

独立成分分析を用いた車両加速度からの外乱推定

○ [機] 中村 弘毅 [機] 中野 公彦 (東京大学)

Estimation of Gauge Irregularity Using Independent Component Analysis

○ Hiroki Nakamura, Kimihiko Nakano, (the Univ. of Tokyo)

The paper introduces the new method to estimate vertical gauge irregularity from accelerations of the bogie using ICA (Independent Component Analysis) and examines the performance through the numerical simulation of a travelling bogie. For safety on railway systems, techniques to estimate the gauge irregularity and identify the dynamical properties of the railway vehicles are required, however they are complicated. The authors propose to apply ICA to monitor the railway system. It is a method utilized mainly in the field of biophysics to identify the signal sources from the multi data sets of the mixed signals. Only the vertical and pitch motion of the bogie are considered and the dynamics of the car body is neglected. To simulate the sensor noises, the white noises are added to the accelerations. The velocities and the displacements are calculated by integrating and double integrating the observed accelerations, respectively. They are treated as parts of the observed data sets as well as the accelerations. By using ICA, the similar shape to the input irregularity is obtained, and it is proven that the ICA is effective to monitor the railway system.

キーワード：独立成分分析，軌道不整，高低狂い，

Key Words：Independent Component Analysis, Gauge irregularity,

1. 緒言

鉄道交通システムの保全のためには軌道，車体，台車などのモニタリングが不可欠である．そのために軌道不整を推定する技術や車両の動特性を同定する手法の開発が望まれる．しかしそれらは空気変動力や車両の弾性振動，センサの観測雑音といった多くの要素が複雑に混成していてその中に埋もれた軌道不整の情報を検出することは困難である．つまり，モニタリングにおいて外乱要素の分離が不可欠となっている^{1),2)}．一方，生体信号解析の分野においては，混合して観測された多チャンネルの信号を独立な信号群に分離する，独立成分分析 (ICA) と呼ばれる手法^{3),4)}が提案されている．雑音などが大きく混入した信号から有意な信号を分離することができるため，自動車の振動解析などへの適用も可能である⁵⁾．しかし，本来，ICA は静的な系における混合を前提としているため，その適用範囲は限られていた．本研究では，ICA の動的な系への適用法を

提案し，鉄道車両上のセンサから軌道不整を推定することを試みる．ここでは2自由度台車モデルを用いた数値シミュレーションを行い，台車が不整軌道を走行するときに観測される加速度から高低狂いを検出できるかを検討する．

2. 独立成分分析の原理

ICA の概念図を図1に示す³⁾．またその構造は以下の式のように書ける．

$$x(t) = A s(t) \quad (1)$$

$$s(t) = W x(t) \quad (2)$$

図1のように複数の原信号 $s(t)$ が混成過程 A を経て観測信号 $x(t)$ として観測される場合， A が既知であれば $W = A^{-1}$ として式(2)より原信号 $s(t)$ が推定できる．しかし，今回のシステムにおいて A は未知であるためこの方法で原信号は推定できない．

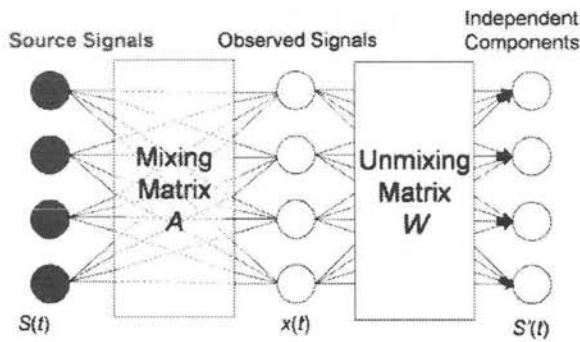


図 1 ICA 概念図

そこで原信号 $s(t)$ が互いに独立であり、また観測信号 $x(t)$ はその線形結合であると仮定する。ICA は式 (2) の復元行列 W を求める解析である。本研究では尖度の大きさを独立成分を推定する FastICA³⁾ を利用した解析を行った。ここで、確率変数 x の尖度は平均値が 0 の場合、期待値 $E(x)$ を用いて

$$\text{kurt}(x) = E(x^4) - 3[E(x^2)]^2 \quad (3)$$

で定義される。尖度は基本的に 4 次モーメントを正規化したものであり、その重要な特徴として確率変数の非ガウス性を示す最も簡単な統計量であることが挙げられる。FastICA はこの尖度の絶対値を最大化する W を反復計算によって得ることで独立成分を推定する。ICA の特徴は外乱形状の分離にあるが、一方でその絶対値を確定できないという点に課題を残す。本論文では台車上に置かれたセンサに白色雑音が混ざった状態での軌道高低狂いの推定に ICA が有効であるかを検討した。

3. 数値シミュレーション

3.1 台車モデル

走行台車の上下振動を模擬した数値シミュレーションによって検討した。台車のモデルは図 2 示す通りである。上下並進およびピッチ運動のみを対象とし本研究では車体のダイナミクス影響は考慮していない。図中の x , θ はそれぞれ台車重心の上下運動、およびピッチを表している。また x_{g1} , x_{g2} はそれぞれ前、後輪に対する軌道からの入力であり、 S_1 , S_2 は加速度センサの位置を表す。車両諸元を以下の表 1 に示す。

表 1 台車諸元

	記号	設定値
質量	m	$2.9 \times 10^3 [\text{kg}]$
ピッチ慣性モーメント	I	$3.4 \times 10^2 [\text{kgm}^2]$
ばね定数	k	$1.8 \times 10^7 [\text{N/m}]$
減衰係数	c	$1.2 \times 10^5 [\text{N/(m/s)}]$
前後軸間距離	$2L$	$2.5 [\text{m}]$

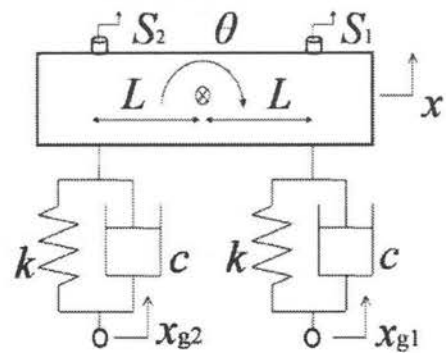


図 2 2 自由度台車上下振動モデル

3.2 軌道不整作成

乱数にフィルタ処理を行って間隔 0.05m、全長 400m の軌道高低狂いを再現した (図 3 (a) 参照)。この軌道は一般的な鉄道線路と同様の PSD (パワースペクトル密度) をもつ⁶⁾。またこの軌道の 220m から 270m の区間に波長 350mm、振幅 10μm の正弦波 (図 3 (b) 参照) を加え、特定のパターンが混入した軌道を模擬した (図 3 (c) 参照)。図 3 は作成した軌道のうち 200m~280m の区間を示している。

3.3 台車走行シミュレーション

前述の軌道上を一定速度 40m/s で通過するときの台車の加速度、角加速度を時間刻み 1ms の時刻歴解析によって求める。台車の運動方程式は

$$m\ddot{x} = -k(x - L\theta - x_{g1}) - k(x + L\theta - x_{g2}) - c(\dot{x} - L\dot{\theta} - \dot{x}_{g1}) - c_{or}(\dot{x} + L\dot{\theta} - \dot{x}_{g2}) \dots (3)$$

$$I\ddot{\theta} = kL(x - L\theta - x_{g1}) - kL(x + L\theta - x_{g2}) + cL(\dot{x} - L\dot{\theta} - \dot{x}_{g1}) - cL(\dot{x} + L\dot{\theta} - \dot{x}_{g2}) \dots (4)$$

と書ける。さらに、得られた加速度、角加速度よりセンサ位置の上下加速度を計算する (式 (5), (6) 参照)

$$S_1 = \ddot{x} - L\ddot{\theta} \dots (5)$$

$$S_2 = \ddot{x} + L\ddot{\theta} \dots (6)$$

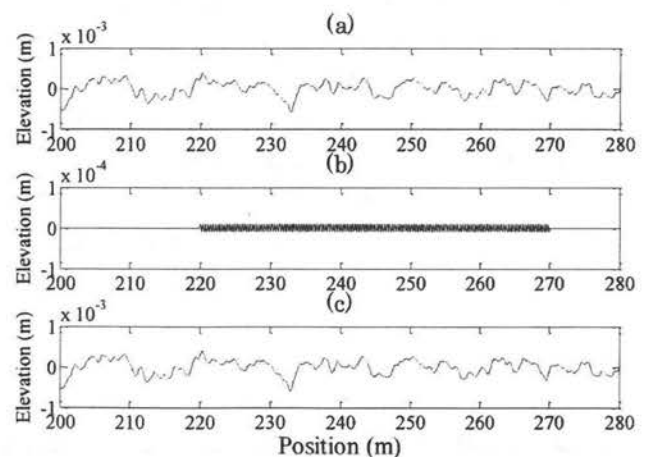


図 3 (a) 高低狂い, (b) 正弦波, (c) 高低狂い + 正弦波

4. 軌道高低狂いの推定

4.1 ICAによる高低狂い推定

計算されたセンサ位置加速度に白色雑音を混成し、前後のセンサの観測信号を模擬した (図4(a), (b)参照). ICAによる高低狂い推定を行った. この白色雑音はセンサノイズやモデル化誤差, 本研究のモデルで無視している車体からの振動を想定したもので, 加速度と白色雑音それぞれの二乗平均平方根の比が3:2となるように大きさを設定した. 式(3), (4)を状態方程式形式に書き換えると以下のようになる.

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \ddot{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \dot{X} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{01} \\ X_{02} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

ここで X_{01} , X_{02} は外乱とし, C_{ij} , D_{ij} は未知定数行列の要素とする. また適当な信号源 X_0' を仮定すると以下の式が成立する.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \dot{X} \\ \ddot{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \dot{X} \\ \ddot{X} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{01} \\ X_{02} \\ X_0' \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

信号源 X_0' を含めて信号源 S とみなし, $[X \ \dot{X} \ \ddot{X}]^T$ を観測信号と考えれば式(2)と同じ形式になり, 入力外乱と係数行列が未知であってもそれらの同定がICAによって可能であることがわかる. そこで, 観測された前後加速度をそれぞれ積分して速度, 変位を求め, 加速度と合わせて計6つ状態量を観測信号とする. 図4(a), (b)はそれぞれ前後のセンサ加速度, (c), (d)は速度, (e), (f)は変位を表している. それらからFastICAによって得られた独立成分を図5に示す. 6つの独立成分のうち4本目が高低狂い, 5本目が特定パターンの信号と考えられる.

4.2 伝達関数を用いた高低狂い推定

比較のため伝達関数を用いた高低狂い推定法を検討した. 式(3), (4)より軌道入力から台車加速度への伝達関数を求める. X , X_{g1} , X_{g2} はそれぞれ x , x_{g1} , x_{g2} のラプラス変換を表し, $\mathcal{L}^{-1}$ は逆ラプラス変換を表す.

$$s^2 X = \frac{2s^2(cs+k)}{(ms^2+2cs+2k)} \frac{(X_{g1}+X_{g2})}{2} \dots\dots\dots (9)$$

つまり軌道入力から台車加速度の伝達関数 $G(s)$ は

$$G(s) = \frac{2s^2(cs+k)}{(ms^2+2cs+2k)} \dots\dots\dots (10)$$

と書ける. $g(t) = \mathcal{L}^{-1}[1/G]$ とすると

$$\frac{x_{g1}(t)+x_{g2}(t)}{2} = \int_0^\infty \ddot{x}(\tau)g(t-\tau) d\tau \dots\dots\dots (11)$$

この畳み込み積分によって得られた信号に遮断周波数0.05Hzのハイパスフィルタを通して台車加速度から高低狂いを推定する.

4.3 考察

推定された軌道高低狂いを比較する. 軌道不整に特定のパターンが混成された区間を拡大して結果を図6に示す. 図6(a)は軌道からの入力 x_{g1} , x_{g2} の平均であり, 図6(b)は伝達関数によって推定された軌道不整, (c), (d)はICAによって推定された軌道形状を示す. (c), (d)からわかるように独立成分分析による原信号推定では軌道高低狂いに混成された正弦波が検出できている. ウェーブレット変換によって特定パターンを認識する手法⁷⁾も提案されているが, 本研究は周波数ではなく信号の中に埋もれた独立な波形を分離する点に特徴がある.

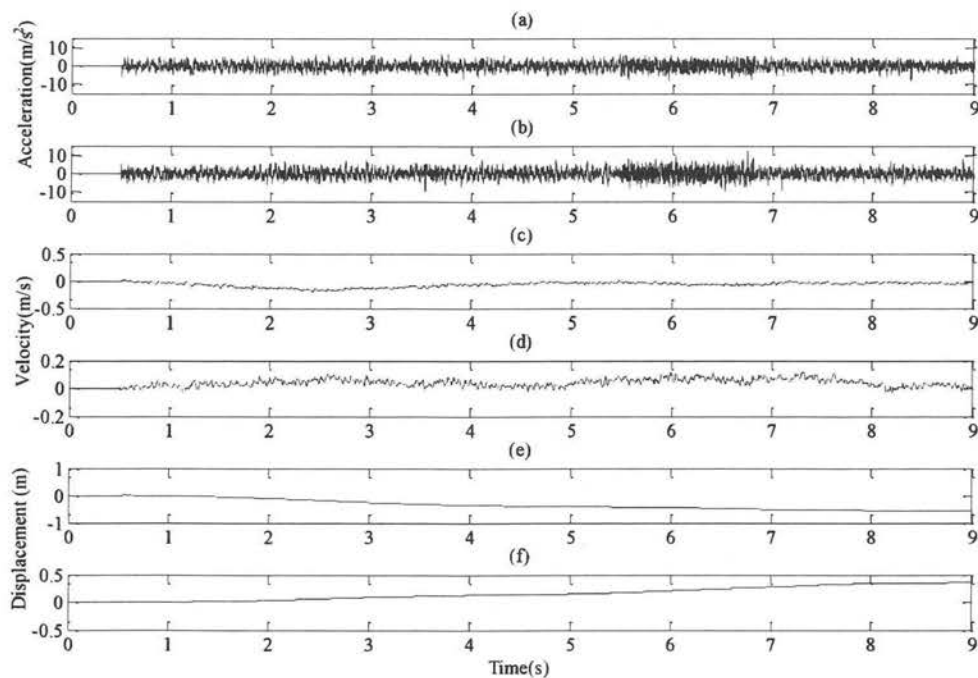


図4 混成信号

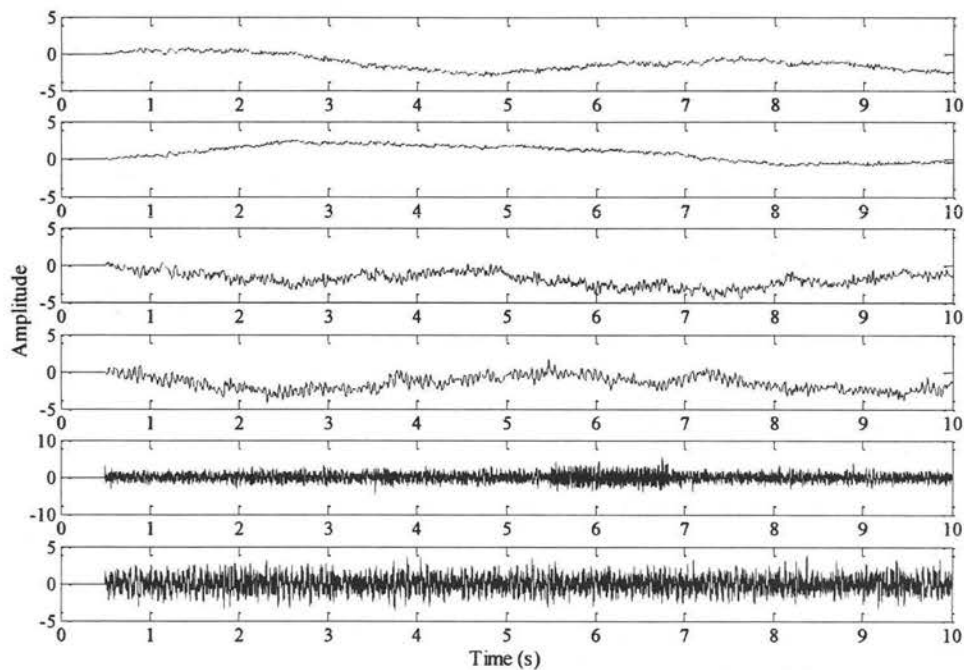


図 5 独立成分

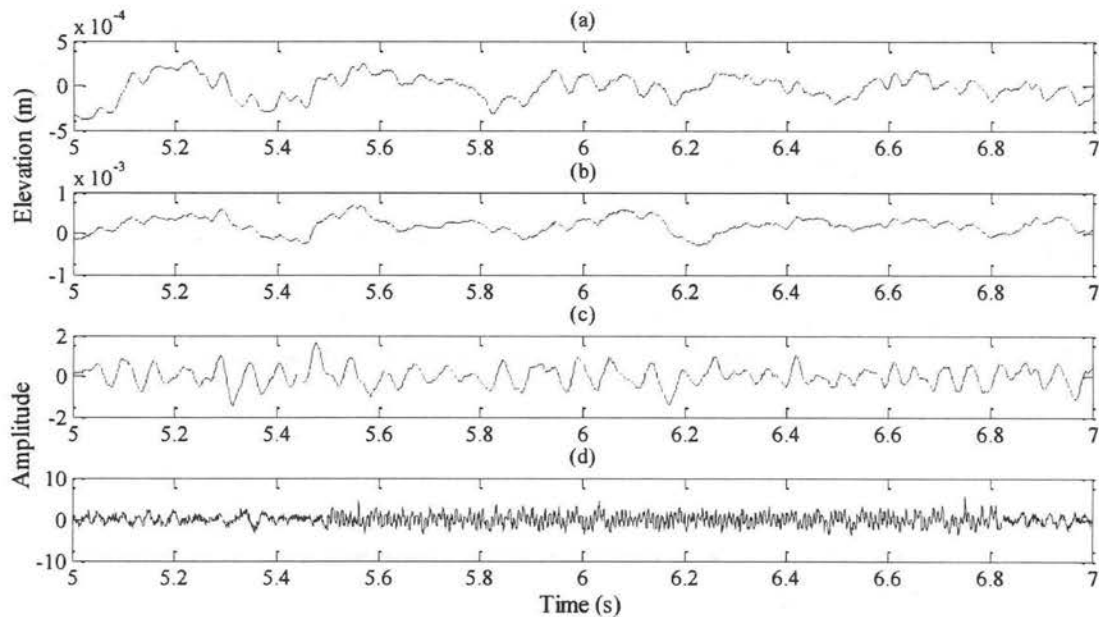


図 6 入力信号との比較

5. まとめ

台車上の加速度から ICA によって軌道不整と正弦波状のパターンを分離することに成功した。一般的な軌道不整と特定のパターンを分離できることが示された。

参 考 文 献

- 1) 網島均, 松本陽, 中村英夫, 山下博: プローブ車両技術の導入による軌道交通システムの再生に関する基礎的研究, 日本機械学会交通・物流部門大会, 2004
- 2) 緒方正剛, 松本陽, 鶴秀生: プローブ車両を利用した軌道状態診断の可能性, 日本機械学会第 13 回鉄道技術連合シンポジウム, 2006.
- 3) Hyvärinen, A. Karhunen, J. and Oja, E.: Independent Component Analysis, John Wiley &

Sons, 2001.

- 4) James, C. J. and Hesse, C.W.: Independent component analysis for biomedical signals, *Physiol. Meas.* 26 R15-R39, 2005
- 5) 山邊茂之, 中野公彦, 林隆三, 須田義大, 独立成分分析を用いた車両加速度からの路面情報の推定, 日本機械学会第17回 交通・物流部門大会 (発表予定), 2008
- 6) 鈴木康文: 軌道高低狂いの PSD, 鉄道総研報告 特別 16 pp117
- 7) 須田義大, 奥村幹夫, 小峰久直, 岩佐崇史, 錢蓓麗, 曄道佳明: ウェーブレット解析を用いたレール波状摩耗検出手法に関する研究, 日本機械学会論文集C編, 66-642, pp615-620, 2000