路面状態推定のための独立成分分析の応用*

中村 弘毅^{*1,*2}, 中野 公彦^{*1}, 内山 泰宏^{*3}, 柿原 正治^{*3}

Application of Independent Component Analysis for Road Profile Estimation

Hiroki NAKAMURA^{*1}, Kimihiko NAKANO, Yasuhiro UCHIYAMA and Shoji KAKIHARA^{*1} Institute of Industrial Science, The Univ. of Tokyo
Komaba 4-6-1, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

An application method of Independent Component Analysis (ICA) on vibration of an automobile considering dynamical properties is introduced and its performance is examined through a numerical simulation using a half car model. ICA is categorized in blind source separation method, and originally invented to separate significant signals buried in mixed signals. The proposed method separates road irregularity profile from mixed signals; data set of measured accelerations and calculated double integral of accelerations (displacements), integral of accelerations (velocities), differential accelerations (jerk) and double differential of accelerations. The advantage of proposed method is considering dynamical properties, while original ICA assumes a static mixture. So, it is effective on analysis of source separation in mechanical system including springs and dampers. Also, methods for fixing order of independent components and amplitude are proposed for the estimation of road irregularity. By applying the proposed method, road irregularity with information of amplitude is estimated without knowing parameters such as mass and spring constant.

Key Words : Method of Vibration Analysis, Monitoring, Automobile, Simulation, Independent Component Analysis

1. 結 言

自動車交通システムの安全性向上のためには路面、車体、サスペンションなどの状態監視が不可欠である。特にタイヤと路面の関係は車両運動特性に大きく影響する。そのために路面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。鉄道の分野では車体に搭載した簡易なセンサから軌道不整の情報を観測するプローブ車両というものが提案されていて⁽¹⁾、自動車でも車内に設置した簡易センサから路面不整が観測できれば非常に有益であると考えられる。しかし車内での信号計測は空気変動力や車体の弾性振動、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、その中に埋もれた路面不整の情報を検出することは困難である。つまり、路面不整のモニタリングにおいて外乱要素の分離手法の考案が不可欠となっている。鉄道分野においては、慣性正矢法と呼ばれる手法を用いた軌道不整推定⁽²⁾や伝達関数の逆関数を用いて路面不整を推定する手法⁽³⁾なども提案されている。慣性正矢法は軸箱にセンサを置くことでより精度の高い推定が可能である。ただし、軸箱はより強い振動にさらされるため高価なセンサが必要となる。また、逆伝達関数を用いた場合、モデルが正確であれば高い推定精度をもつが、モデル化誤差の影響を受けやすいことや、プロパーな系でなければ原信号を推定できないといった点は課題である。

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^(4,5)が提案されている。ICA は信号の独立性を仮定することで、混成過程が未知のまま原信号が復元可能な手法であり、機械システムの振動解析への適用も提案されている⁽⁶⁻¹⁰⁾。文献⁽⁶⁾は短

* 原稿受付 2012 年 10 月 25 日

^{*1} 正員, 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)^{*2} 日本学術振興会特別研究員 DC^{*3} IMV (株)

E-mail: Hiroki-n@iis.u-tokyo.ac.jp

時間フーリエ変換した信号を ICA で独立成分を復元することでベアリングの故障を診断する手法を提案している。文献⁽⁸⁾ではこの手法を応用し 1 つの観測信号をウェーブレット変換によって分解し、その信号群を独立成分分析することで故障歯車の特特定に成功している。これらの手法は少ない観測信号から原信号を推定することができる反面、診断対象となる周波数が既知である必要がある。また、文献⁽⁹⁾は ICA を用いて梁や平板のモード形状を推定する手法を提案し、さらにモード形状の変化から故障個所の推定可能性を示唆している。

このようにさまざまな振動が複雑に混成している車内で路面不整を観測するためには ICA は有効な手段であると考えられる。文献⁽¹⁰⁾では車両後輪の軸などに加速度センサを取りつけて加速度信号を直接観測信号として ICA を用いて路面状態推定を行っている。それに対して、著者らは車両の動特性を考慮し、車体上で計測される加速度から路面不整形の推定を行う研究を進めている⁽¹¹⁾。前述の慣性正矢法や逆伝達関数を用いる方法に対して、本手法の意義は設置が容易で安価なセンサを用いて路面状態推定を行う点である。ダッシュボードやトランクに設置したセンサを用いて原信号を推定するため、メンテナンスも容易である。そのため、検査車両ではなく一般車両やトラックなどの物流車両に取り付けて逐次データを蓄積可能である。自動車の半車体モデルを用いた数値解析により車体前後の加速度信号、およびその 2 階積分から 2 階微分までを含めた 5 つのことなる次元の観測信号を考慮して ICA 処理を行うことで、ばねやダンパを含む動的なシステムにおいて車両諸元が未知のまま路面不整が推定可能であるか検討し、実験車両に加速度計を取り付け、高速道路の路面不整推定を行ってきた。ただし、独立成分分析は得られる独立成分の順序が不定であることと、絶対値が正規化された無次元の値になることが課題であった。本研究では独立成分分析の探索過程に拘束条件を与えて特定の独立成分の順序を固定する手法を提案し、得られる独立成分の絶対値を決定する手法と合わせて有効性を検討する。

2. 手法

2・1 独立成分分析概要

独立成分分析 (ICA) の構造を図 1 に示す。また、原信号 $s(t)$ と観測信号 $x(t)$ の関係は以下の式であらわされる。

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

$$s'(t) = W x(t) \quad (2)$$

$s(t)$ と $x(t)$ は多チャンネルベクトルであり、 $s(t)$ の次元は $x(t)$ の次元以下であると仮定する。また、複数の原信号が線形に混成して観測されるため混成過程は行列 A であらわすことができる。行列 A が既知である場合 $W=A^{-1}$ であるから(2)式を用いて観測信号 $x(t)$ から原信号 $s(t)$ が推定できる。しかし、実際のシステムにおいて A を同定するのは困難な場合がある。そのため、何らかの条件を与えない限り W を同定することは不可能である。ここで、それぞれの原信号が独立に生成されたと仮定し観測信号 $x(t)$ が原信号 $s(t)$ の線形結合で表せるとする。ICA は $s(t)$ が最も独立になるように復元行列 W を決定する手法である。原信号の独立性のみを仮定するため、伝達過程が未知であっても信号の復元が可能になる。ここで、独立性とは統計的な独立性を指す。統計的な独立性和非ガウス性には非常に強い相関がある。この考え方は中心極限定理に基づいていて、二つの独立な確率変数の和の分布はそれぞれの変数の分布よりもガウス分布に近づくことが知られている。そのため観測された信号 $w_j(t)$ の線形結合 $s_i'(t) = \sum w_j(t)$ を考えると、非ガウス性が極大になったとき $s_i'(t)$ は独立な成分であると考えられる。本研究は尖度 (kurtosis) と呼ばれる 4 次の統計量で独立性を評価する FastICA⁽²⁾ というアルゴリズムを用いて独立成分分析を行った。確率変数 x の平均が 0 であり、 x の期待値を $E(x)$ とすると、尖度は以下の式であらわされる。

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

ここで重要なのは、非ガウス性を評価する尖度は最も単純な指標であるということである。FastICA は観測信号の無相関化の処理を行った後、尖度が最大になるような W を反復計算によって求め、独立成分を復元する。尖度の絶対値を最大化させるために行列 W の 1 つの行 $W_i (i=1,2,\dots,n)$ に着目し、観測信号 $\mathbf{x}(t)$ に基づいて $y_i = W_i \mathbf{x}(t)$ の尖度の絶対値が最も急激に増大する方向を計算し、 W_i をその方向に動かす。この考えを実現したものが勾配法である。この勾配法によって W_i を反復計算し収束した点が尖度の最大値を与えるので、このときの W_i を用いて独立成分の 1 つが線形結合 $y_i = W_i \mathbf{x}(t)$ として得られる。このアルゴリズムは FastICA と呼ばれる²⁾。本研究では Oja らが配布しているプログラムを用いて独立成分分析を行った。FastICA は尖度が最大になるような W を反復計算によって求め、独立成分を復元する。

Fig.1 Scheme of Independent Component Analysis

2・2 動特性を考慮した独立成分分析

加速度を元に路面不整を推定する方法を提案する。本稿で扱ったモデルを図2に示す。図中の x_2 と θ はそれぞれ車体重心の上下変位とピッチ角を表す。 x_2 は上向きを正とし、 θ は車体前方が沈み込む方向を正にとる。 x_{0f} , x_{0r} はそれぞれ前後輪への路面からの入力変位を表し、 x_{1f} , x_{1r} はそれぞれホイールの上下変位、 y_1, y_2 は車体に設置した加速度計およびその加速度を表し、それぞれ前後各車輪の直上の加速度を計測しているものとする。

Fig.2 Half car vertical vibration model

車両の運動方程式は以下のように記述できる。

$$m_f \ddot{x}_{1f} + k_{1f}(x_{1f} - x_{0f}) = k_{2f}(-x_{1f} + x_2 - l_f \theta) + c_{2f}(-\dot{x}_{1f} + \dot{x}_2 - l_f \dot{\theta}) \quad (4)$$

$$m_r \ddot{x}_{1r} + k_{1r}(x_{1r} - x_{0r}) = k_{2r}(-x_{1r} + x_2 + l_r \theta) + c_{2r}(-\dot{x}_{1r} + \dot{x}_2 + l_r \dot{\theta}) \quad (5)$$

$$m_2\ddot{x}_2 = -k_{2f}(-x_{1f} + x_2 - l_f\theta) - k_{2r}(-x_{1r} + x_2 + l_r\theta) - c_{2f}(-\dot{x}_{1f} + \dot{x}_2 - l_f\dot{\theta}) - c_{2r}(-\dot{x}_{1r} + \dot{x}_2 + l_r\dot{\theta}) \quad (6)$$

$$I\ddot{\theta} = +k_{2f}l_f(-x_{1f} + x_2 - l_f\theta) - k_{2r}l_r(-x_{1r} + x_2 + l_r\theta) + c_{2f}l_f(-\dot{x}_{1f} + \dot{x}_2 - l_f\dot{\theta}) - c_{2r}l_r(-\dot{x}_{1r} + \dot{x}_2 + l_r\dot{\theta}) \quad (7)$$

さらに、前後 2 つのセンサで計測される加速度と車体の上下加速度、ピッチ加速度の関係は以下のようにかける。

$$y_1 = \ddot{x}_2 - l_f\ddot{\theta} \quad (8)$$

$$y_2 = \ddot{x}_2 + l_r\ddot{\theta} \quad (9)$$

式(4)から(7) をラプラス変換し、路面不整からセンサへの伝達を考える。ここでは車両のばね定数やダンパ係数が未知であると仮定し、この場合適当な未知定数 a_i ($i=0\sim 11$), b_i ($i=0\sim 9$)を用いて以下のように記述できる。

$$(a_0 + a_1s)X_{0f} = \{a_2s^4 + a_3s^3 + a_4s^2 + a_5s + a_6\}X_2 + \{a_7s^4 + a_8s^3 + a_9s^2 + a_{10}s + a_{11}\}\theta \quad (10)$$

式 10 の X_2 , θ に Y_1 , Y_2 を代入すると以下のように記述できる。

$$(a_0 + a_1s)X_{0f} = \{b_0s^2 + b_1s + b_2 + b_3s^{-1} + b_4s^{-2}\}Y_1 + \{b_5s^2 + b_6s + b_7 + b_8s^{-1} + b_9s^{-2}\}Y_2 \quad (11)$$

ただし、 X_{0f} , X_{0r} , Y_1 , Y_2 , X_2 , θ はそれぞれ x_{0f} , x_{0r} , y_1 , y_2 , x_2 , θ のラプラス変換を表す。つまり路面不整とその微分値は車両の 2 点で上下加速度が計測された場合、加速度の 2 階微分から 2 階積分までの状態量を用いて、それらの線形結合であらわされている。後輪への入力変位についても同様に表すことが可能である。ここで、左辺の各項がそれぞれ独立に右辺の形式で表わせると考えることができるので、特異な場合を除いて式(11)を行列形式で表わすと以下のように記述できる。ただし、 A^T は行列 A の転置を表す。ここで行列 W は 6 行 8 列の要素を持つ横長の未知定数行列である。

$$\begin{bmatrix} X_{0f} \\ X_{0r} \\ sX_{0f} \\ sX_{0r} \\ X_{1f} \\ X_{1r} \end{bmatrix} = W \begin{bmatrix} s^{-2}Y_1 & s^{-2}Y_2 & s^{-1}Y_1 & s^{-1}Y_2 & Y_1 & Y_2 & sY_1 & sY_2 & s^2Y_1 & s^2Y_2 \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

式(13)の各変数を逆ラプラス変換によって時間関数で表わすと、式(12)は以下の形式に書き換えることができる。

$$\begin{bmatrix} x_{0f} \\ x_{0r} \\ \dot{x}_{0f} \\ \dot{x}_{0r} \\ x_{1f} \\ x_{1r} \end{bmatrix} = W \begin{bmatrix} \iint y_1 dt^2 & \iint y_2 dt^2 & \int y_1 dt & \int y_2 dt & y_1 & y_2 & \frac{dy_1}{dt} & \frac{dy_2}{dt} & \frac{d^2 y_1}{dt^2} & \frac{d^2 y_2}{dt^2} \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

このように、加振器からの入力は上下加速度とその1階微分、2階微分、1階積分（速度）、2階積分の線形結合で表わされる。左辺それぞれの信号（行列の各要素）は振動特性が異なり、形状がそれぞれ違った特徴をもつと考えられる。路面の凹凸とその微分値は周波数帯が異なり、またホイールの変異を表す x_{1f} , x_{2f} は 20Hz 付近に共振周波数をもつため、やはり統計的に異なる分布をもつ。そのため、ICA を用いてそれぞれの信号の分離が可能であると考えられる。この式(13)と ICA の構造を表す式(2) 式を比べると式(13)では W に相当する行列が横長になる。しかし FastICA のアルゴリズムは初期条件では混成行列 A が正方になることを仮定している。そのため、この手法で路面不整を推定する場合、路面不整以外の外乱 $x'_n (n=0 \sim 7)$ を適当な数だけ仮定し以下のように表す必要がある。

$$\begin{bmatrix} x_{0f} \\ x_{0r} \\ x'_n \end{bmatrix} = W \begin{bmatrix} \iint y_1 dt^2 & \iint y_2 dt^2 & \int y_1 dt & \int y_2 dt & y_1 & y_2 & \frac{dy_1}{dt} & \frac{dy_2}{dt} & \frac{d^2 y_1}{dt^2} & \frac{d^2 y_2}{dt^2} \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

10 系列の観測信号をもとに ICA を行っているため、前後の路面入力変位以外に最大 8 系列の復元信号が検出される場合がある。

2・3 解探索の条件

ICA は計算アルゴリズムの性質上、解の探索をランダムな値から開始する。そのため、得られる独立成分の順序が不定であるという課題があった。そこで ICA を路面不整の推定に有効に利用するために、得られる独立成分の順序を固定し、絶対値を決定する手法を提案する。加速度信号の計測から路面不整の推定過程は以下のような流れで行われる。

Fig.3 Flow chart of road estimation process

あらかじめ特定の車両で既知の路面を走行し、加速度計測を行い、動特性を考慮した ICA によって路面不整の推定を行う。得られた独立成分と既知路面とを比較し順序とスケール（絶対値）の決定を行う。ここで得られる混成行列 $\mathbf{A}_0$ 、復元行列 $\mathbf{W}_0$ 、スケールを用いて未知路面の推定を行う。

加速度計を設置した任意の車両（既知路面を走行した車両とは異なるものでも可）で未知路面を走行し、加速度計測を行う。微積分計算によって観測信号を得たのち、混成行列 $\mathbf{A}_0$ 、復元行列 $\mathbf{W}_0$ を解探索の初期条件として FastICA によって独立成分の推定を行う。FastICA のアルゴリズムは勾配法と呼ばれる手法を用いて解探索を行っている。これは初期値から尖度の最大値を探すときに最も尖度の変化が大きい方向に向かって復元行列を探していく方法で、各振動原の周波数の高低や強さ大小の相対的な関係が定性的に同じであれば得られる独立成分の順序が変化しないと考えられる。そのため、得られた独立成分に既知路面走行時のスケールを乗じて絶対値のある路面不整の推定を行うことが可能となる。

3. 数値解析

3・1 概要

提案手法の有効性を検討するため、半車体モデルの時刻歴解析を行った。4 次のルンゲクッタ法を用いて 10m/s で走行する車両の上下振動を求めた。時刻歴解析で求めた車体加速度に平均 0 の一様分布に従う乱数波を雑音として混入し加速度センサ計測信号とした。この雑音はセンサの観測雑音などを想定したものである。40 秒間の走行で加速度の二乗平均の平方根（RMS 値）を求め、加速度の RMS 値に対して雑音の RMS 値が 5 : 1 になるように大きさを調整した。他の手法においては雑音の割合が大きくなるにつれて推定精度が悪くなるのに比較して、ICA を利用した推定ではノイズの分離が可能である⁽¹²⁾。本稿の半車体モデルは文献⁽¹²⁾で扱っている鉄道台車モデルと完全に同じものではないが、同様の傾向があると考えられる。また、路面不整は実際の道路のパワースペクトル密度と同等になるように乱数にフィルタリングをし、長さ 400m の路面不整をサンプリング周期 0.05m で作成した。既知路面を走行する基準車両と、未知路面を走行する車両の諸元を表 1 に示す。基準車両に対して、ばね定数を変化させた実験車両 1、ダンパ係数を変化させた実験車両 2、質量およびピッチ慣性モーメントを変えた実験車両 3 を用いて、提案手法の有効性を示す。

Table 1 Specifications of the cars

Parameters	Symbol	Standard car	Test car 1	Test car 2	Test car 3	Units
Mass of half body	m	700	700	700	1000	kg
Inertia of half body	I	2.4×10^3	2.4×10^3	2.4×10^3	3.0×10^3	kgm ²
Front/Rear spring constants	k_{2f}	22	11	22	22	kN/m
	k_{2r}	16	16	16	16	
Front/Rear damping constants	c_{2f}	1.8	1.8	1.8	1.8	kN/(m/s)
	c_{2r}	1.5	1.5	0.75	1.5	
Front /Rear wheel mass	m_{1f}	38	38	38	38	kg
	m_{1r}	28	28	28	28	
Front/Rear tire stiffness	k_{1f}	1.6×10^5	1.6×10^5	1.6×10^5	1.6×10^5	N/m
	k_{2r}	1.1×10^5	1.1×10^5	1.1×10^5	1.1×10^5	
Distance between C.O.G. and front/rear suspension	l_f	1.1	1.1	1.1	1.1	m
	l_r	1.4	1.4	1.4	1.4	
Natural frequency		1.52, 2.14, 19.2, 19.7	1.27, 1.89, 19.0, 19.2	1.53, 2.10, 19.2, 19.9	1.35, 1.87, 19.2, 19.8	Hz

3・2 基準路面走行

図3のフローチャートに従って既知路面を基準車両で走行するシミュレーションを行い、混成行列 $\mathbf{A}_0$ 、復元行列 $\mathbf{W}_0$ 、およびスケール a_0 を求める。計測された加速度信号を図4に示す。計測された加速度信号を微積分計算して観測信号とし、独立成分分析を行った。得られた独立成分を図5に示す。図中の3段目、4段目がそれぞれ前輪、後輪の路面不整に相当する。ただし、ICAによって得られた信号は正規化された無次元の値になっている。そこで、基準路面と絶対値が合うようにスケール a_0 を求めた。図6にスケールを合わせた独立成分と基準路面不整を示す。(a)、(b)はそれぞれ前輪、後輪に加えられる路面不整の入力を表す。独立成分分析の計算過程で得られた混成行列を $\mathbf{A}_0$ 、復元行列を $\mathbf{W}_0$ として以後異なる車両の独立成分分析を行う際に利用する。

Fig.4 Measured accelerations of a standard car on test track; (a) and (b) represent front and rear accelerations respectively

Fig.5 Independent components of a standard car on test track

Fig.6 Comparison between input road displacement and independent components; (a) and (b) represents front and rear displacements respectively

3・3 様々な車両での推定の有効性

未知の路面不整に対して、基準車両、実験車両 1～3 の 4 つの条件について混成行列 A_0 、復元行列 W_0 を ICA の解探索の初期条件として同様の走行シミュレーションを行った。基準車両に対して、実験車両 1～3 はそれぞればね定数、ダンパ係数、質量を変更したものである。特性の異なる車両に対して、混成行列 A_0 、復元行列 W_0 が推定性能にどのような影響を与えるかを検討する。

図 7 は推定された独立成分と入力と比較である。ただし、順序は 3・2 節で得られたのと同じ順序 (3, 4 段目) の独立成分を抽出している。(a), (b) は前輪の入力と推定値の比較を表し、(c), (d) は後輪の入力と推定値の比較を表している。薄太線は入力振動を表し、細線はそれぞれ推定値を表す。(a) の破線は基準車両で未知の路面を走行したときの前輪の路面不整推定値を表し、細線は実験車両 1 で走行したシミュレーションで推定結果を表す。(b) の破線は実験車両 2 で走行したときの推定結果、実線は実験車両 3 で走行したときの推定結果を表す。同様に (c) の破線は基準車両で未知の路面を走行したときの後輪の路面不整推定値を表し、細線は実験車両 1 で走行したシミュレーションで推定結果を表す。(d) の破線は実験車両 2 で走行したときの推定結果、実線は実験車両 3 で走行したときの推定結果を表す。図のように、基準車両が走行したときに得られた独立成分と同じ順序で路面不整の推定値が得られることがわかる。また、基準車両のスケールを適用することで路面不整の変位を推定できている。このように、ばね、ダンパ、質量といった車両特性の変化に対しても基準車両の混成行列 A_0 、復元行列 W_0 、およびスケール a_0 を利用することで路面不整を推定できることがわかる。

また、車両の走行速度とホイールベースが既知であるとき、前輪と後輪への路面不整による入力変位は以下のように表せる。ただし、 t_0 は速度 v とホイールベースによって決まる時間である。

$$x_{0f}(t) = x_{0r}(t + t_0) \quad (15)$$

$$t_0 = (l_f + l_r) / v \quad (16)$$

Fig.7 Comparison between input road displacement and estimated values; (a) and (b) represent front displacements; (c) and (d) represent rear displacements respectively

そこで、推定された前輪、後輪への入力的时间差を考慮して、平均値をとることで推定精度の向上が期待できる。つまり、二つの独立成分を用いて、推定される路面不整は以下のように表せる。

$$Road(t) = \{IC_f(t) + IC_r(t+t_0)\} / 2 \quad (17)$$

ただし、 IC_f 、 IC_r はそれぞれ前輪、後輪の入力の推定値を表す。それぞれの走行条件での比較のため、推定された路面不整およびパワースペクトル密度を図8、9に示す。図8は式(17)を利用して得られた路面不整の時刻歴での比較、図9は式(18)を利用して得られた路面不整の周波数特性を比較している。図のように、8Hz付近までは精度よく推定できているのに対し、それ以上の高周波では十分な推定性能が得られていない。これは、加速度信号に混入した白色ノイズが十分に分離されていないためである。しかし、異なる車両条件に対しても同程度の推定精度が得られることから、解探索の初期条件を基準車両の走行データから決定する提案手法が有効であることを示している。乗用車であれば同一クラスの車両に対しては基準車両のデータが適用可能であると考えられ、実

運用時には軽自動車，普通乗用車，トラック，のようにクラスごとに基準車両のデータを用意することで運用可能になると考えられる。

Fig.8 Input displacement and estimated values in time historical scale

Fig.9 Power spectrum density of input displacement and estimated values

4. 結 言

本論文は動特性を考慮した ICA による振動解析手法に独立成分の順序を固定する手法と路面不整の絶対値を決定する手法を組み込み，数値解析をととして提案手法による振動源の推定性能を検討しその有効性を示した．車体前後の上下加速度，およびその 2 階積分(変位)，1 階積分値(速度)，1 階微分値，2 階微分値の計 10 系列の観測信号を求め，FastICA によって信号の分離を行い，基準走行時の混成行列，復元行列，スケールを利用して，ばね定数，ダンパ係数，車重がそれぞれ約 50%変化している車両に対しても独立成分の順序，および絶対値を決定できることを示した．そのため，乗用車であれば同一クラスの車両に対しては基準車両のデータが適用可能である．また，前後輪への入力時間差を利用して路面不整の推定性能を向上させることを示した．本手法は運動方程式の次数を既知としているが車両のそれぞれの諸元は未知のまま信号源の分離を行った．今後，実車での実験を行い，実運用の可能性を検討する予定である．

なお、本研究は科学研究費補助金（課題番号：21760168）の助成を受けたものである。関係各位に感謝する。

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”, 日本機械学会第 13 回交通・物流部門大会講演論文集, Vol.2004(13), (2004), pp.241-242.
- (2) 竹下邦夫, 矢澤英治, “慣性正矢法による軌道狂い検測装置の開発”, 鉄道総研報告, Vol.14(4), (2000), pp.25-30.
- (3) 遠藤容満, 椎葉太一, 森田恵介, “車両の上下動特性に基づく路面凹凸形状の推定”, 日本機械学会第 18 回交通・物流部門大会講演論文集, Vol. 2009(18), (2009), pp.117-120.
- (4) Hyvärinen, A. Karhunen, J. and Oja, E., *Independent Component Analysis*, (2001), John Wiley & Sons.
- (5) James, C. J. and Hesse, C.W., “Independent component analysis for biomedical signals”, *Physiological Measurement*, Vol.26, (2005), pp.15-39.
- (6) Gelle, G. Colas, M and Serviere, C., “Blind source separation: a tool for rotating machine monitoring by vibrations analysis”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.248(5), (2001), pp.865-885.
- (7) 高木賢太郎, 長瀬賢二, 早川義一, 川崎督生, “独立成分解析を用いたモード形状の推定法と故障診断への応用”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.70, No.698, (2004), pp.57-63.
- (8) Zuo, M.J. Lin, J. Fan, X.F., “Feature separation using ICA for a one-dimensional time series and its application in fault detection”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.287(3), (2005), pp.614-624.
- (9) 黒地孝, 日野順市, 芳村敏夫, “独立成分分析を用いた未知入力システムの同定と未知入力の復元”, 日本機械学会中国四国支部第 44 期総会講演会講演論文集, No.065-1, (2006), pp.261-262.
- (10) 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・物流部門大会講演論文集, Vol. 2008(17), (2008). pp.103-106.
- (11) 中村弘毅, 中野公彦, “独立成分分析法を用いた車両振動の解析”, 日本機械学会論文集 C 編 Vol.76, No.765, (2010) pp.139-146.
- (12) 中村弘毅, “動特性を考慮した独立成分分析法による機械振動の解析”, 東京大学工学系研究科修士論文, (2010), pp.36-44.