

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760168

研究課題名（和文） 独立成分分析を用いた振動源特定とシステム同定

研究課題名（英文） System identification and detection of vibration source
using independent component analysis

研究代表者

中野 公彦（KIMHIKO NAKANO）

東京大学・大学院情報学環・准教授

研究者番号：90325241

研究成果の概要（和文）：この研究では、独立成分分析（ICA）法を用いて、動特性を考慮しながら車両の振動源の同定を行うことを提案し、数値計算と模型実験を通じてその性能を検討する。動的な混合行列を見つけるために、計測した車両加速度の積分、二重積分、微分、二重微分を求め、それらを観測信号として扱い ICA を行う。信号源の分離性能を検討するため、二種類の異なる振動によって実験装置を下方から加振した。類似した周波数帯に属する二種類の異なる信号が同定され、同様の結果が数値計算からも得られた。これより、提案手法の妥当性が示された。

研究成果の概要（英文）：This study proposes to use Independent Component Analysis, ICA, to identify vibration source of vehicles considering dynamical properties and examines the performance through numerical simulations and lab experiments. To find mixing matrix dynamically, integral, double integral, differential and double differential of accelerations measured on the body frame, which are treated as observed signals in ICA, are calculated. To examine the separation performance, two different types of vibrations are excited from the bottom of the experimental setup. Then, two different signals, which have similar frequency feature, are identified. Similar results are also obtained through numerical simulations. These results verified the proposed method.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
H 2 1 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
H 2 2 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：振動解析・実験、振動学

1. 研究開始当初の背景

鉄道などの輸送システムにおいては安全であることが重要であり、そのためには、常にモニタリングを行い、車両や軌道に異常が発生した場合には、それを速やかに検知する

ことが求められる。そのためには、走行時に、軌道不整や車両の同定を行う必要がある。しかし、一般的な同定法は、入力を与え、センサによって出力を計測し、その間の伝達関数を推定することであり、入力が既知であるこ

とが必要となる。しかし、実走行時においては、入力となる外乱は未知である。また、外乱も1種類ではなく、例えば鉄道車両においては、軌道不整以外にも、空力、搭載機器の振動などが、外乱となる。すなわち、入力と伝達関数が未知の状態、伝達関数を同定する必要がある。従来の方法では、この作業は困難である。

生体計測の分野で用いられている独立成分分析 (Independent Component Analysis, 略称 ICA) と呼ばれる新しい信号処理法を自動車および鉄道車両を例にして、機械システムの振動源の推定に用いることを試みる。未知な複数の源信号が未知の線形行列を通じて混合されて出力された複数の信号 (源信号と同じ数) を計測しているという問題を設定し、源信号は独立した信号であるという仮定をし、最も独立になるように源信号を推定する手法である。これにより、入力が未知の状態、入力 (振動源) の同定が可能となる。この手法を用いれば、走行している車両の加速度から、軌道不整などの外乱入力の推定を行うことが可能になる。ただし、ICA は静的な混合を前提としているが、機械システムは動的なシステムであるため、本来は動的な混合を考えなければならない。すなわち、未知の線形行列の各要素は伝達関数で表されることを前提にする必要がある。

2. 研究の目的

未知である動的システムにおいて、次数だけは既知であるという前提の下、未知の線形行列を動的に同定することを提案する。具体的には、計測されたデータの微分値、積分値を求め、それらも独立成分分析の入力として扱い、源信号を求める。この処理により、動的な系であっても、軌道不整などの振動源を推定することができる。

自動車と相似である模型実験装置を作成し、路面不整を模擬した、前後で時間差をもって入力される振動を、車体に相当する剛体の加速度から推定することを試みる。数値計算と実験の結果から、提案する手法の妥当性を示すことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 動特性を考慮した独立成分分析

複数の信号源が存在しそれらを観測する場合、原信号 $s_i(t)$ と観測信号 $x_i(t)$ の関係は以下のように表すことができる ($i=1 \dots n$)。

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_n(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで $W=A^{-1}$ とすると、原信号 $s(t)$ は以下の式で表される。

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

ICA は観測信号 $x_i(t)$ から原信号 $s_i(t)$ を復元する行列 W を求める手法である。 $s_i(t)$ が最も独立になるような W を反復計算によって求める。

ICA は混成過程を定数行列で仮定している。一方、動特性を持つ機械システムの振動伝達は以下のように表わすことができる。ただし、 $S_i(s)$ 、 $X_i(s)$ はそれぞれ原信号 $s_i(t)$ 、および観測信号 $x_i(t)$ のラプラス変換を表す。

$$\begin{bmatrix} X_1(s) \\ X_2(s) \\ \vdots \\ X_n(s) \end{bmatrix} = A(s) \begin{bmatrix} S_1(s) \\ S_2(s) \\ \vdots \\ S_n(s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

このように混成行列が定数行列ではないため従来の ICA では適用対象が限定される。ここで、観測信号を適当な階数微積分した信号を求め、それらの信号を観測信号の一部と考えると、計測信号と計算された微積分信号の線形結合によって原信号を表すことが可能になる。そのため解析対象となるシステムの伝達関数の次数が分かれば動特性を考慮した独立成分分析による振動解析が可能になると考えられる。

自動車車体の状態量を例に路面不整を推定する方法を説明する。半車体モデルを用いた数値解析、模型実験を行った。本モデルは4次遅れ系である。そのため、路面不整(式(4) x_{0f}, x_{0r}) は加速度(式(4) y_1, y_2) と、その二階微分から二階積分までの状態量の線形結合であらわされる。ここで行列 W は6行10列の要素を持つ横長の未知定数行列となる。加速度の二階微分から二階積分までの状態量を観測信号とすることで ICA により路面不整の振動を独立成分として分離できると考えられる。

$$\begin{bmatrix} x_{0f} \\ x_{0r} \\ \dot{x}_{0f} \\ \dot{x}_{0r} \\ x_{1f} \\ x_{1r} \end{bmatrix} = W \left[\int \int y_1 dt, \int \int y_2 dt, \int y_1 dt, \int y_2 dt, y_1, y_2, \frac{dy_1}{dt}, \frac{dy_2}{dt}, \frac{d^2 y_1}{dt^2}, \frac{d^2 y_2}{dt^2} \right]^T \quad (4)$$

左辺それぞれの信号は振動特性が異なり、違った特徴をもつと考えられるため、ICA を用いてそれぞれの信号の分離が可能である。

(2) 模型実験

自動車と等価の振動特性を持つ実験装置によって実験を行う。実験装置は上下方向の並進振動とピッチを再現した半車体モデルである。装置の構成を図1に示す。

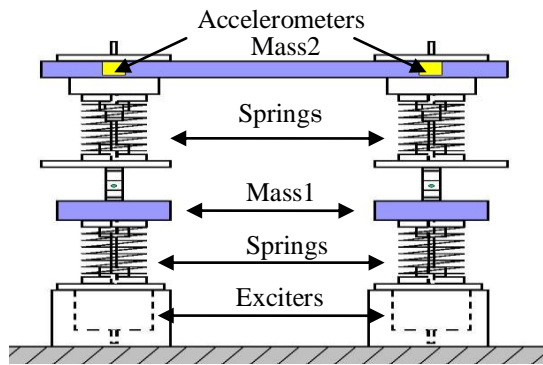


図1 実験装置概略

前後の加振器によりばね下質量を加振し、自動車走行時の振動を模擬することができる。質量2の前後2か所に加速度センサを取り付け、上下方向の加速度をそれぞれ計測する。模型は相似則に従って設計され、固有振動数は1.44Hz, 2.38Hz, 19.72Hz, 25.82Hzになっている。各固有振動数はその比が自動車と同等になるように設計している。

入力振動を以下に示す。図2(a)は周波数2.5Hzの正弦波に一樣な乱数を重ねた信号、(b), (c)はそれぞれ時間差で矩形の信号を入力したときモータが発生する力を表している。前の加振装置からは図2(a)と(b)を重ね合わせた信号を入力し、後の加振装置からは図2(a)と(c)を重ねた信号を入力している。

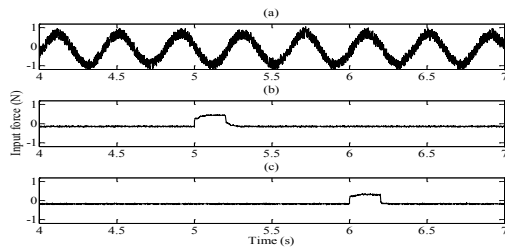


図2 入力

4. 研究成果

(1) 実験結果

図3に計測された上下加速度を表す。この加速度信号から数値計算によって二階積分から二階微分の信号を計算し、それら10系列の信号を入力として独立成分分析を行った(図4)。得られた独立成分を図5に示す。合計9本の独立成分のうち1段目の信号が入力信号から矩形の信号を分離していると考えられる。数値解析でも同様の結果が得られた。

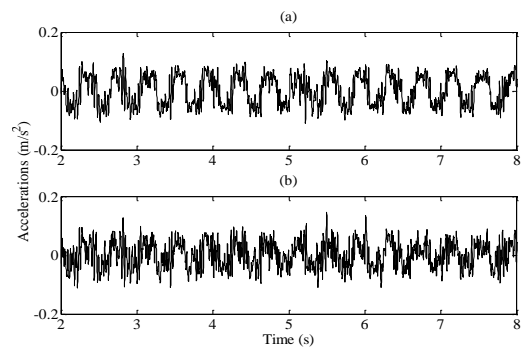


図3 計測した加速度

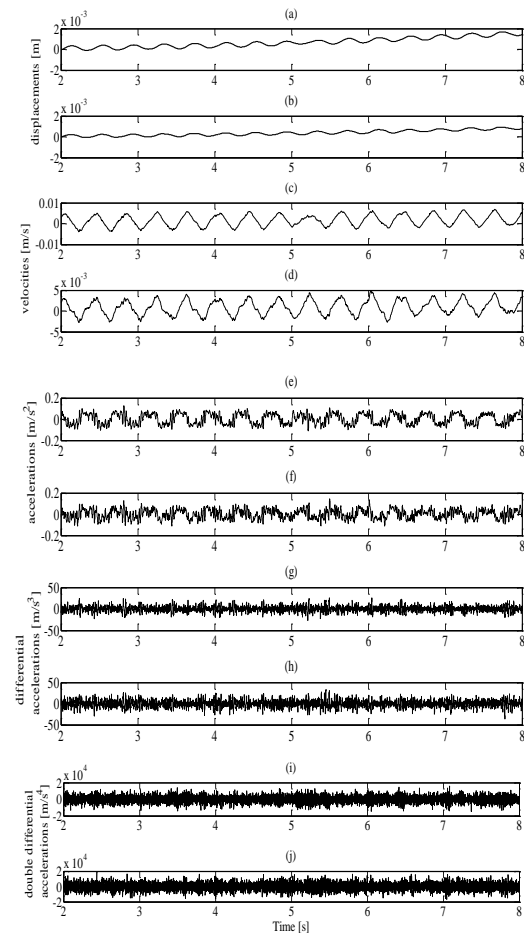


図4 入力信号: a, bは二階積分(変位), c, dは一階積分(速度), e, fは計測加速度, g, hは加速度の一階微分値, i, jは二階微分値

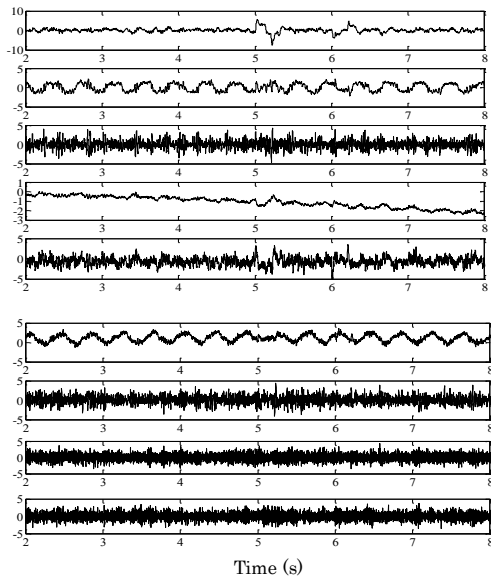


図5 模型実験ICA解析結果

(2) 周波数解析との比較

計測した加速度のスペクトログラムを図6に示す。スペクトログラムをみると、前後ともに2.5Hzに強い信号が表れている。前方の信号は5秒後から信号が弱められ、後方の信号は6秒後に一時的に2.5Hz付近の信号が強められている。これは入力に矩形の信号を混ぜたタイミングに合っている。ただし、スペクトログラムによる解析では同一の周波数の異なる信号が混成された場合、一つのスペクトルの強度が変化するのみで、このスペクトログラムから入力信号に複数の信号が混ざっていることを推定するのは困難である。ここが、提案する手法が、既存の周波数解析に対して有利な点である。

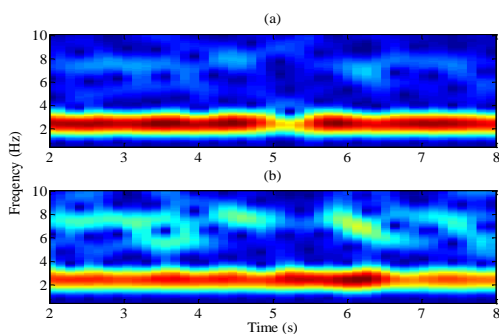


図6 計測した加速度のスペクトログラム

(3) 成果のまとめ

動特性を考慮したICAによる振動解析手法を提案し、模型実験を通して提案手法による振動源の推定性能を検討した。模型は自動車の半車体モデルと等価なものを用い、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、ICAによって信号の分離を行った。その結果周波数解析では分離が困難な、共通の周波数特性のピークを持つ異なる形状の信号を分離することに成功した。

(4) 成果の国内外への位置づけ

ICAを用いて振動解析を行った例は少なく、特に、動特性を考慮した混合行列を扱った例は国内では見当たらない。また、海外では1チャンネルの信号をフーリエ変換したものを、ICA分析することによって動特性を考慮した研究成果が存在する。しかし、当該論文の著者が指摘している通り、入力信号が徒に増える欠点がある。提案する手法は、入力信号の増加を適当に抑えることができることが有利な点である。国内では、既に雑誌論文に掲載されており、その成果が認められていることがわかる。また、国外のシンポジウムにおいても発表を行い、聴衆の関心も高かった。今後は、国際雑誌への投稿も考えている。

(5) 今後の展望

今後は以下の点に着目して研究を進める予定である。

1. ICAによって、波形だけではなく、絶対値も推定する手法を提案する。現状では、不可能であるが、入力が既知である個所を一度走行し、そのデータを活用できれば、絶対値も合わせる事が可能である。理論だけではなく、現実的な使い方を想定して、問題解決を図りたい。
2. 実車両を使った実験によって、有効性を評価する。自動車への応用を中心にして、実車両からの路面不整推定を行うことを考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 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), 76 巻 765 号, 1163-1170 (2010)、査読有

[学会発表] (計6件)

- ① Hiroki Nakamura, Kimihiko Nakano, Masanori Ohori, Vibration Analysis of Railway Vehicles Using Independent Component Analysis, Abstracts of 12th MINI Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, pp.5-6 (2010)
- ② 中村弘毅, 中野公彦, 動特性を考慮した独立成分分析法を用いた車両振動の解析,

日本機械学会 Dynamic and Design Conference 2010 CD-ROM 論文集, No. 10-8 (2010)、査読無

- ③ Hiroki Nakamura, Kimihiko Nakano, Masanori Ohori, Estimation Method of Vertical Track Irregularity Using Independent Component Analysis -Experimental review using an actual bogie-, Proc.of the 10th International conference on Motion and Vibration Control CD-ROM, 2C33 (2010)
- ④ 中村弘毅, 中野公彦, 大堀真敬, 独立成分分析法を用いた軌道高低狂い推定法, 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, 09-65, 603-606 (2009)、査読無
- ⑤ 中村弘毅, 中野公彦, 独立成分分析法を用いた鉄道台車加速度からの軌道形状推定, 第 52 回自動制御連合講演会予稿集 (CD-ROM), D4-3 (2009)、査読無
- ⑥ 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 Dynamics and Design Conference 2009 CD-ROM 論文集, No. 09-23 (2009), 査読無

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ

<http://www.knakanolab.iis.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中野 公彦 (NAKANO KIMIHIKO)
東京大学・大学院情報学環・准教授
研究者番号：90325241

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし