

車両応答分析の社会実装に向けた分析対象波形抽出に関する基礎的検討

筑波大学大学院 システム情報工学研究科 非会員 村井 諒
 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 学生会員 ○高橋 悠太
 筑波大学 システム情報系 助教 正会員 山本 亨輔

1. はじめに

わが国には建設後 50 年を迎える橋梁が数多く存在する。これに対し、橋梁の状態を点検する熟練技術者も不足していくと考えられるため、橋梁の維持管理をどのように行っていくかが社会的な課題として考えられる。例えば、橋梁に加速度センサーを設置し、橋梁の振動から損傷を検知する手法がある。これらの技術は橋梁毎のセンサー設置及び維持管理において、膨大なコストがかかると考えられ、予算の乏しい地方自治体にとっては実現が困難であると考えられる。

一方で、車両に加速度センサーを設置し、車両振動を基に損傷を検知する、車両応答分析(Vehicle Response Analysis)に関する研究も行われている。Yamamoto and Ishikawa [2]は、橋梁上の走行する車両の振動波形を分析対象として、損傷橋梁の走行した際に敏感に反応する指標を作成し、橋梁の損傷を簡単に検知する手法を提案している。しかし、社会実装時においては、高感度センサー等を用いた橋梁上走行時の時刻同期・特定は行えないため、分析対象となる波形の切り出しの誤差が生じてしまう。一般的に、現在実際に運用されている橋梁を走行する車両は、①橋梁の結合部分で大きく鉛直方向の衝撃、②路面の凹凸の影響による衝撃を受けることが分かっている。すなわち、橋梁に車両が入る際、または橋梁から車両が出る際に、車両振動に何らかの様相の変化が見えることが予想される。

以上から本研究では、実際の車両走行振動データのみから、橋梁上の走行振動の波形を抽出する方法を構築する。その際、橋梁上・非橋梁上の振動の構造変化に着目し、特異スペクトル解析による変化点検知に基づき、波形抽出に用いるべき特徴量・精度評価の検討を行うこととする。

2. 特異スペクトル解析による変化点検知

特異スペクトル解析による変化点検知は、Moskvina and Zhigljavsky [1]によって提案された。以下は、井手・井上 [3]の表現に基づき、手法の説明を施す。

時刻を t とし、時系列 $T = \{x(1), x(2), \dots, x(t), \dots\}$ に対して、長さ w の部分列 $\{x(t-w), \dots, x(t-2), x(t-1)\}$ を考える。対応する列ベクトルを、

$$\mathbf{s}(t-1) = (x(t-w), \dots, x(t-1))^T \quad (1)$$

と記し、以下のハンケル行列を作成する。

$$\mathbf{H}(t) = [\mathbf{s}(t-n), \dots, \mathbf{s}(t-2), \mathbf{s}(t-1)] \quad (2)$$

ここで、 n 次元ベクトル $\mathbf{v} = (v_1, \dots, v_n)^T$ 、 $\mathbf{v}^T \mathbf{v} = \mathbf{u}^T \mathbf{u} = 1$ を満たすような w 次元ベクトル $\mathbf{u}$ を以下のような性質を満たすように定義する。

$$\mathbf{u} = \mathbf{c} \sum_{i=1}^n v_i \mathbf{s}(t-i) \quad (3)$$

c は規格化条件を満たすための整数である。また、

$$\mathbf{v}(t) \equiv \underset{\mathbf{v}}{\operatorname{argmax}} \|\mathbf{H}(t)\tilde{\mathbf{v}}\|^2 \quad (4)$$

という方程式を $\mathbf{v}^T \mathbf{v} = 1$ の制約のもと解く。ラグランジュ乗数 λ を用いると、固有値方程式

$$\mathbf{H}(t)^T \mathbf{H}(t) \mathbf{v} = \lambda \mathbf{v} \quad (5)$$

$$\mathbf{H}(t) \mathbf{H}(t)^T \mathbf{u} = \lambda \mathbf{u} \quad (6)$$

が導かれ、 $\mathbf{u}$ と $\mathbf{v}$ はそれぞれ $\mathbf{H}(t)$ の左特異ベクトル、右特異ベクトルになっている。今、 $\mathbf{u}$ の次元数が $\mathbf{v}$ のそれよりも小さいとし、特異値の大きい順に l 個の特異ベクトルを並べ替えて作成した行列を

$$\mathbf{U}_l = [\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_l] \quad (7)$$

とする。また、 w 次元ベクトル

$$\mathbf{r}(t+g) = (x(t+g), \dots, x(t+g+w-1))^T \quad (8)$$

を新たに定義し、以下のハンケル行列を定義する。

$$\mathbf{G}(t) = [\mathbf{r}(t+g), \dots, \mathbf{r}(t+g+m-1)] \quad (9)$$

すると、 $\mathbf{G}(t) \mathbf{G}(t)^T \mathbf{u} = \lambda \mathbf{u}$ のようにして行列 $\mathbf{G}(t) \mathbf{G}(t)^T$ の固有ベクトルが求まり、最大固有値に属する規格化された固有ベクトルを $\boldsymbol{\beta}(t)$ と表す。すると、 $\boldsymbol{\beta}(t)$ の超平面への規格化された射影は

$$\boldsymbol{\alpha}(t) \equiv \frac{\mathbf{U}_l^T \boldsymbol{\beta}(t)}{\|\mathbf{U}_l^T \boldsymbol{\beta}(t)\|} \quad (10)$$

と書け、 $\beta(t)$ が超平面と直行していれば零ベクトルになるようにすれば、

$$z(t) \equiv 1 - \alpha(t)^T \beta(t) \quad (11)$$

によって、変化度が定義される．この変化度の性質として、変化がないときに 0，変化が激しくなるほど 1 に近づく性質をもつ．

3. データ・評価指標

本研究で用いる振動データは、平坦な地面、橋梁までのスロープ、橋梁上、橋梁後のスロープを順に走行して得られたものである．加速度センサーは前輪・後輪のそれぞれに設置しており、進行方向、進行方向横向き、鉛直方向の計 3 方向の加速度を計測している．本研究が達成すべき波形切り出しについては、①橋梁上の走行開始・終了時刻が、実際の時刻と乖離していない、②スロープ部分における振動を含まないという性質を満たすことが望ましい．しかし、現状ではその指標を作成することができていない．図 1、図 2 が同時刻の振動データと変化度の時系列プロットである．

4. まとめ

本研究では、特異スペクトル変換を用いて、橋梁上の車両振動に該当する波形を抽出する方法の検討した．しかし、切り出しに用いる適切な特徴量や、精度指標については、検討できていない．今後はさらにもう一度 SSD を行うことで変化の加速度を導出し、検討を行う．

参考文献

- [1]. Moskvina, V., & Zhigljavsky, A. (2003). "An algorithm based on singular spectrum analysis for change-point detection". *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, 32(2), 319-352.
- [2]. Yamamoto, K., & Ishikawa, M. (2016). "Numerical Verification of Bridge Screening Technology based on Vehicle Vibration". In *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The World Congress on Engineering* (Vol. 29).
- [3]. 井手剛, & 井上恵介. (2004). "非線形変換を利用した時系列データからの知識発見" 第 4 回データマイニングワークショップ, 日本ソフトウェア科学会データマイニング研究会, 研究会資料シリーズ ISSN, 1341, 1-8.

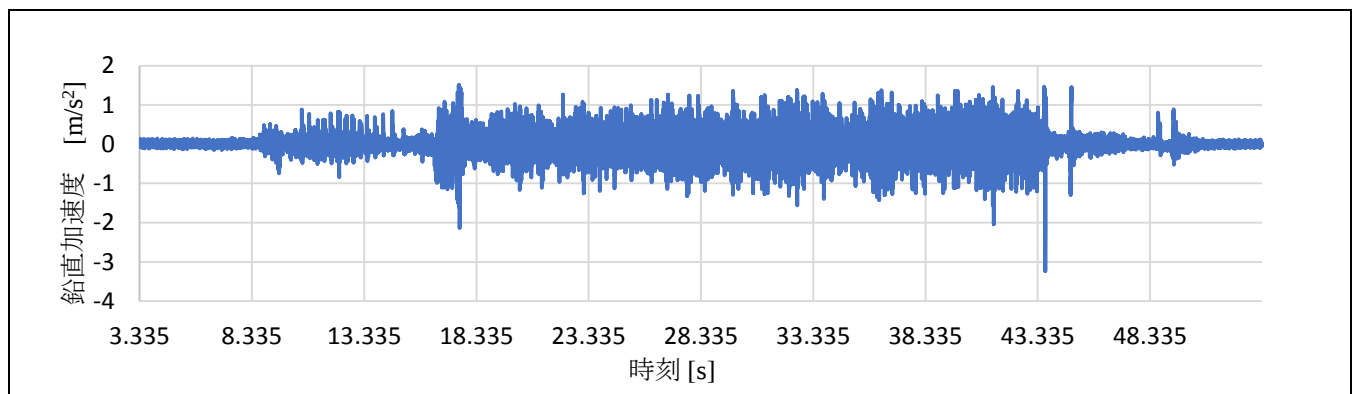


図 1 前輪部鉛直加速度(一部切り出し)

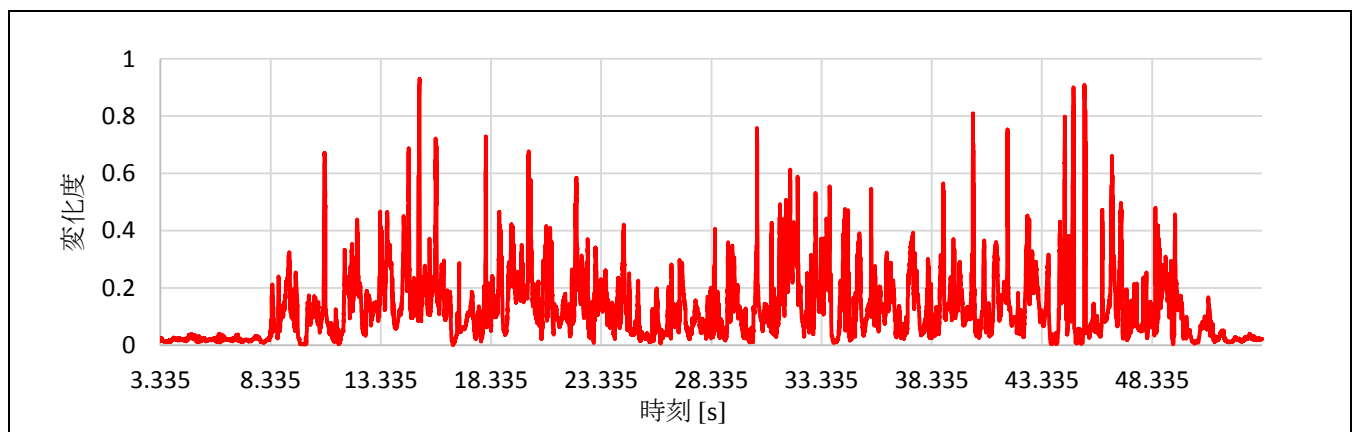


図 2 変化度時系列プロット(図 1 と同時刻切り出し)