

構造物の非接触振動計測の効率化を図る

上半 文昭

鉄道力学研究部(構造力学 主任研究員)



うえはん ふみあき

はじめに

鉄道を支える土木構造物は、地震や豪雨などの自然災害による高い被災リスクを抱えています。また近年、先進国においても使用中の橋梁が突然崩壊する事例が報告されています。構造物の健全性や耐災害性を速やかに調査して、適切な対策を施す不断の努力が必要です。

構造物の検査は、技術者による目視検査を中心に据えた体系で実施されていますが、検査結果の客観性・定量性の不足、少子高齢化に伴う検査技術者の不足などの課題が指摘されています。そのため国内外で、最新のセンシング・モニタリング技術を用いて、構造物検査の定量化や効率化を図ろうとする試みが盛んに実施されるようになりました。

鉄道分野では、古くから振動を計測して構造物を検査する手法が研究されており、列車通過時の振動や人為的な加振による振動などを利用した検査技術が提案されています。著者らは、この振動計測による構造物検査技術の普及と発展をめざして、構造物診断用非接触振動測定システム「U

ドップラー」を開発しました。

ここでは、Uドップラーを用いた構造物振動計測作業をより簡単にするために検討を実施している、測定対象への反射ターゲットの形成手法と測定システムの無線化について説明します。

構造物診断用非接触振動測定システム「Uドップラー」

Uドップラー(図1)は、レーザ光を照射することによって構造物の振動を遠隔非接触計測できるシステムで、レーザ光のドップラー効果を利用して運動する物体の速度を検出するレーザドップラ速度計(LDV)というセンサに、屋外での構造物計測に適した工夫を施したものです。これまでのシステムでは構造物へのセンサ設置のために必要であった線路内立ち入り作業、高所作業、足場の架設作業などの負担を軽減し、振動計測による構造物検査作業の効率化と安全化を図ることを目的としています。Uドップラーは2007年から鉄道事業者や大学等研究機関に導入され始めており、列車通過時の振動、衝撃振動、常時微動などを利用した構造物検査への適用が実施、検討されています。

レーザのドップラー効果を利用した振動計測

「ドップラー効果」といえば、救急車などの緊急車両のサイレンの音が自分に近づいてくる時には高く聞こえ、自分から離れていく時は低く聞こえる現象を思い出されるのではないのでしょうか(図2(a))。それと同様の現象が、レーザ光が運動する物体にあたって反射して戻ってくる際にも生じます。レーザを当てた物体が近づいてくる時には反射レーザ光の周波数が高くなり、逆に物体が遠ざかっていく時は反射レーザ光の周波数が低くなります(図2(b))。物体の速度が大きいほど、周波数の変化も大きくなります。LDVは、この入射レーザ光と反射レーザ光の周波数の差を検出して逆算することにより、レーザを照射した物体の

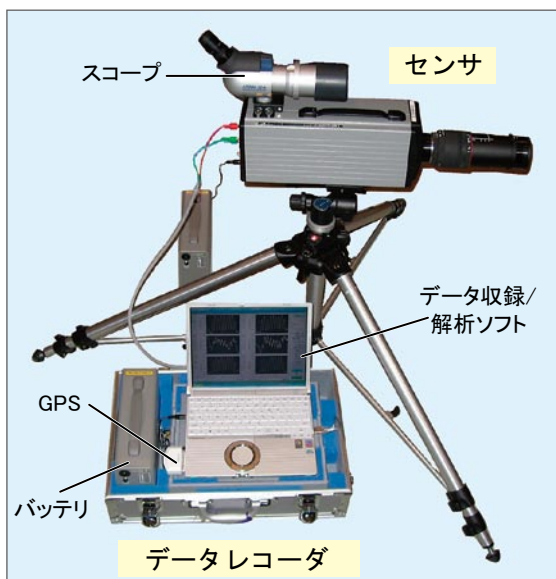


図1 Uドップラー

速度を検出し、それを連続的に行うことにより物体の振動を計測します。

LDVはセンサと測定対象との間の相対的な揺れを検出するため、センサ自身が揺れると正確な測定ができません。そこでUドップラーに、自身の揺れと傾きを検出するセンサを用いてLDVの揺れの影響を低減する技術を導入しました。そのため、交通振動や風の影響を受けてセンサ自身に振動が発生しやすい屋外環境においても、構造物に直接振動計を取り付けた場合とほぼ同等の振動データを遠隔非接触で計測できるようになりました。

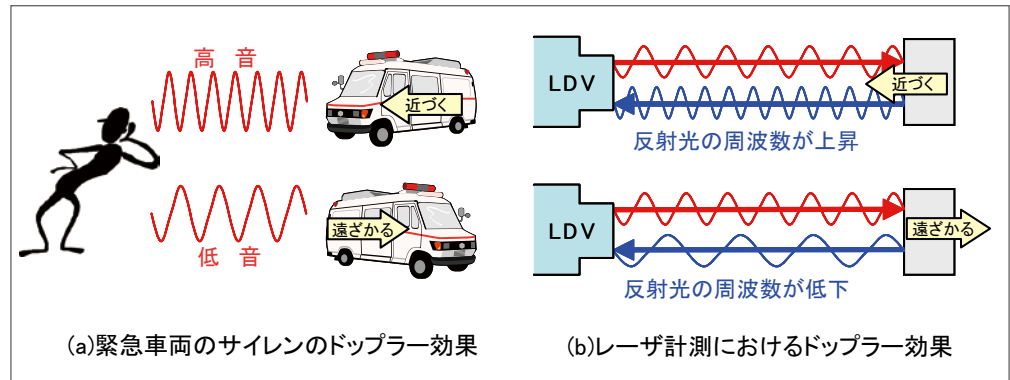


図2 ドップラー効果

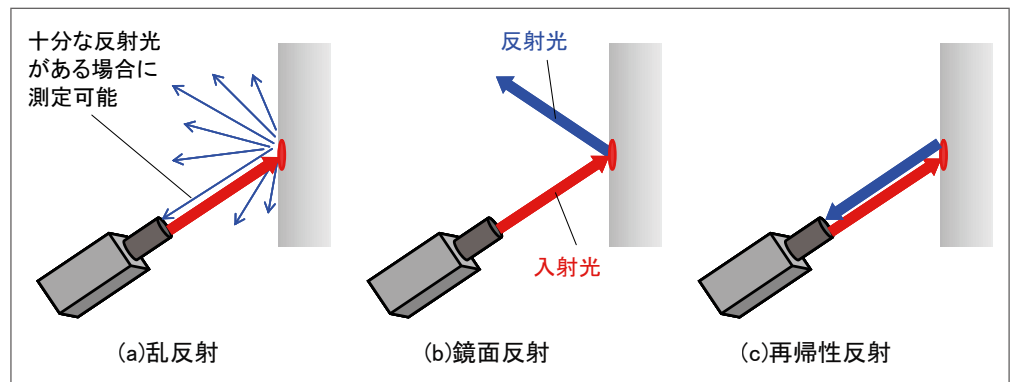


図3 レーザ光の構造物表面での反射

レーザ光の構造物表面での反射

Uドップラーによる振動計測では、その原理上、センサから測定対象に照射したレーザ光が、測定対象表面で反射されて再びセンサまで戻ってくる必要があります。測定対象表面でレーザ光は図3 (a) のように乱反射し、一部の反射レーザ光がセンサの方向に戻って来ます。しかし、測定対象の表面状態が反射に適していない場合や、測定距離やレーザの入射角が大きい場合には、十分な反射レーザ光を受信できず、ノイズが増大して測定を実施できません。

反射光量の向上策

その対策の一つとして、Uドップラーのレーザ出力を高める手法が考えられます。Uドップラーではレーザ製品の安全基準(表1)クラス2のレーザを用いています。これは会議発表などで用いるレーザポインタと同クラスの十分に安全なレーザ出力です。現在、装置の安全性とのトレードオフを考慮しながら、Uドップラーのレーザ出力をクラス3R(可視光でクラス2の5倍以下の出力)に向上する検討を進めているところです。

一方、測定対象表面のレーザ光の反射性を向上すること

ができれば、現状のUドップラーのレーザ出力を維持したまま、十分な反射を得ることができます。光の反射性を向上するには構造物の表面を鏡のように仕上げれば良いと連想しがちですが、大型の構造物を非接触計測する場合はレーザを測定対象表面に垂直に照射できないケースが大半であるため、図3 (b) のようにかえってセンサに光が戻らなくなってしまいます。そのため、光を光源の方向に強く

表1 レーザ製品の安全基準(JISC6802)

クラス	危険評価の概要
クラス1	設計上本質的に安全である。
クラス1M	ビーム内観察状態も含め、一定条件の下では安全である。ビーム内で光学的手段を用いて観察すると危険となる場合がある。
クラス2	直接ビーム内観察状態も含め、通常目の嫌悪反応によって目の保護がなされる。
クラス2M	通常目の嫌悪反応によって目の保護がなされる。ビーム内で光学的手段を用いて観察すると危険となる場合がある。
クラス3R	直接ビーム内観察状態では危険となる場合がある。
クラス3B	直接ビーム内観察をすると危険である。ただし拡散反射による焦点を結ばないパルスレーザ放射の観察は危険ではなく、ある条件下では安全に観察できる。
クラス4	危険な拡散反射を生じる可能性がある。これらは皮膚障害をもたらし、また、火災を発生させる危険がある。

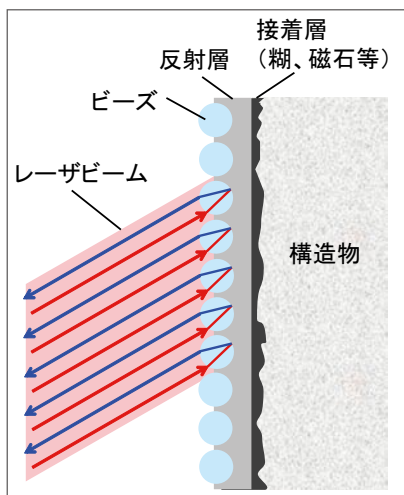


図4 反射シートによる再帰性反射

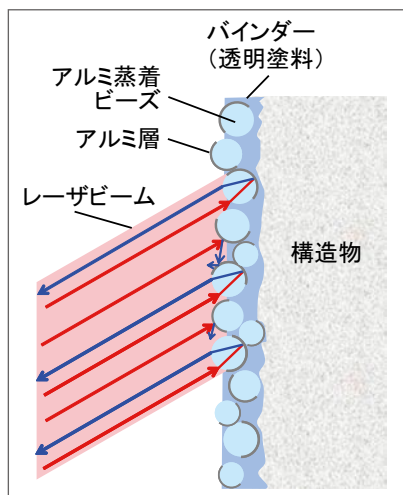


図5 反射塗料による再帰性反射



図6 測量用反射プリズムを用いた岩盤計測状況

反射する再帰性反射 (図3 (c)) の特性を構造物表面に与える工夫が必要です。

再帰性反射ターゲットの形成

測定対象表面のレーザ反射性を向上するために、筆者らは構造物に再帰性反射シート (シール) を貼付する手法をよく用います。シートの表面には微小なビーズまたはプリズムが多数配列されており、図4のように光の屈折と底面での反射により、光を光源の方向に強く反射する性質を持っています。再帰性反射シートは、夜間の交通・作業安全用品への適用を主な目的として様々な製品が市販されており、その中でも「高輝度」、「超高輝度」などに分類される反射シートを構造物に貼付すれば、測定点の表面状態にかかわらず、100m程度の遠隔地からの測定や、60°を超える大きなレーザ入射角での測定を実施できることを確認しています。

また、再帰性反射塗料を用いることもできます。著者らは、半球部のみにアルミニウムが蒸着された微小なガラスビーズを多数含有する再帰性反射塗料を用いています。同塗料をスプレーすると、図5のように測定対象表面に再帰性の反射面が形成されます。塗料の色は薄いグレーで、コンクリート表面にスプレーしても美観を損ねる心配がありません。また、景観を重視する構造物にも適用できるよう、雨で自然に流れて消える水溶性の反射塗料も開発しています。

さらに、測量機器用のターゲットとして市販されている反射プリズムもUドップラー用の反射ターゲットとして使用できます。光の反射時のロスが少ない複数のミラーで構

成されたタイプの反射プリズムを用いれば、これまで公表してきたUドップラーの測定距離の仕様 (1~100m程度) を大きく超え、数百m程度離れた場所からの測定を実現できることを確認しています (図6)。また、耐久性の優れた製品が市販されているので、災害危険箇所の定点観測用の常設ターゲットとしても活用できます。

反射ターゲットの形成作業の効率化

反射シールの貼付や塗料の噴霧は、センサの設置・撤去作業と比較すれば非常に簡単です。しかしながら、危険箇所近傍での作業をなくすことがUドップラー開発の主要な目的ですので、さらなる作業の安全化、簡略化を検討しています。例えば、高所へのターゲットの設置用に、棒状の器具を用いたシールの貼付、スプレーの噴霧方法を提案しています (図7)。また、図8に示す反射ターゲットの形成装置の開発にも取り組んでいます。この装置は、反射塗料を封入したペイント弾を空気圧を利用した発射機で構造物表面に着弾させ、着弾箇所に反射ターゲットを形成することができます。屋外実験 (微風) では、測定箇所までの水平距離が20mで数cm、30mで十数cm、50mで数十cm程度の誤差でペイント弾を着弾させることができました。

Uドップラーの無線通信化

センサ配置の自由度を高めて作業効率を向上するために、無線通信機能を有するUドップラーのプロトタイプシステムを開発しました。従来のUドップラーに、新たに開発した無線化ユニットとソフトウェアを追加することにより、センサとレコーダ間の通信を無線化することができま



図7 高所への反射ターゲット設置器具



図8 反射ターゲット形成装置

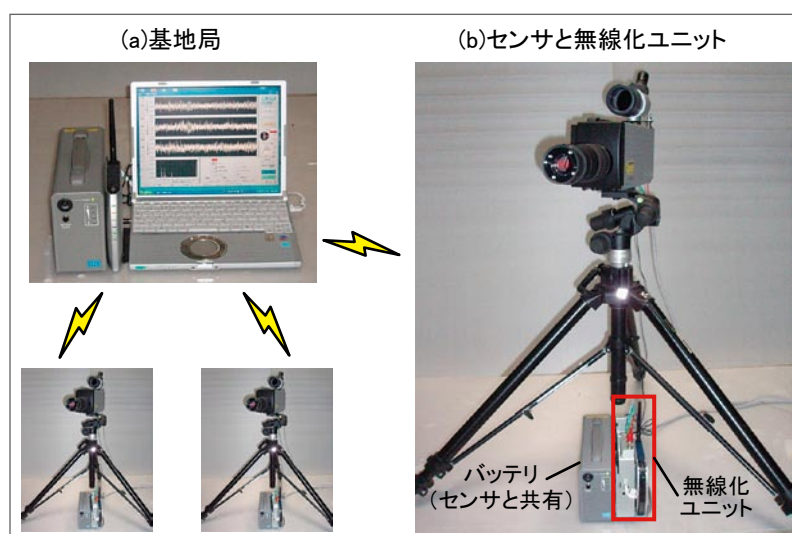


図9 無線通信化したUドップラーシステム

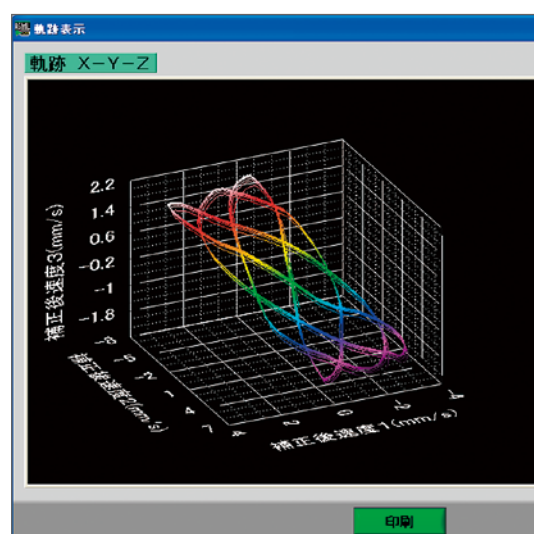


図10 3次元計測結果例(解析ソフトウェア画面)

す。プロトタイプシステム(図9)では、基地局から見通し距離約100m以内の場所に設置された最大3台のUドップラーセンサを制御して同時測定を実施できます。

センサが観測しているデータは基地局(無線LANルータを接続したPC)にモニタ用データとして常に無線送信されています。基地局では、観測波形をほぼリアルタイムでモニタしながら、データ収録の開始と終了、各種設定の変更などの制御情報をセンサに送信できます。測定中に無線通信状況が悪化しても収録データに欠損が生じないように、収録データはまずセンサ側の無線化ユニット内に収録し、収録終了直後に基地局が自動でデータを回収してPCのハードディスクに保存します。

より多様な計測の実現

Uドップラーの無線化によって、より多様な測定を実施できるようになります。基地局を測定車内などに固定でき

るので、センサの取り回しが容易になり、作業をより効率化できます。人の配置を避けたい危険箇所での測定も安全に実施できます。また、多点を同時測定できるので、離れた構造物や隣接構造物の同時測定、構造物の振動モード推定、多次元測定(図10)なども実施できます。今後、多点測定および多次元測定機能を活用して、より高度な構造物の検査手法を提案していく計画です。

おわりに

Uドップラーを用いた構造物の遠隔非接触計測作業の効率化に向けた取り組みを紹介しました。ここで紹介した、反射ターゲットの形成装置、無線通信化および多センサ化、レーザ光量の向上などの改良に加えて、測定レンジの拡大、ユーザインターフェイスの改良、作業マニュアルの整備などの検討を実施しています。今後も、皆様からの要望に柔軟に対応してシステムの開発を進めていく所存です。RRR