## 3406 独立成分分析法を用いた軌道高低狂い推定法

学	[機]	〇中村	弘毅	(東大院)	正	[機]	中野	公彦	(東大生研)
正	[機]	大堀	真敬	(東大生研)					

### Estimation Method of Vertical Track Irregularity Using Independent Component Analysis

Hiroki NAKAMURA, The Univ. of Tokyo 4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo
 Kimihiko NAKANO, Institute of Industrial Science, the Univ. of Tokyo
 Masanori OHORI, Institute of Industrial Science, the Univ. of Tokyo

This research introduces a method to estimate vertical track irregularity from accelerations of the bogie using ICA (Independent Component Analysis) and examines the performance through the experiment using test track and an actual bogie. The authors propose to apply ICA to monitor the railway system. It is a method to identify the signal sources from the multi data sets of the mixed signals. The vertical accelerations of bogie frame at several points are measured, and the velocities and the displacements at those points are calculated by integrating and double integrating the measured accelerations, respectively. They are treated as parts of the observed data sets as well as the accelerations. By using ICA, the vibration of front and rear wheels are separated. From this result it is expected to separate some disturbance mixed to the track irregularity such as bias of wheels.

Keywords Monitoring, Railway, Method of Vibration Analysis, track, Independent Component Analysis

#### 1. はじめに

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.中でも軌道は車両 と直接接触する箇所であるため,車両の運動特性に大き な影響を与える、そのため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. 車両で振 動を計測し,そこから軌道形状を推定する場合,計測信 号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<sup>1),2)</sup>.これまで独立成分分析(ICA)と呼ばれる手 法 3),4)を用いて鉄道台車のばね上加速度から軌道高低狂 いを推定する手法を提案し,数値シミュレーションによ る検討を行ってきた.本研究では東京大学生産技術研究 所が保有する千葉実験所鉄道試験線および FS-045 台車 を用いて提案手法の有効性を実験を通して検討する. 台 車枠の車輪上方に4つの加速度センサを取り付け,上下 方向の加速度を4系列計測し,各信号を一階積分, 二階 積分してセンサ位置の速度,変位を計算した. それら計 12 系列の信号を FastICA によって分離することで 軌道 から各車輪への上下入力の推定を行った. 試験線直線区 間にある3つの継ぎ目を検出対象とし、それらの継ぎ目 を乗り越す際の上下変位が検出可能であるかを検討した.

#### 2. 独立成分分析の原理

ICA の概念図を図1に示す<sup>3)</sup>. またその構造は以下の 式のように書ける.

$$\mathbf{x}(t) = A\,\mathbf{s}(t) \tag{1}$$

$$s(t) = W x(t) \tag{2}$$

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.



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 で独立性を評価し反復計算によって独立成分を推定する FastICA<sup>3)</sup>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)を用いて以下の 式(3)で定義される.

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

[No.09-65] 日本機械学会第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集〔2009-12.2~4. 東京〕

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.

# ICA の動的システムへの適用手法 1 台車モデル

以下の図2に示すモデルを想定し、台車枠の上下加速 度から軌道高低狂いを推定する手法を構築した<sup>5)</sup>. 図中 のx,  $\theta$  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.



Fig.2 the bogie constructed with two degrees of freedom vertical vibration model

台車の運動方程式は次式で表わされる.

$$m\ddot{x} = -k\left(x - L\theta - x_{g1}\right) - k\left(x + L\theta - x_{g2}\right)$$
  
$$-c\left(\dot{x} - L\dot{\theta} - \dot{x}_{g1}\right) - c\left(\dot{x} + L\dot{\theta} - \dot{x}_{g2}\right)$$
(4)

$$\begin{aligned} H\ddot{\theta} &= kL \Big( x - L\theta - x_{g1} \Big) - kL \Big( x + L\theta - x_{g2} \Big) \\ &+ cL \Big( \dot{x} - L\dot{\theta} - \dot{x}_{g1} \Big) - cL \Big( \dot{x} + L\dot{\theta} - \dot{x}_{g2} \Big) \end{aligned} \tag{5}$$

また,加速度,角加速度とセンサ位置の上下加速度の関係は以下の式(6),(7)で表わされる.

$$S_1 = \ddot{x} - L\ddot{\theta} \tag{6}$$

$$S_1 = \ddot{x} + L\ddot{\theta} \tag{7}$$

#### 3.2 観測信号と原信号の関係

ICA で観測信号を解析するために式(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.

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \ddot{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \dot{X} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} X_0$$
(8)

ここで X<sub>0</sub> は適当な長さの外乱ベクトルとし, C<sub>ij</sub>, D<sub>ij</sub> は未知定数行列の要素とする.また適当な信号源 X<sub>0</sub>'を仮 定すると以下の式(9)が成立する.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \dot{X} \\ \ddot{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \dot{X} \\ \ddot{X} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ X_0 \end{bmatrix}$$
(9)

信号源  $X_0$ 'を含めて信号源 S とみなし,  $\begin{bmatrix} X & X & X \end{bmatrix}$  を 観測信号と考えれば式(9)は以下の形式に書き換えられ る.ただし, A は未知定数行列とする.

$$\begin{bmatrix} X \\ \dot{X} \\ \ddot{X} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} X_0 \\ X_0 \end{bmatrix},$$
(10)

式(10)は式(2)と同じ形式になる. つまり外乱  $X_0 \ge X_0$ 、 を原信号 s(t),  $\begin{bmatrix} X & \dot{X} \end{bmatrix}$  を観測信号 x(t)とみなす.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. 今回の実験では加速 度が計測可能であるため,速度,変位は加速度を一階積 分,ないし二階積分することによって計算した. 積分計 算はドリフト成分除去のため 0.3Hz 以下の低周波は除去 するローカットフィルタ処理を行った.

#### 4. 台車実験

#### 4.1 実験装置

(1) 東京大学生産技術研究所 千葉試験線

東京大学生産技術研究所が2007年10月に敷設した試 験線<sup>の</sup>を用いて本実験を行った.試験線の様子を図3に 示す.本実験では入口直線区間のみを利用した.



Fig.3 a photo of the test track



Fig.4 The straight section of the test track: the dashed line represents start line and each number represents the seam.

台車の後端が計測開始地点を通過した時点で加速度計

測を開始する. 図4に示すように進行方向右側のレール は計測開始地点から4311mm 地点に図中①の幅6mmの 継ぎ目があり,8810mm 地点に幅5mmの継ぎ目②がある. 進行方向左側のレールは8765mm に幅7mm, 高低差 3.5mmの継ぎ目③がある.①から③までの継ぎ目を図5, 6に示す.



Fig.5 Seams of right rail: the seam at 4311 mm from start line is shown on left and the other seam at 8810 mm is shown on right



Fig.6 The seam of left rail: the width is shown on left and the vertical gap is shown on right.

#### (2) 実験用台車

本実験には阪急電鉄株式会社殿より寄贈していただい た住友金属工業株式会社製FS-045 台車を用いた.台車の 諸元を表2に,図7に計測装置を取り付けた台車を示す.

#### Table 1 Specifications of the test bogie

Bogie type	Minden			
Overall length	4040mm			
Width	2600mm			
Height	930mm			
Mass	4950kg			
Wheelbase	2100mm			
Wheel diameter	762mm			
Type of body support	Swing hanger			
Axle box suspension system	Horizontal beam spring			
Brake system	Clasp Brake			
Manufacturing year	1966			



Fig.7 The bogie used for the experiment

計測装置は図8に示すように台車枠の4か所に取り付け

た. 図9には計測装置の様子を示す.



Fig.8 Places of accelerometers on bogie frame



Fig.9 An accelerometer set on bogie frame

#### 4.2 実験条件

実験は上述の試験線及び実験用台車を用いて行う.直線区間で台車を押し,歩行者の速度に合わせたほぼ一定速度で走行させた.台車後端が一定地点を超えた時点で計測を開始し,3つ目の継ぎ目を後輪が越えた所から減速し停止するまで計測を行った.台車枠に取り付けた加速度センサの計測信号から軌道高低狂いの推定を行う.

#### 5. 実験結果

計測された加速度を図 10 に示す.上段から順に左前方, 右前方,左後方,右後方の計測加速度を表す.



Fig.10 Measured Accelerations

左のレールには継ぎ目が一つしかないが,ここでは二つ のピークを持つ振動が分離されている.これは車軸で左 右輪がつながっているため,右レールの継ぎ目を乗り越 した際に左側の車輪も振動しているためと考えられる. 次に加速度を積分して得られた速度,変位を図 11,12 に示す.図10と同様に図 11,12の各グラフはそれぞれ 上から左前輪,右前輪,左後輪,右後輪の順にセンサ位 置の速度,変位を表わしている.



Fig.12 Calculated displacements

これら図 10 から 12 の計 12 系列の信号を入力として FastICA によって独立な信号に分離した.その結果を図 13 に示す.



Fig.13 Independent Components

計5回同様の実験を行ったが、すべての試行において 6本の独立成分が得られた.FastICAのアルゴリズムでは 観測信号と同数の独立成分が得られる可能性があるが、 反復計算による疑似最適解を求める性質上、尖度が一定 の閾値を越える独立成分が求められない場合観測信号よ りも少ない独立成分が得られる場合もある.上から1段 目2段目の独立成分は時間差で形状の似た振動が検出さ れているため前後の車輪の入力が分離されたものと考え られる.また一つ目の振動が大きく出ていることから, 右側の前輪、後輪への入力を分離しているものと考えら れる.ただし,継ぎ目を乗り越す際の凹型の変位にはな っていない.継ぎ目付近の波形はインパルス入力を加え た際の自由振動のような形状をしているため、軌道形状 そのものではなく車輪の変位を検出しているものと考え られる.これは、半車体モデルでの軌道変位入力が輪軸 変位と一致するとして数値計算を行っている点からも妥 当である.一方,3番目の独立成分は左前輪,4番目の独 立成分は左後輪の振動を検出しているものと考えられる.

このように図9から11の観測信号でははっきり表れて いない前後への時間差の入力が FastICA によって分離さ れている.

#### 6. 結言

台車枠加速度から独立成分分析法を用いて軌道高低狂 いを推定する手法を鉄道試験線を用いた実験により検討 した.前後の車輪の振動を分離することに成功した.こ のことから,軌道不整のように前後車輪から時間差で入 力される振動と車内で発生する振動のように前後同位相 で入力される振動を分離できる可能性を示した.

#### 謝辞

本実験を進めるにあたり助言を与えていただいた須田 義大教授に深く感謝する.また,実験を補助していただ いた須田研究室の山邉茂之特任助教,安藝雅彦特任研究 員,修士学生の辻隆史君にも謝意を表したい.

#### 参考文献

- 綱島均,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
- Weston, P.F. Ling, C.S. Roberts, C. Goodman C.J. and Goodall, R. M.: Monitoring vertical track irregularity from in-service railway vehicles, Proc. IMechE Vol.221 Part F: J. Rail and Rapid Transit, pp75-88, (2007)
- Hyvärinen, A. Karhunen, J. and Oja, E.: Independent Component Analysis, John Wiley & Sons, 2001
- James, C. J. and Hesse, C.W., Independent component analysis for biomedical signals, Physiol. Meas. 26 R15-R39, 2005
- 5) 中村弘毅,中野公彦:独立成分分析を用いた車両加 速度からの外乱推定,第15回鉄道技術・政策連合シ ンポジウム(J-RAIL2008),pp449-452,2008
- 中野公彦:総合的交通システムとしての鉄道試験線の敷設,日本機械学会誌,Vol.112,No1087,pp504, (2009)