

特集：鉄道固有技術に関わる実験・計測技術

ビデオカメラとドローンを用いた構造物検査技術の開発

上半 文昭* 池田 学** 松岡 弘大**

Development of Railway Bridge Inspection Method Using Video Camera and UAV

Fumiaki UEHAN Manabu IKEDA Kodai MATSUOKA

To improve method of soundness inspection of railway bridges, we have developed two kinds of remote non-contact inspection techniques in which a video camera and a drone robot are used, respectively. The system using video camera can measure vibrations of structure at multiple points synchronously without installing any targets on the surface of the structure. Therefore, it can be applied to the inspection of bridge main girders, bearings, and overhead wire poles, etc. The system using drone robot can conduct close-up shooting, hammering test and rebar explorations of the underside and side surfaces of concrete structures. In addition to those, it can also analyze the measured data with AI diagnostic techniques of the measured data.

キーワード：構造物検査，非接触測定，画像計測，変状検査，ビデオカメラ，ドローン，AI

1. はじめに

インフラ老朽化や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る。筆者らは、これまで、鉄道橋等の健全性評価のための検査業務の省力化や安全性向上を目的として、レーザードップラー振動計やドローンを活用した遠隔非接触計測手法の開発に取り組んできた¹⁾。レーザードップラー振動計に自己振動によるノイズの影響を補正する機能を加えて屋外環境でも微小な振動を測定可能とした非接触振動測定システム「Uドップラー」をこれまでに3機種実用化した。また、クローラで構造物下面等に付着して走行しながら、コンクリート構造物の変状撮影などを行う構造物検査用のドローン・ロボット開発の基礎検討を実施してきた。

筆者らは、次の目標として遠隔非接触測定による構造物検査のさらなる低コスト化・高度化を目的としたビデオカメラを用いた構造物振動の多点同期測定による橋りょう検査手法の開発、並びに、ドローン・ロボット計測技術を応用したコンクリート構造物の変状調査技術の向上に取り組んできた。本報告では、ビデオカメラを用いた構造物検査用動的画像計測システム、並びに浮きコンクリート片の検出を主目的とした構造物検査用のドローンシステムの開発状況と、それらを用いた検査手法の提案、計測データ分析へのAI適用の検討結果について報告する。

2. ビデオによる多点同期振動測定技術

2.1 動的画像計測システムの開発

非接触振動測定による構造物検査のさらなる低コスト化・高度化を目的として、ビデオカメラを用いた構造物振動の多点同期測定システムを開発し、構造物検査への適用を試みた。

このシステムは、ビデオカメラで撮影した動画から計測対象の動的挙動をデジタル画像相関法²⁾で算出する。デジタル画像相関法は、計測対象を撮影したデジタル画像情報をもとに、表面の模様を輝度情報のパターンとして取り扱い、移動または変形する前後の二画像間での位置の探索を行うことで、画像内の任意の点の変位の大きさと方向を求める手法である。具体的には、移動・変形前の画像から任意の変位算出点周りの $N \times N$ 画素の小領域を抽出し、移動・変形後の画像における画素数に対応した整数座標上から、その小領域に対応する位置を相関度の高さによって検出する。

計測システムのハードウェアは、高解像度、高フレームレート（4K：266fps, FHD：935fps, HD：1384fps）のビデオカメラと撮影画像データを高速かつ大容量で収録できるロガー、それらを制御するPCで構成した。図1に、開発した計測システムの外観を示す。なお、ソフトウェアは、パナソニックシステムソリューションズジャパン（株）の「変位計測ソフトウェア」を元に、構造物検査に適用させるための各種の改良を施して作成した。

2.2 計測手法の改良

2.2.1 外乱によるカメラ振動の影響の補正技術

ビデオ測定においては、カメラが動くとき撮影画像中の被写体に見かけの動きが生じてしまうので、高精度な非

* 鉄道力学研究部

** 鉄道力学研究部 構造力学研究室



図1 ビデオによる多点同期振動測定システム

接触振動測定を行うためには、風などの外乱によるカメラ振動の影響を補正する技術の適用が不可欠である。ビデオ測定の場合、実際には不動である固定点が被写体中にある場合、画像解析で得られたこの固定点の動きをカメラの振動による見かけの動きであると判断できる。固定点に対する測定対象点の相対的な動きの計算、つまり、画像解析で得られた構造物上の計測対象点の動きから、この固定点の動きに相当する成分を減算することで、カメラ振動の影響を除去することができる。

しかしながら、この手法を用いて現地で構造物振動を測定して補正を試みたところ、固定点と指定した点に特定の振動変位がある場合や、不動であっても日照による画像変化で見かけの変位が生じてしまった場合などに、測定精度を確保できないことがあった。そこで、撮影画像上から適切な固定点を自動で見つける手法を検討した。手法の概要を図2に示す。まず、固定点と想定される複数の候補点を画像上で指定する。次に、複数の固定点候補の挙動を解析し、他の候補点の挙動との乖離が大きい候補点は不動点ではないと判定する。最後に、不動点と判定された固定点との相対挙動を求めることで、カメラ振動の影響を補正した計測点の挙動を求めることとした。

2.2.2 簡易測量による実振幅測定技術

従来の変位計測ソフトウェアでは、測定画像中の何らかの標尺物を利用して、画像解析で得た画像中の変位量を構造物振動の実振幅に変換する必要があった。このため鉄道橋等の測定では、標尺物として設計図書で寸法が把握できる構造部材を用いる必要があり、測定精度が標尺物の寸法精度に依存するとともに、寸法が既知の部材が存在しない場合には実振幅を推定できなかった。また、測定対象を斜め方向からビデオ撮影する場合、画像の左右、上下で構造物の縮尺が変化するため、多点測定を行う場合、各測定点近傍での標尺物との比較が必要であった。

そこで、図3のように、簡易な測量装置による構造物上の数点の測量結果から主要部分の寸法を算出し、その

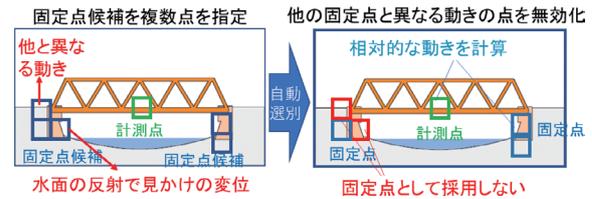


図2 カメラ振動の影響の補正技術

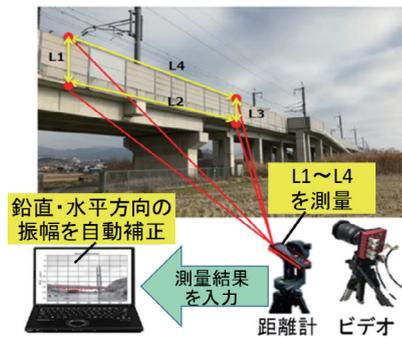


図3 簡易測量による実振幅測定技術

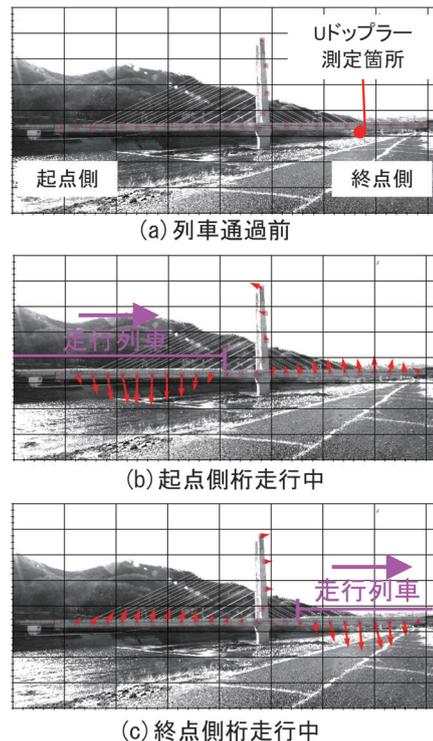


図4 長大橋の列車通過時挙動の可視化例

寸法を画像解析の際に2次的に反映させることで、ビデオ撮影画像中の任意点の振動を実振幅で測定可能とする改良を施した。

2.3 長大橋のたわみ測定・全体挙動把握

長大橋各部の挙動の列車走行中の実振幅推定を実施した。図4は、ビデオによる多点同期振動測定システムを

用いて列車通過時の長大橋の時々刻々変化する全体挙動を測定・可視化した結果例である。図中の矢印は各測定点の変位ベクトルであり、列車が載っている桁が下にたわみ、主塔は列車が載っている桁側に若干傾き、反対側の桁が上反る様子が確認できる。

また、実振幅の測定精度を確認するため、上り・下り合計7列車を対象として、列車が通過する際の最大たわみを、終点側桁支間中央の測定点から約170m離れた位置から測定した。その結果、表1に示すように、測定点直下に設置した長距離型Uドップラーの測定結果と比較して、平均5%程度の誤差でたわみを測定できることが確認できた。

表1 終点側桁の最大たわみの比較

	ビデオ (mm)	Uドップラー (mm)	差異 (%)
1	41.9	41.8	0.29
2	39.7	38.3	3.73
3	46.7	49.4	-5.39
4	37.4	38.8	-3.74
5	41.6	37.9	9.85
6	41.4	40.6	1.82
7	35.4	38.6	-8.32



図5 鋼橋支承部の測定状況

2.4 橋りょう支承部の微小挙動測定

ビデオ計測による支承部変状調査手法の開発に向けて、図5に示す支間34mの鋼橋の支承部を対象として現地測定を実施した。支承部に測定用のターゲット等は一切設置せず、支承近傍（測定距離1m）から測定を行った。図6は、橋りょう上を貨物列車が通過した際の支承近傍の変位の測定結果を示しており、0.1mm以下、 0.1° 以下の微小挙動を検出することができた。このような測定を定期的実施することで、支承の損傷による振動増大や可動部の固着などの早期発見が可能になると考えられる。

2.5 付帯構造物の複数同時測定

ビデオによる多点同時測定を利用すれば、沿線に多数存在する架線柱などの付帯構造物の列車通過時振動を一度に複数測定することができる。

例として、高架橋架線柱の複数同時測定により固有振動数測定試験を実施し、長距離型Uドップラーによる結果と比較した。新幹線のラーメン高架橋上の単柱コンクリート架線柱の測定を実施したところ、列車通過時振動を利用して、図7に示す6本程度を一度に測定でき、得られた固有振動数はUドップラーによる結果と一致することが確認できた。

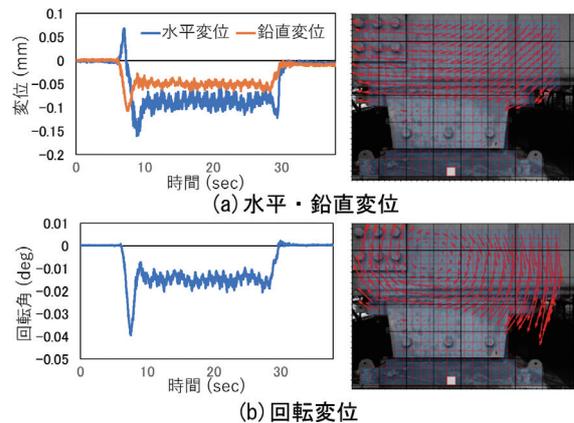


図6 支承部の微小挙動の測定・可視化結果例

3. 構造物検査ドローン

3.1 構造物検査ドローンの開発

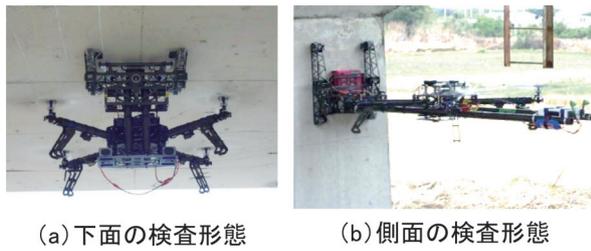
高所等接近困難箇所の詳細な検査は、足場の架設などにコストを要するため、ドローン計測の適用を検討した。鉄道構造物の検査にドローンを用いる場合、線路への侵入や設備・車両との衝突の防止が不可欠であるため、桁下部の調査に特化することで鉄道橋の上部への侵入リスクを低減した付着走行型の構造物検査ドローンを開発した。この構造物検査ドローンを単純な空撮ではなく、コンクリート橋の変状の近接撮影、打音検査、内部鉄筋の



図7 架線柱の固有振動数の一括測定結果例

探査に適用し、あわせて測定結果のAIによる評価方法を検討した。

まず、鉄道橋の下面に加えて、脚部や高欄・防音壁などの側面の検査に適用できる付着走行型の構造物検査ド



(a) 下面の検査形態 (b) 側面の検査形態

図8 下面・側面を検査できる構造物検査ドローン

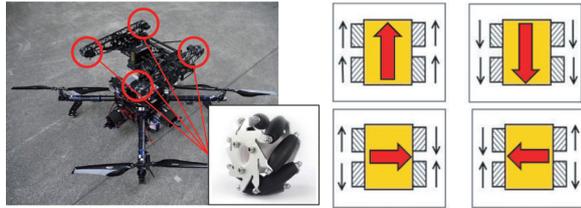


図9 メカナムホイールによる付着走行制御

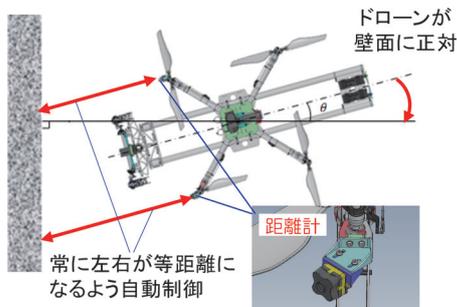


図10 側面検査用の期待制御手法



図11 構造物検査ドローンの実用化プロトタイプ

ドローンを開発した(図8)。このドローンは、機体の構成を組み替えることで、下面、鉛直面の両方に適用可能であり、カメラ、鉄筋探査機、打音検査機などを搭載できる。ドローンの推進力を利用して、電動自走式の付着走行機構を面に押し付けて面上を移動する。付着走行機構にメカナムホイールを採用することで、ドローン機体の方向を転換することなく、検査対象面上を多方向に移動できるよう工夫した(図9)。また、側面に機体の推進力で付着走行機構を押し付けやすくするために、機体前方に取り付けた2つの距離計を用いて、自動的に機体を面に正対させる制御技術を適用した(図10)。

また、構造物検査ドローンの実用化に向けて、比較的、簡単・軽量の機体構造で、近接画像撮影、打音測定、鉄



図12 ひび割れ・かぶりのドローン測定の対象橋りょう

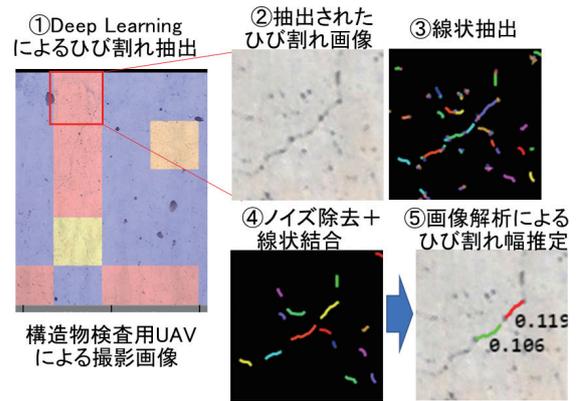


図13 AIと画像計測によるひび割れ測定手法

筋探査を行うことができる、図11に示す実用化プロトタイプを合わせて製作した。

3.2 近接画像撮影とAIによるひび割れ測定

図12に示すコンクリート橋の桁下面を対象として、近接画像撮影、AIによるひび割れ検出、ひび割れ幅の測定を実施した。ひび割れ幅の測定アルゴリズムを図13に示す。まず、多くのビデオ撮影画像から、Deep learningでひび割れが含まれている画像を検出し、次に、その画像中の線状を検出・結合するとともにノイズを除去してひび割れ形状を推定する。最後に、画像解析でひび割れの幅を測定する。構造物検査ドローンは、検査対象であるコンクリート面と撮影用ビデオカメラの離隔を常に一定に保つことができるので、事前に撮影したクラックゲージ上の各クラックの画素数と、検出されたひび割れの幅の画素数を比較すれば、ひび割れ幅を正確に推定できる。検証試験の結果、図14に示す通り、熟練技術者がクラックゲージで測定した結果と十分に一致するひび割れ幅を測定できた。

3.3 打音の測定とAIによる評価

構造物検査ドローンで測定した打音には、大きなドローン機体発生音が含まれるため分析が容易ではない。そこで、打音の分析にサポートベクタマシンによる機械

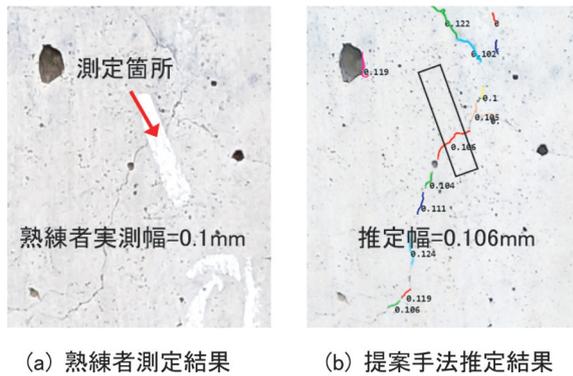


図 14 ひび割れ幅の測定結果の比較

学習を応用した。図 15 に検査ドローンによる打音の評価の流れを示す。まず飛行して検査対象に付着して、検査位置まで走行する。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する。地上の PC

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 で評価する。OK か NG かの評価は、MFCC³⁾ で低次元化した打音のスペクトルを対象にして、OCSVM⁴⁾ が自動的に行う。この AI 判定は、評価対象の打音データが、これまでに AI が学習した正常 (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ある。さらに、地上の PC による AI 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、結果が OK の場合は緑、NG の場合は赤く表示される。地上からビデオ撮影を行って、LED 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れば、打音検査の位置と結果を台帳化することができる。

実用化プロトタイプ機の機能確認と AI 評価の現状の精度確認を目的として、図 16 に示すコンクリート橋で打音測定と AI 評価の実証実験を行った。健全なコンクリートと、木板を貼って打音を変化させた模擬変状を対

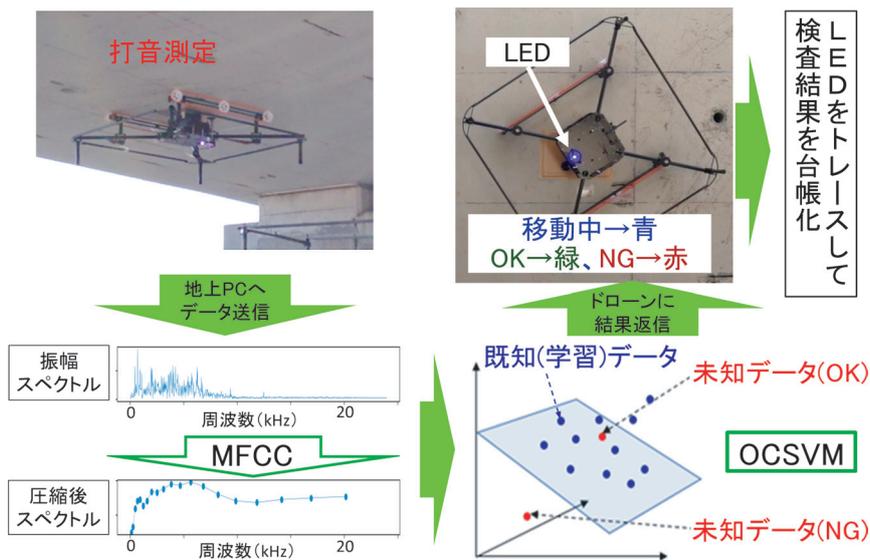


図 15 ドローンで測定した打音の AI 評価手法の流れ

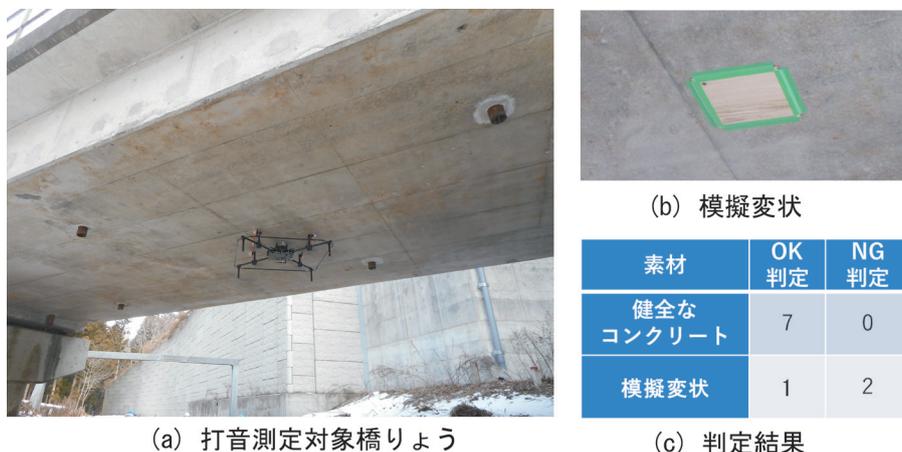


図 16 測定対象橋りょうと健全箇所と模擬変状の AI 判定結果例

象として簡易な判別評価を行ったところ、健全なコンクリート箇所の打音データ約 50 サンプルを教師とした AI 判定試験で、90% の正答率を得た。現状は学習データが少なく、単純な 2 種類のグループの分類を行った段階であるが、今後の学習データの蓄積により、より詳細、正確な判定をめざす計画である。

3.4 鉄筋コンクリート構造のかぶり測定

鉄筋コンクリート構造の表面付近の鉄筋をカバーするコンクリートの厚さを「かぶり」と呼ぶ。このかぶりが薄いと内部鉄筋の腐食などにより、鉄道橋からのコンクリート片の剥落が生じて、公衆への被害につながる場合があり、電磁波等を利用した鉄筋探査機を用いたかぶり測定が実施されている。そこで、かぶり測定作業の効率化に向けて、構造物検査ドローンの適用を検討した。

先に示した図 12 のコンクリート橋桁下面を対象として、図 17 に示す要領でかぶり測定を実施した。その結

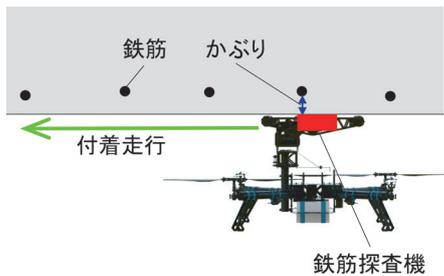


図 17 構造物検査ドローンによるかぶり測定手法

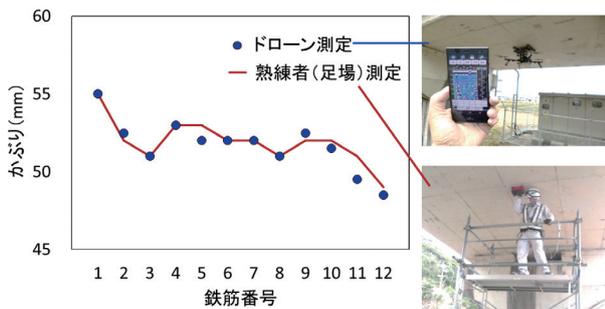


図 18 かぶり測定結果の熟練者測定結果との比較

果、図 18 に示す通り、熟練技術者が足場を架設して測定した結果と十分に一致する測定結果が得られた。

4. おわりに

鉄道インフラ構造物の検査の省力化・安全化を目的とした、ビデオカメラとドローンを用いた遠隔位置からの構造物検査技術の開発状況について説明した。今後も技術・システムの改良や、現場適用時の課題の把握と解決に取り組み、開発技術を効果的に活用した構造物検査体系を提案する計画である。

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た。

謝 辞

本研究における現地測定試験走行試験の実施にあたり、東日本旅客鉄道株式会社、九州旅客鉄道株式会社、三陸鉄道株式会社、伊豆箱根鉄道株式会社の関係各位に多大なご協力を賜った。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 上半文昭：鉄道構造物診断用の非接触振動測定システム、検査技術, Vol.23, No.7, pp.41-47, 2018
- 2) Sutton, M. A., Orteu, J. J. and Schreier, H. W., "Image Correlation for Shape," Motion and Deformation Measurements, Springer, New York, pp.81-118, 2009.
- 3) 徳田恵一, 小林隆夫, 深田俊明, 斎藤博徳, 今井 聖：メルケプストラムをパラメータとする音声のスペクトル推定, 電子情報通信学会論文誌 (A), Vol.J74-A, No.8, pp.1240-1248, 1991
- 4) Scholkopf, B., Platt, J., Shawe-Taylor, J., Smola, A. and Williamson, R., "Estimating the support of a high-dimensional distribution," Neural Computation, Vol.13, No.7, pp.1443-1471, 2001.