

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

レーザーとドローンで 鉄道橋調査を低コスト化する

鉄道構造物の検査技術の省力化・高度化が必須の課題となっています。そこで、鉄道橋の調査に遠隔位置からの非接触測定技術を適用することによって、高所作業や線路内への立ち入り作業を省略し、検査作業の安全化・効率化、ならびに低コスト化に取り組んでいます。ここでは、非接触測定による鉄道橋検査作業の省力化の例として、レーザー振動計による長大橋のケーブル測定の省力化技術とドローンによるコンクリート橋の調査技術を紹介します。



上半 文昭

Fumiaki Uehan

鉄道力学研究部
部長

【専門分野】 構造力学、
地震工学、維持管理工
学、計測工学

はじめに

鉄道構造物の検査分野では、インフラ老朽化や、少子高齢化にともなう熟練作業者不足のため、検査技術の省力化・低コスト化が不可欠となっています。とくに鉄道橋は高所に位置するため、外側から検査するには足場や高所作業車が必要となり、橋上で検査するには、作業時間が夜間や短い列車間合いに限られ、事前調整や保安にも人員を要します。

そこで、遠隔位置からの非接触測定技術を応用して、鉄道橋の検査に必要であった高所作業や線路内への立ち入り作業を省略し、検査作業を効率化

する技術の開発に取り組んできました。具体的には、レーザードップラー振動計による非接触振動測定技術の精度を向上して、現場向けの測定システム「Uドップラー」(☞参照) (図1)を製品化し¹⁾、列車通過時の橋りょうのたわみの測定や、平時の極微小な振動である常時微動(☞参照)による高架橋の固有振動数測定による検査などを実用化するとともに、センサーと測定対象間の測定距離をより長距離化し、長大構造物への適用性も高めてきました²⁾。さらに、鉄道橋の局所的な劣化・損傷(変状)を人が高所などに接近せずに把握する手法としてドローンの活用を検

☞ Uドップラー

レーザーを運動する物体に照射すると、ドップラー効果によって反射レーザー光の周波数が物体の速度に応じて変化することを利用して、物体の振動速度を非接触測定するレーザードップラー振動計に、屋外環境で高精度な測定を行うために、風や地盤の振動によるセンサーの揺れの影響を補正する改良を行った装置。

☞ 常時微動

波浪・風などの自然の外力や、交通機関・工場・工事などの人工的な外力を受けて、ごく微小ではあるものの常に揺れ動く地表面の振動。



図1 UドップラーⅡ

討し、構造物検査用のドローン³⁾(図2)を提案しました。橋りょうの桁下部や高架橋床版裏に付着して、電動の移動装置で走行しながら、変状箇所の撮影、鉄筋探査、打音検査などを行うもので、飛行しながらではなく面に付着して安定した状態で検査することで変状の検出精度を高めるとともに、鉄道橋上部への侵入事故を防止する効果を期待したものです。このようなレーザー振動計とドローンを中核的なツールとして、図3に示すように鉄道橋の健全度検査を遠隔非接触でできるようにし、検査業務の効率化、安全化、ならびに低コスト化を図っています。

ここでは、レーザー振動測定技術については、不可視光を用いた長距離型Uドップラーに見つけて測定作業をより簡単にする(自動視準)手法³⁾を説明します。また、従来の下面検査に加えて、壁や柱などの側面の検査にも活用でき、検査対象面の移動性能も高めた新型ドローンと、そのコンクリート橋の局所的な変状発生危険箇所の検出技術を紹介します。

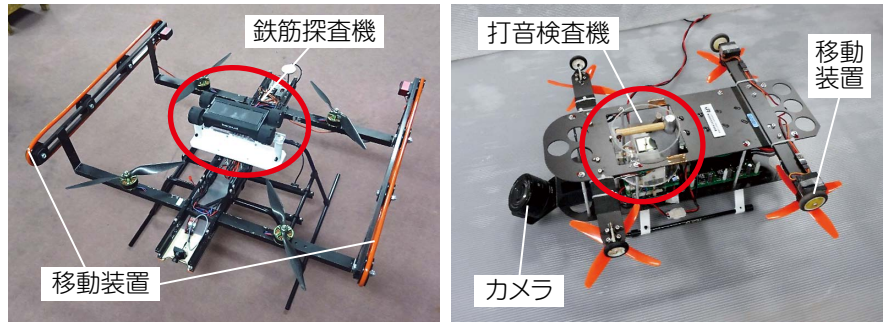


図2 構造物検査用ドローン

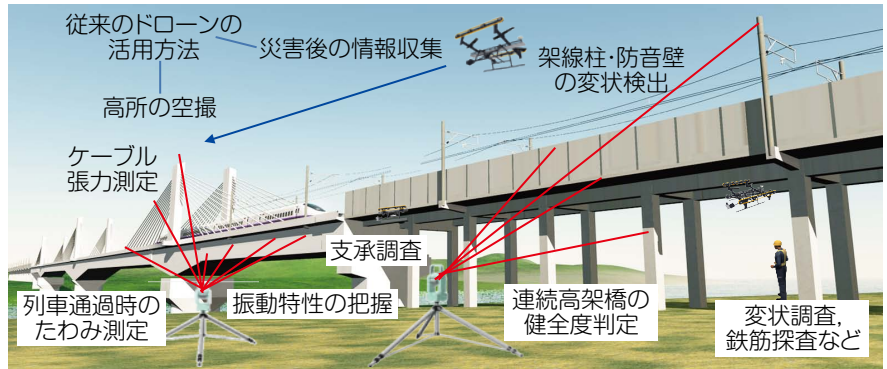


図3 鉄道橋健全度の遠隔非接触検査手法

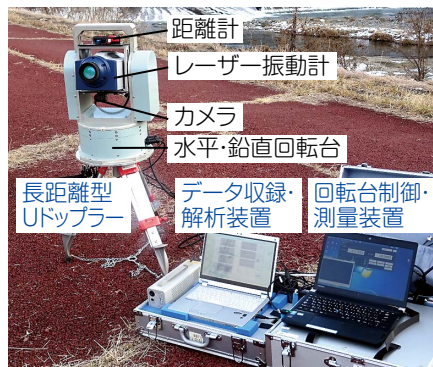


図4 長距離型Uドップラー

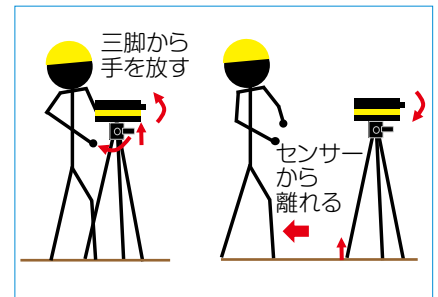


図5 測定作業者の動作によるセンサーの微小な傾き

レーザー振動計の長距離測定化

図4に、長大構造物を効率的に非接触振動測定するために開発した長距離型Uドップラーを示します。この長距離型Uドップラーは、自己振動の補正機能¹⁾を付加した高出力の不可視光レーザー振動計を、水平・鉛直2方向に制御できる回転台に搭載した装置です。本装置を用いれば、構造物上の測定点に反射材などのターゲットを取り付けることなく、数mから数百m離れた構造物の微小な振動を測定できます。

測定対象を自動的に見つける

レーザードップラー振動計は測定対象にレーザーを照射してその反射光を受光して振動を測定します。測定対象

までの距離が長くなると、測定対象にレーザーを照射する作業の難易度が上がるとともに、反射レーザーを受光しにくくなるため測定対象表面からレーザーの反射に適した点を選んでその点に正確にレーザーを照射する必要があります。また、操作者が三脚から手を離れたり三脚から少し離れたりする作

業動作によって極微小にセンサーが傾いただけでも(図5)、遠方ではレーザー照射位置にずれが生じます。センサーの微小な傾きによるレーザー照射位置のずれ量は図6で表され、たとえばセンサーの角度が0.01°傾いた場合、10m先では2mm以下のずれですが、300m遠方では5cm以上のずれとなります。

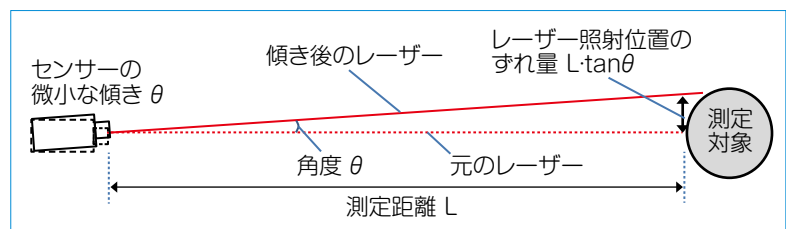


図6 センサーの微小な傾きによるレーザー照射位置のずれ

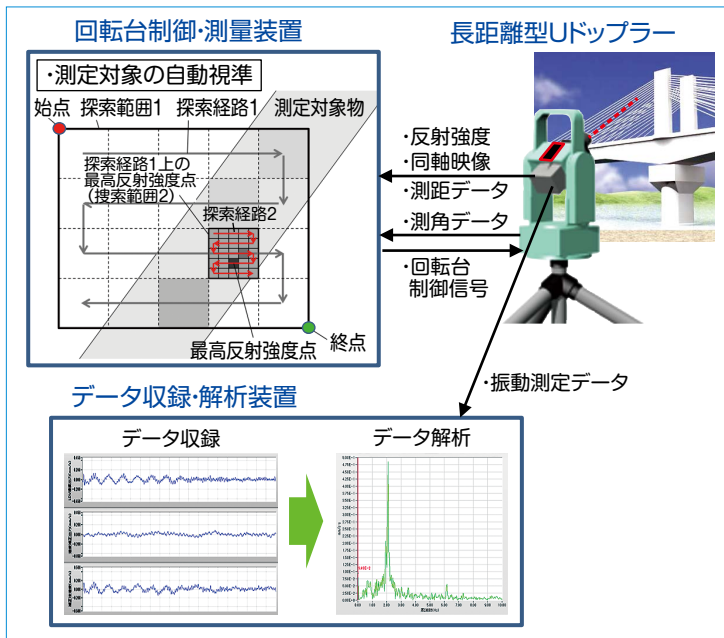


図7 自動視準測定の流れ

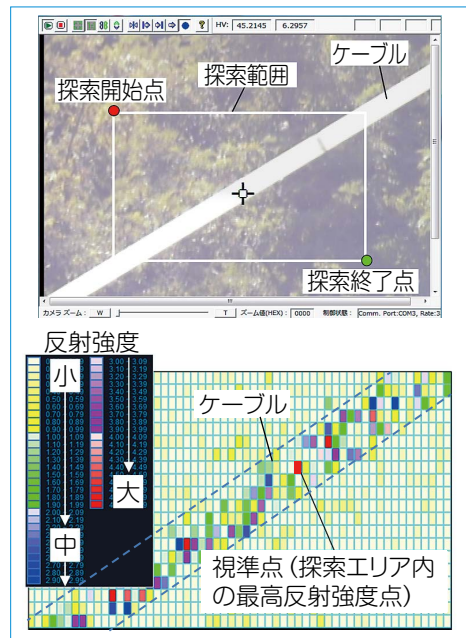


図8 探索範囲の設定画面と反射強度分布

そうすると、測定に適した点からレーザーが外れてしまうだけでなく、細かいケーブルなどが測定対象の場合にはレーザーが測定対象から外れてしまう可能性もあり、長距離非接触測定作業は、ある程度の熟練を要する作業でした。

そこで、測定対象ならびに対象上の非接触測定に適した高い反射が得られる点を自動的に検出する手法を開発しました。図7に測定対象および対象表面上の高反射強度点の探索方法を示します。回転台の制御装置にはレーザーの照射方向の同軸カメラ映像が表示されており、まず、長距離型Uドップラー(LDV)をおおむね測定対象方向に向け、同カメラ映像上で、探索範囲の始点と終点を指定します。次に、水平鉛直回転台を自動制御してLDVに探索経路1を自動探索させます。探索中、LDVの反射レーザー光の強度をモニ

タリングすることで、探索範囲内の反射強度分布が得られ、さらに、探索経路1上の最高反射強度点周辺の小領域を自動探索(探索経路2)して、より反射強度の高い点を検出します。このようにして検出された点の振動測定を実施します。三脚付近で人が操作しないので、視準後の測定位置のずれも生じません。

提案手法を検証するために、長大橋のケーブルの固有振動数(☞参照)を100m以上離れた河岸からの常時微動測定で推定しました。図8に、ケーブルの反射強度の探索範囲と分布の例を示します。ケーブル上でのみ反射強度が高まること、ケーブル上でも反射強度がばらつくことが確認できました。また、長さの異なる11本のケーブルの固有振動数を、熟練技術者が手動で測る場合と遜色ない精度で測定できました(図9)。

このケーブルの固有振動数測定作業は、従来は夜間に作業員が橋の上に立ち入って、ケーブルに振動計を取り付けてハンマーで打撃して行っていました。その従来手法では上記の作業に夜

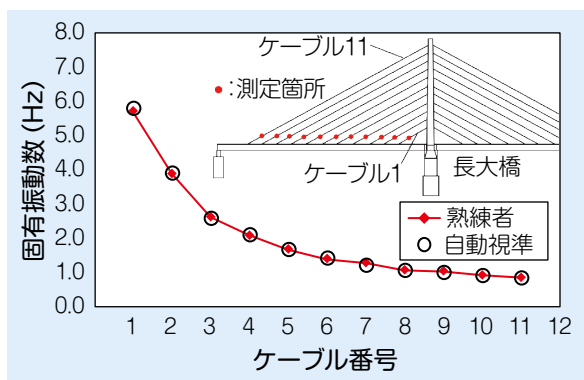


図9 自動視準と熟練者視準による測定結果

間作業1日程度を要しましたが、長距離型Uドップラーの採用によって日中40分で、さらに自動視準技術の採用によって、非熟練者でも日中20分程度で実施できるようになり、検査作業の低コスト化に貢献しました。

新しい構造物検査用ドローン

コンクリート橋の局所的な変状を詳細に調査するために、新型の構造物検査用ドローンを開発しました(図10(a))。測定対象面に附着して機体に搭載した特殊(メカナム)ホイールで面上を自在に移動でき(図10(b))、カメラ、打音検査機、鉄筋探索レーダーを搭載して(図10(c))、下面に加えて側面の検査も実施可能にしました(図10(d), (e))。

☞ 固有振動数

振動体を自由に振動させたときにその振動体が示す固有の(もっとも揺れやすい)振動数。

☞ かぶり厚さ

コンクリートの表面から内部の鉄筋表面までの最短寸法。かぶり厚さが薄い位置でコンクリートの変状が発生しやすい。

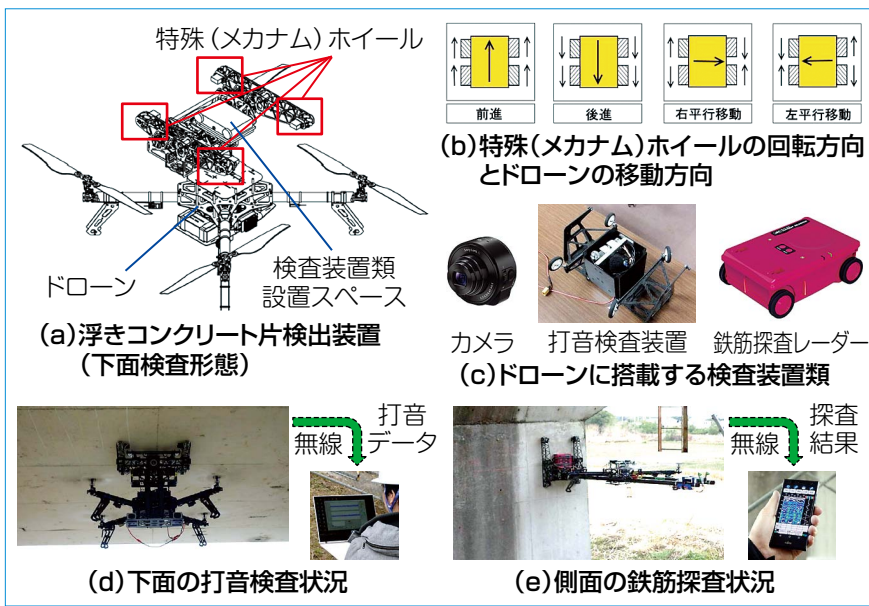


図10 新しい構造物検査用ドローン

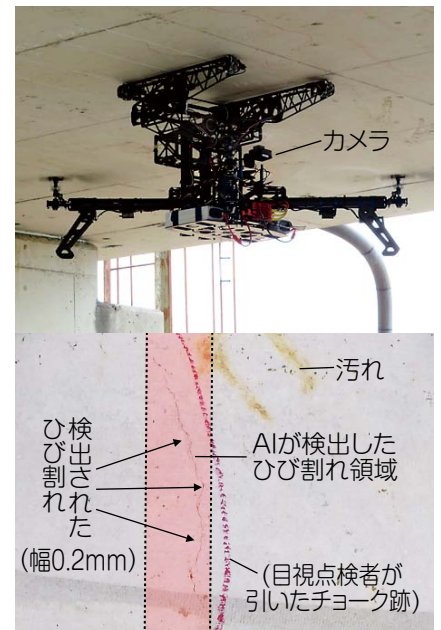


図11 桁下面撮影状況とAIによるひび割れ検出

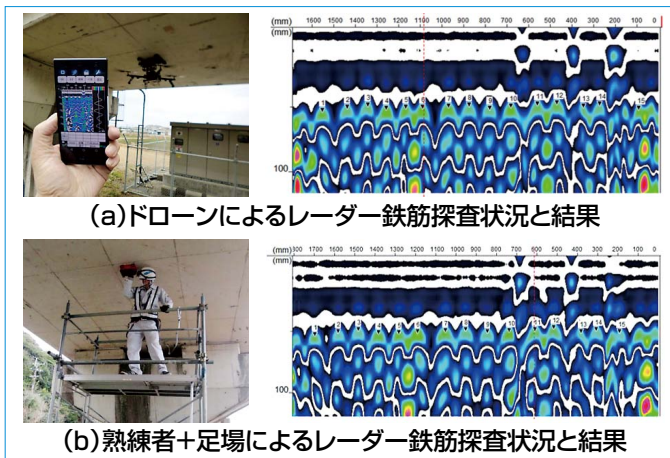


図12 コンクリート内の鉄筋のレーダー探査状況と結果

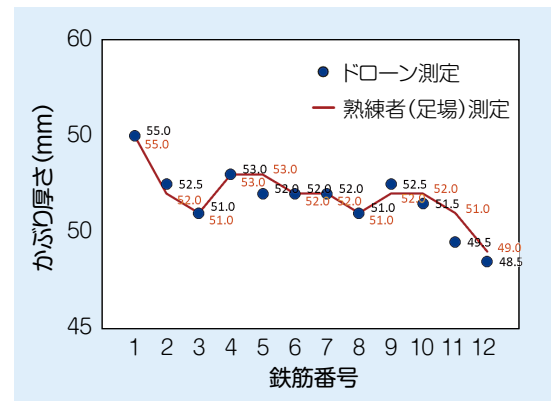


図13 ドローンと熟練者によるかぶり厚さの比較

コンクリート橋の変状調査

図11にコンクリート橋の桁下面の撮影状況と、撮影画像からAI(人工知能)でひび割れを自動検出した結果を示します。今のところ、幅0.2mm程度のひび割れをAIで自動検出できることを確認しています。

また、コンクリート橋の桁下面のかぶり厚さ(参照)測定を実施しました。図12に新型ドローンによる内部鉄筋のレーダー探査結果を熟練者による測定結果とともに示します。図13は新型ドローンによるかぶり厚さ測定結果を示しており、熟練者が足場を用いて測定した結果と十分に一致しました。

構造物検査用ドローンによる検査は、

足場設置のための資材、人員、時間を省力でき、足場などでのアクセスが難しい河川上の鉄道橋などにも適用できるメリットがあります。

おわりに

紹介した遠隔非接触検査技術は、高度かつ現状では高価な装置を使うため、技術導入の最初のハードルの高さが気になる方が多いと思いますが、将来的に検査作業に要する時間や人を大きく削減できる可能性がある技術です。引き続き、一度にたくさんの点の振動を測定するためのビデオカメラによる非接触振動測定技術の開発や、ドローンによる撮影画像や打音測定結果のAI分析による検査の効率化の研究

に取り組んでおり、さらなる検査技術の高度化・省力化を目指します。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

文献

- 1) 上半文昭：構造物診断用非接触振動測定システム「Uドブラー」の開発，鉄道総研報告，Vol.21，No.12，pp.17-22，2007
- 2) 上半文昭：鉄道橋検査を目的とした遠隔非接触測定技術の開発，鉄道総研報告，Vol.31，No.4，pp.53-58，2017
- 3) 上半文昭：遠隔非接触計測による鉄道橋健全度の評価手法の開発，鉄道総研報告，Vol.32，No.6，pp.41-47，2018