fig. 7　Compound images from multiple cameras using automatic process.

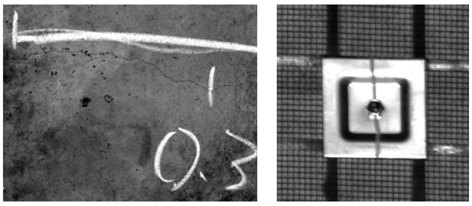

Fig. 8　Expansion images reveal 0.3 mm cracks and bolt counter marks.

展開画像上には，変状情報を登録したり，過去の点検結果を重ねて表示したりすることができる．過去の点検結果と比較することで，2回目以降の点検の工数が大幅に低減可能となる．また従来は現場での手書きスケッチを基にCAD図面に変状を入力していたが，AIの活用により変状などを自動抽出することで，作業の効率化が可能である．Fig. 9は，展開画像上に，AIにより抽出されたひび割れを白線で重ね合わせたものである．以上により，点検現場での作業や調書作成などの業務プロセスの自動化も可能である．これらにより，効率的で安全・安心なトンネル点検の実現を目指す．

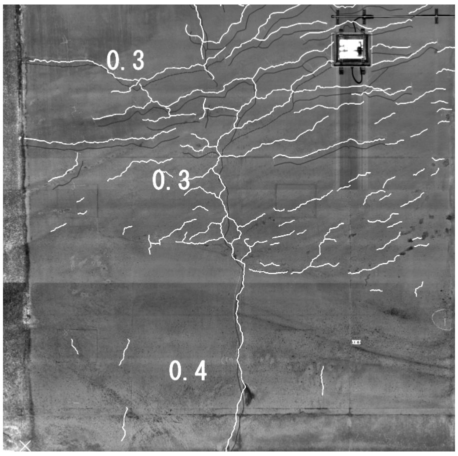

Fig. 9　Results of damage detection using AI.

2-3　のり面モニタリングシステム

2-3-1　のり面点検におけるリコーの取組み

日本の国土は山が多く平地が少ない．このため，全国に道路を通すにあたり膨大な数の道路土工構造物が施設された．その施設延長は全国に存在する約120万kmの道路のうち約100万kmに及び，道路を構成する主要構造物と言える．

道路構造物の1つであるのり面は，道路や宅地造成を目的に地山を切り取り，盛土工事を行うことで人工的に作られた斜面である．地山を切り取った斜面を「切土のり面」，盛土を行った斜面を「盛土のり面」と呼ぶ[6)]．Fig. 10にのり面の概要，Fig. 11に切土のり面の事例を示す．

のり面は道路インフラの中でも地震，台風，梅雨，積雪など自然環境の影響を受けやすく，その品質確保を目的に2017年に道路土工構造物点検要領[7]が国土交通省から出され，全国で点検が行われている．点検要領に従った点検方法は，土木技術者が斜面に登り，近接目視による点検を行うというものである．これは，転落などの危険があるうえ，のり面の数や面積が膨大なため，多くの人手と手間がかかっており，点検の効率化が望まれていた．

この課題に対し，我々は，カメラや3次元LiDARなどから構成された撮影装置を取り付けた一般車両により，近接目視による点検を補完・代替する走行型計測方法を開発した．交通規制をせずに走行撮影を行うことで，従来，現場で行われていたのり面のひびなどの変状部のスケッチ作業や変状部の撮影作業などの現場作業がなくなり，安全にかつ工数を削減して点検できる．前述の道路点検，トンネル点検と同様に，一般車両に搭載可能な撮影装置であるため，山間部などの狭隘路線での撮影も可能である．カメラと3次元LiDARを併用することにより，高精度な距離画像が生成される．

これらにより，点検品質を維持しつつより多くののり面検査を行い，撮影データと解析結果を基に，危険度が高いと判断された部分のみで土木技術者の目視点検を行うなど，効率的かつ効果的なのり面点検の実現を目指している．以下では，走行撮影を実現する撮影装置と，全景画像などの生成方法について説明する．

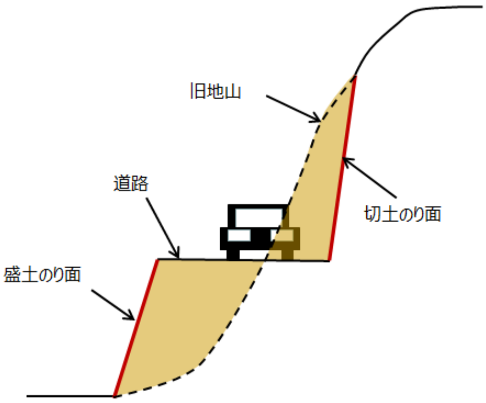

Fig. 10 Types of road slope.

Fig. 11 Example of cut slope.

2-3-2 一般車両搭載型の撮影装置

撮影装置は，3つのカラーラインセンサカメラと3次元LiDARを備えたもので，走行しながらのり面の撮影が可能である．撮影装置を取り付けた車両の外観をFig. 12に示す．

Fig. 12 Exterior of slope monitoring system.

車両の側面方向に，下方，正面上方，上方の3方向を撮影できるようにカラーラインセンサカメラが設置されている．車両が所定の距離を進むごとにカラーラインセンサカメラに外部トリガーをかけて1ラインずつ撮影を行う．これらの撮影方法により，

高さや幅が広いのり面でも一度に高画質な画像を撮影可能である．3次元LiDARで，画像と同時にのり面の3次元形状を記録し，平面画像からだけでは分からない断面の形状も記録が行える．浮きやはらみ出しなど，のり面の崩壊につながる可能性のある予兆をつかむことができる．撮影装置はトンネル撮影装置同様に，一般車両のルーフキャリア部分に搭載可能な撮影装置となっており，撮影装置だけを取り外して輸送することも可能である．

2-3-3　全景画像と点群データの融合

走行しながら3つのカラーラインセンサカメラで撮影し，輝度・形状・色ずれなどに関わる各種画像補正を行った後に，各カメラ間で画像データを結合して，全景画像が自動作成される．全景画像に対してAI処理を行うことにより自動的にひび割れなどの変状を抽出することが可能であり，劣化状況を俯瞰することができる．3次元LiDARからは，車両周囲ののり面の3次元点群データを取得することができる．そして全景画像と3次元点群データとを融合させることで，カラー3次元点群マップと高精度距離画像を生成することができる．カラーラインセンサカメラの各画素のあるタイミングでの撮影方向が3次元点群マップののり面のどの場所であるかを推定することで，各画素に高精度な3次元情報を付加して高精度・高密度カラー3次元点群データを生成できる．このカラー3次元点群データから，カラー3次元点群マップの生成とともに，高精度距離画像を生成することができる．カラー3次元点群マップは，のり面の地形を直感的に把握する目的で利用し，高精度距離画像は画像と3次元形状の両面からのり面の劣化状況を分析するのに役立てられる．

Fig. 13に全景画像の一部を抜粋した事例を示す．全景画像は，延長方向に数十～数百m，高さ方向に数十mあるのり面の現況を一見して把握することを目的とし作成した画像である．全景画像を拡大することでひび割れなどの変状をも確認でき，近接目視による点検と同等以上の精度を有する．前記の通り，全景画像と3次元点群データとを融合させることで，カラー3次元点群マップを生成することができる（Fig. 14）．のり面の所定位置の断面図は，斜面内部からの圧力によるのり面のはらみ出しなど変状の経時変化の発見に役立つ．また従来は現場での手書きスケッチにより変状を書き込んでいたが，AIの活用により変状などを自動抽出することで，作業の効率化が可能である．Fig. 15は，全景画像上に，AIにより抽出されたひび割れを黄色の線で重ね合わせたものである．以上により，点検現場での作業や調書作成などの業務プロセスの自動化も可能である．これらにより，効率的で安全・安心なのり面点検が可能となる．

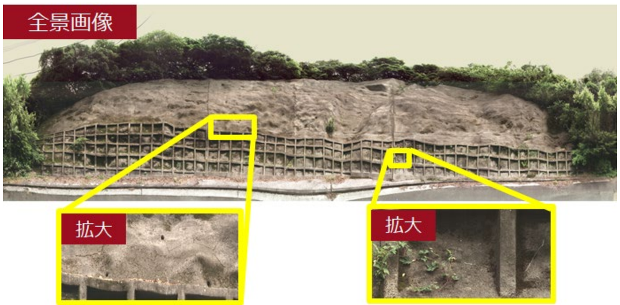

Fig. 13 Compound images from multiple cameras using automatic process.

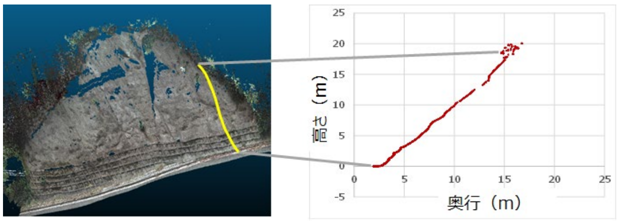

Fig. 14 Section profile analysis results and slope outputs through LiDAR data processing.

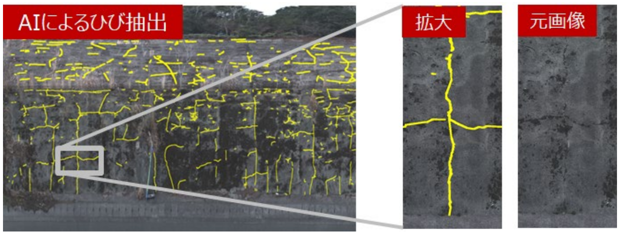

Fig. 15 Results of damage detection using AI.

3. 総合点検

道路，トンネル，のり面の各撮影装置から撮影された画像や3次元LiDARからのデータは，クラウド上にアップロードを行い，処理は全てクラウド上で実施可能である（Fig. 16）．点検の時期が集中するような場合もコンピュータリソースが不足することはなく，高速な並列処理を実施可能である．いずれの画像もウェブ上で閲覧可能である．展開画像上で点検対象を示す点検対象画像を描画するとともに，診断対象の点検結果を含む情報を入力することが可能である．

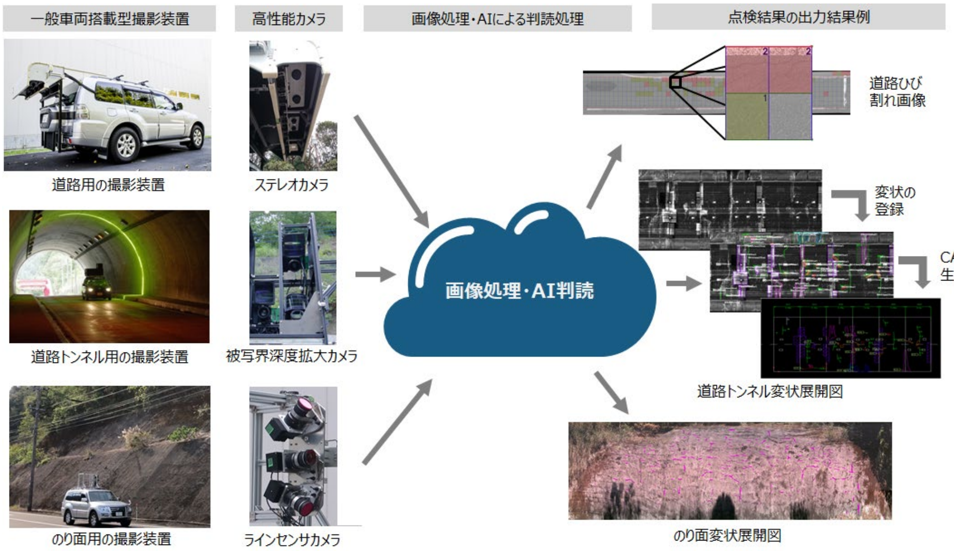

Fig. 16 Totalized inspection using unique camera and AI.

我々は道路，トンネル，のり面の各点検機材や点検結果を併用することで網羅的，かつ相互的な道路インフラ点検を実現できると考えている．

まず網羅性について説明する．これら3種類の撮影装置を用いた撮影により，道路および，それらと接する土工構造物を併せて計測できる．いずれの撮影装置も一般車両に搭載可能なものであるため，山間部や生活道路などの狭隘な区間についても撮影可能である．また撮影装置はいずれも着脱可能な構成であるため，例えば路面点検とのり面点検を1つの車両にまとめ，路面点検とのり面点検を同時に行えれば点検の効率化が図れる．

次に相互性について説明する．道路（舗装面）の変状と附属する構造物であるトンネルの覆工面，のり面，橋梁の舗装面の変状には密接な関係がある．例えば，地山の外形変形によりのり面やトンネルが変形する場合は，隣接する道路にも縦断のひび割れや変形が生じる場合がある．また道路と構造物の接合箇所に変状が出やすいなどの特性もある．道路と附属する構造物であるトンネルの覆工面，のり面，橋梁の舗装面の変状を一括計測することで，変状が一部の構造物で起きているのか，複数の構造物にわたって発生しているのかなど相互性，変状発生の原因がより正確につかめる．したがって効果的な対策の策定も可能となる．

4. まとめ

本稿では，各種のカメラを適用した独自の撮影装置，自動化された画像処理技術とAI技術を適用した，道路，道路トンネル，道路のり面の変状をモニタリングするシステムについて説明した．各撮影装置を併用することで，道路（舗装面）と附属する構造物であるトンネルの覆工面，のり面，橋梁の舗装面の変状を一通り計測することが可能である．各データの画像処理はクラウド上の共通システムで並列処理が行えるようになっている．必要な点検精度の確保と，業務の効率化の両立を実現している．安全・安心の確保，持続可能な地域社会の実現に向けて，さらなる技術革新に取り組んでいく．

参考文献

1) 国土交通省道路局: 舗装点検要領, https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo28_10.pdf (2016.10) (入手2022.10).
2) 日本道路協会: 舗装調査・試験法便覧〔第1分冊〕第II章 調査編, pp. 197-236 (2019.03).
3) 幸田信則, 柏原勇, 須貝仁貴, 高橋 博: 高速路面性状測定車 (Road Tiger), 光アライアンス, pp. 16-21 (2014.01).
4) 国土交通省道路局: 道路トンネル定期点検要領, https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4_2.pdf (2019.03) (入手2022.10).
5) 安田亨, 山本秀樹, 重田佳幸: 走行型高速3Dトンネル点検システムMIMM-R (ミーム・アール), 日本ロボット学会誌, 34巻, 9号, pp. 19-20 (2016).
6) 公益社団法人日本道路協会: 道路土工構造物技術基準・同解説 (2017.03).
7) 国土交通省道路局: 道路土工構造物点検要領, https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/ty_h2908.pdf (2017.08) (入手2022.10).