

軌道検測波形予測モデルの提案とそのパラメータ特性

神山雅子 〇正 [土] 小木曾清高 正 [土] 古川敦 (鉄道総合技術研究所)

The linear prediction model of track irregularity waveform
and the characteristic of the model

Masako Kamiyama, 〇Kiyotaka Ogiso, Atsushi Furukawa,
(Railway Technical Research Institute)

For economical maintenance of ballasted tracks, it is important to predict the change of track irregularity wave form. For the purpose we have developed the prediction model using the multi inputs linear prediction model, and verified the model with track irregularities measured on a conventional line. As a result, we have confirmed that the accuracy of the model is enough on the plane track and it is necessary a space-variant model on the track which has some peculiar structural like bridges or road crosses.

キーワード：軌道検測波形，線形予測モデル，最小二乗法

Key Words：Track irregularity, waveform, Linear prediction model, Least square method

1. はじめに

軌道の保守計画策定を効率化するために、軌道変位の将来予測が行われる。現在、軌道検測波形の経時変化は、検測波形から求めた区間代表値の変化として予測されている。これに対し本報告では、軌道保守計画をより効率的なものにするために、高低方向の軌道検測データの波形そのものの経時変化を、過去の軌道検測波形から予測するシステムのプロトタイプを提案する。

軌道変位の経時変化は、将来の軌道保守計画の策定に用いられる。このような保守計画は、保守要員や保守用大型機械の運用の効率化を目的に行われる。マルチヤレール削正車等の大型機械は、通常 1 回の作業で数百メートルの施工を行うため、保守計画の策定に用いられる軌道検測データは、100m 程度を 1 ロットとする区間代表値（標準偏差、P 値、最大値等）に加工されることが多い。

一方、バラスト軌道において軌道沈下の速さは局所的に異なることが多い。特に噴泥等でバラストが劣化した箇所や橋梁・踏切境界等の軌道構造境界箇所では、他よりも速く変化することが多い。このような箇所では、しばしば当初計画に無い緊急的な保守が投入されることが多く、軌道

保守コストを押し上げる原因となっている。このような緊急的な保守を減らすためには、軌道変位の地点毎の経時変化、すなわち軌道検測データの波形としての経時変化を求めることが合理的である。そこで本研究では、線形予測モデルを用いて、将来の軌道検測波形を過去の軌道検測波形から予測するモデルを考案した。以下にその概要を述べる。

2. モデルの概要

2.1 モデルの構造

本モデルは、将来の軌道検測波形を過去の軌道検測波形を入力とする線形予測モデルによって予測する。その構造は以下のとおりである。

$$\hat{x}_{i,1} = a_{i,-1}x_{i,-1} + \sum_{k=-M}^N b_{i-k,0}x_{i-k,0} \quad (1)$$

ここで、 $\hat{x}_{i,1}$ ：地点 i における 1 期先の予測値。

$x_{i,-1}$ ：地点 i における 1 期前の実測値。

$x_{i,0}$ ：地点 i における当該期の実測値

$a_{i,-1}$ ：1 期前のデータ $x_{i,-1}$ に乗じる係数。

$b_{i-k,0}$: 当該期のデータ $x_{i-k,0}$ に乗じる係数。

M : モデルに取り入れる、地点 i の進行方向手前の軌道変位の個数。

N : モデルに取り入れる、地点 i の進行方向先の軌道変位の個数。

M , N はいずれも 0 か自然数とする。これらの値は、統計モデルの妥当性を評価する基準の一つである赤池情報量基準 AIC¹⁾ (Akaike's Information Criterion) で定める。

このモデルの概念を図 1 に示す。このようなモデルの構造とした理由は以下のとおりである。

- 1) 軌道検測波形の経時変化は、主として列車荷重の繰り返しによってバラスト層が漸進的に変形して生じる。したがって、一期程度の時間内では、軌道検測波形は通過トン数 (≒ 時間) に対し線形に変化すると仮定できる。このようなモデルにおいて M , N は、地点 i の軌道変位振幅の経時変化には当該地点の何点手前あるいは先の地点の軌道変位が影響しているかということの意味する。これらの値は、単線と複線あるいは当該地点を走行する列車の速度等によって変化すると考えられる。このとき、係数 $b_{i-k,0}$ は軌道検測波形の経時変化の周波数特性と解釈できる。
- 2) 一期前の軌道検測波形は、既に当該期 (最新) のものに影響を与えているので、帰納的に考えれば予測には当該期のもののみを用いればよい。ただし、バラストの劣化等により、一期前までと当該期前までの経時変化傾向に差が生じる可能性があるため、着目地点のみは、一期前の軌道変位の振幅 x_{i-1} も入力とする。

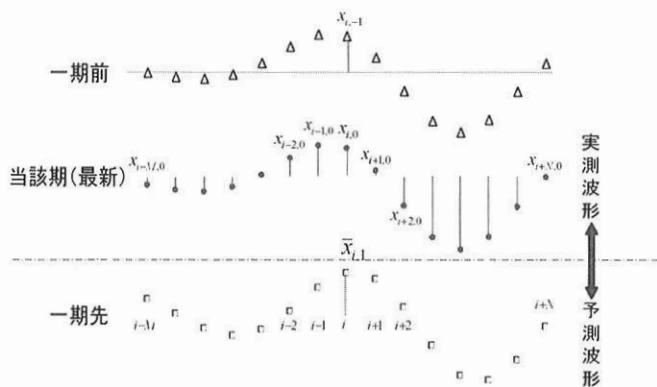


図 1 モデルの構造

2.2 軌道検測データ同士の位置照合

図 1 からわかるように、本モデルでは一期前および当期の軌道検測位置が一致していることが前提となっている。通常、日本の軌道検測車ではサンプリング間隔は 0.25m であるのが一般的である。したがって、それだけで最大 ±12.5cm の位置ずれが生じるが、さらに車輪の空転や滑走によって数メートルのずれが生じる可能性がある。このため、本モデルの適用にあたっては、文献 2) に示す方法で、軌道検測データ同士の位置をあらかじめ照合している。

2.3 パラメータの同定

式(1)のパラメータ a_{i-1} , $b_{i-k,0}$ は、最小二乗法で求める。すなわち、連続する三期の軌道検測データ列を用いて、式(2)を満足する a_{i-1} , $b_{i-k,0}$ を算出する。なお、実際の計算では、 L 個のデータ列の始点側に M 個、終点側に N 個の 0 を加えたものを用いた。

$$\min \sum_{i=0}^L \left\{ x_{i,1} - \left(a_{i-1} x_{i-1} + \sum_{k=-M}^N b_{i-k,0} x_{i-k,0} \right) \right\}^2 \quad (2)$$

ここで、

$\bar{x}_{i,1}$: 地点 i における 1 期先の検測データの実測値 (以下、「参照データ」という。)

L : 対象とする区間における軌道検測波形列のデータ点数。 M と N に対し十分大きくする。

さらに、求められた a_{i-1} , $b_{i-k,0}$ に対する AIC (式(3)) を算出する。 M , N を変えながらこの計算を繰り返し、AIC が最小となる M と N の組み合わせを求める。そのときのパラメータ列 a_{i-1} , $b_{i-k,0}$ を最適な予測モデルとする。

$$AIC = -n \log(2\pi \hat{\sigma}_{M+N}^2) + 2(n+2) \quad (3)$$

ここで、 n : 対象とする区間のパラメータ総数 (= $M+N$)。

以下「次数」という。

$\hat{\sigma}_{M+N}^2$: 本モデルにおける予測誤差の分散の推定値

AIC を用いて M と N を定めるのは、一般に最小二乗法を用いて線形予測モデルの係数を求める場合、 M と N を大きくするほど予測誤差は小さくなるのに対し、尤度は必ずしも大きくならないためである。

3. 営業線の検測データによるモデルの検証

3.1 モデルの検証手順

前章で述べたモデルの妥当性を確認するため、営業線の検測データを用いて検証を行った。検証に用いた線区の諸元を表 1 に示す。検測データは、2 台車検測車の偏心矢高低データ (0.25m サンプル・年 4 回検測) により検測した。検証手順は、以下のとおりである。

- 1) 連続した四期分の軌道検測データを文献 2) の手法により位置照合を行う。
- 2) 次に、第一～二期目の検測データを入力とし、三期目のデータを参照データとして AIC が最小となる次数とパラメータを推定する。
- 3) 2) のパラメータを用い、第二～三期の検測データから第四期を波形予測し、実測値と比較する。

検測周期は約 3 カ月毎のため、本モデルでは 3 ヶ月後の予測波形を算出する。検証には軌道変位進みの違いを考慮し、線区の中で「①高低変位が安定している区間」および

「②高低変位の急進箇所を含む区間」をモデル区間として抽出し、式(2)の軌道検測波形列のデータ点数(L)を 2000 データ (500m) として係数を推定した。なお、列車密度や路盤等による影響を統一するため、①②は隣接区間を選定した。

表 1 波形予測線区の諸元

項 目	諸 元
線 級	1 級線(通トン約 4000 万トン/年)
速 度	最高速度 120km/h
線 別	複線(下り線)
線 形	直線
レール	60kg ロングレール
道 床	砕石(道床厚 250mm)・PC マクラギ

3.2 高低変位が安定している区間の係数推定

高低変位が安定している区間では、軌道変位波形の経時変化に対し、列車通過によるバラスト層の漸進的な変形がほぼ一定であり、また変形量も小さい。この区間において、経時変化を予測する地点(i)の進行方向手前方データ数(M)、および進行方向先のデータ数(N)の適切な値を推定するため、 M と N の一方を固定し、他方を変化させて AIC を算出した結果を図 2 に示す。

N を固定した場合、AIC は $M=50$ 程度まで急激に減少し、それ以上大きくした場合の AIC の変化は小さかった。一方、 M を固定した場合の AIC は概ね $N=100$ 程度以上で変化が小さくなった。この傾向より、当該区間では予測点の手前側 50 データ (13m) 程度、先側 100~120 データ (30m) 程度を用いるのがよいと推定される。 $M < N$ とは、ある地点の高低変位は、主として進行方向先の高低変位を用いて推定できることを意味する。これは、ある高低変位を起点として発生する上下動に伴う輪重変動によって、そこから列車の去り側の区間の高低変位に影響が現れるためと考えられる。なお、この点については単線区間のデータを用いて検証する予定である。なお、区間長の 30m は上下動の固有振動数 (1Hz 前後) の 1 波分に相当する。

次に、予測した第四期の波形を図 3 に示す。予測値と実際値の差は、最大 1mm 程度であった。この結果から、構造物等の介在がなければ、本モデルで高低変位の経時変化を予測できることが確認できた。

3.3 高低変位の急進箇所を含む区間の係数推定

この区間は、高低変位は全体的に安定しているが、中央付近に踏切(接続軌道、幅員 5.6m)が介在し、その前後で変位の急進がみられる区間である。本区間のデータを用いて、3.2 と同様に AIC を算出した結果を図 4 に示す。

N を固定した場合、AIC は M が増加するに従って階段状

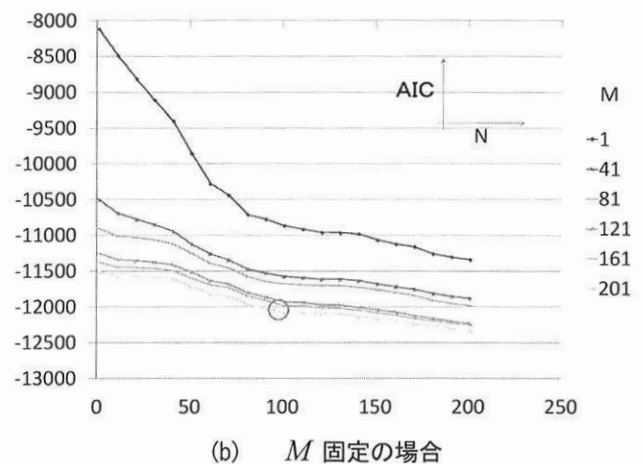
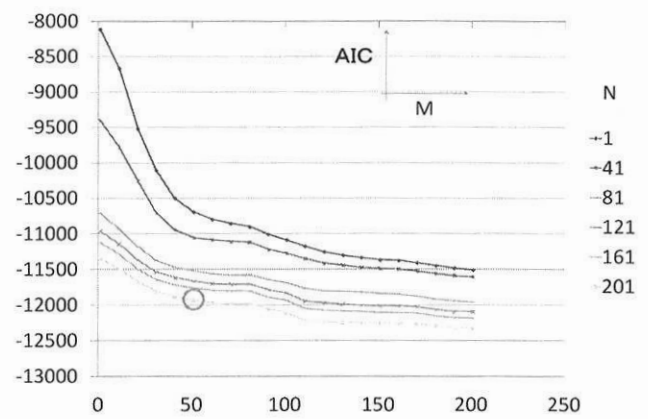
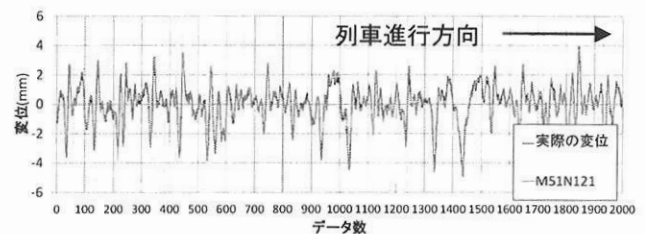


図 2 軌道変位安定区間の AIC 傾向

図 3 予測変位結果と実際の軌道変位との比較
(偏心矢高低・ $M=51$, $N=121$ の場合)

に減少する傾向を示した。 $M > 200$ 以上でも減少したが、 $20 \leq M \leq 50$ の低下が大きく、実用上は $M=50$ 程度を用いるのがよいと思われる。また M を固定した場合、AIC は $N=110$ 程度で最小となった。よって、この区間では、予測点の手前 50 データ (13m) 程度、先 110 データ (28m) を用いるのがよいと考えられる。これは、AIC の減少傾向は異なるものの、3.2 と同様の結果である。

本区間の予測した波形を図 5 に示す。高低変位が安定している区間の誤差は小さいが、踏切前後の高低変位の急進箇所では誤差が拡大する。これは、式(1)のパラメータ a_{i-1} , $b_{i-k,0}$ を 500m 区間全体の変位データを用いて推定するため、急進箇所の影響が反映されにくくなると考えられる。したがって、急進箇所の予測には、予測区間長を短くする必要があると考えられる。

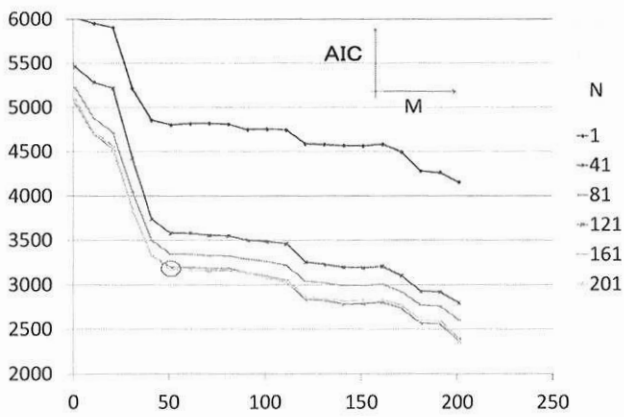
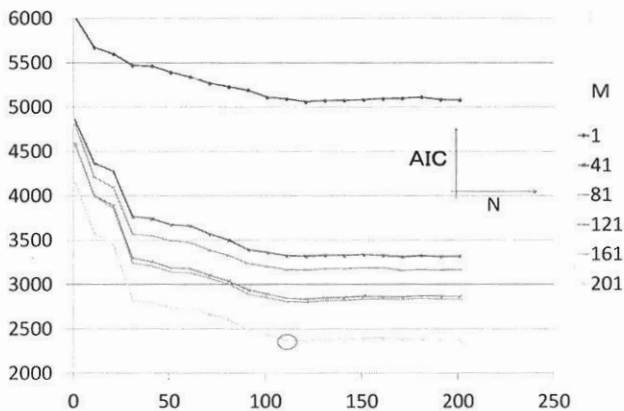
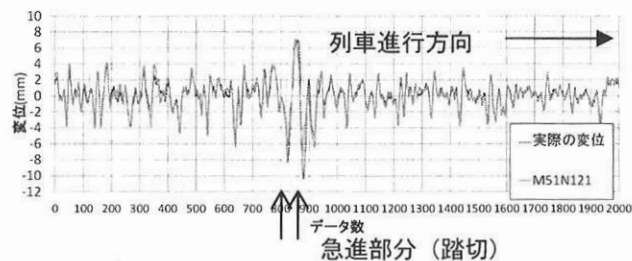
(a) N 固定の場合(b) M 固定の場合

図 4 軌道変位急進区間の AIC 傾向

図 5 予測結果と実際の軌道変位との比較
(偏心矢高低・ $M=51$, $N=121$ の場合)

3.4 変位の急進区間を抽出した場合の係数推定

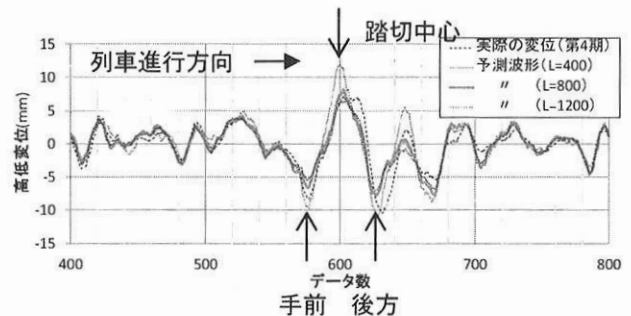
前節での考察結果に基づき、変位の急進に対する精度向上を図るため、踏切を中心として区間長 (L) を変えて再計算した。踏切を中心とし、①進行方向手前、②踏切内および③後方の 3 点に着目して変位のピーク値を算出した結果を、表 2 に示す。また、予測波形の例を図 6 に示す。

検測車による実測データと比較し、踏切前後のピーク値が近い予測波形が得られたのは区間長を $L=400$ データ (100m) の場合だったが、踏切内および区間全体では誤差が大きくなった。一方、区間全体で誤差が小さくなったのは $L=800$ データ (200m) 以上の場合であったが、急進については誤差が大きくなった。このことから、急進箇所への予測には、区間を絞り込んでモデルのパラメータを同定する必要があるといえる。本件については、急進箇所に対し最

適な区間長とパラメータを自動的に決定できるよう、モデルを拡張する予定である。

表 2 予測延長と踏切前後の予測変位の関係

予測延長 (データ数)	M と N の最適値		変位のピーク値(mm)		
	M	N	手前	踏切内	後方
検測車	—	—	-8.3	6.3	-10.5
200	36	36	-11.2	14.7	-9.7
400	36	41	-9.7	12.1	-11.1
600	51	71	-6.1	8.2	-7.5
800	51	111	-6.6	8.1	-7.4
1000	61	111	-6.2	7.7	-7.7
1200	51	121	-5.6	7.2	-7
1600	51	121	-5.4	6.7	-7

図 6 予測区間 (L) を変化させた場合の予測波形

4. まとめと今後の課題

本研究では、軌道変位波形の経時変化について過去の軌道検測波形から線形予測モデルによって予測するシステムのプロトタイプを提案した。本研究で報告した内容をまとめると、以下ようになる。

- 1) 軌道変位進みのメカニズム解明と合理的な保守計画策定のため、過去の軌道検測データを用いて将来の軌道検測波形を予測するモデルを考案した。
- 2) 実際の検測データでモデルの検証を行い、対象区間全域で軌道変位進みが安定している場合におけるモデルの有効性を示した。
- 3) 踏切前後の急進箇所を含む区間では、パラメータ同定に用いるデータ長を短くする方が、急進地点の予測精度が高くなるが、区間全体の予測精度は下がる結果となった。また、今後の課題として以下の事項が挙げられる。

- 1) 線路条件 (線形、軌道構造、運行条件等) 別にモデルの検証を進める。
- 2) 軌道変位の急進箇所について、最適な次数とパラメータを自動的に決定するモデルを開発する。

最後に、本研究において多大なるご協力を頂いた JR 東日本関係者の皆様に、心より感謝申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 赤池弘次、中川東一郎：ダイナミックシステムの統計的解析と制御、サイエンス社、1972。
- 2) 神山雅子：軌道形状の経時変化把握のための検測データの位置補正、.鉄道総研報告, Vol.21, No.6, pp.39-44, 2007.6。