

48

橋梁・トンネル用打音点検飛行ロボットシステムの研究開発

研究責任者 日本電気(株)西沢俊広

共同研究グループ (株)自律制御システム研究所、(一財)首都高速道路技術センター、(国研)産業技術総合研究所



研究開発の目的・内容

研究開発の目的

高所作業車等を利用した従来の打音検査の課題を解決するため、飛行ロボットを活用した点検システムを実現する。

従来の打音検査の課題

- ① 高所作業車による長時間の車線規制
- ② 高い橋脚等の足場設置が困難
- ③ 災害現場での人による点検が危険



研究開発の内容

- ① 橋梁・トンネルなどの非GPS環境、風などの外乱がある環境での飛行制御技術
- ② コンクリート構造物の打音による変状の状況検知技術
- ③ ロボットによる点検の安全確保と、従来の人手の点検からロボット導入による生産性の向上

飛行ロボットにより解決

- ① 車線規制時間の大大幅短縮
- ② 死角など点検困難箇所の点検
- ③ 危険な場所での人の作業が不要



現状の成果②

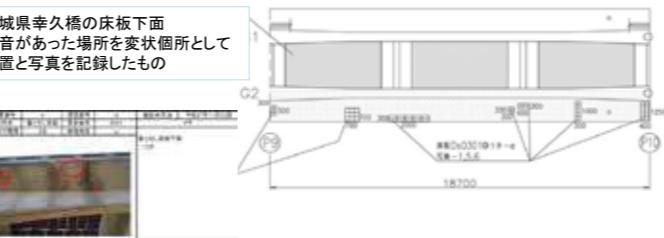
ポール打検機／状況検知技術

研究成果:

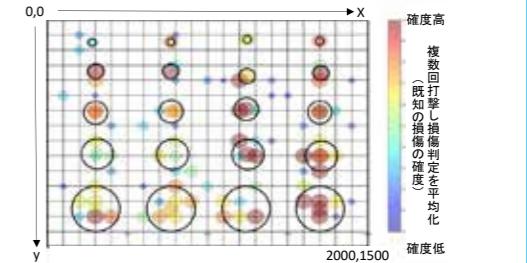
- ・6m以下の高さで安価な打音点検支援を実現するため、打音点検飛行ロボットと共にセンサヘッドを用いたポール打検機を試作。
- ・国土交通省の現場検証において実用性を評価。従来の点検と同等の時間での作業性を確認。足場の構築時間、費用を縮減。
- ・機械学習を用いた打音の清音・濁音の識別機試作。
- ・飛行ロボットのノイズを低減する音響処理フィルタの開発、点検員の評価により聞きやすさの向上を確認。



ポール打検機による点検結果に基づく調査の例



試験体を用いた清音・濁音の判別結果



現状の成果①

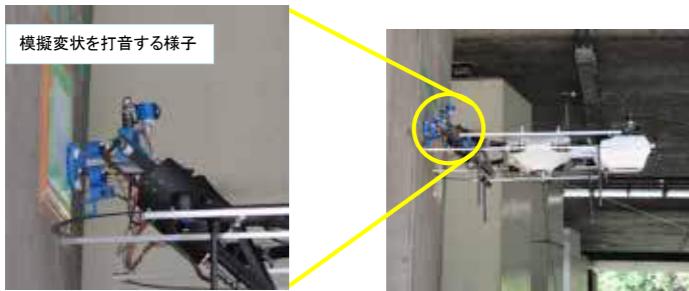
打音点検飛行ロボット／飛行制御技術

研究成果:

- ・打音点検飛行ロボットを試作し、国土交通省主催の現場検証にて要素技術の部分的な機能を確認。
- ・非GPS環境での飛行を目標としたトータルステーションとLRF※による位置姿勢情報による自律制御飛行を実現。
- ・搭載した打検機を壁面に押し当て、点検員が清音・濁音の判断がつく品質の打音の発生を実現。
- ・JAXA風洞での飛行性能の評価により、風速8m/sの整流での飛行安定性の確認。
- ・逸脱防止用ネットによる飛行試験現場の安全性確保。

※LRF: レーザ レンジ ファインダー

打検機を押し当てる飛行制御



試作した打音点検飛行ロボット



JAXA風洞での飛行性能評価



試作した逸脱防止用ネット展開システム



最終目標

開発の最終目標:

- <共通>
 - ・橋梁・トンネルの打音点検の支援
 - ・清音／濁音の識別支援
- <打音点検飛行ロボット>
 - ・連続運用2時間(有線給電)
 - ・高度 30m・平均風速8m/sで運用
- <ポール型打検機>
 - ・足場なしで高さ6m以下の打音点検

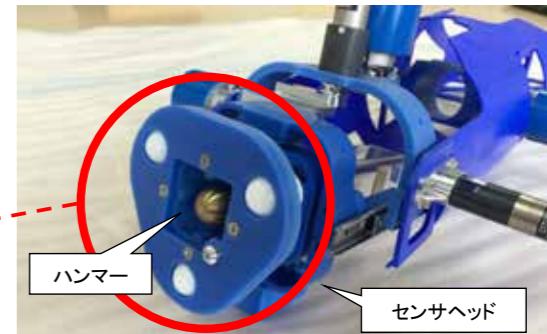
社会実装イメージ:

- ・従来の足場建設、または高所作業車や橋梁点検車が必要な高所の打音点検に本装置を活用
- ・従来の機械足場や点検装置と同じようにレンタルにより点検業者に提供
- ・点検データの管理、情報共有についてクラウド型で情報サービスを提供
- ・岐阜大学SIP実装プロジェクトなどの現場検証に参加し、評価を反映した改良を経て、高速道路、国、地方自治体が管理する道路に展開
さらに鉄道、ビル等の道路以外の点検に応用

改良中の打音点検飛行ロボットシステム



開発中の機体、昨年度より40%小型化
今後評価を実施し、現場での実証実験を計画



センサヘッド

9

高速走行型非接触レーダーによるトンネル覆工の内部欠陥点検技術と統合型診断システムの開発



研究責任者 パシフィックコンサルタンツ(株) 安田亨

共同研究グループ (株)ウォールナット、iシステムリサーチ(株)、(株)三英技研、(株)フォーラムエイト

研究開発の目的・内容

研究開発の目的

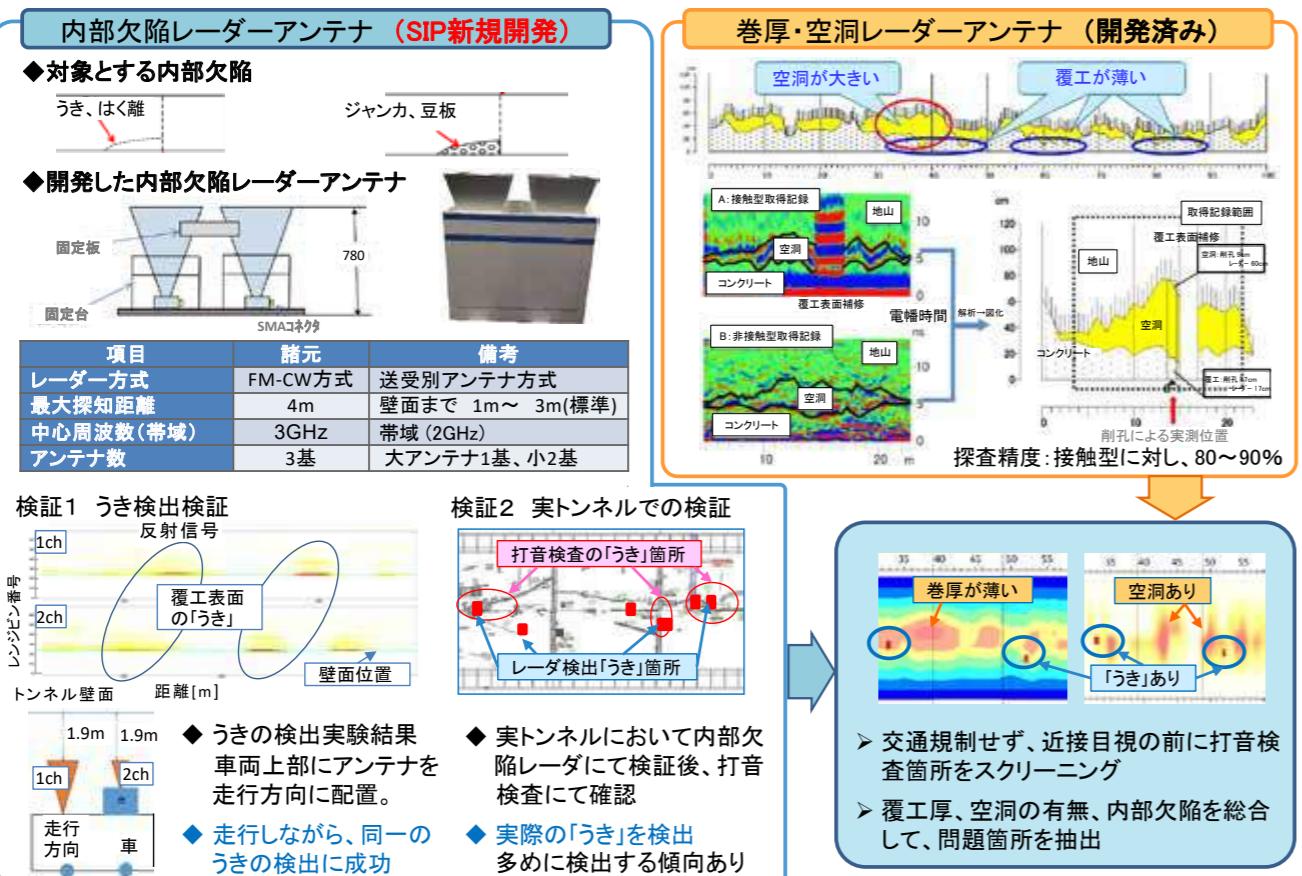
- ① 打音検査の代替技術、補完技術として、覆工コンクリートの内部欠陥を、高速走行型非接触レーダーにより検出する点検技術を開発し、交通規制を要しないトンネル維持点検業務を実現する。
- ② 変状情報をレーザー計測の3次元位置情報と同期し、高精度な変状図を3次元可視化技術によってデータベース化するとともに、健全性を総合的に評価できる統合型診断システムを開発する。

研究開発の内容



現状の成果①

レーダーの開発



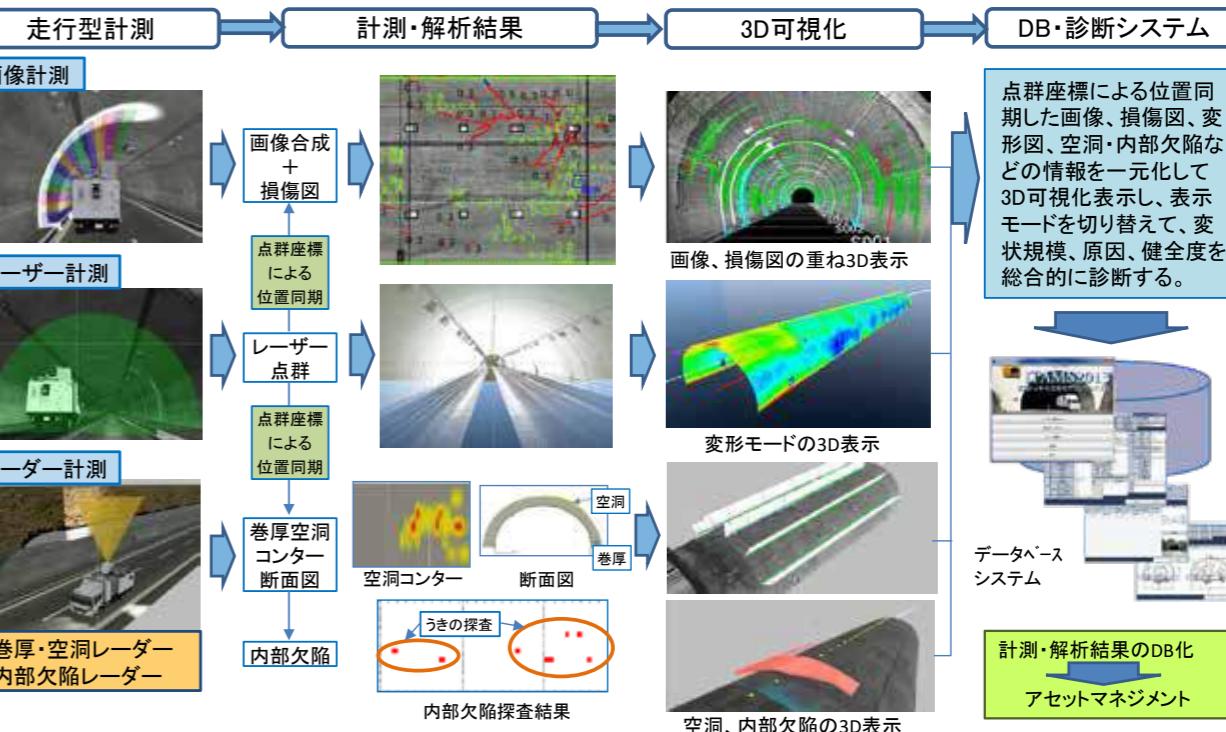
現状の成果②

3D可視化技術

3次元可視化技術(統合型評価診断システム)の開発【全体構成】

SIPにおける研究開発内容

- ◆ 点群解析機能: トンネル点群から自動的に目地位置検出を行い、スパンごとに断面形状やスパン軸を高精度に抽出する機能
- ◆ レーザー計測結果可視化機能: 内部欠陥、巻厚・空洞厚の計測・解析結果を位置同期し、3D表示、センター、縦・横断図表示する機能
- ◆ 下図の構成で、3D可視化、DB構築を行う。画像・レーザー・レーダーを組合せた健全度診断は日本で初めての試み。



最終目標

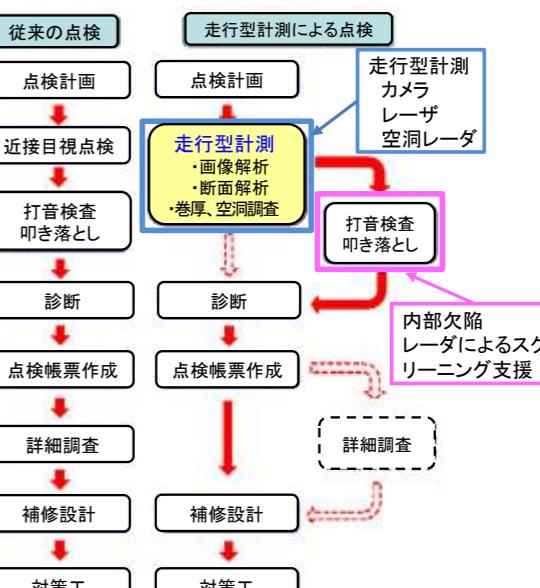
達成目標と達成度

実施項目	達成目標	達成度
内部欠陥 点検診断 技術	アンテナシステム構築 ・検出精度: 80%以上 ・縦断5cm、横断方向1m ・探査深度: 20cm程度	・アンテナシステム完成 ・目標とする内部欠陥の信号受信に成功 ・探査深度20cm以上
点検診断 結果の可 視化技術	・位置同期、目地位置同期、進行性評価ソフト ・3D可視化VRソフト	・位置同期、目地検出完了 ・変状進行性ソフト完成 ・3D表示機能: 完了 ・DBソフト iTAMS完了

本技術の社会実装イメージ

出口戦略	対象	スケジュール、見通し
① 開発レーダー、診断システム点検業務へ活用	自社業務 他事業者への貸与	SIP終了後、速やかに実施。H29年度より5年間で自社シェア20%程度までアップを目指す。
② 近接目視、打音検査の補完、支援技術として活用	国交省 他	次世代社会インフラ用ロボット試行と連動。点検要領の改訂まで視野に入れ普及、標準化
③ 技術指導、現場へのコンサルテーション	自治体	岐阜大などの社会実装プログラムとの連携 統合型診断システムの普及
④ 国内外へのレーダー・ソフト販売	コンサル 点検会社	レーダーは年5台程度の販売 ソフトは年10本程度の販売
⑤ レーダー販売、計測業務、技術支援等の海外展開	ASEAN	走行型計測車両を活用した海外ビジネスモデル、車両のカスタマイズ、診断ソフトを活用

トンネル定期点検の支援



カメラ、レーザー、レーダーおよび、近接目視打音検査を総合的に融合させ、適切な判定を実施し、トンネル点検・診断全般の効率化、省力化を支援し、低コスト化を目指す。

11 学習型打音解析技術の研究開発



研究責任者 (国研)産業技術総合研究所 人工知能研究センター 研究チーム長 村川正宏
共同研究グループ 首都高技術(株)、東日本高速道路(株)東北支社、(株)ネクスコ・エンジニアリング東北、(株)テクニー

研究開発の目的・内容

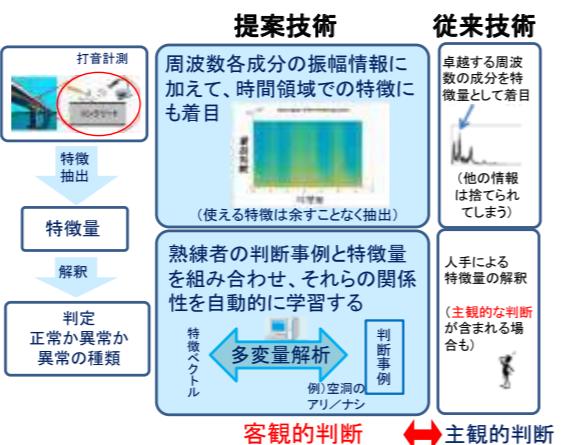
研究開発の目的

- 1次点検手段としての打音装置の高度化
—簡便かつ確実
—高精度(熟練者でも難しい領域での損傷検知)
—報告書作成も含めたトータルな作業工数の削減
- 打音検査結果の**量化**と蓄積、その**可視化**を実現

研究開発の内容

- 打音のデジタル化とその収集、分析による異常検知
- 分析には機械学習に基づく音響解析技術を用い、打音の違いを自動判別し、構造物の損傷箇所を検出
- 通常の点検ハンマと組み合わせて使える装置を開発し、提案手法の有効性を実構造物において検証

機械学習に基づく打音解析



現状の成果②

点検困難箇所用打音装置の開発



- 橋台・橋脚等で手が届かない範囲の打撃用
- コンクリートの剥離だけでなく内部の欠陥も検知
- 足場設置の作業工数削減

- 打撃部にソレノイドを使用
- 打撃対象面に打撃部がうまくフィットするような機構を導入
- 開発中の打撃軌跡の自動取得システムと合わせて利用

供試体や地方自治体の実橋にて評価実験中

台車型打音装置の開発



現状の人手による打音検査

- 舗装開削前の床版損傷状況の把握(非破壊調査)
- アスファルト舗装面上から土砂化・ひび割れを検知
- 打音調査の「作業工数」及び「開削調査費用」の削減



供試体や東北自動車道等の実橋にて評価実験中



取替直前の床版で異常検出箇所等をコア抜きにより検証
既設床版内の水平クラック
増厚部と既設床版の界面破断

最終目標

他社の打音装置

SaaS

解析エンジン開発

●産総研ベンチャー(予)

機械装置開発

●株テクニー

クラウドシステム構築

●システム開発会社

技術提供を基点としたビジネスモデル

SIP地域拠点機関

社会実装支援

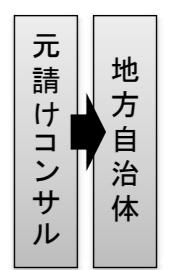
点検・検査・診断

●点検会社
●建設会社等

技術サポート

首都高技術(株)

利用者支援を基点としたビジネスモデル



現状の成果①

二段階学習による判定

二段階で行うメリット

- 教師ラベル付のデータが十分に集まらない段階でも異常の有無が一段目で判定可能
- 様々な構造物の打音の違いにも対応**
- 汎用的な枠組みで、任意の打音装置に適用可能

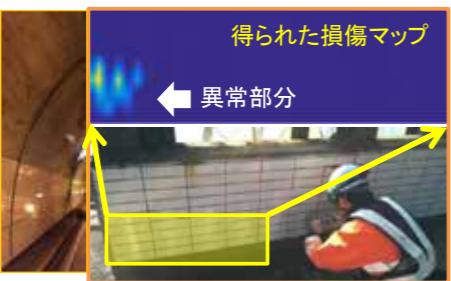
一段目: 教師なし学習手法

- 検査対象ごとに、その場の「正常」を学習
- 学習した「正常」からの逸脱として異常を定義
- 異常の大小を各打撃点ごとに算出

二段目: 教師あり学習手法

- 一段目の判定結果に教師ラベルをつけて蓄積
- 蓄積した結果をもとに判別学習
- 異常の有無の高精度化

トンネル内タイル打音検査での有効性検証実験



打診棒を用いた打音検査装置

騒音の大きいトンネル内においてさえタイルに浮きのある領域を確実に発見できた。

極めてノイズに強い解析手法であることを確認

① 継続的に技術の改良が行われる開発体制を構築

② 開発した機器+(SIP地域拠点のご支援/技術コンサル)で展開

③ 解析エンジンについてはSaaS(Software as a service)として提供

・集中的なシステムの管理運営

・サービスの安定供給とバージョンアップを継続化

橋梁点検ロボットカメラ等機器を用いたモニタリングシステムの創生



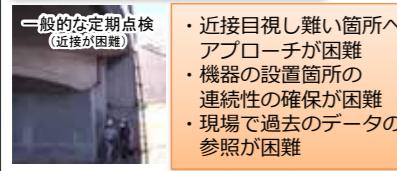
研究責任者 三井住友建設(株) 土木リニューアル推進室長 藤原保久
共同研究グループ (株)日立産業制御ソリューションズ

研究開発の目的・内容

研究開発の目的

コンクリート橋の支承部・桁端部等、人が容易に近づけず近接目視が困難な部位を対象に、損傷状況の経年変化データを取得する定期監視型モニタリングシステムを開発

従来の定期監視型モニタリング



- 一般的な定期点検（近接が困難）
- 近接目視し難い箇所へアプローチが困難
- 機器の設置箇所の連続性の確保が困難
- 現場で過去のデータの参照が困難

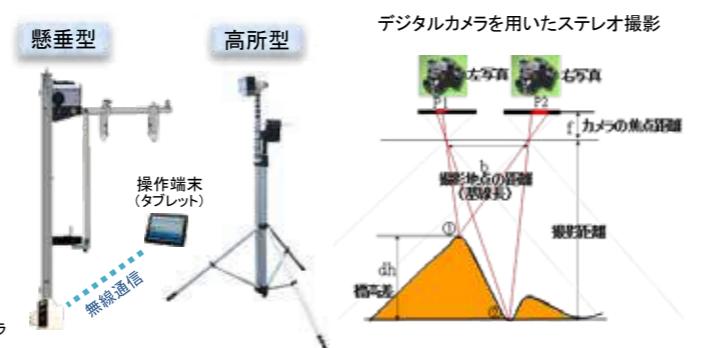
ロボットカメラ等機器を用いた定期監視型モニタリング

- 近接目視が困難な部位に適用可能
- GPS機器と連動により、前回と同じ位置に設置可能
- Webシステムとの連携により、現場でデータの出し入れが可能



研究開発の内容(平成26~30年度)

- 使用する機器は、橋梁点検ロボットカメラ※、デジタルカメラ、レーザースキャナ
- 機器相互では、位置情報連動の補完機能や雲台付きポールユニットの活用を開発
- 実橋にて技術検証を実施
⇒ それぞれの機器の長所を活かしたモニタリングシステムの構築を実現



※橋梁点検ロボットカメラ:レーザー距離計や照明を搭載し、暗所でも撮れる高感度高機能カメラ

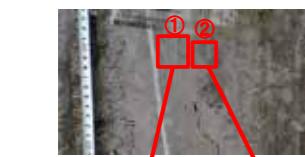
現状の成果①

1. 解像度の向上

画面表示をHD(ハイビジョン)画像からFHD(フルハイビジョン)画像に拡張した試作機を開発し、解像度の向上を検討。

HDカメラ:画素数 1280x720 約90万画素

FHDカメラ:画素数 1920x1080 約200万画素



拡大画像(画像比較)

	①	②
FHDカメラ		
HDカメラ		

- ひびわれ視認性の向上を実現
- 損傷の抽出性能の向上を実現

2. 位置情報の保持

GPS機器と点検ロボットカメラを接続し、データ連動機能を搭載。

画像データに撮影位置を特定する情報(GPS情報[カメラ雲台座標]、パン・チルト角度、倍率)を追加。

⇒ 撮影時期が異なっても、同じ位置で撮影可能

(1) 色調規格パレットを用いた方式
対象表面に貼付けた規格パレットを写し込み、画像の色調補正を行なう技術の有効性を確認。

3. 画像の色調補正

同一箇所を撮影した画像において、撮影日時が異なれば天候や明るさの影響を受け、損傷の経年劣化状況が正しく判断できないことがある。

⇒ 環境条件の差異を排除するため、以下の色調補正技術を検討

(1) 色調規格パレットを用いた方式
対象表面に貼付けた規格パレットを写し込み、画像の色調補正を行なう技術の有効性を確認。

(2) レーザーポイント光を用いた方式
現場で規格パレットが貼れない場合に対応するため、レーザーポイント光を用いた画像の色調補正を検討。

- GPS機器と点検ロボットカメラの運動の実現
- 操作端末上で位置情報を確認でき、同一箇所でのデータ取得が実現
- 近接困難箇所における色調補正の実現

現状の成果②

(平成26~30年度に実施)

4. ステレオ撮影における基準距離取得

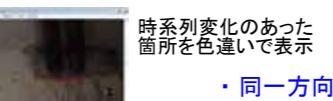
デジタルカメラを2台用いたステレオ撮影では、対象物の3次元形状が認識可能。ただし、解析する際、対象表面の基準となる目印相互の間隔(距離)データが必要。そこで、橋梁点検ロボットカメラのL型スケール表示について、斜め面に応じた表示を新たに開発。
⇒ 非接触計測の精度を向上



- 斜め面に適用可能なL型スケールの実現
- デジタルカメラが対象面に正対していない場合におけるステレオ撮影の精度向上を実現

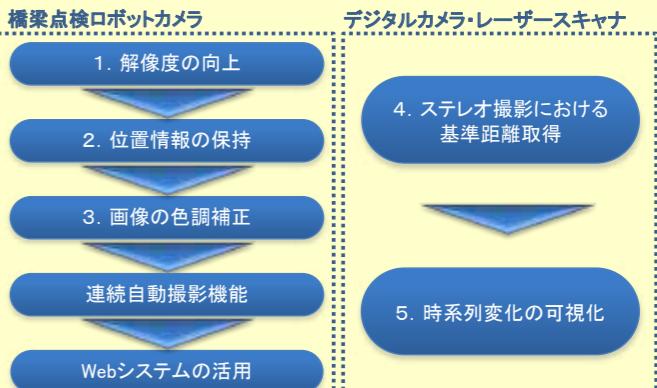
5. 時系列変化の可視化

時期が異なって同一箇所を撮影した画像について、画像より特徴点を複数抽出し、座標変換して同一方向の画像に変換。
⇒ 画像の重ね合わせが可能。重ね合わせた画像より、変化が生じた箇所を色違いで表示する機能を検証。



- 同一方向に変換した画像の利用
- 経時に伴う損傷変化箇所の可視化を実現

成果の活用フロー



使用性に優れ、データ抽出精度の高い定期監視型モニタリングシステムを実現

最終目標

最終数値目標

- 橋梁点検ロボットカメラの解像度向上150%を実現
- 斜め面に対するL型スケール表示の誤差10%以下を実現

対象ユーザー

橋梁管理者、建設コンサルタントなど

販売、利益創出等の流れ

橋梁点検ロボットカメラは、日立産業制御ソリューションズまたはSMCシビルテクノスより市販しており、点検用に流通している。また、販売のみでなく、レンタルも対応。

使用方法・使用場所等

コンクリート橋の定期監視型モニタリングシステムに適用



ロボットカメラ(高所型)を用いた桁端部のモニタリング状況

GPS機器、デジタルカメラ、レーザースキャナは、市販品をユーザーが購入またはレンタル。

蓄積ウェブシステムのクラウドサービスは、日立産業制御ソリューションズ、または、サービス会社が提供。

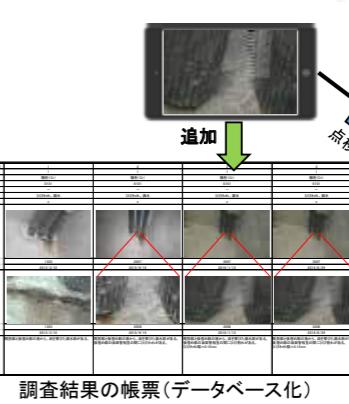
提供サービスの概要

- モニタリングに使用するデバイスとして、橋梁点検ロボットカメラ、デジタルカメラ、レーザースキャナを提供

⇒ 桁端部・支承部のモニタリングに適した使用方法が選択可能

- 経年毎の損傷データが格納できるデータベースから成るWebシステムを構築

⇒ 現場からシステムにログインし、参照・編集が可能



【Webシステム】モニタリング調査データ

損傷の兆候や変化の発見に役立つモニタリングが可能

→ 使用性に優れ、データ抽出精度の高い定期監視型モニタリングシステムを実現

51

近接目視・打音検査等を用いた飛行ロボットによる点検システムの研究開発

研究責任者 新日本非破壊検査(株)メカトロニクス部 部長 和田秀樹

共同研究グループ 名古屋大学大学院、九州工業大学大学院、福岡県工業技術センター、北九州工業高等専門学校



研究開発の目的・内容

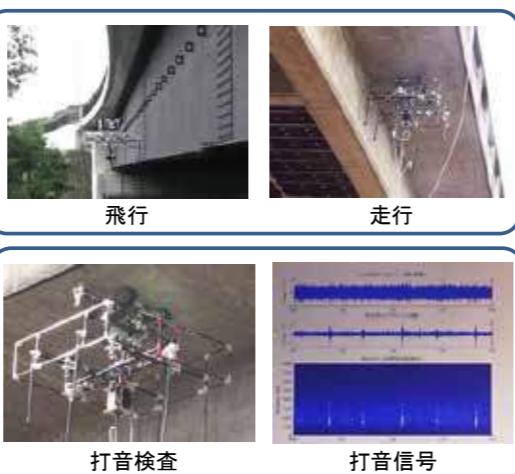
背景

- インフラ点検には多くの課題
 - 特殊車両・足場使用のコスト
 - 安全対策
 - 点検者技能に依存
 - 技術者の不足



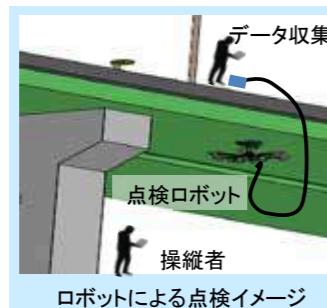
研究開発の内容

- ドローンと駆動車輪を合わせた移動機構
- 近接目視・打音検査を実施する点検機構
- 画像・音響解析による変状検出システム



研究開発の目的

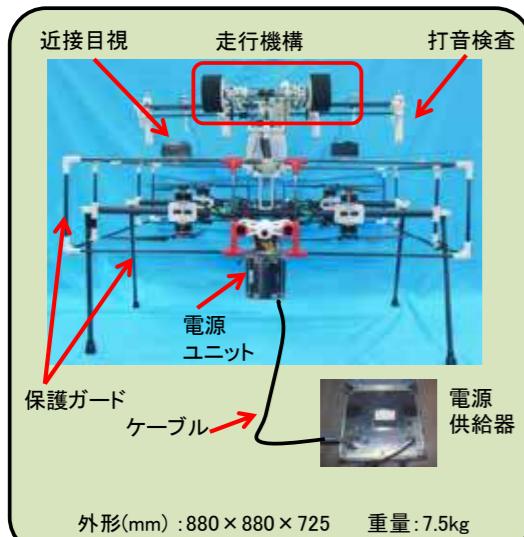
- ドローン技術の活用とデータ解析で点検作業の効率化・低コスト化を支援
 - 特殊車両・足場費の削減
 - 道路規制の低減
 - 従来点検データの活用
 - 変状の自動検出
 - 点検調書の支援



現状の成果①

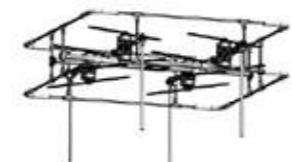
点検ロボット

ドローンの上部に駆動車輪と点検機構を搭載した点検ロボットを開発
車輪を押し当て走行状態で連続点検



飛行機構

点検部への接近は小型が有利
⇒ 小型で高出力



走行機構

点検面の傾斜に対応
⇒ 車輪揺動



フィールド試験



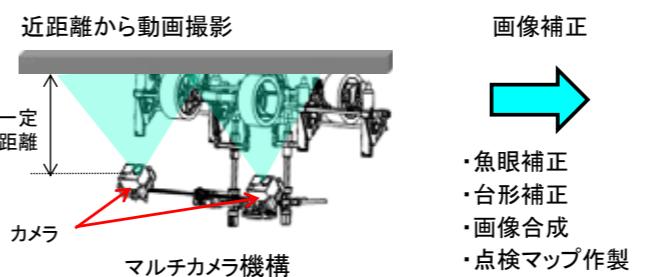
現状の成果②

自動検出システム

ドローンに搭載したカメラ・打撃機構によりひびわれ、空洞等の検出を可能とした。

- 自動記録による見落とし防止
- データの可視化

近接目視



近距離から動画撮影

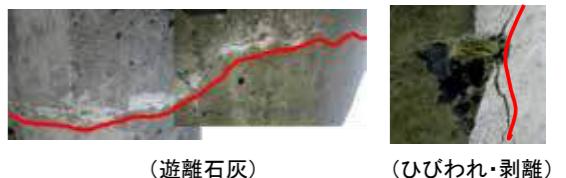
- 一定距離
- カメラ
- マルチカメラ機構

画像補正

- 魚眼補正
- 台形補正
- 画像合成
- 点検マップ作製

画像解析

- ひびわれ自動検出(幅0.2mm程度)
- ひびわれ測定(われ幅、長さ、位置)

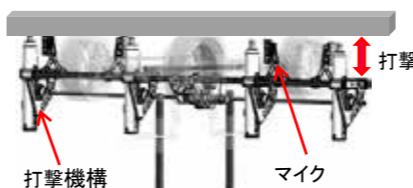


(遊離石灰)

(ひびわれ・剥離)

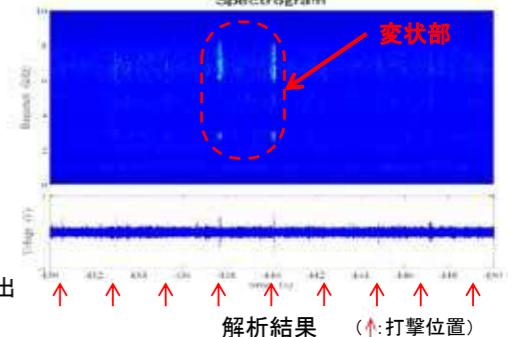
打音検査

内部変状の検出



打音解析

- 打撃機構
- マイク
- 4連ピストン式打撃機構
- 一定間隔で連続的な打撃
- マイクによる収音



- プロペラノイズ除去
- 周波数スペクトル変動の抽出(深さ60mm空洞検出が可能)
- 打撃位置

最終目標

最終目標

機能	目標値
ロボット	飛行範囲: 半径30m ケーブル長: 40m
近接目視	検出ひびわれ: 0.1mm 位置計測: ±10cm
打音検査	空洞検出: 深さ60mm RCひびわれ: かぶり深さ30mm
厚さ測定(鋼橋)	超音波厚さ測定 精度: ±0.2mm
点検作業	オペレータ: 3名 / ロボット 作業可能風速: 6m/秒(平均) 点検速度: 250m ² /時間

社会実装のイメージ

- 点検サービス
- 販売
- レンタル

点検サービス

○コンクリート橋(RC構造、PC構造)

近接目視(ひびわれ、剥離、鉄筋露出)
対象: 床版、桁、橋脚、支承、その他
打音検査(浮き、内部われ²)
対象: 床版、桁、橋脚、その他

○鋼橋

近接目視(腐食、亀裂、変形)
対象: 床版、主桁、横桁、支承、その他
超音波検査(厚さ測定、われ)
対象: 主桁、横桁、その他

○トンネル(調査・部分点検)

近接目視(ひびわれ、剥離、漏水、腐食)
対象: 覆工、機器取り付け部、その他
打音検査(浮き、空洞、内部われ²)
対象: 覆工、ボックスカルバート、その他

(*2: 鉄筋腐食による内部ひびわれ)

販売・レンタル

- 点検システム
- ユニット(点検ロボット、打音機構など)
- 検出ソフト(画像処理・打音処理)
- オペレーター¹、点検技術者¹
- オペレーター・メンテナンス教育

(*1: レンタルのみ)