

正規化相互相関を指標とした 動的時間伸縮法による軌道変位の位置合わせ手法の構築

葛西 亮平* 山本 修平 (東日本旅客鉄道株式会社)

田部井 靖生 末廣 大貴 (国立研究開発法人理化学研究所)

Development of a method for aligning railway track displacements by Dynamic Time Warping to optimize normalized cross correlation

Ryohei Kasai*, Syuhei Yamamoto (East Japan Railway Company)

Yasuo Tabei, Daiki Suehiro (Riken)

Railway track monitoring device can get frequent track geometry data. We can predict future track geometry by using these data. To make accurate future predictions, it is important to align each data with high accuracy. We developed a method for aligning railway track displacements by Dynamic Time Warping to optimize normalized cross correlation with high accuracy.

キーワード：線路設備モニタリング装置、軌道変位、相互相関法、動的時間伸縮法

(Railway track monitoring device, Track irregularity, Cross correlation method, Dynamic time warping)

1. はじめに

東日本旅客鉄道株式会社 (以下 JR 東日本) では、生産年齢人口 20%減を見据えたオペレーション&メンテナンスの変革に向けた研究開発を進めており、その一環として線路設備モニタリング装置 (図 1 参照) を実用化し、2020 年度までに全 50 線区に導入が完了した。それらの装置から取得したデータを適宜適切に処理することで、タイムリーな異常検知や将来予測ができるようになった。このことによりさらに安全かつ効率的なメンテナンスが可能となった。

線路設備モニタリング装置は軌道変位モニタリング装置 (引用文献⁽¹⁾) と軌道材料モニタリング装置から構成され、軌道変位モニタリング装置から取得した軌道変位データ (軌道の不陸を取得したデータ) は営業列車が走行する都度取得できるため、検測車と比較し、非常に高頻度なものである。このデータの実業務への適用方法の 1 つとして、異常検知と将来予測があり、そのための重要な前処理として取得した軌道変位データ間の位置合わせがある。

一方、軌道変位のデータ間の位置合わせについて、現状において部分的に微細な誤差が残留する場合があります、その結果、将来予測の精度が低下する場合があります。

本論文では、位置合わせの誤差を低減すべく新たな位置合わせ手法を開発したので提示する。



図 1 線路設備モニタリング装置 (営業列車搭載試作機)

2. 軌道変位の将来予測について

軌道変位は、時刻の経過とともに変化がない部分が多くを占め、その他の部分ではゆるやか変化し、わずかな部分では急激に変化する。さらにまれに突如軌道変位が大きくなることもある (軌道の急進)。それらの状態を適宜把握することは安全性の確保及び効率的な保守の上で非常に重要である。そのためには、線路設備モニタリング装置から取得した大量の軌道変位データを位置合わせすることは重要なタスクである。

位置合わせを適切に行うと図 2 に示すようなデータが得られる。尚、キロ程とは各線区において基準とされる位置(例として東京駅中心)からの距離のことをいう。将来予測するためには、位置合わせした軌道変位から着目したキロ程(例としては図 2 中の破線の位置)におけるデータを取得し時刻歴に並べることで時系列データが得られ(図 3 参照)、このデータをさらに処理することで将来予測ができる。

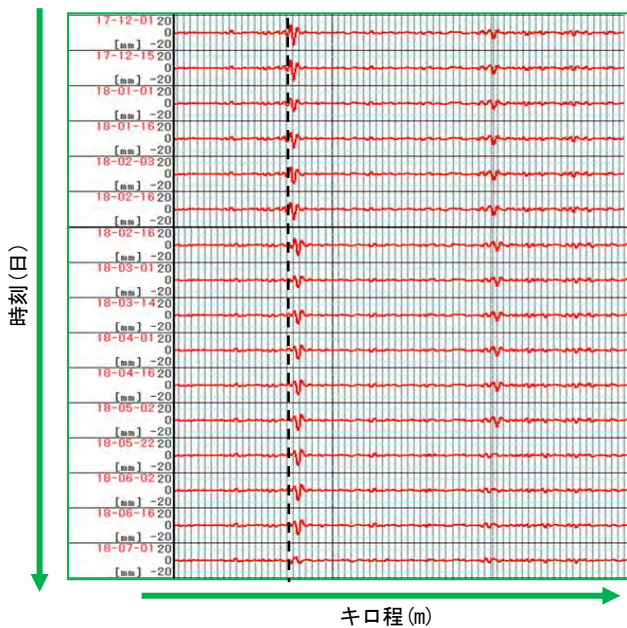


図 2 軌道変位データ(高低変位)を並べた例

3. 軌道変位の将来予測の難しさと課題

図 3 における軌道変位時系列データにおいて、将来予測(図 3 破線矢印)することの難しさは3点ある。

- ① 不連続性(線路の工事)
- ② 非線形性(線路の工事後に発生)
- ③ データのばらつき

この中で、①②は実現象に起因するものであると考えられるが、③は実現象と測定誤差の両方の原因が考えられる。さらに③における測定誤差は2つの要素が考えられ、1つ目が位置の誤差、2つ目が測定値の誤差である。位置の誤差を解決すべく公益財団法人 鉄道総合技術研究所において相互相関法を応用した位置合わせ手法(引用文献^②)を開発し導入したことでキロ程の誤差が大幅に軽減した。

しかし、位置合わせ後においても一部キロ程の微細な誤差が依然生じることがあり(図 4 参照)、時系列データのバラつきが大きくなり将来予測の精度に影響を及ぼすことがある。例として図 4 中の破線のキロ程において時系列データを取得し描画すると図 5 に様になり、バラつきが大きく精度よく将来予測を行うことは難しい。

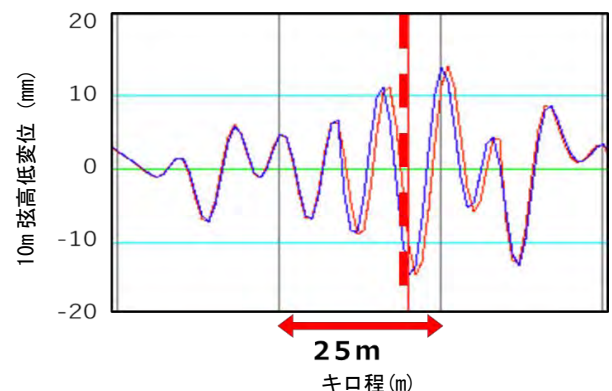


図 4 位置合わせ後において微細な位置ずれが残留する例

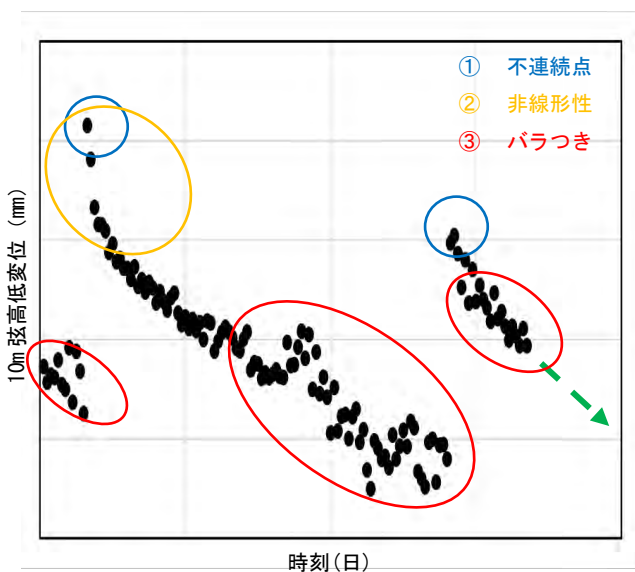


図 3 軌道変位時系列データ(傾向グラフ)例

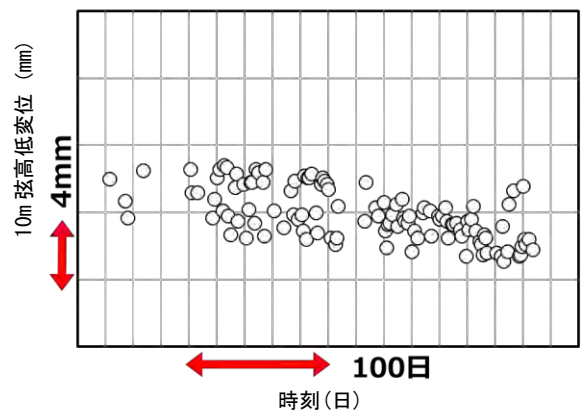


図 5 バラつきが大きい時系列データ例

4. 提案手法

〈2・1〉相互相関法 (従来手法)

正規化相互相関法による軌道変位の位置合わせは式 (1) により与えられる。ここで基準データとは位置合わせの基準となる検測データのことを言い、修正データとは位置合わせがなされる検測データのことを言う。

$$\tau^* = \text{Max}(\tilde{r}(\tau, x, y)) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

$$\tilde{r}(\tau, x, y) = \frac{1}{\sigma(x)\sigma(y)} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-\tau} \{x(n)y(n+\tau)\}$$

ここで、

- x: 基準データ
- y: 修正データ
- τ : 位相ずれ量(m)
- $\sigma(x)$: 基準データ x の位置合わせ対象区間における標準偏差
- $\sigma(y)$: 修正データ y の位置合わせ対象区間における標準偏差
- N: 位置合わせ対象区間内の基準データ個数
- n: データインデックス

\tilde{r} は正規化相互相関であり、求められた τ^* が修正すべき位置のずれ量として得られ、このずれ量をもとに修正データをリサンプリングすることで位置合わせを行う。リサンプリングは等間隔に基準データと修正データの個数が完全に一致するように行う。

一方、位置情報 (キロ程) の取得には列車の車輪回転数を用いており、空転・滑走により局所的に位置ずれが生じる場合があり (図 4 参照)、その場合、等間隔にリサンプリングすると、微細な位置ずれが残留することが若干の欠点として残る。

〈2・2〉動的時間伸縮法 (比較のため記載)

この課題に対して、動的時間伸縮法による位置合わせをすることで解決が可能となる。動的時間伸縮法による軌道変位の位置合わせは式 (2) を満たす経路 π により与えられる。

$$\text{DTW}(x, y) = \min_{\pi \in A(x, y)} (\sum_{(i, j) \in \pi} \delta(x_i, y_j)) \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$$\delta(x_i, y_j) = |x_i - y_j|$$

ここで、

- x: 基準データ
- y: 修正データ
- i: 基準データのキロ程
- j: 修正データのキロ程
- A(x, y): 基準データ、修正データが取りうるすべての経路

位置合わせ対象区間において基準データの個数が N 個、修正データの個数が M 個あり、位置合わせの始点から終点までのキロ程のペアが K 組存在すると仮定すると、A は以下を満たす π の集合となる。

- $\pi_0 = (0, 0) \Rightarrow$ 位置合わせ始点の定義
- $\pi_{k-1} = (N-1, M-1) \Rightarrow$ 位置合わせ終点の定義
- $i_{k-1} \leq i_k \leq i_{k-1} + 1 \Rightarrow$ キロ程減の経路は許容しない
- $j_{k-1} \leq j_k \leq j_{k-1} + 1 \Rightarrow$ キロ程減の経路は許容しない

動的時間伸縮法の欠点として以下の 2 点があげられる。
 1 つ目が、計算コストが 0(MN) であり、相互相関法の 2 乗程度計算コストが多くかかる
 2 つ目が、式 (2) にある δ は類似度と呼ばれ、一般的には、測定データ間の距離 (具体的には測定値の差の絶対値) で表されるため、波形の位相を壊しながら測定データの数値が同程度の箇所を探索しながら位置合わせをする可能性があることである。

〈2・3〉正規化相互相関を指標とした動的時間伸縮法 (提案手法)

相互相関法と動的時間伸縮法それぞれに長所短所があり、今回それらの短所を補う方法として動的時間伸縮法の類似度を正規化相互相関とした軌道変位の位置合わせ手法は式 (3) のとおりであり、これを満たす経路 π' により与えられる。

$$\text{DTW}'(\hat{x}_i, \hat{y}_j) = \max_{\pi' \in A(\hat{x}_i, \hat{y}_j)} (\sum_{(i, j) \in \pi'} \tilde{r}'(\hat{x}_i, \hat{y}_j)) \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

$$\tilde{r}'(\hat{x}_i, \hat{y}_j) = \frac{1}{\sigma(\hat{x}_i)\sigma(\hat{y}_j)} \frac{1}{N'} \sum \hat{x}_i \hat{y}_j$$

ここで

- \hat{x}_i : キロ程 i の前後 K 個の基準データ (つまり 2K+1 個)
- \hat{y}_j : キロ程 j の前後 K 個の修正データ (つまり 2K+1 個)
- A(\hat{x}_i, \hat{y}_j): 基準データと修正データが取りうるすべての経路

尚、 K は各点における相互相関を計算する窓幅で短いと微細な位置ずれが完全に修正できるが波形を破壊する可能性が高くなるとともに計算コストは少なくなる。 K が長いと波形を破壊する可能性は低くなるが微細な位置ずれが残留し、さらに計算コストは多くなる。

双方の長所を享受するために位置合わせに用いる軌道変位種類及びその周波数特性等を勘案した上で適切なものを定める必要がある。また動的時間伸縮法(提案手法含む)においては、位置合わせの始点と終点は固定となり、修正データの位置合わせは行わないため、予め位置が正しいと判明している点である必要がある。また動的時間伸縮法であるため計算コスト $O(MN)$ となりかつ、各点で相互相関を計算する必要があるため、非常に計算コストが高くなるのが欠点であるが、位置ずれは微細であることを考えると A に制約をかけることで計算コストは $O(M)$ 程度に低減することが可能である。

6. 従来手法と提案手法の波形の比較

局所的に軌道変位に位相がずれ、また局所的に測定データに装置に起因する誤差が含まれる箇所が最も位置合わせが困難な例の 1 つである。その箇所において相互相関法、動的時間伸縮法、及び今回構築した正規化相互相関を指標とした動的時間伸縮法による位置合わせの比較を行った(図 6~8 参照)。

相互相関法(図 6 参照)においては、部分的に波形のピーク点がずれている一方、位置合わせ前後で修正波形の振幅はほとんど変化しない。動的時間伸縮法(図 7 参照)において位相は基準波形と修正波形で完全に一致しているが、修正波形の振幅が大幅に変化しており、誤差の少ない時系列データの取得のための前処理という本来の目的から逸脱している。提案手法(図 8 参照)においては、基準波形と修正波形でほぼ一致し、かつ修正波形の振幅の変化もほとんどない。したがって、提案手法が良いと考える。

7. 従来手法と提案手法の位置合わせ検証

横須賀総武快速線に搭載された線路設備モニタリング装置から取得された 10 線区の上下線における半月程度のデータから各 500~1,000m 程度を検証区間として相互相関法と提案手法における位置合わせ後の基準波形との波形の類似度(相関係数)を比較し、各線区の平均をしたところ、表 1 の通りとなり、相互相関も元々高い類似度が得られていたが、さらに改善が見られた。

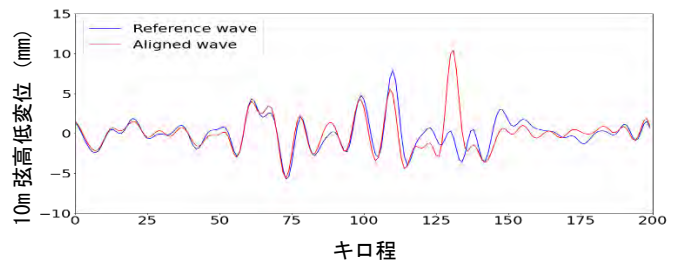


図 6 困難箇所における相互相関法による位置合わせの例

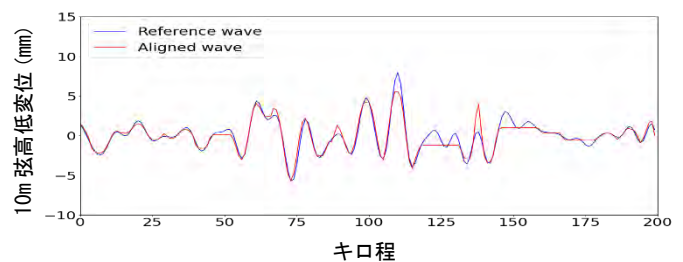


図 7 困難箇所における動的時間伸縮法による位置合わせの例

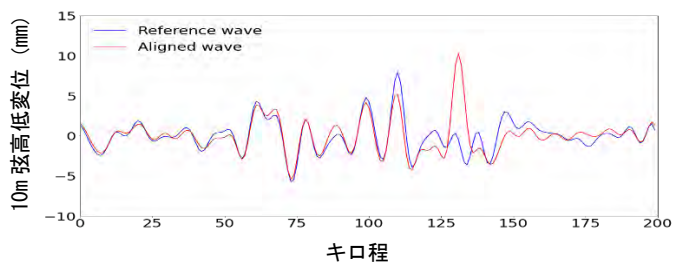


図 8 困難箇所における正規化相互相関を指標とした動的時間伸縮法による位置合わせの例

表 1 基準波形と修正波形の位置合わせ後類似度。

	相互相関	提案手法
相関係数	0.925	0.972

8. まとめ

線路設備モニタリング装置から取得した高頻度軌道変位データをさらに高精度に位置合わせする手法として正規化相互相関を指標とした動的時間伸縮法を提案した。この手法は現行の装置の性能に合わせ作ったものであるため、今後さらに装置自体および位置合わせ手法の性能が向上する可能性があるため、その時々における最善の知見を取り入れ日々改良を続けたいと考える。

文 献

- (1) 坪川洋友, 矢澤英治, 小木曾清高, 南木聡明: 車体装荷型慣性正軌道検測装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.26, No.2, pp-7-12, 2012
- (2) 田中博文, 山本修平, 大島崇史, 森忠夫, 西藤安隆: 相互相関法を応用した高頻度軌道検測データによる急進把握手法の開発, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol21, pp.1-8, 2017