

4Kカメラによるインフラ構造物の遠隔・非接触動的挙動観測技術

Sensing Technology for Infrastructure using a High Resolution Video Camera

野田 晃 浩
Akihiro Noda

丸山 悠 樹
Yuki Maruyama

今川 太 郎
Taro Imagawa

日下 博 也
Hiroya Kusaka

松岡 弘 大
Kodai Matsuoka

上半 文 昭
Fumiaki Uehan

要 旨

橋梁（きょうりょう）やトンネルなどの社会インフラの老朽化が大きな社会課題となっており、従来の目視点検に替わる効率的な点検手法の進展が望まれている。そこで筆者らは、4K解像度といった高精細なビデオカメラを用いて構造物を撮影した動画から、画像処理により構造物の全体挙動を計測する技術を開発した。従来の光学式計測手法とは異なり、対象物に特定のマーカーなどを貼り付ける必要はなく、より簡便でありながら同時に多点での計測が可能である。この技術を実際の現場に適用し、既存の変位計測手法と同等の精度を有していることを実証した。また、多点での計測が可能である利点を活（い）かして、従来手法では困難であった構造物の全体的な動きや部材の動作を直感的に理解しやすい形で可視化できることを確認した。

Abstract

Aging social infrastructure such as bridges and tunnels have become a major social issue, and development of an efficient inspection method alternative to conventional visual inspection by people is desirable. We have developed the technology to measure object displacement by image processing. In contrast to the conventional optical measuring method, our method does not require setting a specific marker on the object and it allows multiple point measurement to be performed at the same time. We conducted a field test and the results indicated that our method makes it possible to measure the object displacement with approximately same accuracy as conventional methods. Moreover, we confirmed that the overall and part behavior of the structure, which were difficult to visualize with conventional methods, can be visualized intuitively and easily by taking advantage of multiple point measurement.

1. はじめに

先進国を中心に道路や鉄道の構造物といった社会インフラの老朽化は今や重大な社会課題の1つといえる。特にわが国では高度成長期に建設された構造物が建設後50年を経過し加速度的に老朽化が進むことが懸念されている。しかしそれらを管理していく熟練労働者数は年々減少する傾向にあり、既存の定期目視点検を主とする管理手法から、構造物の耐荷力を適切に評価し対策の種類や時期を最適化することで維持管理の効率化を図るCBM（Condition based maintenance）への移行が検討されている。CBMの実現には、測定に基づく構造物の状態評価が必須となるが、そのためには高い精度で多くの箇所のデータを容易に計測・収集できる技術が必要となる。

そこで筆者らは4K画素の高精細な動画を活用し、インフラ構造物の動的な挙動（変位や振動）を高精度かつ多点で計測する技術を開発した。さらにカメラを利用することで、遠隔から非接触で計測することができ、作業に伴う工事（足場設置、高所作業もしくは計測用マーカーの設置）や保安業務が不要な簡易で現場適用性の高い計測と、直感的にわかりやすい結果の可視化を実現した。

本稿では、第2章で従来技術の概要、第3章で本技術の特徴と計測原理、第4章で従来技術との計測精度の比較検証結果、第5章で本技術を現場適用した場合の例について述べる。

2. 従来技術

インフラ構造物の変位や振動を計測する技術は、接触式と非接触式の2種類に大別できる。前者はリング式変位計や加速度計が、後者はレーザドップラー変位計やビデオカメラを用いた画像変位計測技術が代表例として挙げられる。また、画像変位計測技術としては、サンプリングモアレ法[1]に代表されるような対象となる構造物に特定のマーカーを貼り付けることで計測を可能とするターゲット方式が一般的である。しかし、ここに挙げた従来の計測技術では、インフラ構造物のように大規模な構造物を多点で同時に計測することは困難であった。

3. 4K動画による変位計測技術

そこで筆者らは、ターゲット方式とは対照的に特定のマーカーの貼り付けを必要としないノンターゲット方式の画

像変位計測技術（以下、本手法）の開発を行ってきた。

3.1 従来技術との比較と本手法の特徴

第1表に本手法と従来手法を作業負荷および同時計測可能点数の観点で比較した結果を示す。本手法においては原理上、画像内の全ての箇所を計測点とすることができるため、ターゲット方式に比べ空間的に超高密度な計測が可能である。さらに画像から変位を計測する際のブロックマッチングの最適化および多点計測結果を利用したノイズ低減を行うことで高精度な計測を可能にした。さらに、接触式に比べてセンサ設置にかかる工事や保安業務、車線規制が不要なため、作業負荷および計測にかかるコストを削減できる。

3.2 計測原理

構造物の微小な変位を遠隔から高精度に計測するには、撮影画像内の時間的な移動量を高精度に求める必要がある。本節ではノンターゲット方式における高精度な変位計測方法について説明する。

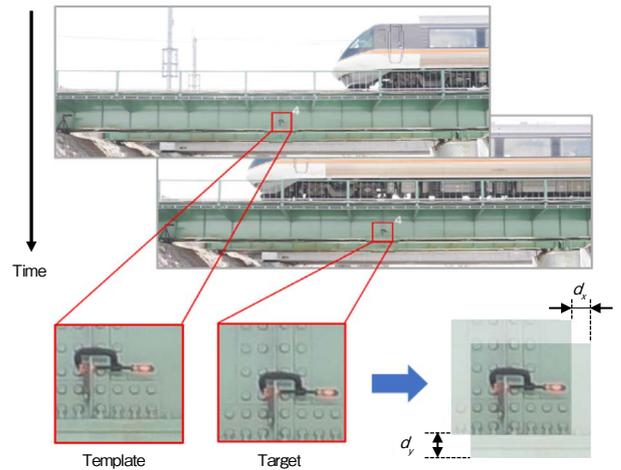
サブピクセル単位での変位は以下の2つのステップを経て算出する。

- (1) ブロックマッチングによりピクセル単位で変位を算出
- (2) (1)で計算される相関値を関数フィッティングにより内挿し、サブピクセル単位の変位 (d_x, d_y) を推定処理の概要を第1図および第2図に示し、上記2つのステップの詳細を以下に説明する。

[1] ブロックマッチングによる変位算出

ブロックマッチングでは、基準となる画像から任意領域の画像を切り出してテンプレート画像（第1図のTemplate）とし、比較する画像から注目領域（第1図のTarget）を切り出してテンプレート画像との相関値を算出する。そして最大の相関値を与える切り出し位置を変位として算出する。この際、画像の切り出しはどちらもピクセル単位で行う。

相関値の評価には各種計算法が提案されているが、屋外では輝度変化が生じやすいため輝度変化に頑健でかつ一般的にも用いられることが多いゼロ平均正規化相互相関（Zero-mean Normalized Cross-Correlation）を採用している[2]。

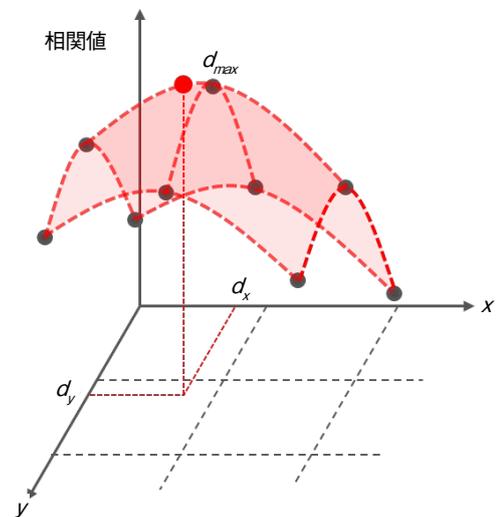


第1図 ブロックマッチングの説明図

Fig. 1 Block matching method

[2] 相関値フィッティングによるサブピクセル変位推定

ブロックマッチングによりピクセル単位で求めた相関値から二次元相関関数（第2図）を推定する。この相関関数の相関値が最大となる位置をサブピクセル単位で算出する



第2図 相関関数とサブピクセル推定の概念図

Fig. 2 Conceptual diagram of sub-pixel measurement

第1表 各種計測方式の比較

Table 1 Comparison of displacement measurement methods

	リング式変位計	レーザドップラー変位計	ターゲット方式画像変位計測	ノンターゲット方式画像変位計測（本手法）
作業負荷	足場設置, 高所作業	反射板設置	マーカー設置	計測対象物への作業不要
同時計測点数	1点	1点	マーカー設置個所数以下	制限なし

ために、相関値が最も大きくなる画素 (d_{max}) とその周辺8画素の相関値に対して二次関数をフィッティングし、二次関数が最大となる位置 (d_x, d_y) をサブピクセル単位の変位とする[2].

高精度推定において誤差要因となるピクセルロッキング (整数値に値が偏る現象) が前記処理で生じることを確認したため、この影響を低減するために Estimation Error Cancellation (EEC) と呼ばれる手法を採用した[3]. EECは0.5画素だけ平行移動した画像も移動量推定に用いることでピクセルロッキングの影響を緩和する手法である.

さらに、相関関数の曲率が大きくなるようにマッチングを行うブロックのサイズや位置を選択することで精度向上を図った.

4. 実橋梁による計測精度の検証

本手法による変位計測精度を実際に供用中の鉄道橋において検証した結果を説明する. 第3図に測定対象とした実橋梁の全景を示す. 当該橋梁は径間長20 mの単純桁橋である. 単線桁であるため列車通過時の挙動が比較的単純であり、精度検証に適した鉄道橋である.



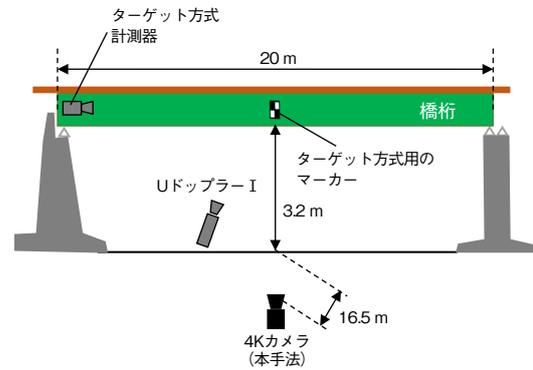
第3図 計測対象とした橋梁
Fig. 3 Overall view of the target bridge

4.1 実験条件

本手法の比較対象として、レーザドップラー変位計 (UドップラーI[4]) およびターゲット方式画像計測器[5]による計測を同時に行った[6][7].

UドップラーIはレーザドップラー速度計の出力を積分することで変位を高精度に計測できる. そのため今回はUドップラーIの計測結果を基準値とした. 一方、画像による計測手法の比較として、ターゲット方式は橋梁の径間中央に設置したLEDターゲットを撮影し、画像処理により変位を計測した. どちらも多くの測定実績を有し、既存のたわみ計測として一般的な手法である. また、各機器の設置状況を第4図に示す. 本手法のカメラは、橋梁全体が撮影されるように、橋梁から16.5 mの位置に設置した. この条件において画像における上下1ピクセルは、橋梁位置にお

る上下9.2 mmに相当する.

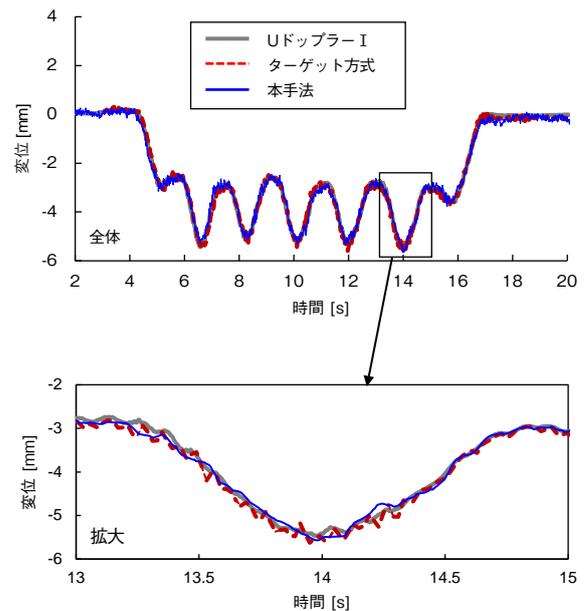


第4図 計測対象と各機器の配置図

Fig. 4 Equipment layout

4.2 橋桁 (はしげた) たわみ量の計測結果

列車が通過した際の径間中央のたわみを本手法, UドップラーI, ターゲット方式により測定した結果を第5図に示す. 本手法の測定結果は、ターゲット方式およびUドップラーIの結果と良く一致しており、従来の計測手法とほぼ同等の精度でたわみを計測可能であることがわかる. また、列車通過時のたわみ量は最大で5.5 mm程度であり、これは画像内ではおよそ0.6ピクセルに相当する. 高精度にサブピクセル変位が計測できることで橋桁全体を遠隔から撮影した画像からでも既存手法と同等精度の計測ができている.



第5図 橋桁中央のたわみ計測結果の比較

Fig. 5 Comparison of displacement measurement results

第2表に各計測手法で得られた最大たわみ量およびUドブローIを基準値とした場合の測定誤差を示す。異なる3手法間の差は高々3%程度であり、それぞれの真値からの誤差も同程度と考えられる。これは、UドブローIの仕様誤差範囲である±5%以内に収まるため、今回の測定条件であれば本手法が変位計測の実務においても利用可能と考えられる。

第2表 計測精度

Table 2 Measurement accuracy

	最大変位 [mm]	誤差 [%]
UドブローI	5.47	-
ターゲット方式	5.63	2.9
本手法	5.64	3.2

第6図に最大たわみ量を計測した時刻の画像を示す。この時刻は車両の連結部が桁中央にある時であることが画像から容易に確認できる。このように周囲の状況を同時に撮影できることによって、視覚的に橋の挙動の背景要因の理解を助けるだけでなく、今回は実施していないが、荷重位置とたわみの関係を定量的に解析するなどの活用も可能である。



第6図 最大たわみ発生時刻の列車位置と橋桁たわみ
Fig. 6 Train position when maximum deflection occurs

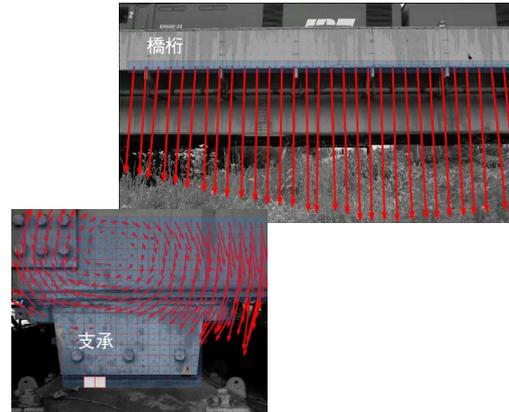
5. 現場適用例と画像計測導入の利点の紹介

本手法はカメラで撮影した画像を用いるため、撮影可能な対象であるならばさまざまな対象物の挙動を計測できるだけでなく、その結果を直感的にわかりやすい形で可視化することも可能である。そこで本手法を実際のインフラ構造物に適用した事例を以下に紹介する。

5.1 鉄道橋の橋桁と支承の同時計測

供用中の鉄道橋において、列車通過時の橋桁のたわみと支承の回転量を計測した例を第7図に示す。支承とは橋梁の上部構造（主桁、主構）と下部構造（橋台、橋脚）の間に設置され、橋桁に掛かる荷重を受ける重要な部材である。第7図は列車通過時の橋桁と支承の変位をベクトルで表示

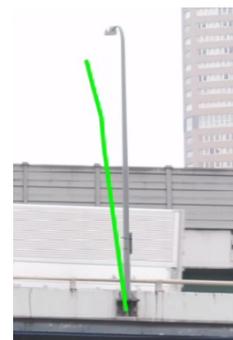
した例であるが、列車が通過する際に橋桁がたわむことにより支点部に生じる回転変形に追従して支承が回転していることがわかる。このように画像を利用して同時に多数の箇所の変位を計測することで、構造物や部材の動作を直感的に理解しやすい形で可視化することができる。



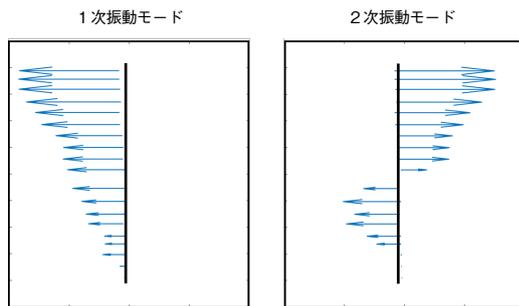
第7図 橋桁と支承を同時計測した例
Fig. 7 Visualized results of a bridge girder and bearing

5.2 照明柱の揺れ

道路橋に設置された照明柱の揺れを計測した結果を第8図（緑線）に示す。本手法においては細い棒状の対象物でも容易にその動きを計測できる。さらに動きの時刻歴データを解析することで例えば第9図に示すような振動モードも計測できる。



第8図 照明柱の揺れ
Fig. 8 Visualized result of the inclination of a lamp post



第9図 振動モードの計測例

Fig. 9 Oscillation modes

5.3 斜張橋のケーブルの振動

最後に、列車通過中の斜張橋ケーブルが動く様子を計測した結果の一例を第10図（黄色線）に示す。ケーブルの張力はその固有振動数を計測することで推定が可能であるが、現在は点検時にケーブルごとに加速度センサを設置するなどして固有振動数を計測している。本手法を用いれば非接触で同時に複数本のケーブルの固有振動数を計測することができ、作業の効率化が見込まれる。



第10図 斜張橋のケーブルの動き

Fig. 10 Visualized movement of cables

6. まとめ

ノンターゲット方式の画像計測技術の開発を行い、実際の現場において実績のある既存の計測手法と同等といえる精度で計測可能であることを実証した。さらに本手法によりさまざまな対象物の挙動を計測できるだけでなく、その結果を直感的にわかりやすい形で可視化できることを実際の構造物を例に示した。

今後は、例えば8Kといったさらに高精細なカメラを活用し、計測アルゴリズム自体の改良による高精度化およびロボスタ性の向上に加えて、損傷・劣化を検出・推定する解析手法や指標を開発し、インフラ維持管理における人的お

よび財政的課題の解決といった社会貢献に寄与することを目指したい。

本手法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「4K画像活用構造物点検サービス」として2018年4月よりサービス事業を開始している。

本研究の一部は、（公財）鉄道総合技術研究所が国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施したものである。

最後に、鉄道構造物を利用した計測・検証実験においては、東日本旅客鉄道（株）長野支社 長野土木技術センターの関係各位のご協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 森本吉春 他, “サンプリングモアレ法による変位・ひずみ分布計測,” *Journal of Vacuum Society of Japan*, vol.54, no.1, pp. 32-38, 2011.
- [2] 奥富正敏 他, “12-1 パターンの検出,” *デジタル画像処理*, (公財) 画像情報教育振興協会, 東京, 2004, pp. 202-205.
- [3] 清水雅夫 他, “画像のマッチングにおけるサブピクセル推定の意味と性質,” *電子情報通信学会論文誌D*, vol.85, no.12, pp. 1791-1800, 2002.
- [4] 上半文昭, “構造物診断用非接触振動システム「Uドブラー」の開発,” *鉄道総研報告*, vol.21, no.12, pp. 17-22, 2007.
- [5] 岡本陽介 他, “運用性に着目した橋梁のたわみ計測システムの開発,” *土木学会第68回年次学術講演会概要集*, VI-081, pp. 161-162, 2013.
- [6] 松岡弘大 他, “ノンターゲット光学式測定による桁たわみ形状測定の精度検証と適用性検討,” *土木学会論文集A2 (応用力学)*, vol. 74, no. 2, pp. I-715-I-726, 2018.
- [7] 松尾賢 他, “映像処理技術等を活用した橋りょう挙動把握の精度検証について,” *土木学会第72回年次学術講演会概要集*, VI-968, pp. 1935-1936, 2017.

執筆者紹介



野田 晃浩 Akihiro Noda
テクノロジー本部 デジタル・AI技術センター
Digital & AI Technology Center, Technology Div.



丸山 悠樹 Yuki Maruyama
テクノロジー本部 デジタル・AI技術センター
Digital & AI Technology Center, Technology Div.



今川 太郎 Taro Imagawa
テクノロジー本部 デジタル・AI技術センター
Digital & AI Technology Center, Technology Div.
博士 (工学)



日下 博也 Hiroya Kusaka
テクノロジー本部 デジタル・AI技術センター
Digital & AI Technology Center, Technology Div.
博士 (工学)



松岡 弘大 Kodai Matsuoka
公益財団法人 鉄道総合技術研究所
Railway Technical Research Institute
博士 (工学)



上半 文昭 Fumiaki Uehan
公益財団法人 鉄道総合技術研究所
Railway Technical Research Institute
博士 (工学)