

第 I 部門

振動モニタリングにおけるセンサ間通信の省力化のためのシステム行列の再構築

京都大学工学部 学生員 ○三増 拓也 京都大学大学院 正会員 金 哲佑

京都大学大学院 学生員 五井 良直

1. はじめに

橋梁の振動ヘルスマニタリングによる異常検知の研究が進んでいる¹⁾なか、振動計測におけるセンサの配線の煩雑さや作業時間・人件費の観点から、有線センサよりも無線センサの活用が期待されている²⁾。無線センサは、電力が限られていることから、省電力化や最適配置といったセンサネットワークの簡素化によるセンサの効率的運用が求められる。最適配置に関する研究が数多く報告されているが、構造同定に着目した配置センサ間の通信の省力化まで考慮した研究は見当たらない³⁾。そこで、本研究ではセンサグルーピングによりセンサ通信の簡素化を目指す。特に、多次元 AR モデルを用いた構造同定におけるセンサ間の相関に基づき、相関の強いセンサでグルーピングを行い、再構築されたシステム行列での構造同定の可能性を検討する。

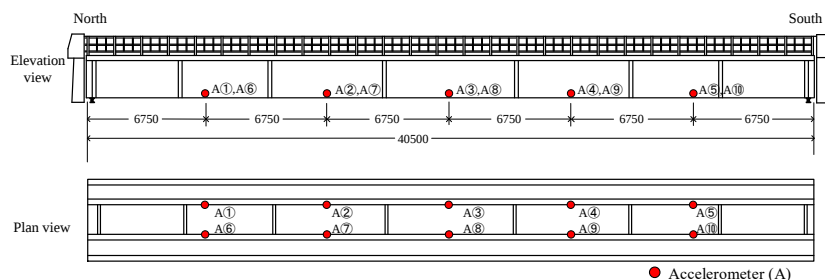


Fig.1 Accelerometer deploying map

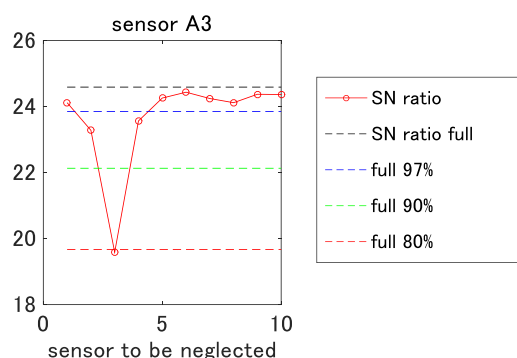


Fig.2 SN ratio of acceleration by reconstructing system matrix of multivariate AR model

2. 線形システム行列の再構築

運動方程式は式(1)のような MAR(Multivariate Auto Regressive)モデルで表すことができる¹⁾。 $\mathbf{y}_k$ は離散時間の時刻 k における加速度応答の観測値を表す。AR 係数行列により構造同定が可能となる。

$$\mathbf{y}_n = \sum_{i=1}^p \mathbf{A}_i \mathbf{y}_{n-i} + \mathbf{v}_n \quad (\mathbf{v}_n: \text{白色雑音}, \mathbf{A}_i: \text{AR 係数行列}, p: \text{次数}) \quad (1)$$

センサ間の相関の判断基準に用いる SN 比(Signal Noise ratio)は式(2)で計算する。 $\hat{\mathbf{y}}_k$ は MAR モデルによる加速度応答の推定値を表す。

$$\frac{\sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{y}}_i^2}{\sum_{i=1}^N (\|\mathbf{y}_i - \hat{\mathbf{y}}_i\|)^2} \quad (N: \text{データ長}) \quad (2)$$

センサ間の相関を 1 つずつ取り除いたときの SN 比の変化により、相関の強弱を判断することができる。相関の強いセンサでグルーピングを行うが、構造同定において正しいモード形状が得られるように、主桁間の相関を考慮するセンサグルーピングとする。センサグルーピングに基づき AR 係数行列を再構築して、構造同定が可能かを判断する。システム行列の再構築手法としては、相関を取り除くセンサ間の情報が無視されるように最小二乗法により推定を行う。

3. 実橋梁データによる構造同定

計測対象橋梁は橋長 40m, 幅員 4.5m の単純 2 主桁橋梁である。計測点を Fig.1 に示す。サンプリング間隔 0.005s で 10s 間計測された加速度応答を用いて構造同定を行い、センサグルーピングを行う。センサ間の相関を一つずつ取り除いたときの SN 比のグラフのうち、橋梁の支間中央部に位置する A3 のセンサに着目したグラフを Fig.2 に示す。横軸が A3 との相関を取り除いたセンサ番号、縦軸が SN 比である。一番上の破線は全てのセンサとの相関を考慮したときの SN 比の値(SN ratio full)である。SN 比が小さくなることは推定精

Takuya MIMASU, Chul-Woo KIM, Yoshinao GOI

kim.chulwoo.5u@kyoto-u.ac.jp

度が低下することを示すため、相関を取り除いたときの SN 比が小さければ、構造同定における相関が強いと判断できる。つまり, Fig.2 では, 着目センサ自身との相関が最も強く, 同一桁内では距離が近いほど相関は強く, 異なる桁のセンサとの相関は弱いことがわかる。全センサとの相関考慮したときの SN 比の値の 97%, 90%, 80% で閾値を設定してセンサグルーピングを行い, その中で最適なグルーピングを決定する。ここで, 最適センサグルーピングはある程度の精度を保った構造同定が可能で, 相関を考慮するセンサ数が少ないグルーピングのことを指す。

センサグルーピングによる構造同定の結果, 閾値が 97% のときが最適センサグルーピングとなった。A1, A2, A3 のセンサに着目をした最適センサグルーピングを Fig.3 に示す。他のセンサのグルーピングも Fig.3 と同様のグルーピングであるため省略する。Fig.3 において 97% の閾値では隣接桁とのセンサとの相関は考慮しないはずだが, ねじれモード形状を得るために隣接桁の 5 つのセンサ中で最も相関の強いセンサをグルーピングに入れる。グルーピング前の構造同定結果とグルーピングに基づきシステム行列を再構築した構造同定結果をそれぞれ Fig.4 および Fig.5 に示す。再構築前後の振動数誤差は 0.05Hz 以下, MAC 値は 0.97 以上となり, 改善の余地は見られるが, 構造同定がある程度の精度で可能であることが示された。

4. 結論

本研究では構造同定におけるセンサ間の相関に基づいたセンサグルーピングを行い, システム行列を再構築し, 構造同定が振動数誤差 0.05Hz 以下, MAC 値 0.97 以上の精度で可能であることが示された。ただし, 振動特性に着目をする振動ヘルスマonitoringにおいて, 振動数の同定精度は重要な要素の一つであるため, センサグルーピングと同定精度のバランスを考える必要がある。今後, 別橋梁によるグルーピング手法を用いた構造同定の検討, グルーピング手法を用いた損傷検知の検討を行う。また, センサグルーピングはセンサ設置段階で必要になるため, 事前検討として構造解析でセンサグルーピングを行うことができるかを検討する。さらに, AR モデル以外の構造同定手法でのグルーピング手法の適応可能性の検討や SN 比に代わるセンサ間の相関判断基準の検討を行い, グルーピング手法の汎用性を確認する。

【参考文献】

1) 岡林隆敏, その他 3 人: 多次元 AR モデルを用いた常時微動による橋梁振動特性推定法と推定精度の検討, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.2, pp.474-487, 2008. 2) 川谷充郎, その他 6 人: 橋梁振動モニタリングのための MEMS 無線センサノード開発と実橋適用性検討, 応用力学論文集 Vol.13, pp.1009-1016, 2010. 3) Ting-Hua Yi, Hong-Nan Li, Ming Gu: Optimal sensor placement for structural health monitoring based on multiple optimization strategies, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol.20, pp.881-900, 2011.

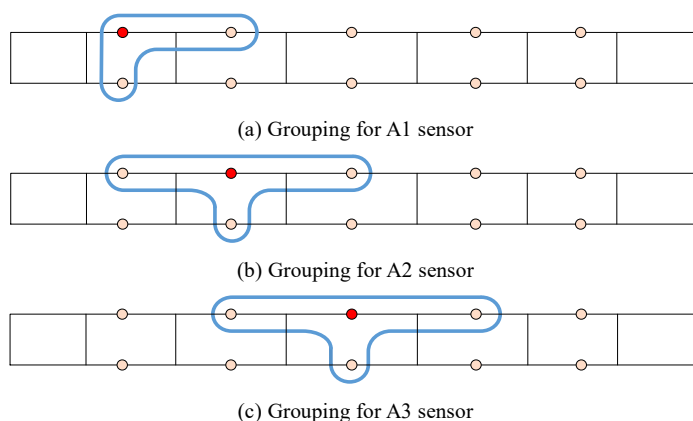


Fig.3 Sensor grouping based on the threshold of SN ratio below 97%

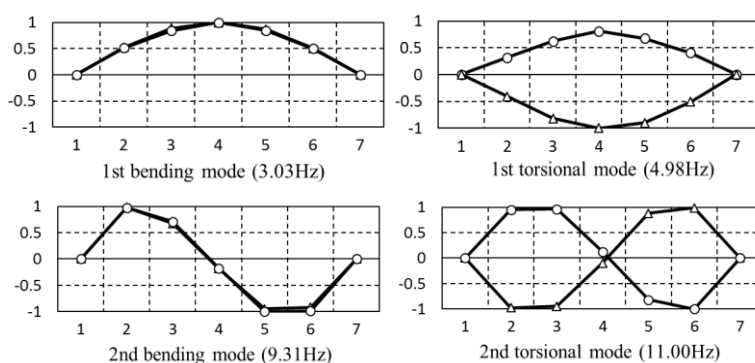


Fig.4 Identified natural frequencies and vibration modes by initial system matrix

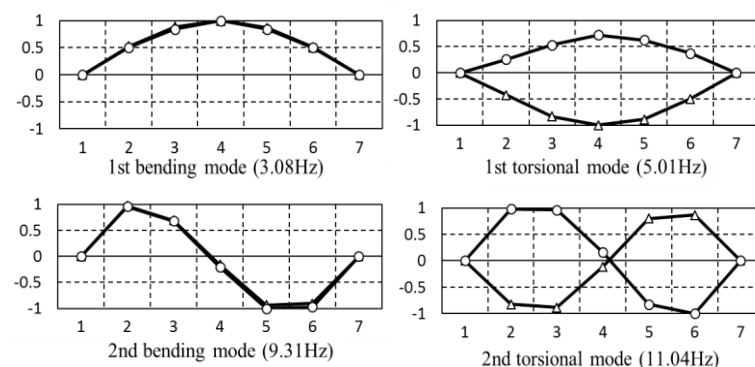


Fig.5 Identified natural frequencies and vibration modes by reconstructing system matrix (threshold: SN ratio below 97%)