鉄道車両における線形システム同定時の精度向上法

清水 惇* 古川 敦 (鉄道総合技術研究所)

An accuracy improvement method of system identification between rolling stock and track irregularity Atsushi Shimizu^{*}, Atsushi Furukawa, (Railway Technical Research Institute)

We use the technique that is called system identification to identify the dynamic characteristic of an unknown system. In the field of the track management the system identification method is applied to obtain the dynamic response of the vehicle excited by the track irregularity. Though it is an ideal to use a white input signal that evenly contains all the frequencies, the identification accuracy might fall on the system identification by colored of the input signal in the data measured on operating line. In this paper, we have examined the technique to reduce the influence of the problem when we identify the relationship between the wheel load and vehicle accelerations.

キーワード:システム同定、輪重、車体振動加速度 **Keywords**: System identification, wheel load, vehicle acceleration

1. はじめに

一般に、動特性が未知のシステムを同定するために、シ ステム同定と呼ばれる手法が用いられる。軌道管理の分野 においても、例えば軌道変位による車両の応答特性などを 求めるために、システム同定が行われる¹⁾。

システム同定には、全ての周波数を均等に含む白色性の 入力信号を用いるのが理想であるが、営業線上で測定され たデータでは、入力信号の有色性によって同定精度が下が ることがある。また、サンプリング間隔が必要以上に短い 場合、これが同定精度を下げる可能性がある。

本稿では、軌道変位に対する車両の応答を例として、シ ステム同定を行う際の、前記の問題点の影響を小さくする 手法を検討した。以下にその結果を述べる。

2. 従来のシステム同定法の問題点

〈2・1〉 システム同定とは(1)

システム同定とは、システムへの入力信号およびシステ ムからの出力信号を観測し、これらを用いてシステムの動 的な特性を同定する手順をいう。

昨今では、システムの出力の推定のために様々な動的シ ミュレーションモデルが用いられる。しかし、例えば機械 系の振動であっても、個々の要素の正確なばね定数や減衰 定数は未知の場合が多いことや、モデル化の過程で様々な 近似が行われることから、シミュレーションによる出力は、 実現象とは必ずしも一致しない。また、昨今の計算機能力 の向上は著しいものの、動的シミュレーションには、多大 なる計算機負荷が必要となる。したがって、同定されたシ ステムの動特性を用いた出力の予測は、対象となるシステ ムが複雑であるほど、有用となる。

システム同定には大きく分けて2つの方法がある。一つ は、FFT を用いて周波数領域でシステムの応答特性を求め る方法であり、システムの動特性が周波数応答関数の形で 表されることから「ノンパラメトリックモデル」と呼ばれ る。もう一つは時間軸(または空間軸)領域で、システム の動特性を表すパラメータを直接求める方法で、「パラメ トリックモデル」と呼ばれる。

以下の検討では、鉄道車両の上下・左右振動加速度の2 つを入力信号、輪重(右)を出力信号とし、パラメトリッ クモデルを用いて両者の関係を同定する。

<2・2> 軌道/車両の相互作用系の同定における問題(1)入力信号のPE性の問題

一般に、同定対象の振動モード数は不明のことが多いの で、システム同定の際にはより多くの周波数成分を含む励 起(入力)信号を用いるのが望ましい。具体的には、シス テムがn次系であれば、入力信号は次数2n以上のPE (persistently exciting)性信号でなければならない。簡単に言 えば、n種類以上の周波数成分からなる正弦波を含む信号 を入力とする必要がある。理想的には、すべての周波数を 均等に含む白色性信号であるのが良い。鉄道車両の場合、 任意の周波数で車両を加振できる設備があれば良いが、営 業線で得られる入出力信号では、このような条件は満たさ れないのが一般的である。この場合、入力信号にいくつか の卓越周波数が存在するため、これらの卓越周波数以外の 帯域では同定精度が低下する。一般には、入力信号の卓越 周波数とシステムの固有振動数は一致しないため、最も重 要な固有モードが精度良く同定てきない可能性が生じる。

(2) 入力信号のサンプリング間隔の問題

ー般に、データ処理速度や容量の問題が無ければ、サン プリング間隔は短い方が良い。しかしながら、システム同 定では必ずしもそうとはいえない面がある。以下にその概 念を述べる。



Fig.1 本研究で用いた入出力信号のパワースペクトル

Fig.1 に示す周波数特性を持つ入出力信号からシステムを 同定することを考える。図からわかるように、入出力信号 とも 10Hz でカットオフしている。したがって、システム同 定を行う際には 20Hz以上の周波数でサンプリングされた時 系列データを用いる必要があるが、サンプリング周波数が 高過ぎると、同定結果にカットオフした 10Hz 以上の帯域の 影響が現れ、精度が低下することがある。

(3) 本研究の対象

以上の現状認識に基づき、本研究では以下の2点の検討 を行った。

- 同一区間の入出力データについて、サンプリング周波数を変更した場合の、同定精度の比較。
- ② 有色性信号である入出力信号をいくつかの周波数帯域 に分割してシステム同定を行った場合と、着目する全 帯域を一括してシステム同定した場合の比較。

3. システム同定の精度向上法の検討

〈3・1〉 サンプリング間隔の変更

(1) 同定対象

同定対象と、入出力信号の性質は以下のとおりである。 ・用いる信号

- 入力:車体前台車直上で測定した上下動、左右動
- 出力:前台車第1軸の輪重のうち、定常成分(静止輪重) を、0.5Hz 以下をカットオフするフィルタで除いたもの。ここでは右車輪を対象とした。

なお、入出力をこのように設定したのは、将来的に本手 法を、走行安全性(輪重抜け)を考慮した車体振動加速度 の管理に用いるためである。

・信号の特性

車上で、6000plus/sec で測定し、10Hz 以上をカットオフ。 (2) 同定条件

上記の入出力信号に対し、サンプリング間隔を以下の 3 種類にデシメーションし、システム同定結果を比較した。

- ①サンプリング間隔 0.001sec
- ②サンプリング間隔 0.04sec

③サンプリング間隔 0.01sec

(3) 同定結果

Fig.2 に、各サンプリング間隔での予測波形と実測波形を、 Fig.3 に各波形のパワースペクトル密度を、Fig.4 に実測波形 /予測波形の振幅比を、Fig.5 に両波形のコヒーレンスを示 す。

輪重実測 10)	mh	manne	when	hum
[kN] -10 サンプリング 10		<		.1	-
(0.001) [kN] -10)	ann an	ware and	Whome	neutr
サンプリング 1((0.04) [kN] -1(amman	unggendegetaget	when	-
サンプリング 1((0.01) ([kN]-1(manga	in the stand	helpours	~~





Fig.3 実測波形と予測波形のパワースペクトル密度



Fig.5 予測波形と実測波形のコヒーレンス

周波数[Hz]

Fig.2 の予測波形ではサンプリング間隔の変更による違い は見られないが、パワースペクトル密度、振幅比およびコ ヒーレンスからサンプリング間隔による差が見られた。 Fig.3 から実測波形と予測波形を比較すると、全体的なパワ ーは低下しているが、2Hz~10Hz の帯域では、サンプリン グ間隔によらず実測波形と予測波形の周波数特性がよい一 致を見せている。0.5~2Hz での帯域では、サンプリング間 隔を広げるに従って周波数特性が実測波形に近づいている ことがわかる。Fig.4 から、1Hz~10Hz の帯域では、サンプ リング間隔を広げるに従って1 に近づいているが、0.5Hz~ 1Hz の帯域では、サンプリング間隔 0.04sec での結果が最も 1 に近づくことがわかる。Fig.5 からもサンプリング間隔 0.04sec での予測波形が最も相関が高いことが確認できる。

今回用いた入出力信号は 10Hz でカットオフしているが、 サンプリング間隔 0.001 ではサンプリング間隔が小さすぎ ることで、カットオフした 10Hz 以上の帯域の影響を受けた ために同定精度が低下し、サンプリング間隔を大きくする ことでその影響を受けず、精度のよい結果が得られている と考えられる。

以上のことから、システム同定におけるサンプリング間 隔の変更により同定精度に変化が見られることがわかり、 入出力信号の周波数特性に応じてサンプリング間隔を選定 する必要があることがわかった。

〈3・2〉 同定対象帯域の分割

(1) 同定対象

前節と同じ入出力信号を用いて、同定帯域をいくつかに 分割してシステム同定を行い、全体を一括して行った場合 とを比較した。両者の評価は、これらの同定結果から得ら れる予測波形と実測波形との一致度により行った。以下、 これらの予測波形を「帯域別予測」、「全帯域予測」と記す。

同定帯域は、Fig.1を参考として以下の3つとした。なお、 帯域毎にサンプリング間隔を変更している。なお、予測波 形の推定の際には、各々の帯域で得られたシステムの動特 性を用いてそれぞれの帯域の出力波形を予測し、サンプリ ング周波数を合わせた上で3つの出力波形の和を求めた。

低周波: 0.5Hz~1.0Hz、サンプリング間隔 0.2sec 中周波: 1.0Hz~2.4Hz、サンプリング間隔 0.1sec 高周波: 2.5Hz~10.0Hz、サンプリング間隔 0.04sec なお、全帯域同定では、前節での結果を受けてサンプリ ング間隔を 0.04sec とした。

(2) 同定結果

Fig.6 に、予測波形と実測波形を、Fig.7 に各波形のパワー スペクトル密度を、Fig.8 に実測波形/予測波形の振幅比を、 Fig.9 に両波形のコヒーレンスを示す。

Fig.6 から、帯域別予測波形と全帯域予測波形では、前者 の方が、実測波形の大局的な変動傾向を良く再現している ことがわかる。これを周波数別に見ると、Fig.7(1)から、帯 域別予測波形は、高周波および中周波については実測波形 とよく一致しているものの、低周波で予測波形は実測波形 よりも小さくなっている。また同図(2)から、全帯域予測で も低周波での乖離が見られ、高周波および中周波では更に 差が大きくなっており、これが Fig.8 で、全帯域予測波形と 実測波形との差になって現れているといえる。Fig.9 のコヒ ーレンスで見ると、2つの予測波形に大きな差はないが、 低周波では、全帯域予測の方が相関が高い周波数も見られ る。これは低周波での予測波形が実測波形よりも小さくな っていることから、低周波でのサンプリング間隔を再度検 討する必要がある。

以上のことから、有色性の入力信号しか得られない場合 は、これをいくつかの帯域に分割することで、より精度の 高いシステム同定結果が得られることがわかった。

今回の検討では、分割する周波数帯域の境界は入力信号 のパワースペクトル密度からヒューリスティックに定めた が、今後は、この帯域を合理的に定める方法を検討してい く予定である。





0



4. まとめ

以上、本研究で得られた結果をまとめると以下のとおり となる。

- (1) サンプリング間隔の変更により、同定精度に違いが見られた。より精度の高いシステム同定を行うには、入出力信号の周波数特性に応じてサンプリング間隔を選定する必要がある。
- (2) 有色性の入力信号しか得られない場合は、周波数帯域 別にシステム同定を行うことで、より精度の高い同定 結果が得られることがわかった。

5. おわりに

本稿では、実測データを用いた解析により、入出力信号 の周波数帯域の分割およびサンプリング間隔の変更が、同 定精度におよぼす影響を検証した。今後は、最適な周波数 帯域およびサンプリング間隔の選定法について解析的な検 討を行い、軌道管理に適した、より精度の高いシステム同 定法を提案していきたいと考えている。

(平成 22 年 10 月 29 日受付)

献

文

- (1) 古川教,吉村彰芳:鉄道車両の上下動特性の同定および軌道保守への適用,土木学会論文集,No.730, IV-59, 2003.4. (in Japanese)
- (2) 足立修一: MATLAB による制御のためのシステム同定,東京電機大
 学出版局(1996) (in Japanese)

10