

S1-4-6 線形予測モデルによる列車動揺予測手法の任意速度への拡張

[土] ○古川 敦 ((財) 鉄道総合技術研究所)

Extension of linear prediction method of vehicle acceleration to variable velocity

Atsushi FURUKAWA; Member of JSCE (Railway Technical Research Institute)

The author has developed the method to predict vehicle dynamics. This method is based on the system identification theory. Because of this method can have been applied in the case that the velocity of the train is constant only, the author has developed a new method to predict vertical vehicle acceleration on variable velocity. This method is based on the character of vehicle dynamics that the lower eigen frequency of the vehicle is depend on time frequency and the higher eigen frequency is depend on spatial frequency. To predict the acceleration in the lower frequency, the author has developed a new algorithm to convert spatial datasets to time datasets and re-convert time datasets to spatial datasets. The acceleration in the higher frequency can be predicted with the former method.

キーワード: 列車動揺、システム同定、予測、速度

Keywords: vehicle acceleration, system identification, prediction of vehicle acceleration, variable velocity

1. はじめに

筆者は、これまで軌道変位から列車動揺や輪重・横圧を予測する手法を開発してきた^{1)~3)}。これらの手法は、距離軸上でサンプリングされた軌道変位を入力、車両の応答の実測値を出力とし、システム同定⁴⁾の手法によって車両の動特性を表す伝達関数を同定し、この伝達関数と等価なデジタルフィルタ(以下、「予測フィルタ」という。)を用いて、軌道変位上を走行する車両の応答を予測するものである。

この方法は、比較的簡易な計算によって予測モデルが得られ、かつ予測に必要な計算負荷が小さいことから、軌道変位の評価には有用である。しかしながら、車両の動特性は本来時間軸上で定義されるべきものであるため、空間軸上で定義された予測フィルタはその適用範囲が限定される。すなわち、システム同定に用いる車両の応答の実測値は時間軸上かつ距離軸上で等間隔サンプリングされたものでなければならないため、等速走行時に取得されたものである必要があり、また予測される車両の応答は上記実測値を取得した速度におけるものに限られる。

これに対し、速度に応じて異なる予測フィルタを適用し、各速度域における応答を予測することが考えられるが、処理が煩雑となり、かつ列車速度に応じた予測結果の選別等の処理が必要となる。

以上の背景に対し、本報告では予測フィルタを用いた手法を一般化し、車両応答(ここでは上下動)の予測を、速度変化区間を含めて線区全体で一括して処理する手法

について検討した。

2. なぜ列車動揺の予測を行うか?

本題に入る前に、なぜ列車動揺の予測を行う必要があるかについて解説し、一連の研究に対する筆者の立場を明らかにしておく。

軌道変位は、一般に 10m 弦正矢法による測定値の振幅で評価される。その妥当性は、10m 弦正矢法の検測特性と車両の周波数応答関数が在来線の速度域(概ね 100km/h 以下)では類似しているためと説明されている⁵⁾。列車速度がより高い場合は、検測特性と車両の周波数応答との類似性を確保するために、在来線高速線区では 20m 弦正矢が、新幹線では 40m 弦正矢が用いられている。一方、より車両の応答に即した評価を行うために、軌道検測データになんらかの演算処理を施すことも行われている。前記の 20m 弦、40m 弦正矢も 10m 弦正矢から演算で得られるものである。また主として 2 軸貨車の振動特性を考慮した複合変位⁶⁾もその一種である。

筆者の立場は、軌道状態の評価はこれらの指標と同程度の演算量で得られ、より車両の応答に近い指標によるべきという点にある。ただし、軌道保守の効率化を目標とする以上、評価すべきものはあくまで軌道状態であり、車両の応答そのものではない。言い換えれば、軌道状態の評価はあくまでも軌道変位の関数によって行うべきであり、筆者が行おうとする車両の応答の予測は、実測値によって代替できるものではないことを言い添える。

3. 速度と周波数応答関数

図1に、在来線特急電車の上下振動加速度の周波数応答関数の例を空間周波数軸上で示す。同図より、この周波数応答関数には2つのピークがあることがわかる。

一つは、車両のばね系によって定まる車体の1次固有振動数に相当する周波数で、時間周波数軸上では不変であるが、空間周波数軸上では速度が高くなるにつれて低い側に移動する。なお、この車両の1次固有振動数は時間周波数で1.2Hzである。

二つ目は、速度が変化しても空間周波数軸上で移動しないピークである。これは、前台車と後台車の上下動の位相差によって生じる車体の振動であり、車両の寸法によってその周波数が定まる。

本論文では、この特徴を用いて速度変化区間の上下動の予測を行う。具体的には、上記の2つのピークのうち、低周波側のピークに対しては時間軸上で応答を予測するために、等距離サンプリングされた軌道変位のサンプリング間隔を速度に応じて伸縮させ、等時間サンプリングとしたものを入力として車両の応答を予測し、もう一つのピークに対しては、速度に関わらず等距離サンプリングされた軌道変位データを入力として車両の応答を予測する。以下、空間周波数で0.08[1/m]以下を「帯域A」、0.08[1/m]以上を「帯域B」と呼ぶ。

4. 軌道変位の座標系変換方法

前述したように、帯域Aにおける車両の応答は時間周波数軸上で不変であるため、この帯域における車両応答の予測のためには、等距離サンプリングされた軌道変位を等時間サンプリングに変換する必要がある。これは当該区間の速度データを用い、以下の手順で行う。

(1) 距離軸→時間軸への変換

時間軸と距離軸の関係を図2のように表す。各地点 X_1 、 X_2 …と、対応する列車の通過時刻 T_1 、 T_2 …を曲線で結び、各点における接線の傾きが各時刻（ないし各地点）における速度 $V(X_1)=V(T_1)$ 、 $V(X_2)=V(T_2)$ となる。

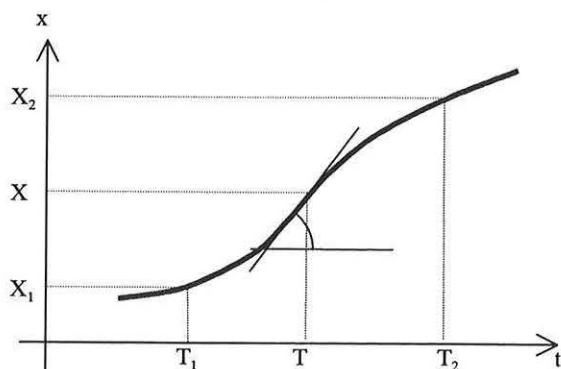


図2 距離と時間の関係

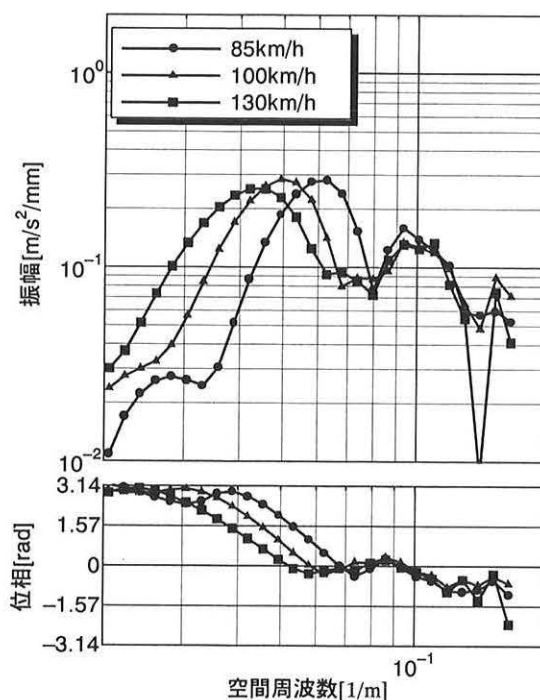


図1 速度変化に対する周波数応答関数の変化

また、軌道変位および速度データは等距離サンプリングされているものとする。

以上の準備のもとで軌道変位を距離軸上から時間軸上へ変換するには、既知である距離軸上の X_1 、 X_2 、 $V(X_1)$ 、 $V(X_2)$ を用いて、時間軸上の T_1 、 T_2 を求めればよい。なお適切な補間法により任意の地点 X における速度 $V(X)$ は既知とする。

速度、時間、距離の関係から、時刻の初期値 T_1 が定まれば、任意の地点 X の通過時刻 T は式(1)で求まる。

$$X(T) - X_1 = \int_{T_1}^T V(t) dt \quad (1)$$

鉄道列車の場合、微小時間内における運転速度の変化はごくわずかであるので、時間軸上に変換後のサンプリング間隔を Δt とすると、上記式(1)の積分は式(2)のように離散化できる。

$$X(T) - X_1 = \sum_{k=1}^n V_k \Delta t \quad (2)$$

$$\text{ただし、} \quad V_k = V(X(k\Delta t)) \\ T - T_1 = n\Delta t$$

これは、

$$\begin{aligned} X(\Delta t) &= X_1 + V(X_1)\Delta t \\ X(2\Delta t) &= X(\Delta t) + V(X(\Delta t))\Delta t \\ X(3\Delta t) &= X(2\Delta t) + V(X(2\Delta t))\Delta t \end{aligned} \quad (3)$$

として順次計算する。

なお、 $T_2 - T_1$ が Δt の整数倍であると都合が良いが、一般にそうにはならない。したがって、

$$N\Delta t < T_2 < (N+1)\Delta t \quad (4)$$

なる整数 N に対し、

$$X_2 = X(N\Delta t) + V(X(N\Delta t))\alpha\Delta t \quad (5)$$

となる α ($0 < \alpha < 1$) を算出し、

$$T_2 = T_1 + (N + \alpha)\Delta t \quad (6)$$

とする。

以上の計算で得られる地点 X と時刻 T との関係を模式的に表すと図3のようになる。

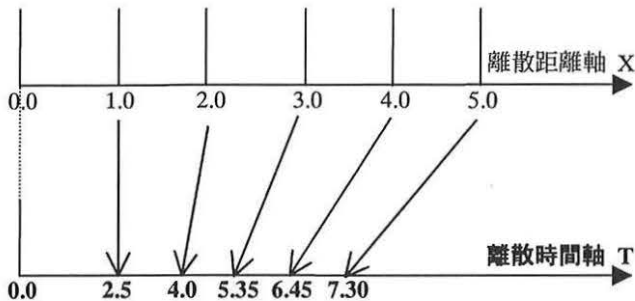


図3 距離軸→時間軸への変換

(2) 時間軸→距離軸への再変換

一般に、軌道管理に用いるデータベースシステムでは、各種データは地点（キロ程）で管理されるため、(1)で変換した等時間サンプリングデータに対する各種フィルタ処理結果は、再度等距離サンプリングに変換する必要がある。ここで、時間軸→距離軸の再変換の際に式(2)のような離散近似を行うと、再変換後の距離軸上での地点と元の（時間軸変換前の）地点との間に誤差が生じる。後述するように、本報告で述べる上下動予測手法では、等距離サンプリングデータ同士の和を求めるため、各データに対応する地点が、わずかとはいえ異なるのは好ましくない。

この問題を解決するため、(1)で距離軸→時間軸の変換を行う際に、等時間サンプリングによる新しいデータ番号（式(6)の $N + \alpha$ ）と、元の等距離サンプリングのデータ番号との対照表を作成し、この対照表を用いて、等時間サンプリングデータを等距離サンプリングデータに再変換する。例えば図3でサンプリング間隔がそれぞれ1m, 0.01sの場合、以下のような対照表をあらかじめ作成する。

<元データ番号>,<変換後データ番号>

0,	0
1,	250
2,	400

3,	535
4,	645
5,	730
...	...

この対照表を用いた再変換の概念図を図4に示す。

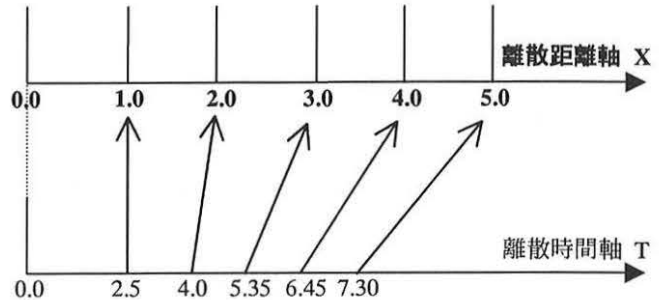


図4 距離軸→時間軸への再変換

このようにして、距離軸上で取得された軌道変位データを時間軸上に変換し、時間軸上で定義される各種フィルタ処理を施した上で、元のキロ程情報を保ったままで再度距離軸上のデータとして扱うことが可能となる。

5. 上下動の予測

以上の準備に基づき、以下の手順で列車の速度に応じた車両の上下動を予測する。

① 車両の動特性の同定

(1) サンプリング間隔 $d\xi$ [m] でサンプリングされた軌道変位、および一定速度 v [m/s] において、等距離 ($d\xi$ [m]) サンプリングされた車両の上下振動加速度を用い、車両の上下動特性を同定する。この動特性に対応する予測フィルタ（インパルス応答）をフィルタBと呼ぶ。

(2) フィルタBは、時間軸上では等時間 ($d\xi/v$ [s]) 間隔のインパルス応答と見なせる。これを、時間軸上で定義される予測フィルタとし、フィルタAと呼ぶ。

② 軌道変位の等時間サンプリングへの変換

等距離サンプリングの速度データを用いて、軌道変位を等時間 ($d\xi/v$) サンプリングデータに変換する。合わせて、等距離サンプリングデータのデータ番号と、対応する等時間データ上でのデータ番号との対照表を作成する。

③ 時間軸上での上下動予測（帯域A）

- 1) 等時間サンプリングの軌道変位およびフィルタAを用いて、時間軸上の上下動を予測する。
- 2) ②で作成した対照表を用いて、1)の予測波形を等距離 ($d\xi$) サンプリングデータに再変換する。
- 3) 2)のデータに、帯域Aのみを濾波するフィルタ処理を行う。

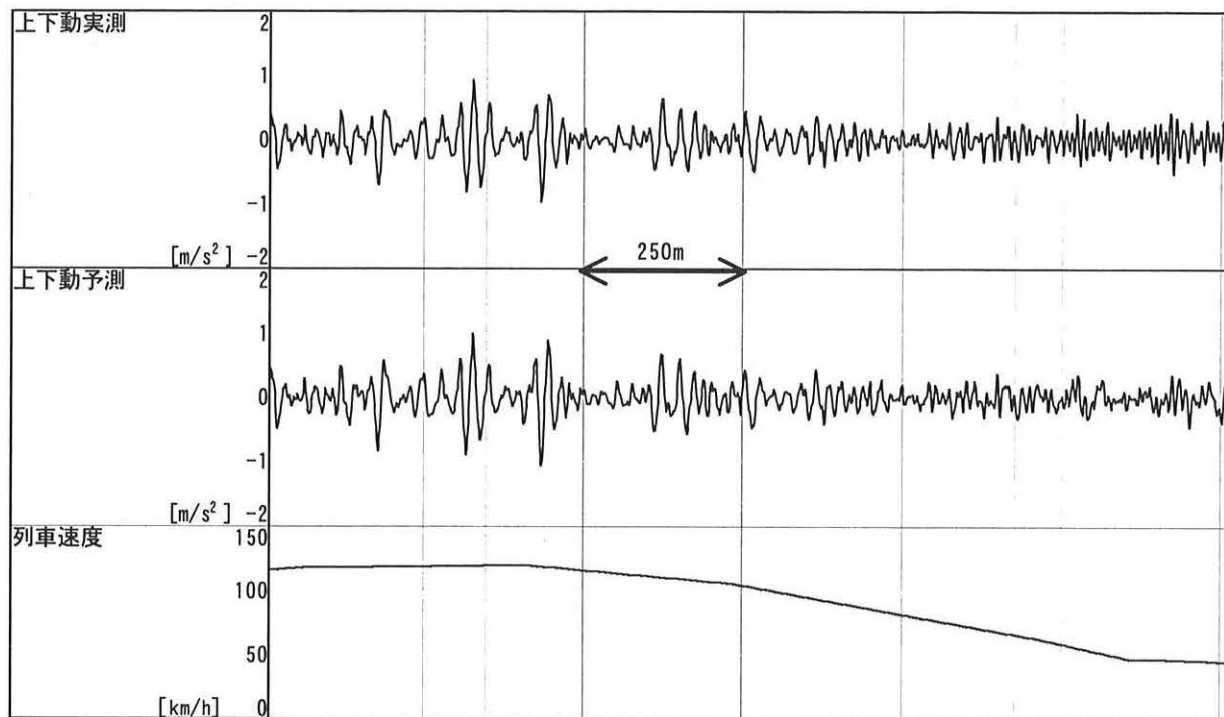


図5 速度変化区間における上下動の実測波形と予測波形との比較（在来線交流電車）

④ 距離軸上での上下動予測（帯域B）

- 1) 等距離サンプリングの軌道変位およびフィルタBを用いて、距離軸上の上下動を予測する。
- 2) 1)のデータに帯域Bのみを濾波するフィルタ処理を行う。

⑤ 最終予測波形の作成

③ 3)および④ 2)の和を計算する。これが求める予測波形となる。

このようにして得られた上下動の予測波形と実測波形を比較した例を図5に示す。速度が概ね 50km/h より高い領域では両者が一致しているのがわかる。

以上に述べた方法はあくまでも車両の周波数応答関数が持つ特徴に基づいたものであり、例えば帯域Aと帯域Bが逆転するほどの低速域では成立しない。しかしながら、このような低速域では乗り心地が問題となることは少ないため、軌道変位の振幅を指標とする管理を行えば良い。一方、高速域ではこの手法によって著大な加速度が発生する可能性がある箇所を特定できるため、従来の振幅による管理よりきめ細やかな軌道状態評価および保守投入計画が可能になるものと考えられる。

6. おわりに

本報告では、システム同定によって求められた等距離

間隔データに対応する予測フィルタを用いて、速度変化区間の車両応答を予測する手法を、上下動を対象にして示した。この手法は、車両の上下動の特性を利用したものであり、全ての速度域に対して適用できるものではないが、乗り心地管理が必要となる速度域では十分な予測精度を持つものであると考える。

今後は、この手法を利用し、左右動や輪重などの予測手法を検討し、より合理的な軌道変位管理に結びつけたいと考えている。

参考文献

- 1) 古川敦、吉村彰芳：統計モデルによる車両上下動揺の予測と軌道管理への適用，鉄道総研報告 Vol.17, No.2, 2003.2
- 2) 古川敦、吉村彰芳：軌道狂い管理のための車両左右動特性の同定，鉄道総研報告 Vol.18, No.3, 2004.3.
- 3) 古川敦：軌道狂いによる輪重変動の予測手法と軌道管理への応用，鉄道総研報告、Vol.19, No.2 2005. 2.
- 4) 片山徹：システム同定入門、朝倉書店、1994.5.
- 5) 佐藤吉彦：乗り心地の立場から見た軌道高低狂いの整備限度，鉄道技術研究報告，No.549, 1966.8.
- 6) 池守昌幸：軌道狂いの波形の整備に関する研究，鉄道技術研究報告，No.1038, 1977.3.