2 段階推定法による高精度振動特性自動推定システムの開発

長崎大学大学院　学生会員　○舩原祐樹　　長崎大学工学部　フェロー　岡林隆敏
長崎大学工学部　正会員　　奥松俊博　　長崎大学大学院　学生会員　房前慎一

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，高精度に振動特性を推定するアルゴリズムが必要である．そこで本研究では，AR モデルと自己相関関数曲線適合を用いて振動特性を高精度に自動推定するシステムを，仮想計測器ソフトウェア LabVIEW を用いて開発した．本手法の有効性を，実橋梁より得られる常時微動データにより検証した．

2．構造同定手法[1)]

構造同定手法の流れは，まず，速度応答データの自己相関関数を算出する．それにより AR モデルにおけるパラメータを決定し，複素固有値解析を行うことによって，振動特性を推定する．これを 1 段階推定と称することとする．ここで，AR モデルは次式で表すことができる．

$$y(k)+\sum_{s=1}^{n} a_s y(k-s)=e(k) \qquad (1)$$

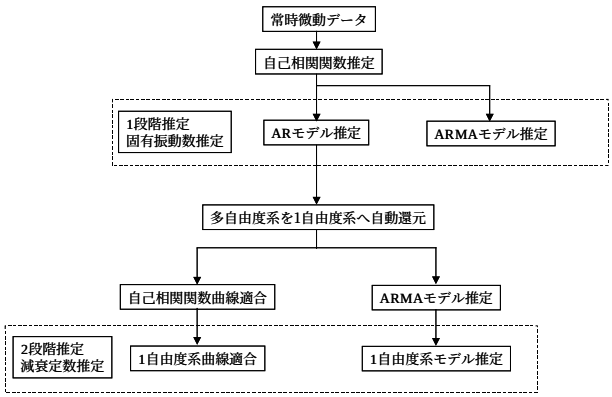
AR モデルの特性方程式は，

$$z^n-a_1 z^{n-1}-a_2 z^{n-2}-\cdots\cdots-a_n=0 \qquad (2)$$

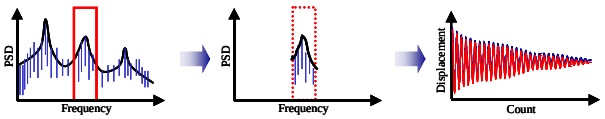
となり，この方程式の根は，

$$z_k = X_{\mathrm{Re}}^{k} \pm iX_{\mathrm{Im}}^{k} \qquad (3)$$

である．この根と振動パラメータの関係から，AR モデル（1 段階推定）による振動数 ω_k と減衰定数 h_k が推定できる．



図－1　解析の流れ



図－2　バンドパスフィルタによる処理の流れ

1 段階推定で得られた ω_k と h_k を用いて自己相関関数曲線適合を行い，さらに高精度に振動特性を推定する．これを 2 段階推定と称す．図－2 は，多自由度系にフィルタ処理をして得られる k 次振動の自己相関関数算出までの流れを示している．この自己相関関数は次式により定義される．

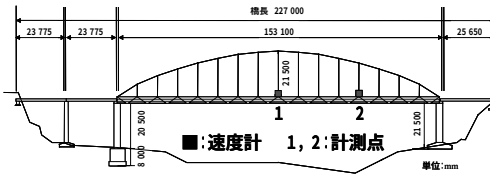
$$R_k(t)=A_k exp(-2\pi\omega_k h_k t)sin\left(2\pi\omega_k\sqrt{1-h_k^2}t+\theta_k\right) \qquad (6)$$

ここに，A_k は振幅，θ_k は位相のずれを示す．実測データ $\tilde{R}_k$ に(6)式を推定関数として曲線適合させる．非線形最小二乗法より二乗誤差 ε_{kt} を最小にするような最適なパラメータを決定する．二乗誤差 ε_{kt} は次式により決定される．

$$\varepsilon_{kt}=\sum_{s=0}^{N-1}\left|\tilde{R}_k-R_k\right|^2 \qquad (7)$$

これより，減衰定数と固有振動数を推定する．以上の解析の流れを図－1 に示した．

写真－1　樺島大橋全景



図－3　一般図と計測位置

表－1　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**

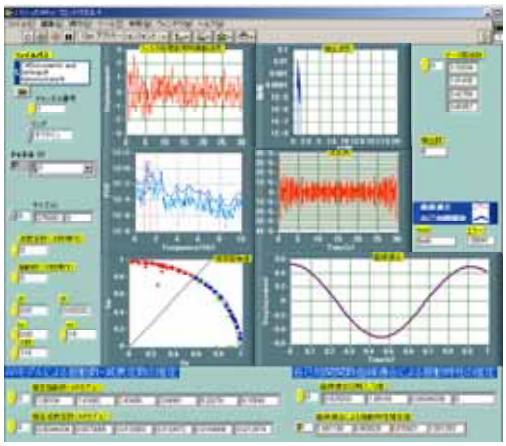
3．対象橋梁および構成するプログラム

本手法を用いて振動特性推定を行い，精度検証を行う．対象橋梁は，写真－1 に示す長崎県長崎市野母崎町に架設されてある樺島大橋を対象とした．橋長 227m，幅員

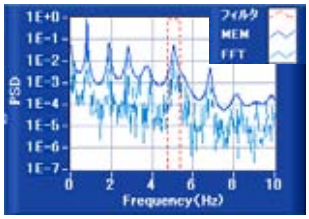
7.5m，最大支間 153mの鋼ランガー桁の道路橋である．図－3 にその一般図と速度計の設置位置，表－1 に固有振動数を示す．本研究では，速度計により計測された桁の鉛直方向の振動を常時微動とした．

4．振動特性自動推定プログラム

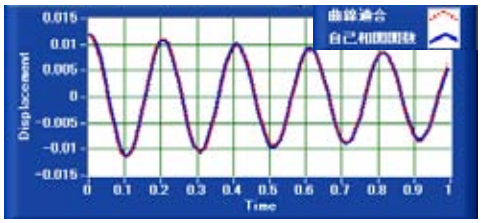
今回，仮想計測器ソフトウェア LabVIEW により，振動特性を推定した．図－4 に示すのは，LabVIEW を用いた，AR モデルと自己相関関数曲線適合による振動特性推定プログラム画面である．本研究では，サンプリング時間を 0.01(秒)とし，30 秒間の常時微動データを 1 回区分とした，100 回分の振動数・減衰定数より精度検証を行う．図－5 に，バンドパスフィルタによる 5 次振動抽出処理状況を示す．図－6 は，5 次振動に対し曲線適合させた場合の自己相関関数の結果である．



図－4　プログラム画面



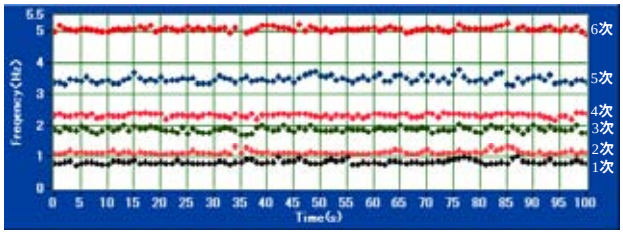
図－5　フィルタ処理(5 次)



図－6　曲線適合状況(5 次)

5．検証結果

図－7 は，計測点 1 より推定された曲線適合による 2 次，4 次振動，計測点 2 より同手法により推定された 1 次，3 次，5 次，6 次振動の推定軌跡を重ね合わせたものである．表－2 には，AR モデル，曲線適合により推定された振動数の推定精度を示している．変動係数より両手法を比較した場合，曲線適合により推定された振動数は，AR モデルに比べ，全次数域においてばらつきが少ない．これは計算値付近に振動数が集中していることを示しており，精度良く推定されていることが確認できる．表－3 に，両手法により推定された減衰定数の推定精度を示す．変動係数より比較した場合，4 次振動に着目すると，曲線適合により推定された減衰定数が，AR モデルに比べ，精度良く推定されている．しかし，全次数域において両手法の精度の差は見られない．これより，減衰定数に関して，両手法の推定精度が同等であることを確認した．



図－7　曲線適合による振動数推定の軌跡

表－2　振動数の推定精度

		計算値 (Hz)	平均 (Hz)	標準偏差(Hz)	変動係数 (%)
1次	AR	0.67	0.844	0.00662	0.785
	曲線適合		0.814	0.00434	0.533
2次	AR	1.04	1.17	0.0112	0.961
	曲線適合		1.16	0.00629	0.544
3次	AR	1.89	1.91	0.0175	0.916
	曲線適合		1.90	0.0126	0.663
4次	AR	2.29	2.33	0.00961	0.412
	曲線適合		2.35	0.00772	0.329
5次	AR	3.63	3.50	0.0490	1.40
	曲線適合		3.63	0.0310	0.854
6次	AR	4.90	5.32	0.0694	1.31
	曲線適合		5.33	0.118	2.21

表－3　減衰定数の推定精度

		平均(Hz)	標準偏差(Hz)	変動係数 (%)
1次	AR	0.0111	0.00767	69.0
	曲線適合	0.00965	0.00565	58.5
2次	AR	0.0244	0.0133	54.3
	曲線適合	0.0210	0.0154	73.5
3次	AR	0.0141	0.00867	61.5
	曲線適合	0.0125	0.00933	74.4
4次	AR	0.0105	0.00643	61.0
	曲線適合	0.00931	0.00336	36.1
5次	AR	0.0270	0.0169	62.7
	曲線適合	0.0248	0.0201	81.0
6次	AR	0.0221	0.00943	42.8
	曲線適合	0.0200	0.00790	39.4

6．まとめ

本研究は，仮想計測器ソフトウェア LabVIEW を用いて，AR モデル(1 段階推定)と自己相関関数曲線適合(2 段階推定)による振動特性自動推定法を開発した．今回の樺島大橋の場合，曲線適合による推定法がより精度の高い振動特性を推定することができた．これより，2 段階推定法の有効性が確認できた．

[参考文献]1)山森和博：システム同定理論による可搬型特性推定システムの開発と橋梁振動への適用，長崎大学修士論文，1998.3