

非接触変位計測システムへの家庭用 DV カメラの応用について

Study on Applicability of DV Camera for Household use to Non-Contact Displacement Measuring System

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 安達一憲 (Kazunori Adachi)
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 宮森保紀 (Yasunori Miyamori)
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 小幡卓司 (Takashi Obata)
 北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
 北海道大学大学院工学研究科 F 会員 佐藤浩一 (Koichi Sato)

1 はじめに

一般に、橋梁は社会基盤施設を構成する主要な構造物の一つであり、道路、鉄道などにおける橋梁を含んだ交通ネットワークの供用期間中において、常にその機能を保持し続けることが必要であることは自明である。我が国においては、2004 年に第一次道路整備五カ年計画の開始から 50 年を迎え、それに伴い供用開始後 40～50 年程度以上となる橋梁が急激に増加し、2021 年には 5 万橋に達すると予測されている¹⁾。我が国における今後の経済状態、あるいは地球環境への負荷低減を考慮すれば、これらの橋梁に限らず老朽化した構造物の保有性能を将来にわたって維持し続けることが重要であると考えられ、維持管理および補修補強を含めた広義のメンテナンスを効率的かつ適切に実施することが、21 世紀における大きな課題となっている。上記を実現するためには、何らかのデータに基づいた健全度診断や損傷同定が不可欠であることから、近年これらの研究が盛んに行われるようになってきた。従来の主な点検手法あるいはデータ収集方法は、目視に基づくものであったが、上述のような点検を必要とする橋梁の急激な増大に対応することは、専門技術者の不足などを考慮するとほとんど不可能である。そこで最近では、健全度診断あるいは安全性の評価に用いるために、構造物の静的および動的な性能をある程度正確に把握して、逆解析的に損傷同定・健全度診断を行おうとする傾向にある。中でも振動の短期および長期モニタリングによる動的挙動の変化を把握することは、橋梁構造物の健全度診断を簡便かつ容易に実現するための、極めて重要な一項目であると思われる。

構造物の振動測定用のセンサーとしては、これまで種々の動作原理に基づいたデバイスが開発されており、観測対象となる構造物や、応答加速度・変位などの得べき物理量に応じて各種の装置が用いられている。ここで、物理量としての応答変位に言及すれば、車両走行に伴う衝撃などのノイズ成分の影響を受けにくく、構造物の挙動を非常に理解しやすい形で捉えることが可能なため、健全度評価などへの応用は有効であると考えられるが、従来型の接触式の計測デバイスでは、測定に際して測定位置近傍に固定点が必要であるといった大きな欠点を有している。また、現在では電荷結合素子(CCD)やレーザー光を用いた光学式変位計や静電容量を用いた変位計などの非接触変位計も使用されるようになってきつつある^{2), 3)}。これらのセンサーは計測可能な振動数範囲が広く、高分解能であるため精度の高い観測が可能であるが、装置が非常に高価であることから、橋梁の短期モニタリングはともかくも、長期にわたる振動モニタリングについては、現時点あるいは将来においても一般的な手法にはなり得ないと推定される。よって、廉価で扱いやすい非接触による変位計測手法の開発は、橋梁構造物の維持管理などを念頭においたモニタリングシステムの構築を効果的に行うために極めて重要であると考えられる。

一方、近年では CCD カメラの小型軽量化、低価格化

やコンピュータの演算処理能力の向上によって、比較的安価かつ簡便にデジタル動画像の記録とコンピュータによる画像処理ができるようになってきた。このため、デジタルビデオカメラにより構造物の振動を撮影し、フレーム毎に構造物の位置の変化を算出すれば、前述のような光学式変位計と同様の原理で構造物の変位振幅を得ることが十分可能であり、レーザーなどの専用機器を用いずとも取り扱いが容易な振動測定システムが構築できるものと思われる。

以上を踏まえて、本研究では一般的なデジタルビデオカメラを用いて、構造物の動的変位を簡便かつ高精度で計測するための基礎的検討を行うことを目的とする。

測定対象の構造物は、本研究室で従来から用いていた 3 層ラーメン構造物であり、追跡用ターゲットを設置した上で 1 次および 2 次の減衰自由振動を生じさせ、これをビデオカメラで撮影した。この撮影結果を、デジタル動画像としてパーソナルコンピュータに取り込み、各フレーム毎にターゲットと背景を 2 値化して位置検出を行い、構造物の変位振幅の算出を試みた。また、ビデオカメラによる撮影と同時にひずみゲージ式加速度計によって応答加速度を計測し、得られた加速度波形から時間積分によって変位波形ならびにフーリエスペクトルを求め、両者を比較することにより、固有振動数あるいは最大変位などに関して検討を行った。したがって、本研究はこれらの結果について報告するものである。

2 測定方法

本研究では、吊橋および斜張橋などの鋼製タワーを想定した高さ 2.1m、重量 409N の 3 層ラーメン構造物を計測対象とした。図-1 に計測対象の構造物の一般図を示す。また、表-1 に実験供試体の振動特性を示す。この構造物を人力加振により 1 次モードおよび 2 次モードが卓越す

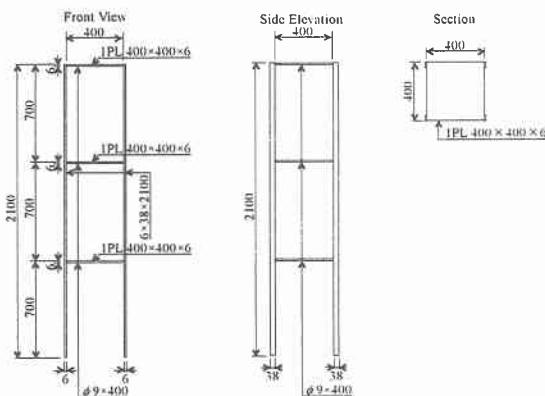


図-1 実験供試体一般図

表-1 実験供試体の振動特性

モード次数	固有振動数	減衰定数
1st.	1.96Hz	0.51%
2nd.	6.54Hz	0.43%

るように強制加振し、加振終了後の減衰自由振動の撮影ならびに応答加速度の計測を実施した。

非接触で変位計測を行う場合、対象物のある一点に着目し変位を計測するのが一般的であるが⁴⁾、本研究でも一辺2cmで白色の標点を計測対象の上層部に写真-1のように接着し、この標点の位置の変化を市販のデジタルビデオカメラ(Victor GR-DVL700)で撮影した。本カメラの主な仕様は、1/3 型プログレッシブ CCD、68 万画素(撮像エリア:ビデオ約 36 万画素・DSC 約 63 万画素)、レンズ: F1.8、光学 10 倍ズーム/デジタル 200 倍ズーム($f=5.0\sim 50\text{mm}$)、フレームレート: 30fps である。撮影データは、デジタル動画としてパソコンに取り込んで 1 コマずつ静止画像に変換し、この静止画像に画像処理を加えることで標点の位置の変化をピクセル単位で算出した。デジタルビデオカメラで撮影した画像をコンピュータに取り込む際のファイル形式については、AVI(Audio Video Interleaving)、MPEG(Moving Picture Experts Group)など様々な形式が知られているが、本研究では情報技術の分野における国際標準であり^{5),6)}、他の形式に比べファイルサイズを小さくすることができる MPEG を適用するものとし、その中でも最もファイルサイズが小さい MPEG-1 を使用した⁷⁾。本研究で作成した MPEG ファイルの詳細を表-2 に示す。

また、2G 加速度ピックアップを標点と同様に供試体の最上層に設置し、標点の撮影と同時に加速度の計測も行った。この測定方法は、加速度ピックアップから動ひずみ計、A/D 変換ボードを介して直接データをパソコンに入力することとした。なお、サンプリング周波数は 200Hz を用いている。

3 解析手法

3. 1 線形加速度法

非接触計測によって得られた応答変位の妥当性を検討するために、撮影と同時に計測した加速度波形から変位を推定し、比較検討を行うこととした。

この推定には、各時間ステップにおける応答加速度が線形であると仮定した線形加速度法の概念を導入し、応答速度ならびに応答変位を次式のように表現した⁸⁾。

$$\dot{u}(t+\Delta t)=\dot{u}(t)+\frac{1}{2}[\ddot{u}(t+\Delta t)+\ddot{u}(t)]\Delta t \cdots \cdots (1)$$

$$u(t+\Delta t)=u(t)+\frac{1}{2}[\dot{u}(t+\Delta t)+\dot{u}(t)]\Delta t \cdots \cdots (2)$$

ここで、 u は変位応答、 t は時間、 Δt は時間刻みを表している。今回の加速度計測では、 $\Delta t=0.005(\text{sec})$ に設定している。

しかしながら、実験により得られた加速度データに式(1)および式(2)を適用した場合、ノイズの影響によって時間の経過に伴って誤差が生じ、甚だしい場合には数値積分によって得られた応答変位が、もはや振動的な挙動を示さないようなことも起こり得ることが知られている。この原因としては、上述のように A-D 変換での量子化誤差や計測対象以外からの偽信号などのノイズが大きく影響すること、また、加速度ピックアップを初期化した場合に、その値が完全にゼロにはならず、若干の誤差が生じているため、時間軸に対して計算が進むにしたがい、これらが蓄積されてしまうためであると考えられる。これらの対策として、移動平均法⁹⁾を用いて加速度データのノイズ成分を除去してから応答値を計算し、それで

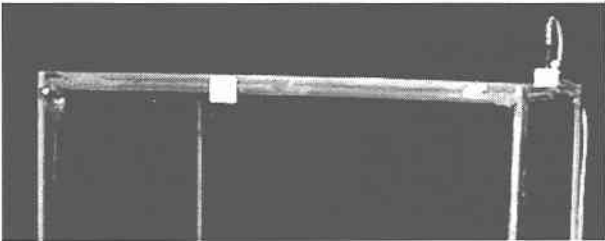


写真-1 標点

表-2 デジタル動画諸元

ファイル形式	MPEG-1
解像度	352×240 画素
フレームレート	30fps
ビットレート	1.5Mbps
画質	VHS 相当

もなお誤差が生じる場合、応答値に補正計算を行うことにした。

まず移動平均法に関しては、最も一般的に用いられ、数多くの手法が提案されているノイズの除去あるいは平滑化の方法である。本手法は、時間ステップ毎にその点と前後数点のデータに重み関数をかけることでノイズの平滑化を行うものである。計測データを n 個の離散値 $x(i)$ (ただし、 $i=1,2,\cdots,n$)で表し、 N ($=2m+1$)個の離散点からなる重み関数 $w(j)$ (ただし、 $j=-m,\cdots,-1,0,1,\cdots,m$)とすると、平滑値 $y(k)$ (ただし、 $k=m+1,m+2,\cdots,n-m$)は

$$y(k)=\frac{1}{W}\sum_{j=-m}^mw(j)\cdot x(k+j)\cdots \cdots (3)$$

$$W=\sum_{j=-m}^mw(j)\cdots \cdots (4)$$

と書くことができる。ここで、 W は正規化のための定数である。重み関数については、一般に広く適用されており、数学的手法にも基づいている 2 次・3 次多項式適合法を採用した。2 次・3 次多項式適合法は、測定波形が各時間ステップ点の近傍で 2 次曲線として表現できると仮定して、この近傍内で最小 2 乗法により測定波形と 2 次曲線を適合させる方法である。この場合、重み関数 $w(j)$ は

$$w(j)=\frac{1}{W}\{3m(m+1)-1-5j^2\}\cdots \cdots (5)$$

$$W=(4m^2-1)(2m+3)/3\cdots \cdots (6)$$

により計算される。重み関数の幅 N については、決定するための基準が与えられていないため、本研究では、予備解析より $N=7$ として計算を行った。

次に、補正計算については、測定データに移動平均を適用しても、なお時間軸を中心とした波形にならない場合において、推定した応答値に対し数値的な補正を加えることで修正を加えることとした。本研究で用いた補正手法は、推定した応答波形が、任意の単位時間においてある傾きを持った直線が中心軸となっているものと仮定し、1 周期を単位時間として傾きを求め、それに応じて

補正を行うものである。

以上の手順を用いて、応答加速度データから変位の推定を行い、非接触計測との比較を試みた。

3. 2 画像処理

本研究では、MPEG 動画から得られたフレーム毎の静止画より標点部分の重心位置を求め、重心の各時間における移動距離を構造物の変位として得るものである。標点の重心を算出するための解析手順としては、静止画像の2値化、白色領域のラベリング、白色領域の重心の計算という過程を経ている¹⁰⁾。

一般に画像に対して何らかの処理を施す場合、情報量を少なくし処理の効率化を図るために、2値化画像へ変換することが通常行われている¹¹⁾。2値化画像とは、グレイ・レベルと呼ばれる0(黒)～255(最大輝度)で量子化された画像をある基準値(以下、閾値と称す)より小さい場合は0(黒)、大きい場合は1(白)の2値のみを輝度を持つ画像に変換したものである。本研究においても、動画から図-2のようなグレイ・レベルの静止画を作成し、予備解析により標点部分が抽出できるような閾値を決定後、2値化画像への変換を行った。

次に白色領域のラベリングとは、2値化画像内の白色の領域に自然数を順に割り当てる処理である¹²⁾。この処理を行うことにより、領域の個数や各々の領域の面積などを容易に計算することが可能となる。ラベリング後、標点以外の領域成分を削除するため、標点以外の領域の輝度を0(黒)にした。この処理を終えた後の静止画像を図-3に示す。

以上の処理により標点部分の領域のみが1の輝度を持つ画像が作成されるため、この領域の重心を求めればその座標から変位情報を得ることができる。重心座標(x, y)は、領域の分布が $f(m, n)$ であるとき、

$$x = \frac{\sum_m \sum_n m f(m, n)}{\sum_m \sum_n f(m, n)} \cdots \cdots (7)$$

$$y = \frac{\sum_m \sum_n n f(m, n)}{\sum_m \sum_n f(m, n)} \cdots \cdots (8)$$

のように表される。上式により重心座標を求め、1コマ目の重心座標を基準に相対位置を計算することにより構造物の変位を計算した。ラベリング処理後の画像上に重心座標をプロットしたものを図-4に示す。

4 解析結果とその考察

振動計測実験で得られた加速度波形、加速度から推定した変位波形ならびに DV カメラにより計測した変位波形を図-5および図-6に示す。なお、今回の撮影条件下における MPEG ファイルの分解能は1画素(ピクセル)当たり一辺 $6.90 \times 10^{-4} \text{m}$ の正方形となり、実験結果の最大振幅に対しては十分な分解能を有するものと思われる。

解析結果について考察を加えると、図-5の応答変位波形に関しては、(b)の加速度応答より推定した変位における最大振幅が $1.76 \times 10^{-2} \text{m}$ であるのに対し、(c)の DV カメラにより計測した応答変位では $1.79 \times 10^{-2} \text{m}$ とほぼ一致していることがわかる。また 0～5sec 間の減衰定数を

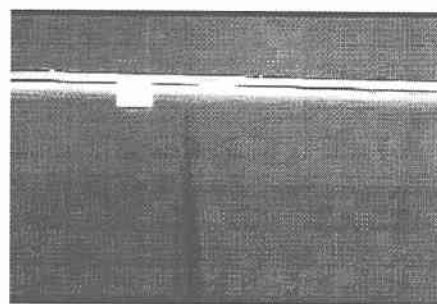


図-2 グレイ・レベル変換後の静止画像

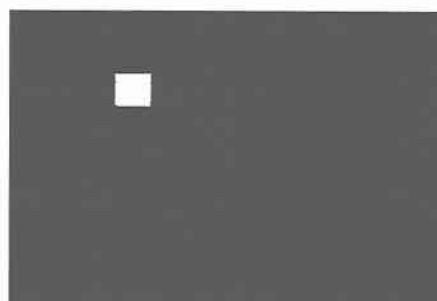


図-3 2値化後の静止画像

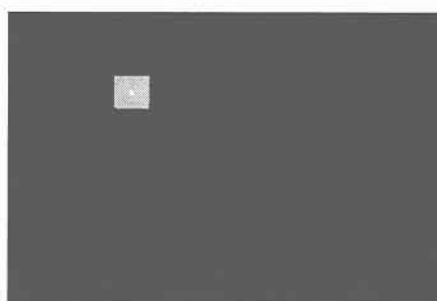
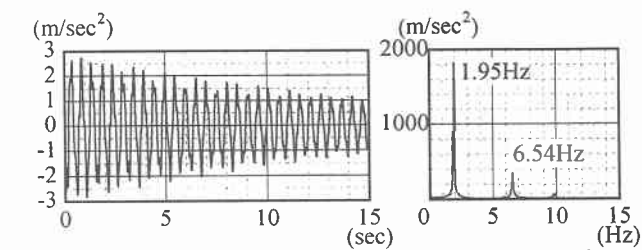


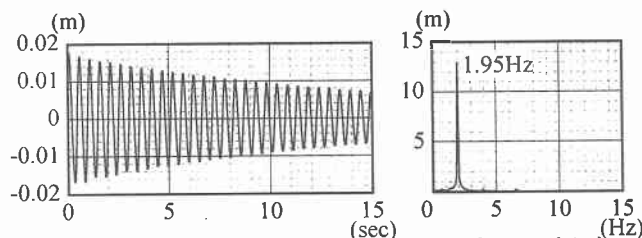
図-4 ターゲットの重心

比較すると、(b)は 0.55%、(c)では 0.65%とほぼ同等な値を有していることから、本研究の測定条件下においては、DV カメラを用いた変位計測システムは構造物の振動を十分な精度で測定することが可能な手法であることが判明した。フーリエスペクトルについては、その卓越振動数は(b)の推定変位では 1.95Hz に卓越成分が見られるのに対し、(c)の場合には 1.93Hz であり、多少の差が生じていることが確認された。しかしながら、これは加速度計測がサンプリング周波数 200Hz、データ点数 4096 点であるのに対し、DV カメラによる計測では 30Hz、512 点であるため、フーリエスペクトルの分解能が異なることに起因しているものと思われる。このことを考慮すると、推定変位スペクトル、計測変位スペクトルともに卓越成分の振動数は一致しているものと考えられ、構造物の卓越応答が DV カメラのナイキスト周波数以内であれば、データ点数を増加することにより、更なる精度の向上も期待しうるものであると推定される。

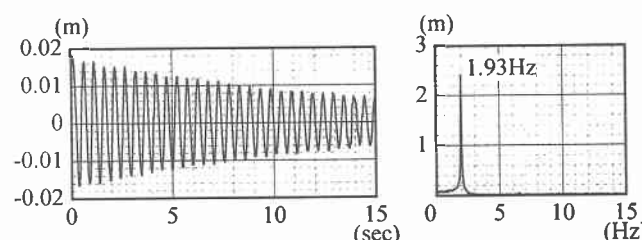
次に、図-6の2次モード加振について考察を加えると、(b)の推定変位と(c)の計測変位を比較して振幅に若干の差が見られるものの、全体的にはほぼ同一の波形になっている。これは、2次モードの固有振動数が 6.54Hz、DV カメラのナイキスト周波数の 1/2 が 7.5Hz であることから、両者がかなり接近しており、2次モードの応答変位における各周期毎の最大値を必ずしも正確に捉えているとは限らないため、1次の場合に比してやや精度が低下



(a) 計測した加速度



(b) 加速度より推定した変位



(c) DV カメラにより計測した変位

図-5 1次モード加振における解析結果

したものと同様と判断される。またフーリエスペクトルにおいても、前述の分解能の違いを考慮すると、(b)、(c)ともに1次モードおよび2次モードの卓越振動数が一致しているものと推定され、2次モードのようなサンプリング周波数に対して、比較的高い振動数を対象とした場合においても本手法のある程度の適用性が確認された。

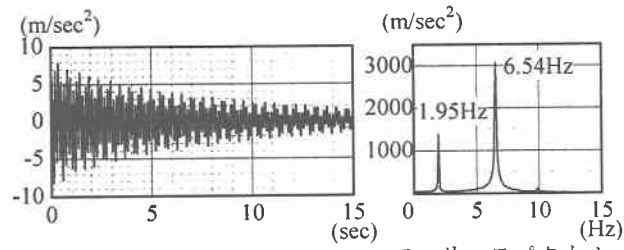
以上の結果から、精度よく計測を行うには対象とする最大振動数の4倍程度にサンプリング間隔を設定するのが一般的であるが³⁾、現在の技術水準では家庭用DVビデオカメラのサンプリング間隔は1/30secが上限であり、7.5Hz以上の高振動数の計測には限界があるものと思われる。また、分解能はフレームサイズに対するターゲットの割合により設定が可能であり、ズームの性能は家庭用カメラでも比較的良好であることから、振動振幅がある程度小さい場合の計測に関しても容易に適用可能であるものと考えられる。

5 おわりに

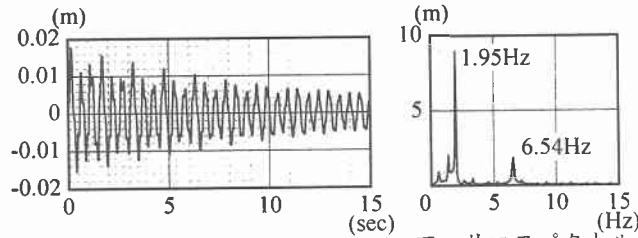
以上のように、本研究は一般的な家庭用デジタルビデオカメラを用いて、構造物の動的変位を簡便に計測するための基礎的検討を行うことを目的として、加速度応答波形から推定された応答変位との比較を通じて、考察を加えたものである。

解析結果からは、対象とする構造物の卓越振動数が、DVカメラのナイキスト周波数の1/2程度であれば、比較的良好な精度で、最大変位、卓越振動数の両者とも十分に把握することが可能であると判明した。また、家庭用カメラの有するズーム性能から、振動振幅がある程度小さい場合の計測に関しても比較的容易に適用可能であるものと判断される。

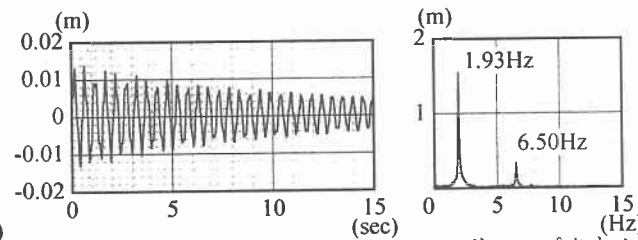
したがって、このようなデジタルビデオカメラの更な



(a) 計測した加速度



(b) 加速度より推定した変位



(c) DV カメラにより計測した変位

図-6 2次モード加振における解析結果

る性能向上によって、橋梁構造物の振動モニタリングへの適用は十分可能であり、維持管理・損傷同定などの総合的なメンテナンスへのデータの活用が期待できるものと思われる。

【参考文献】

- 1) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理、土木学会論文集、No.501/I-29, pp.1-10, 1994.
- 2) 大島俊之編：橋梁振動モニタリングのガイドライン、土木学会、2000.
- 3) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析、技報堂出版、1993.
- 4) 井舎英生、北田俊行、山口隆司、宮脇潔、乙黒幸年、時譲太：道路橋の標識柱・照明柱における損傷の早期発見に関する基礎的研究、橋梁振動コロキウム'01、pp.239-244, 2001.
- 5) 江原暉将、石田晴久編：IT革命最前線、情報処理学会、2000.
- 6) Thomas Sikora：MPEG Video Webpage, <http://www.mpeg-video.de/>, March 1 1997.
- 7) 御手洗毅：VideoStudio4 公式マニュアル、メディア・テック出版、2001.
- 8) 山口宏樹：構造振動・制御、共立出版、1996.
- 9) 南茂夫：科学計測のための波形データ処理、CQ出版、1986.
- 10) 高井信勝：「信号処理」「画像処理」のためのMATLAB入門、工学社、2000.
- 11) 酒井幸市：デジタル画像処理入門、コロナ社、1997.
- 12) 岡崎彰夫：はじめての画像処理技術、工業調査会、2000.