1603 軌道検測波形予測モデルの線路条件ごとの比較

正[土] 〇坪川 洋友 (鉄道総研) 神山 雅子 (鉄道総研)

The comparison of the linear prediction model of track irregularity waveform for track conditions

OYosuke TSUBOKAWA, Masako KAMIYAMA, Railway Technical Research Institute

For economical maintenance of ballasted tracks, it is useful to predict the change of track irregularity waveform. For the purpose, we had proposed the linear prediction model, and verified the model with track irregularities measured on a conventional line, such as the section containing a curve. As a result, we have confirmed that the accuracy of the model is enough and predictive accuracy improved by dividing the track section with the curve or the structure, although the future prediction waveform by this system has a gap of a position with the measuring waveform actually obtained.

キーワード: 軌道検測波形, 線型予測モデル, 最小二乗法 Keywords: Track irregularity, waveform, Linear prediction model, Least square method

1. はじめに

軌道変位の経時変化後の状態を予測することは、効率 的な軌道保守計画を策定するために重要である. MTT や レール削正などの保守用大型機械の保守計画では、通常 1回の作業で数百メートルの区間を施工するため、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・踏切前後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を行う必要が生じ ることになり,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 道変位の地点ごとの経時変化,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.

昨年の本シンポジウムにおいて,基礎的な統計的予測 モデルである線形予測モデルを用いて,直線部における 過去の軌道検測波形から,将来の検測波形を予測するシ ステムのプロトタイプを提案した¹⁾.本稿では,同シス テムを曲線および構造物を含む線路条件に適用した結果 について述べる.

2. 検測波形の経時変化予測モデル

本システムは、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.

バラスト軌道における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少しずつ 変形することで生じる.在来線の軌道検測が四半期(約 3 カ月)ごとに行われるのに対し、この程度の時間経過 では軌道形状の変化は大きくない.したがって、軌道検 測波形は経過日数(通過トン数に比例すると仮定)に対 し線形に変化するとし、軌道検測の四半期一期分に含ま れる日数の増減は無視できると考える.

そこで本予測モデルでは, 軌道検測は等時間間隔で得

られていると仮定し、予測する地点の将来の軌道検測デ ータは、その地点における過去の検測データと、その地 点周辺で得られた検測データの線形和で予測できると仮 定する.具体的には、図1に示すように、予測する地点 で得られた過去2回分(最新とその一期前)の検測デー タと、所望する地点周辺の最新データQ+R点を用いる 予測モデルである.

ここで、整数 Q と R は、軌道形状の変化に影響を及ぼ す前後区間の長さを表す.サンプリング間隔 0.25m の軌 道検測データを用いる場合、Q と R の値は、1 つの検測 データの予測に、最新の検測データの進行方向手前 0.25×Q m から進行方向先側 0.25×R m までのデータを入 力することを表す.なお、Q と R は全ての軌道で一定の 値をとるものではなく、軌道構造や列車走行条件(複線・ 単線や列車速度など)に伴って変化すると考える.



Fig. 1 Input/output of the Linear Prediction Model for a Measured Track Geometry

また、軌道検測データの経時変化を表す予測式は、時間に依存せず一定と仮定する。例えば6月(第三期)の 軌道検測波形を前年12月(第一期)と当該年3月(第二 期)の検測波形から予測する式と、同じく9月(第四期) の軌道検測波形を3月・6月から予測する式とは同じで あると仮定している。レール削正やバラスト交換等、経 時変化の傾向に大きく影響する保守が無い限り、この仮

[No. 12-79] 日本機械学会 第 19 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 [2012-12.5~7.東京]

定は成立すると考えられる.経時変化モデルに入力する 検測波形を過去2回分としたのは、長期にわたる検測波 形に対しては、予測式を一定と見なしにくいと考えたか らである.

これらの前提を踏まえた,経時変化モデルは次式で表 される.

$$y_{t}(i) = \sum_{j=1}^{2} a(j)y_{t-j}(i) + \sum_{k=1}^{Q} b(-k)y_{t-1}(i-k)$$
$$+ \sum_{l=1}^{R} b(l)y_{t-1}(i+l) + e(i)$$

このとき,

y,(i): t 期の軌道検測データ,

i: 検測された位置,

y_t(*i*): *t* 期から *j* 期前に得られた検測データ, *a*(*j*), *b*(-*k*), *b*(*l*): 経時変化モデルことに定まる係数, *e*(*i*): 予測誤差(正規分布に従うホワイトノイズ) である.

なお、本システムでは、経時変化モデルに含まれる係数(a(j), b(-k), b(l))を推定する際に、パラメータの次数(Q,R)と、モデルを一定と見なす軌道区間を定める必要がある.この2つの選択には、共に、統計的予測モデルの評価指標である AIC(赤池情報量規準)²⁾を用いる. すなわち、AICの値が小さい予測モデルほど、与えられたデータに対して、よい予測を与えるモデルと判断する.

- 本予測システムの使用手順は、以下のとおりである¹⁾. 1) 文献 3)の手法を用いて、第一期から第三期の軌道検
- 測データの検測された位置を補正する. 2) 第一期・二期の検測データを入力とし,第三期のデー
- タを出力として,経時変化モデルを推定する.そのとき,AICの値を最小にする次数Q,Rとパラメータ(a(j), b(-k), b(l))を採用する.
- 2)で求めたパラメータを用い、第二期・三期の検測デ ータから第四期の検測データを予測する.

3. 予測モデルの曲線区間への適用

3.1 使用データ

曲線を含む区間の軌道検測データに対する,本予測モ デルの適用可能性を,営業線の検測データを用いて検証 した.検証に用いた線区の諸元を表1に,構造物等の位 置を図2に示す.

Table 1 Elements of the Sample Track Section for the Prediction

項目	諸元
線級	1級線(年間通トン:約4000万トン
線別	複線(下り線)
線形	曲線半径780m
レール	60kgロングレール
道床	砕石(道床厚250mm)・PCまくらぎ

干面線形		\$=74				
-		R=780				
構造物				橋津	横梁	

Fig. 2 Schematic Chart of the Sample Track Section

なお、使用したのは全て、偏心矢高低の検測波形であ り、かつ、通常の保線業務用に検測車が出力する波形は 用いず、各種センサ類(レーザ変位計など)の出力から 求め直したものを用いた.これは、検測車内におけるフ ィルタ処理が、本予測システムで行う信号処理(検測デ ータの位置補正と、経時変化予測)に影響するのを避け るためである。

よって、以下に示す波形・検測値は全て、求め直した 偏心矢高低のものである.なお、検測データの公称のサ ンプリング間隔は 0.25m である.

3.2 区間分割

本経時変化モデルでは、軌道をいくつかの区間に分割 し、それぞれの区間内では特性が一定であると仮定して いる.当然、この区間分割は予測結果に影響を与えるた め、最適な区間分割を選択する必要がある.

区間分割のパターンは、AIC によって評価・選択できる. 与えられた区間分割パターンに対応する最小 AIC の 値は、分割した区間ごとに AIC を最小にするパラメータ を求め、次に全ての区間の最小 AIC を合計することで求 められる.

図2に示した予測区間に対して,以下の3種類の区間 分割パターンを設定し,予測モデルを推定した結果を表 2に示す.すなわち,a)区間分割を行わなかった場合, b)線形および構造物ごとに台帳のキロ程に従って分割点 を設定した場合,c)線形および構造物ごとに検測波形を 確認して分割点を設定した場合,の3種類である.その 結果,波形を確認して分割したときに内軌側・外軌側共 にAIC が最小になり,最も優れた予測を与える分割パタ ーンであると判定された.

このとき得られた予測波形の例を図3に示す.区間分 割を行わず,波形予測区間を全て同じモデルとした図3

	内軌			外軌		
	Q	R	AIC	Q	R	AIC
	区間分割なし					
	32	46	810.389	14	46	747.43
分割区間の線形 および構造物	構造	物の台	帳のキロ程	±10m7	5分割点	を設定
直線	31	11	-158.84	14	12	-66.92
入口側緩和曲線	1	17	-120.97	20	9	-140.66
曲線	6	7	4.35	17	30	-329.49
出口側緩和曲線	7	2	73.06	10	25	45.28
直線	14	0	-133.24	21	0	-88.20
橋りょう・踏切	7	15	37.91	11	0	57.14
直線	12	0	-28.83	14	0	6.70
橋りょう	6	0	13.41	8	0	11.75
直線	16	6	48.53	13	0	133.27
AIC合計			-264.61			-371.12
分割区間の線形 および構造物	線形および構造物ごとに 検測波形を確認して分割点を設定				2	
直線	31	11	-158.84	14	12	-66.92
入口側緩和曲線	1	17	-120.97	20	9	-140.66
曲線	6	7	4.35	17	30	-329.49
出口側緩和曲線	7	2	73.06	10	25	45.28
直線	7	12	-138.92	21	0	-113.12
橋りょう・踏切	10	15	54.33	13	0	73.28
直線	12	0	-63.45	8	0	-45.66
橋りょう	6	1	49.05	1	0	53.29
直線	16	6	21.40	9	0	87.12
AIC合計		-279.99				-436.87

Table 2 Estimated Parameters Varying with Divided Track Sections

上段の予測では、全体的に予測誤差が大きく、特に横軸 220m 付近(円曲線中)や600m 付近(橋りょうおよび踏

平面線形	C=74		
	R=780		-
構造物		横平	
第三期 (実測)	in www.man.	mpmmmmmmmMp	M
(予測) [ma]	in on which which we have a second se	mannanan	m
第三期 予測誤差		and have subserved and the second	hritin

波形を確認し	て区間分割 (外軌 高	低偏心矢波形) [2	間分割位置 ♥	
平面線形	R=780			
構造物				162
第三期 (実測) [ss] -	5 5 5	mmm	mmmm	mmMpha
第三期 (予測) [sb]-	s NumMum	mymm	minhum	many
第三期 予測誤差	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	oper-spectrosofter type Mys	premissions in April and private	www.wy.wy.wy.wy.wy.wy.wy.wy.wy.wy.wy.wy.
10-1	000	100		608 (m

Fig. 3 Predicted Track Geometries Varying with Divided Track Sections 切)に不自然な予測誤差が残った.一方,線形および構造物ごとに検測波形を目視で参照しながら区間分割を行った図3下段の予測では、これらの不自然な誤差は解消されているのがわかる.

したがって、曲線や橋りょうなどの構造物を含む区間 については、周囲と同じ経時変化モデルを使わず、変更 したほうがよいと判断される.またそのとき、予測モデ ルを一定と仮定する区間は、キロ程に従って機械的に区 切るよりも、波形から変化点を判断して区切った方が、 よりよい予測ができることが分かる.ただし、現業区で 波形から逐一区間分割点を設定することは現実的ではな いため、自動的に区間分割点を設定するシステムの開発 が今後の課題である.

3.3 線形と軌道構造の影響

表2に示した「波形を確認して分割」した区間ごとの AICの値を見ると、円曲線部では外軌に比べ内軌のAIC が極端に大きいのがわかる.これは、円曲線部では内軌 側レールに対する予測モデルの当てはまりが、外軌側に 比べて極端に悪いことを示す.すなわち、円曲線の内軌 側レールの軌道検測データは、外軌側に比べて、過去の 軌道検測データの線形和で表現しにくいことになる.モ デルの次数を示す QとRの値が内軌側で小さいのも、次 数を増やしても精度がそれほど上がらないことを示す. これは、検測データのサンプリングが車軸の回転に伴っ て発生するパルスに依存するため、内軌側での実際のサ



Fig. 4 Predicted Track Geometries of the Inner Rail

ンプリング間隔が外軌側に比べて不均一であり,かつ, その不均一に再現性が低いためと考えられる.

また,出口側緩和曲線では,内外軌共に AIC の値が入 口側緩和曲線に対して大きくなっている.これが,この 曲線だけの現象であるのか,それとも他の曲線でも同様 であるのかの検証は今後の課題である.

同様に,橋りょう部での AIC が大きいのは,実際の経 時変化の特性が区間内で定常ではなく,本予測モデルの 仮定と合わないためと考えられる.

3.4 予測誤差

図4に、内軌の第一期~第四期の実測波形と,第三期・ 第四期の予測波形の例を示す。予測波形は実測波形とほ とんど重なってしまっている.また,図5に予測誤差(実 測波形と予測波形の差)の分布を示す。図5の(a)と(b) を比較すると,第四期の予測誤差には,第三期にはほと んど見られない,1mm以上の誤差が増えているのが分か る.

そこで、予測誤差の大きい地点の波形を確認すると、 第四期の実測波形と予測波形に、0.25m(サンプリング 間隔1点分)もしくは0.25m以下の微細な位置のずれが あることが確認された.これは、第2章で述べたように、 第三期の検測波形は経時変化モデルの推定に用いられて いるのに対し、第四期の検測波形には用いられていない ため、第四期の実測・予測波形の間に位置のずれが生じ たと考えられる.そこで、この2波形に対して文献3)の 方法で位置補正をした.得られた予測誤差の波形を図4 の最下段に、値の分布を図5(c)に示す.位置補正により 1mm以上の誤差がほとんどなくなったのがわかる.



Fig. 5 Distributions of Prediction Errors in Fig. 4

また、図5の(a)と(c)を比較すると、第三期の予測波形 の方が第四期(位置補正後)より精度が高いのが分かる. これは、第三期の検測波形が経時変化モデルの推定に用 いられているため起きた、当然の結果と考えられる.

ところで、上記の第四期の予測波形に対する位置補正 は、第四期の検測波形そのものを必要とする.しかし、 第四期の予測波形を線路の保守箇所の選定のために参照 したいのは、第四期の検測前である.そこで、第四期の 予測波形(位置補正前)の実用性を確認するため,第四 期の実測波形のピーク値と,対応する予測波形のピーク 値を比較することにした. 片振幅 3mm 以上を抽出した ものを図 6 に示す. その結果,決定係数は内軌 0.987, 外軌 0.957 であり,片振幅を精度良く予測できているこ とがわかる.



Fig. 6 Measured and Predicted Half amplitude Values (the Fourth Quarter)

4. まとめ

昨年度提案した,過去の軌道検測波形から将来の軌道 検測波形を予測する線形予測モデルを,曲線や構造物を 含む線路条件に適用した結果,以下の結果が得られた.

- 曲線や構造物を含む区間の検測波形を予測するときには、予測区間を線形や構造物ごとに分割することで、よりよい予測ができる.また、その分割点を、キロ程ではなく目視によって設定した方が、よりよい予測モデルとなる.
- 円曲線区間の内軌側レールに対しては、外軌側レー ルに比べて、本予測モデルの当てはまりが非常に悪い傾向が見られた。
- 3) 本システムによる将来の検測波形の予測結果は、実際に得られる検測波形とは位置のずれをもつ.しかし、線路の保守箇所の選定の参考にするには、問題のない波形であると考えられる.

参考文献

- 小木曽清高,神山雅子,古川敦:軌道検測波形予測 モデルの提案とそのパラメータ特性,J-Rail2011
- 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.
- 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.