

ARXモデルによる鉄道車両上下動特性の同定

鉄道総合技術研究所 正会員 古川 敦
東京工科大学 正会員 吉村彰芳

1. はじめに

軌道狂い管理の目的は車両の走行安全性および良好な乗り心地の確保にある。一般的に行われている 10m 弦、20m 弦、40m 弦正矢法による軌道狂い管理は、検測倍率が大きい周波数と車両の固有振動数が各々概ね一致していることから、車両走行特性値の一次近似としては有効である。しかし、より効率的な軌道狂い保守のためには、軌道狂いに起因する車両走行特性値を直接予測し、管理することが望ましい。これに対し本研究では、線形確率モデルの一種である ARX モデル (Auto-Regressive eXogenous model) を用いて、高低狂いによる車両の上下動揺加速度の予測を試みる。

2. ARXモデルの概要

入力信号 $u(t)$ と出力信号 $y(t)$ の関係が以下の多項式で表されるモデルを ARX モデル¹⁾と呼ぶ。

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + w(t) \quad (1)$$

ただし、 $A(q) = 1 + \sum_{k=1}^{n_a} a_k q^{-k}$ 、 $B(q) = \sum_{k=1}^{n_b} b_k q^{-k}$ 、 $q^{-1}u(t) = u(t-1)$ 、 $w(t)$: 誤差項 (正規白色雑音と仮定)

このとき、システムの伝達関数は次式で表される。

$$G(q) = \frac{B(q)}{A(q)} \quad (2)$$

軌道狂いによる上下動揺の予測の場合、入力信号は高低狂い、出力信号は上下動揺加速度となる。パラメータベクトル $\theta = (a_1, a_2, \dots, a_{n_a}, b_1, b_2, \dots, b_{n_b})$ の推定は予測誤差の分散が最小となるように行う。ARX モデルの場合、これは最小二乗法でパラメータ推定を行うことに帰する。なお、最適次数 $n = n_a + n_b$ は、FPE (Final Prediction Error)²⁾ が最小となる値を用いる。パラメータベクトル θ が決まれば、高低狂いと時刻 $t-1$ までの上下動揺加速度を式(1)に代入して、時刻 t の上下動揺加速度 $y(t)$ を求めることができる。

ARX モデルのようなパラメトリックなモデルを用いるのは、従来のようなデータのスペクトル推定値から周波数応答関数を求め、その逆フーリエ変換により得られるインパルス応答を予測に用いる方法に比べて、計算の過程にモデルの次数やパラメータ値の決定方法が理論的根拠をもって組み込まれており、そのため適用が容易で、また、結果として少ないデータから信頼性の高い予測モデルを導くことが期待できると考えるからである。

なお、伝達関数の極が単位円の外にあると同定結果が不安定になるため、本検討では $A(q)=1$ とした。このとき式(1)は、通常の FIR 型フィルタと同じ形となる。

3. 計算結果

図-1 に、新幹線車両 (300km/h 走行時) の周波数応答関数同定結果を示す。また、力学モデルによる周波数応答関数³⁾を合わせて示す。同定に用いたデータ長は 2000 データ (1m サンプリング) である。同図より、同定された周波数応答関数は物理的な動特性を概ね表していると言える。また、このときの次数 n_b と FPE の関係を図-2 に示す ($A(q)=1$ なので $n_a=0$)。FPE は 40 次までは急激に減少し、この後なだらかに減少していく。FPE を 100 次まで計算した結果では明確な極小値を持たなかったが、FPE の減少傾向が変化した点を最適次数とすると、モデルの次数は 47 次であった。

キーワード：システム同定、ARX モデル、FPE、車両上下動特性

連絡先：〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38 鉄道総合技術研究所軌道管理研究室 TEL:042-573-7278

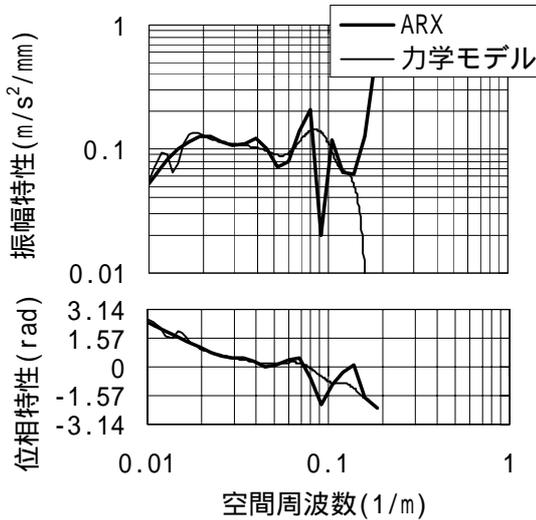


図-1 周波数応答関数の同定結果
(2000 データ)

次に、最小二乗法に用いるデータ長を200mまで短くした場合のモデル次数とFPEの関係を図-3に示す。FPEの計算に用いるデータ数 N は、2000個とした。データ長に関わらず最適次数は約50であった。またFPEはデータ長200mの場合はやや大きいですが、300~500ではほぼ同程度であった。

200mのデータ長で同定をした際(52次)の周波数応答関数と、予測波形を図-4に示す。両図より、データ長が短くなると、低周波域で同定結果と力学モデルの差が広がるが、実用上支障の無い精度で波形が予測できていることがわかる。

これらのことから、ARXモデルを用いて係数を求め、FPEによって次数を適切に求めれば、予測精度とデータ長の関係を、統計的根拠を持って理解することができる。

4. まとめ

- (1) ARXモデルによる車両上下動特性の同定法を提案した。
- (2) 用いるデータ長を2000m 200mまで短くしても、実用上支障のない同定精度であった。また最適次数は用いるデータ長に関わらずほぼ45次~55次の間にあった。

今回の検討によって、新幹線の場合は200m程度のデータ長で上下系の動特性の同定が可能であることを確認した。今後は、等速走行区間が短い在来線において、同様な試みを行う予定である。

参考文献

1) 片山徹：システム同定入門、pp71.-77、朝倉書店、1994.5
 2) 尾崎統、北川源四郎編：時系列解析の方法、pp.82-92、朝倉書店、1998.9
 3) C.Esvelt：Modern Railway Track, pp.381-384, 1989

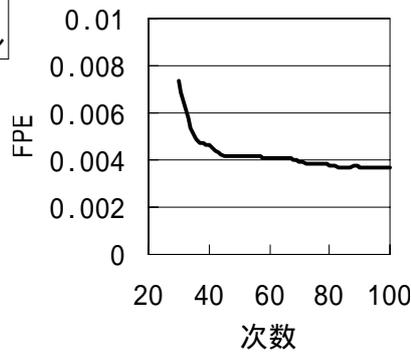


図-2 次数とFPEの関係
(2000 データ)

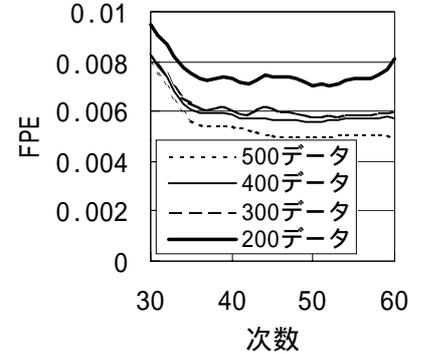
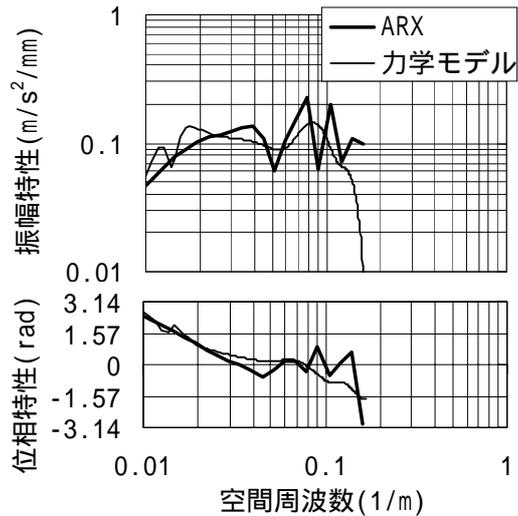
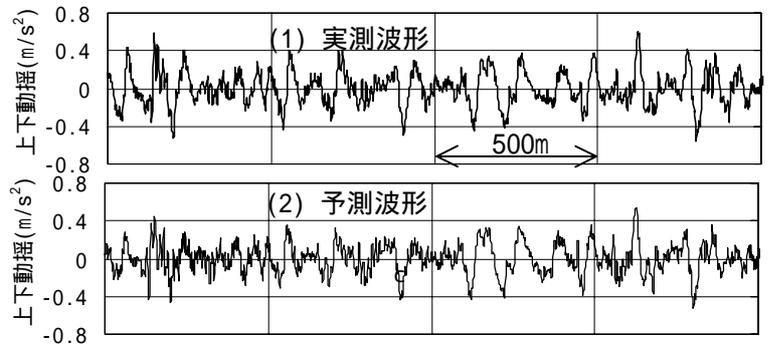


図-3 次数とFPEの関係
(200~500 データ)



(1) 周波数応答関数



(2) 実測波形と予測波形

図-4 200 データによる周波数応答関数と予測波形