

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# ドローンを活用して 鉄道構造物を調査する

鉄道構造物の老朽化や少子高齢化による検査技術者不足を背景として、構造物検査の効率化・省人化が望まれています。そこで、ドローンを活用して、コストのかかる足場架設などを行わずに鉄道構造物を検査する技術を開発しました。すでに広く適用が検討されているドローン空撮による変状撮影の次のステップとして、打音検査やコンクリート構造物内の鉄筋探査などの詳細な検査を行える付着走行ドローンと、AIなどを用いてドローンによる測定データを評価する手法を提案し、実橋で検証実験を行いましたので結果を紹介します。



上半 文昭  
Fumiaki Uehan  
鉄道力学研究部長

## はじめに

インフラ老朽化、ならびに少子高齢化による検査・維持管理技術者確保の困難化を背景として、鉄道構造物の検査の効率化・省人化が喫緊の課題となっています。

ドローンを使えば、足場の架設などにコストを要してきた高所などの接近困難箇所に容易に接近できるようになります。目視検査の代替としてのドローン空撮分野は、ドローンメーカーや画像撮影・処理関連メーカーがおのずと発展させていくものと想定し、その次のステップとして、筆者は単純な空撮のレベルを超えた詳細な検査へのドローンの適用に挑戦しています。

鉄道構造物の検査でドローンを用いる場合、線路への侵入や設備・車両との衝突を防がなければなりません。ドローン開発の分野では、機体の飛行安定性・自立性を向上するとともに、距離計でドローンと周囲の構造物との距離を測定しながら飛行させる技術、ドローンの周りをかご状の材料で覆うことで構造物と接触してもドローンの損傷・墜落を防止する技術、SLAM(参照)とよばれる周辺地図を作成しな

がら飛行する技術を用いて、衝突事故を回避する研究開発が行われています。

一方、筆者は、桁下部の調査に特化することで橋りょう上部への侵入リスクを低減できる付着走行型の構造物検査ドローンを開発し、コンクリート橋の変状の近接撮影、打音検査、内部鉄筋の探査に応用しています。測定結果の評価には、近年の発展が著しいAI技術も活用します。

## 付着走行型の構造物検査ドローン

2015年から構造物検査ドローンの開発に着手しました。図1(a)は機体上部に電動の移動装置を搭載した「付着走行検査ドローン」です。鉄道橋の桁下面の検査を目的としており、操縦支援用の無線カメラ、変状撮影用カメラ、鉄筋探査機などが搭載されています。桁の下面に付着して電動のクロー

### SLAM (Simultaneous Localization And Mapping)

移動体が移動しながら周囲を測域センサーやカメラでセンシングして、周辺の環境地図を作成するとともに自己位置を推定する技術。ロボット掃除機の移動制御などに用いられています。

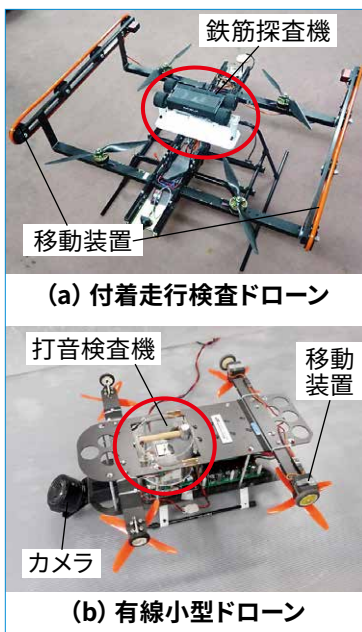


図1 付着走行型の構造物検査ドローン

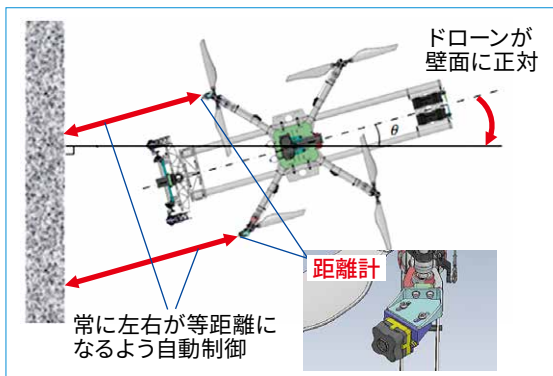


図3 側面検査のための機体制御手法  
(機体を上方から見た図)

ラーで走行移動するので、構造物上の任意位置に高い位置精度で接近し、画像撮影などを行えます。図1(b)は、付着走行ドローンを小型化(縦400mm×横840mm×高さ200mm)して打音検査も可能にした有線式の小型ドローンです。今のところドローンが長時間飛行するには重いバッテリーの搭載が不可欠で、加えて検査機器類も搭載すると、パワーのある大きなド

#### メカナムホイール

任意の方向に移動できるように設計された特殊な車輪で、車輪円周上に45度の角度で樽状のローラーが取り付けられています。モーターの駆動力の伝達により、従来の車輪と同じ動きをすることに加え、4輪それぞれのモーターの回転方向と速度を調整することで全方向に移動できます。

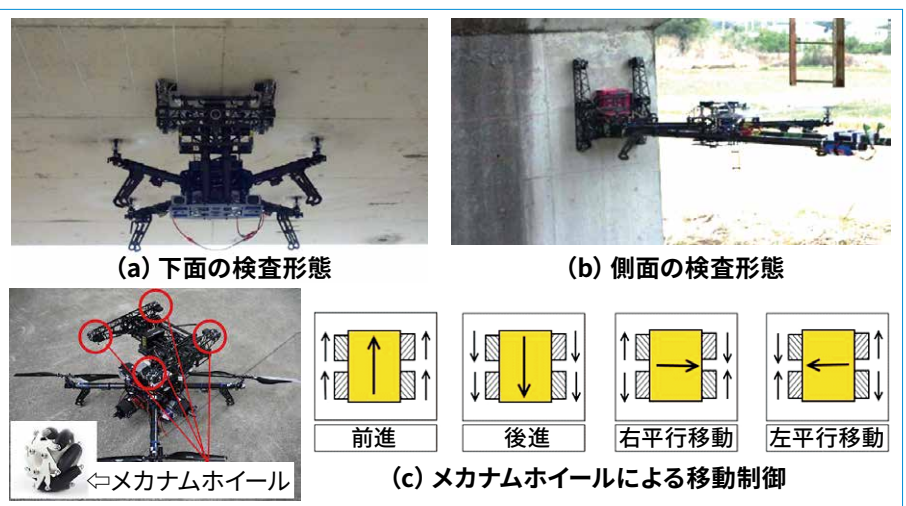


図2 下面・側面検査に対応する検査ドローン

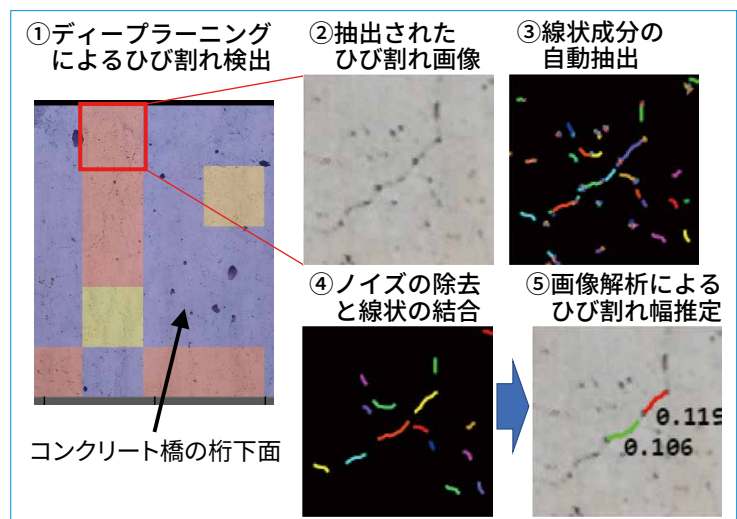


図4 AIによるひび割れ検出と幅の推定

ローンの採用が不可欠です。この装置は、地上から有線で給電してドローン機体へのバッテリー搭載を省略することで、比較的小さな機体で打音測定を連続して実施できるようにしました。

#### 側面の検査への適用

鉄道橋の脚部や高欄・防音壁などの側面の検査への、付着走行検査ドローンの適用拡大をめざして、図2(a)、図2(b)に示す鉛直面も検査できる構造物検査ドローンを開発しました。このドローンは、下面、鉛直面の両方に適用可能で、カメラ、鉄筋探査機、打音検査機などを搭載できます。付着走行にメカナムホイール(参照)を採用することで、ドローン機体の方向を転換せずに検査対象面上を多方向に移

動可能にしました(図2(c))。

ドローンで側面の検査を行うためには、ドローンの機体を測定対象の面に正確に垂直に向けて前進させることで検査機器を押し付けるという難しい操縦技術が必要でしたが、本装置では、機体の左右2箇所に取り付けた距離計で測定対象面との距離を測定することでドローン機体を自動的に測定対象面に正対させる機体制御技術(図3)を考案し、操縦を簡単にしています。

#### ひび割れのAI検出と幅測定

AIを用いて、検査ドローンによるコンクリート面の近接撮影画像からコンクリート面のひび割れを検出・評価することもできます。図4でAIと画像解析を用いて、ひび割れの検出とそ

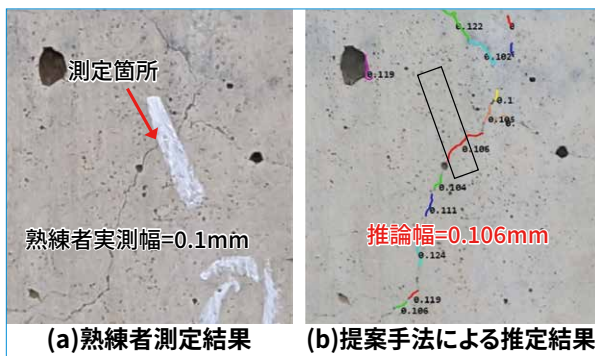


図5 ひび割れ幅の推定結果

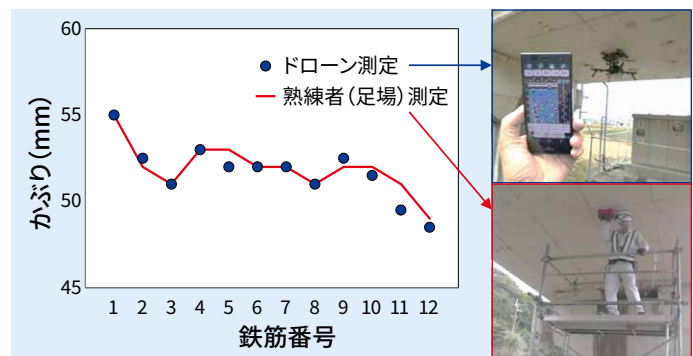


図6 コンクリートのかぶり測定結果

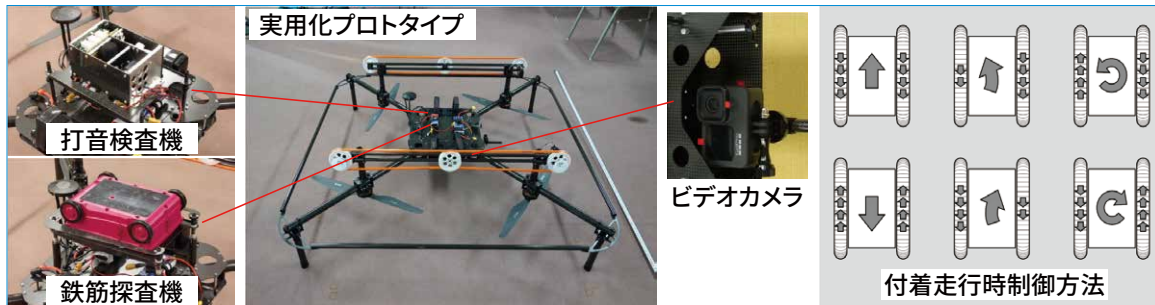


図7 検査ドローンの実用化プロトタイプ

の幅の推定を行う手法を説明します。まず、ディープラーニング(☞参照)を用いて、撮影画像の中からひび割れが含まれた部分を検出し、次に、その部分画像中の線状の模様を検出・結合するとともにノイズを除去して、ひび割れを抽出します。検査ドローンは面に付着してつねに面と一定距離を保って走行するため、撮影用のビデオカメラとコンクリート面との離隔もつねに一定に保つことができるので、抽出されたひび割れ幅の画素数から実際のひび割れ幅を推定し、補修が必要なひび割れ(0.2mm以上など)かどうかを評価することができます。

実橋でひび割れ検出・幅測定の検証試験を実施したところ、図5に示すように熟練技術者による測定結果と十分に一致する結果が得られました。

### コンクリートのかぶり測定

コンクリート橋の内部の鉄筋を覆うコンクリートの厚さ(かぶり)が不足すると、コンクリート片の剥落や鉄筋腐食を引き起こす危険があります。かぶりの調査は、既設コンクリート橋の変状危

険個所の抽出に役立ちますが、道路や河川上の橋りょうの下面や背の高い高架橋の床版裏の調査には足場架設などが必要で、簡単な作業ではありません。一方、レーダーを用いた鉄筋探査機を搭載できる検査ドローンは、足場なしで高所のかぶりを測定できます。図6に実橋におけるかぶりの測定状況と結果を示します。ドローン計測で得られたかぶりは、熟練技術者が足場を用いて測定した結果と十分に一致しました。

### 打音の測定とAI分析

2020年に開発した検査ドローンの実用化プロトタイプ機の紹介を兼ねて、検査ドローンによる打音検査技術を説明します。

図7に実用化プロトタイプ機を示します。比較的、簡単・軽量な機体構造で、近接画像撮影、かぶり測定、打音検査を行えるようにしたものです。機体左右に設けたクローラーで検査対象面にしっかりと密着しつつ、クローラーの回転方向を制御して付着面状を自在に走行できます。打音検査は、検査ドロー

ンに搭載した打音検査機で行います。

図8(a)に検査ドローンによる打音の評価の流れを示します。まず飛行して検査対象に付着して、検査位置まで走行して移動します。次に打音検査機のハンマーでコンクリート面を打撃し、発生した打音をマイクで収録し、収録した音のデータを地上に無線送信します。地上の計算機上で打音が健全なコンクリートの音(OK)か、浮きなどの変状箇所の音(NG)かをAIを用いて評価します。OKかNGかの評価は図8(b)に分析方法のイメージを示す

#### ☞ ディープラーニング

コンピューターによる機械学習であり、人間の脳神経回路を模したニューラルネットワークを多層用いることで、コンピューター自らがデータに含まれる潜在的な特徴をとらえて、画像認識などの効率的な判断を行わせる手法。

#### ☞ OCSVM (One Class Support Vector Machine)

コンピューターによる機械学習であり、多数の正常なデータを学習することで、正常なデータと異常なデータの識別境界をコンピューターが認識し、未知のデータが正常であるのか異常であるのかを判定する手法。

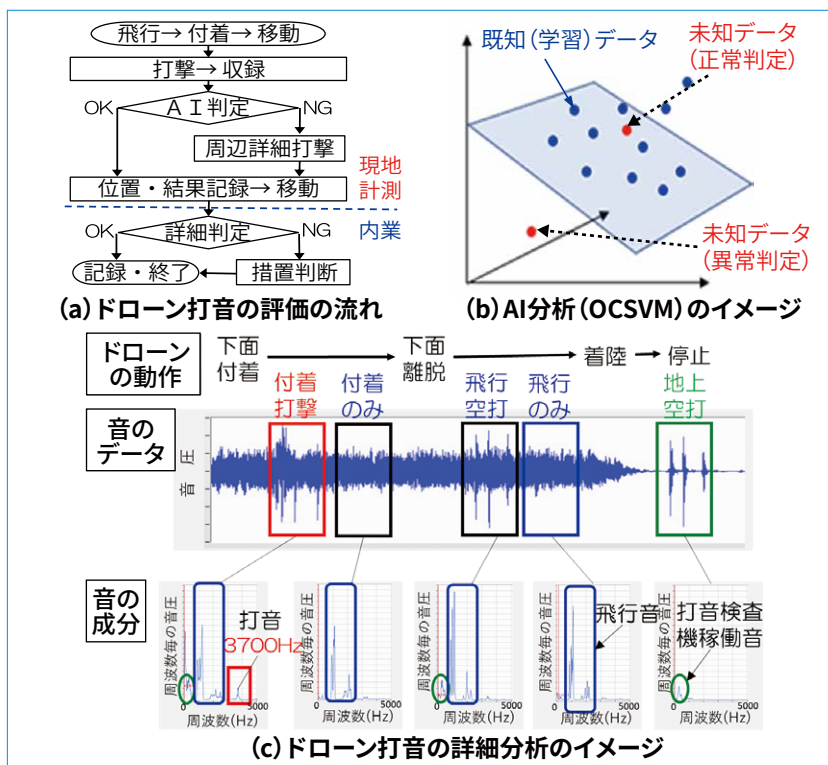


図8 ドローンによる打音測定データの評価手法

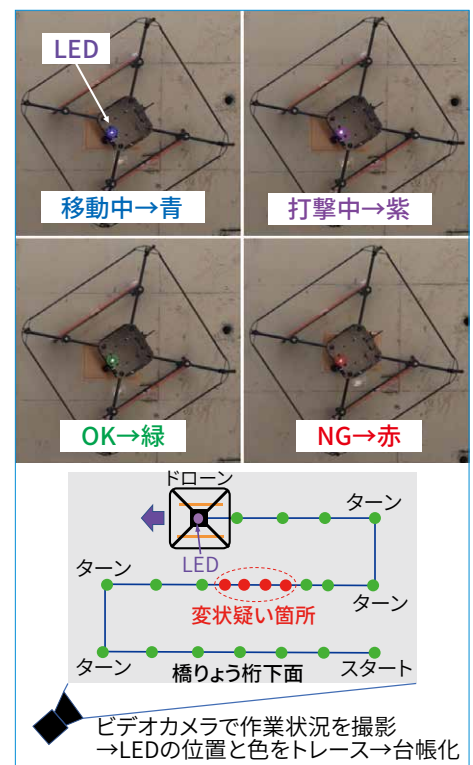


図9 打音検査結果のLED表示と台帳化

OCSVM (参照) という手法を用いて計算機が自動的にを行います。

このAI判定は、評価対象の打音データが、AIがこれまでに学習した正常(OK)な打音のデータと同グループに属する種類の音かどうかだけを即時に判定するもので、より詳しい評価を行う場合は、別途、図8(c)に示すように、ドローン打音データに含まれる音の高さ(周波数)ごとの成分を調べて、ドローンが飛行する際に発生する音や打音検査機が動くときに出す音などの影響を取り除いて、コンクリート面の打音のみを検出し、その音の高さなどからNGと判定された理由を、現状は技術者が考察して詳細に判定します。今後、AI学習用のドローン打音データを大量に集めることができれば、OKの音とNGの音の両方をAIに学習させることで詳細判定もAIが自動的に行えるようになる可能性があります。

地上の計算機でのAIによる評価結果は、即時にドローンに返信され、判定結果がドローン機体下部に取り付けたLEDで表示されます。図9に示すよ

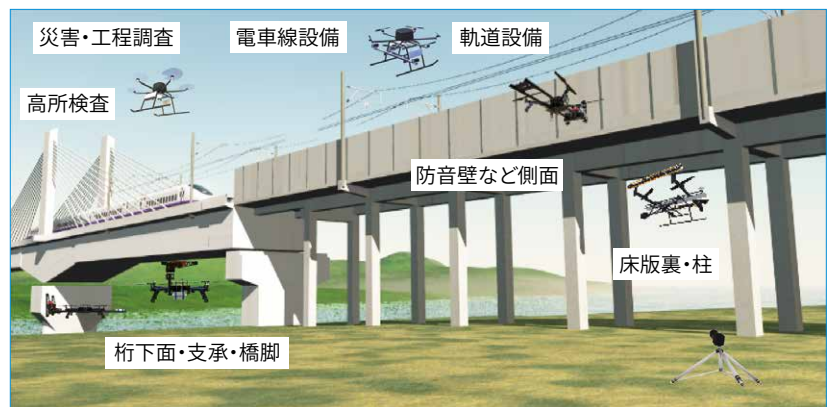


図10 ドローン検査の適用対象

うに、結果がOKの場合は緑、NGの場合は赤くLEDが点灯します。LEDが赤く点灯した場合には、その周囲を詳細に打撃することで変状の疑いがあるエリアを推定します。また、地上からビデオ撮影を行って、LEDライトの描く軌跡と判定後の色を画像分析によりトレースして記録することで、打音検査の位置と結果を台帳化することもできます。

### おわりに

構造物検査に特化したドローン・ロボット開発の取り組みを紹介しました。

現状はまだ大掛かりで、操縦技量も要する装置ですが、SLAMやAIを用いたドローン制御や、検査機器の小型軽量化などの要素技術の発展にともなって、検査ドローンの小型化、自立飛行化が各段に進展していくものと思います。それによって、ドローンによる検査対象(図10)が増えるとともに、すでに普及しているロボット掃除機のように、ドローンが無人かつ自動で構造物の隅々まで検査してくれる時代が、近い将来に訪れるものと期待しています。なお、本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。RRR