

実現理論による多入力構造同定システムの実現と現場計測への適用

長崎大学大学院 学生会員 ○船原祐樹 長崎大学工学部 フェロー 岡林隆敏
長崎県土木部 正会員 中 忠資 長崎大学工学部 正会員 奥松俊博

1. はじめに

構造物の振動特性(振動数・減衰定数・振動モード)の変化から、構造物の健全度評価を行うためには、リアルタイムに振動特性を推定し、構造物の変化をいち早く確認することが可能なシステムの構築が必要である。本研究では、実現理論を用いて振動特性を自動推定するシステムを、数値解析ソフトウェア MATLAB を用いて開発し、さらに仮想計測器ソフトウェア LabVIEW に組み込むことでリアルタイム自動計測を可能にした。今回、システムの有効性を実橋梁より得られる常時微動データにより検証する。

2. 多入力構造同定システム

1) 計測システムの構成

本システムは、図-1 のような構成になっており、計測現場に設置した PC が計測、解析、データの保存を行う。本システムは、リアルタイムに構造物の常時微動を計測し、振動特性を推定する。よって、構造物の変化にいち早く気付くことができるため、振動特性に着目した維持管理を行うことが可能である。システムの計測画面を図-2 に示す。また、取得した常時微動データは毎回保存される。

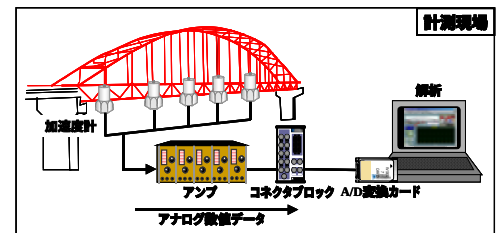


図-1 計測システムの概要



図-2 システムフロントパネル

2) 実現理論¹⁾

本システム開発にあたり、用いた構造同定手法は ERA 法、ERADC 法である。ここでは ERA 法の概要を示す。

・ERA 法 (Eigensystem Realization Algorithm)

計測データの自己相関関数より、ハンケル行列 $\mathbf{H}(k-1) = \mathbf{P}_\alpha \mathbf{A}^{k-1} \mathbf{Q}_\beta$ を形成する。ここに、 $\mathbf{P}_\alpha$: 可観測行列、 $\mathbf{Q}_\beta$: 可制御行列である。この時の $k=1$ および $k=2$ の場合の特異値分解について考える。

$$\mathbf{H}(0) = \mathbf{P}_\alpha \mathbf{Q}_\beta = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T = \mathbf{U} \mathbf{S}^{1/2} \mathbf{S}^{1/2} \mathbf{V}^T \quad (1)$$

$$\mathbf{H}(1) = \mathbf{P}_\alpha \mathbf{A} \mathbf{Q}_\beta \quad (2)$$

観測点数 m の場合を $\mathbf{E}_m^T$ とすると、固有値、固有振動モードは、

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \mathbf{S}^{-1/2} \mathbf{H}(1) \mathbf{S}^{-1/2} \mathbf{V}^T = \mathbf{P}_\alpha^{-1} \mathbf{H}(1) \mathbf{Q}_\beta^{-1} \quad \mathbf{C} = \mathbf{E}_m^T \mathbf{U} \mathbf{S}^{1/2} \quad (3)$$

(3)式、において、 $\mathbf{A}$ の固有値の実数部分 X_{Re} と虚数部分 X_{Im} より、固有円振動数 ω_k 、減衰定数 h_k が得られる。計算式は次式に示す。 Δ はサンプリング時間を示している。

$$h_k \omega_k = (-1/\Delta) \ln \sqrt{X_{Re}^2 + X_{Im}^2} \quad (4)$$

$$\omega_k \sqrt{1-h_k^2} = (1/\Delta) \tan(X_{Im} / X_{Re}) \quad (5)$$

3) システムを構成するプログラム

図-3 にプログラムの構成を示す。本システム内の解析の核の部分は、数値解析ソフトウェア MATLAB によって作成しており、このプログラムを仮想計測器ソフトウェア LabVIEW に組み込むことで、リアルタイム振動特性計測を可能としている。さらにこのプログラムは、計測を開始してから振動特性を算出するまでのすべての

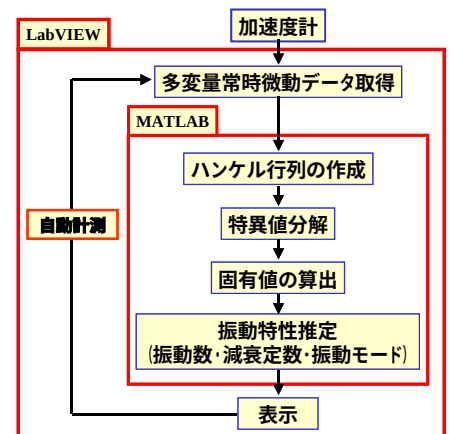


図-3 プログラムの構成



写真-1 樺島大橋全景

手順を自動化している。

3.対象橋梁

本手法を用いて振動特性を推定し、システムの有効性を検証する。対象橋梁は、写真-1 に示す長崎県市野母町に架設されている樺島大橋である。橋長 227m、幅員 7.5m、最大支間 153mの鋼ランガー桁の道路橋である。図-4 にその一般図と加速度計の設置位置を示す。今回、計測点数は 8 点とし、8 点分のデータをリアルタイム計測することで振動特性の推定を行った。表-1 に樺島大橋の橋梁要目、表-2 に 2 次元 FEM 解析²⁾ により求めた固有振動数、図-5 に 1 次から 5 次振動までの固有振動モードを示す。本研究では、加速度計により計測された桁の鉛直方向の振動を常時微動とした。

4.計測実験

仮想計測器ソフトウェア LabVIEW を用いて、多入力構造同定システムを構成し、振動特性を推定した。写真-2 は、振動特性取得のために構成した計測システムと、加速度計の設置状況を示している。

また図-6 に、得られる常時微動波形を示す。本研究では、サンプリング時間を 0.01(秒)とし、30 秒間の常時微動データを 1 回区分とした 8 点分の多変量データから、50 回分の振動数・減衰定数と、推定される振動モードよりシステムの有効性の検証を行う。図-7 に示すのは、ERA 法により推定された振動モードである。固有振動モードと比較しても、各次振動共に固有振動モードと同等の値が推定されていることが確認できる。振動数に関しても、50 回分の平均値が、固有振動数と同等の精度で推定できることを確認した。また ERADC 法を用いたシステムにおいても振動数、減衰定数、振動モード共に、同程度の推定精度を得ることができた。これより、本システムがリアルタイム振動特性自動推定に対し、有効であることを確認した。

5.まとめと今後の課題

本研究では、構造物の多変量常時微動データから振動特性（振動数・減衰定数・振動モード）を自動推定することのできるリアルタイム計測システムを開発した。本システムを樺島大橋に適用してリアルタイムヘルスマニタリング実験を行い、その実験結果からシステムの有効性の検証を行った。その結果、ERA 法、ERADC 法、ARE 法共に、現場計測に有効であることを確認した。今後の課題としては、本システムを用いて実橋梁長期遠隔モニタリングを行い、橋梁維持管理計画へ適用させることである。[参考文献]1) Jer-Nan Juang: Applied System Identification, Prentice Hall, 1933. 11
2)原忠彦：衝撃加振による大規模構造物振動特性推定法の実用化に関する研究，1998. 11

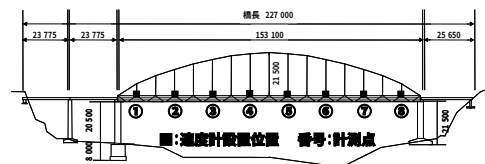


図-4 樺島大橋一般図

表-1 橋梁要目

構造形式	鋼ランガー桁 (ランガートラス式)
橋長	227m (最大支間152m)
幅員	7.5m

表-2 固有振動数

	固有振動数 (Hz)
1次	0.67
2次	1.04
3次	1.89
4次	2.29
5次	3.63
6次	4.90
7次	5.64

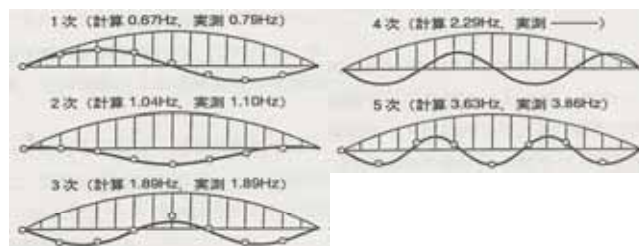


図-5 固有振動モード



写真-2 常時微動計測システム

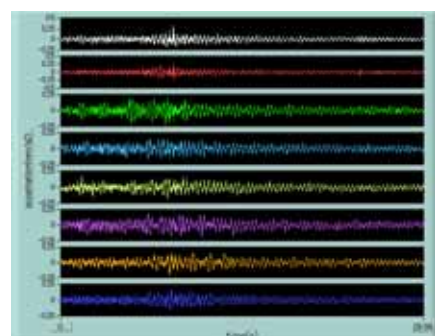


図-6 多変量波形データ

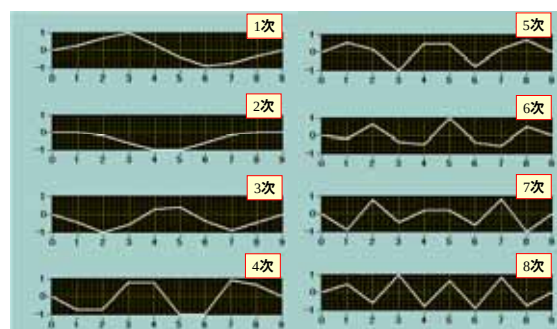


図-7 振動モード (ERA 法)