

論文 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

田中 博文¹・山本 修平¹・大島 崇史¹・森 忠夫²・西藤 安隆³

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）
E-mail:tanaka.hirofumi.96@rtri.or.jp, yamamoto.shuhei.38@rtri.or.jp, oshima.takashi.54@rtri.or.jp

²非会員 株式会社ジェイアール総研情報システム（〒185-0034 東京都国分寺市光町1-7-23）
E-mail:mori@jrjsi.co.jp

³正会員 東日本旅客鉄道株式会社（〒331-8513 埼玉県さいたま市北区日進町2-479）
E-mail:ya-saitou@jreast.co.jp

本論文では、営業車両に搭載した小型の軌道検測装置によって高頻度に取得された検測データから、軌道変位の急進箇所を自動で抽出する手法について検討した。まず、2つの軌道変位波形間の相互相関係数を算出して検測データの位相ずれを補正し、次に波形間のサンプリング間隔を一致させるデータ処理手法を開発した。この位置補正手法の適用によって、従来は困難であった波形間の差分から自動的に軌道変位進みを算定することが可能となった。次に、算定された軌道変位進みには、軌道の沈下等の劣化によるものと、軌道整備による良化によるものが含まれるため、これを自動で判別する手法についても開発した。最後に、開発した手法を実際の高頻度検測データに適用し、その実用性を検証した。

Key Words : high frequency measured data, track irregularity, commercial train monitoring, track maintenance, cross correlation method, position correction

1. はじめに

鉄道の軌道では、列車からの繰返し荷重によって、軌道変位が徐々に進行し、車両の走行安全性や乗り心地の低下を引き起こす。このため、鉄道事業者は、定期的に軌道変位を検測し、そのデータに基づいて軌道を本来の形状に戻すように整備を行っている¹⁾。この軌道検測には、従来は専用の軌道検測車が用いられており、在来線の場合、3ヶ月に1回程度の頻度で軌道変位データが取得されていた。しかしながら、例えば、図-1に示すように、線路下の古い埋設物の破損により路盤が陥没する等の理由により、軌道が局所的かつ急激に沈下することが稀にある。その他にも、線路近接工事の影響や軌道整備後の初期沈下等、または構造物境界等の軌道の弱点箇所においても、局所的な軌道変位の急進が発生することがある。このような軌道変位の急進は、従来の頻度で検測された軌道変位データから捉えることは困難であるが、鉄道の安全安定輸送に大きな影響を及ぼす恐れがあるため、その予兆を把握して事前に適切な保守を行うことが求められている。

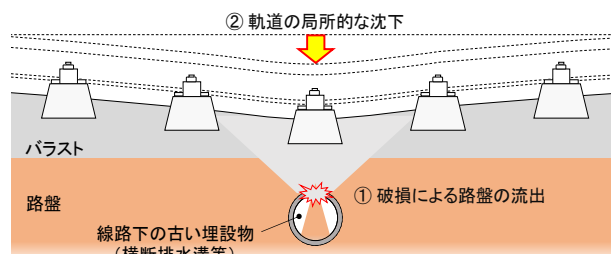


図-1 軌道変位の急進の例
(線路下の埋設物の損傷による沈下)



図-2 営業車両に搭載された慣性正矢軌道検測装置の例

そこで、そのための一つの方策として、図-2 に示すような営業車両に搭載可能な小型で低コストな軌道検測装置の導入が進められている²³⁾。この装置は、慣性正矢軌道検測装置⁴⁵⁾⁶⁾と呼ばれており、加速度を2階積分すると変位になる、という物理の基本法則を用いて、従来の軌道検測車と同等の軌道変位データを取得できるものである。装置が小型されたことに伴って営業車両への搭載が容易となり、導入される路線によって異なるが、1日に数回程度から週に1回程度と、従来と比較して、軌道変位データを高頻度で取得できる。その一方で、取得された大量の軌道変位データの処理、および軌道整備に必要な箇所を把握を効率的に行う手法の開発が求められていた。

そこで、本論文では、営業車両に搭載された慣性正矢軌道検測装置によって高頻度で取得された軌道検測データから、軌道変位の急進箇所を自動で抽出する手法について検討した。その際、抽出された軌道変位急進箇所から、実際の軌道変位の急進に伴って軌道状態が悪化した箇所と、軌道整備によって軌道状態が良化した箇所を自動で判別する手法についても検討した。最後に、開発した手法に対し、実際の高頻度の軌道検測データを用いてその有効性を検証した。

2. 従来の軌道検測データの位置補正手法および軌道変位急進評価手法の概要

本章では、軌道検測車等によって、年に数回程度の頻度で取得された軌道検測データに対して、従来、一般的に適用されてきた位置補正手法、およびそのデータによる軌道変位急進評価手法の概要について述べる。

(1) 従来の位置補正手法の概要

一般に、軌道検測データは、検測車両の車輪の空転や滑走によって、同じ区間を複数回走行した場合であっても、検測データごとに検測延長、すなわちデータ個数に微小な差が生じることがある。そのため、軌道検測車では、位置補正のために、地上の既知の位置（キロ程）に設置されたデータデポ等の検知信号を、軌道検測データと同時に取得している。この位置補正に使用されるデータデポは、1km程度の間隔で設置されていることが多い。

そして、図-3に示すように、その検知信号を用いて軌道検測ごとに地上の位置との照合を行い、軌道検測データの位置を概略的に補正している⁷⁰⁾。この位置補正手法は、軌道保守管理データベースシステム「LABOCS⁹⁾」において、「キロ程・データ番号対照表」という概念を用いて実用化されている。本手法では、検測データ間の位置補正は行っていないため、検測日や検測時間の異な

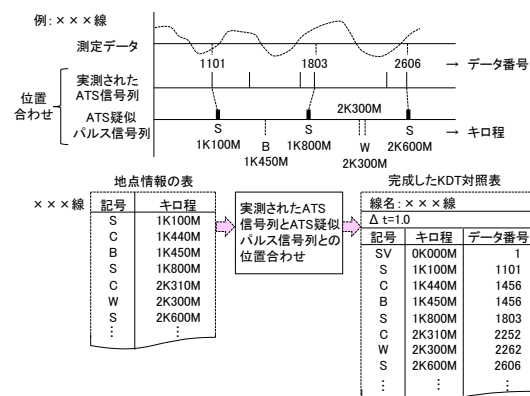


図-3 従来の位置補正手法の概念図⁹⁾

(キロ程・データ番号対照表によるキロ程補正)

る検測データ間には微小な位置ずれが存在することを許容していたと言える。また、地上との位置照合の際に、検測データのサンプリング間隔をデータデポ等の検知信号の間で微修正していることから、異なる検測データ間では、同一区間であっても、データ個数およびサンプリング間隔が一致しないことがあった。

(2) 従来の軌道変位急進評価手法の概要

この位置補正手法は、通常の軌道保守の必要性の判断、すなわち、管理値との照査によって保守が必要な箇所を抽出するには、実用上十分な精度を有していた。一方で、前述のような理由で軌道変位の波形間の差分から任意箇所の軌道変位急進を算出することは困難であった。そのため、一定区間の軌道変位のP値や σ 値（標準偏差）等の区間統計量を算出し、その区間の軌道状態を評価するとともに、区間統計量の推移から軌道変位急進が評価されてきた。なお、この区間統計量は、MIT等の連続施工を基本とする軌道整備の投入箇所の選定等に活用されてきた¹⁰⁾¹¹⁾。その一方で、区間統計量の算定ロット長が長くなるに従って局所的な軌道変位急進箇所の抽出に対しては感度が鈍り、算定ロット長が短くなるに従って微小な位置ずれによる区間統計量の算定誤差の影響が無視できなくなることが指摘されていた。

3. 相互相関法による高精度位置補正手法の概要

本章では、営業車両に搭載された軌道検測装置によって、高頻度で取得された軌道検測データから、波形レベルで軌道変位急進箇所を抽出するために開発した位置補正手法の概要について述べる。

(1) 相互相関法による高精度位置補正手法の概念

新たに提案する位置補正手法では、波形間でデータ個数およびサンプリング間隔を完全に一致させることを前

提とした。

図-4に、新たに提案する位置補正手法の概念図を示す。この位置補正手法は、位相合わせおよびリサンプリングの2つのステップで構成される。

まず、位置補正の基準となる軌道検測データ（以下、「基準データ」という。）、およびそれに対して位置補正がなされる軌道検測データ（以下、「修正対象データ」という。）を指定する。そして、図-4(a)に示すように、基準データに対して、一定区間ごとに修正対象データの位相を微小（データのサンプリング間隔ごと）かつ連続的に変化させながら両データ間の相互相関係数が最大となる位相ずれ量を算定し、修正対象データの位相ずれを補正する。

次に、図-4(b)に示すように、位相が合わされた一定区間中に含まれる基準データの個数と修正対象データの個数を完全に一致させるために、基準データのサンプリング点と対応する箇所において修正対象データのリサンプリングを行う。このリサンプリングのステップによって、後述する波形間の差分演算を可能としている。

本論文では、この相互相関係数を活用した一連の位置補正手法を、「相互相関法¹²⁾」と称することとする。

(2) 相互相関法による高精度位置アルゴリズム

相互相関法による位置補正手法の詳細なアルゴリズムは、以下の通りである。

まず、基準データ $x(n)$ と修正対象データ $y(n)$ に対し、式(1)によって、一定区間内における両データ間の相互相関関数 $\tilde{R}(\tau)$ を算定する。

$$\tilde{R}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-\tau} \{ x(n) y(n+\tau) \} \quad (1)$$

$\tilde{R}(\tau)$: 相互相関関数

τ : 位相ずれ量（データ番号）（ $\tau \geq 0$ ）

N : 一定区間内の基準データのデータ個数

n : データ番号

$x(n)$: 基準データ, $y(n)$: 修正対象データ

次に、式(2)を用いて、基準データに対して、修正対象データの位相ずれ量 τ を変化させながら、相互相関係数 $\tilde{r}(\tau)$ を算定する。

$$\tilde{r}(\tau) = \frac{\tilde{R}(\tau)}{\sigma(x)\sigma(y)} \quad (2)$$

$\tilde{r}(\tau)$: 相互相関係数

$\sigma(x)$: 基準データについての相互相関関数を算出する区間の標準偏差

$\sigma(y)$: 修正対象データについての相互相関関数を算出する区間の標準偏差

この相互相関係数 $\tilde{r}(\tau)$ は、基準データと修正対象データの一定区間における標準偏差の積 $\sigma(x)\sigma(y)$ で相互相関関数 $\tilde{R}(\tau)$ を除することによって正規化さ

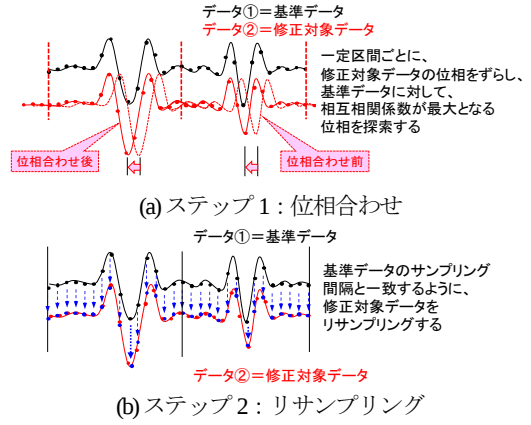


図-4 新たに提案する位置補正手法の概念図
(相互相関法による微小ロット毎の位置補正)

れ、 $(-1,1)$ の範囲内を取り得る値である。なお、相互相関係数を算定する際、位相の探索は、式(1)において、基準データと修正対象データを入れ替えることにより、位相遅れと位相進みの両方を考慮している。この手順によって、相互相関係数が最大となる位相ずれ量 $\tau_{\max}$ を求めることによって、相互相関係数の算出区間の始点における両波形間の位相ずれ量 τ を確定できる。

この位相ずれ量 τ を用いて、修正対象データの一定区間内における位相ずれを補正する。この処理によって、位相ずれ量を確定した後は、位相が合わされた一定区間中に含まれる基準データの個数と、修正対象データの個数を一致させるために、修正対象データのリサンプリングを行う。この処理によって、位置補正区間中に含まれる両波形のデータ個数を一致させる。

(3) 相互相関法による高精度位置の成否判定

上述の一連の手順で、ある一定区間の位置補正が実行された後に、同様の手順で次の区間の位置補正を行い、軌道検測データの全ての区間の詳細な位置補正を順次実行する。

その際、相互相関係数を算定する区間長については、位置補正を行う波形の周波数特性等によって最適な延長があると考えられる。この延長は試行錯誤的に検討した結果、10～100m 程度の範囲内において位置補正の成功率が高くなることがわかっている。

ここで、相互相関法による高精度な位置補正の成否判定のために、2つのパラメータを導入している。1つ目は、一定区間内で算定する相互相関係数の下限値である。この下限値を下回った場合、当該の一定区間内では位置補正が失敗したと判断される。2つ目は、相互相関法による高精度な位置補正の対象となる区間の数に対して、位置補正が失敗した区間の数の割合の下限値である。この下限値を下回った場合、当該の軌道検測データは、相互相関法

による高精度な位置補正が失敗したと判断される。これらの下限値をある一定以上低く設定すると位置補正の成否を誤判定する可能性もあるので注意が必要である。

なお、一定区間内での相互相関法による位置補正が失敗した場合、その前後で位置補正が成功した区間の情報を用いて失敗した区間の位置情報を補正するアルゴリズムも実装している。

(4) 相互相関法適用のための事前処理

a) 従来の位置補正手法の適用

相互相関法では、前述のように、基準データと修正対象データ間の相互相関係数が最大となる位相ずれ量を探索する。したがって、その探索範囲を可能な限り狭くすることは、計算時間の短縮には有効である。そのため、**図-5**に示すように、相互相関法の適用の際には、その事前処理として従来のデータデポによる概略的な位置補正を行い、波形間の位置ずれを数m～数十m程度以内にまで補正しておくことが望ましい。その上で、後述するように、波形間の差分から、軌道変位進みを算出する。

b) アンチエイリアジング処理の適用

相互相関法では、前述したように、位相ずれ量確定後に、修正対象データのリサンプリングを行っている。したがって、リサンプリングに伴うエイリアジングによって修正対象データの周波数情報に誤差が生じないようにする必要がある。そのため、相互相関法の適用の際には、その事前処理として、基準データおよび修正対象データのサンプリング間隔 Δx に対して、 $1/2 \cdot \Delta x$ 以上の波長のローパスフィルタ（以下、「LPF」という。）で処理しておくことが望ましい。この処理は、一般的に、アンチエイリアジング処理と呼ばれる。

なお、10m弦正矢法で検測された高低変位および通り変位は、その検測特性から波長6m以下の波長成分は評価対象外となるため、波長6mのLPFで処理されていることが多い。このような軌道検測データは、アンチエイリアジング処理が施されていることになる。

(5) 検測データ間の位置補正情報の同期

軌道検測データには、**図-6**に示すように、一般的に、左右レールの高低変位および通り変位、軌間変位、水準変位、平面性変位の7項目が含まれている。相互相関法による位置補正をこのような複数の項目からなる検測データに適用する場合、全ての検測データに個別に位置補正処理を行うことは計算時間の観点から合理的では無い。すなわち、同時に測定された複数の検測データは、位置に関して同期されているため、どれか1項目に対して位置補正処理を行い、その位置補正情報を同期するのが合理的であると考えられる。なお、別途検証した結果、何

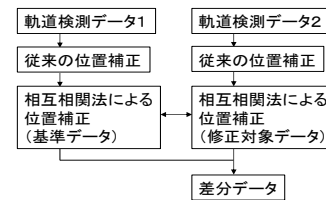


図-5 相互相関法の適用と差分データの算出フロー

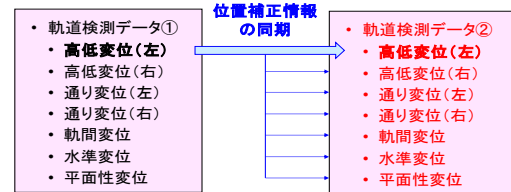


図-6 検測データ間の位置補正情報の同期の概念

れの検測項目に対して相互相関法を適用しても位置補正精度は大きく変わらないことを確認している¹³⁾。

4. 軌道変位急進箇所の抽出手法

本章では、相互相関法によって高精度に位置補正された軌道検測データを用いて、軌道変位進み箇所を自動抽出する手法、およびその際に軌道の保守実績を用いずに、軌道変位進み箇所と軌道整備箇所を判定する手法について述べる。

(1) 軌道変位進み箇所の抽出手法

図-5に示したように、従来の位置補正手法を適用した上で相互相関法を適用することによって、軌道検測データ間の位置は高精度に補正され、サンプリング間隔も一致させることが可能となる。したがって、ある検測間の軌道変位進みは、式(3)に示すように、単純に、波形間の差分 $\Delta y(x)$ （以下、「差分データ」という。）を求めることによって算定可能となる。

$$\Delta y(x) = y_{\text{after}}(x) - y_{\text{before}}(x) \quad (3)$$

$\Delta y(x)$: 軌道検測データの差分データ
 $y_{\text{after}}(x)$: 事後の検測データ
 $y_{\text{before}}(x)$: 事前の検測データ

(2) 軌道変位進み箇所の判別手法

前述のように、相互相関法の適用後に、差分データを求めることによって、軌道変位進み箇所を抽出可能となる。その一方で、このようにして抽出された軌道変位進み箇所には、実際の軌道変位の急進に伴って軌道状態が悪化した箇所と、軌道整備によって軌道状態が良化した箇所が含まれる。本来、軌道整備箇所は、その作業実績等から特定し、軌道変位進み箇所から除外できることが望ましい。しかしながら、営業車検測では検測頻度が

高いため、軌道変位進みを算定する前に、軌道整備の作業実績との関連付けを行うことは難しい。そこで、本論文では、作業実績を用いずに、軌道変位進み箇所と軌道整備箇所を自動で判定する手法を開発した。

図-7に、開発した軌道変位進み箇所の判別フローを示す。判別は2段階に分けて行っている。まず、一定期間内に軌道変位進みがあったとしても、その変化が微小であった場合には、直ちに鉄道車両の走行安全性に影響を及ぼさないと考えられる。したがって、式(4)に示すように、1段階目においては、軌道変位進み量があるしきい値(しきい値A)以下の箇所は、有意な軌道変位の変化はないと判断する。

$$\left. \begin{array}{l} \Delta y > \alpha : \text{軌道変位急進可能性箇所} \\ \Delta y \leq \alpha : \text{急進ではない箇所} \end{array} \right\} \quad (4)$$

Δy : ある箇所での軌道変位進み
 α : しきい値A

次に、しきい値Aを超過した箇所について、その箇所を中心とする一定区間の波形の標準偏差を算定する。その標準偏差が、式(5)に示すように、あるしきい値(しきい値B)以上悪化した箇所は実際に軌道変位進みがあった箇所と判断する。一方で、それ以外の箇所は軌道整備がなされた、あるいは顕著な軌道変位進みはなかった箇所と判断する。なお、このしきい値Bは、理論的には0でよいが、実際の検測データでは、検測誤差等も含まれるので、実態に合わせて0以上の数値を設定すべきであると考えられる。また、前述した通り、標準偏差の算出ロット長が長くなるに従って局所的な軌道変位に対する感度が鈍るため、算出ロット長を適切に設定する必要があると考えられる。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{\text{after}} - \sigma_{\text{before}} > \beta : \text{軌道変位急進箇所} \\ \sigma_{\text{after}} - \sigma_{\text{before}} \leq \beta : \text{急進ではない箇所} \end{array} \right\} \quad (5)$$

$\sigma_{\text{before}}, \sigma_{\text{after}}$: 比較する前後の波形の一定区間の標準偏差
 β : しきい値B

5. 実際の高頻度検測データへの適用例

本章では、開発した位置補正手法および軌道変位進み急進箇所抽出手法を、営業線で高頻度に取得された軌道検測データに適用し、その有効性について検証した。なお、前述の相互相関法による位置補正アルゴリズムを、鉄道総研で開発している軌道保守管理データベースシステムの最新版「LABOCS Ver.4.0¹⁴⁾」上で実現するために、新規にコマンドを開発した。

表-1に、今回の検証に用いた相互相関法を適用する際のパラメーター一覧を示す。また、表-2に、分析に用いた線区の概要を示す。分析対象とした線区では、営業車に

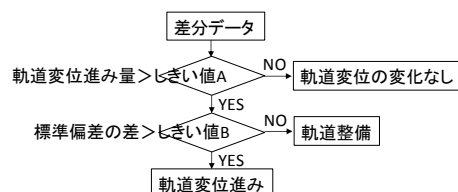


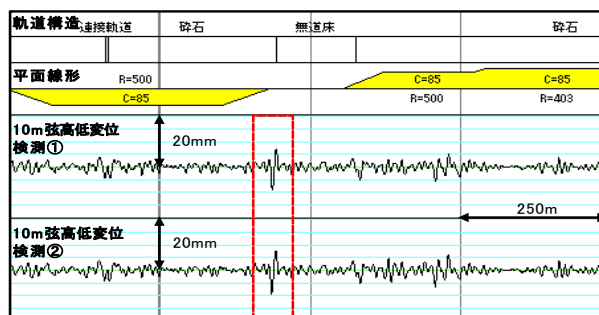
図-7 軌道変位進み箇所の判別フロー

表-1 検証に用いた相互相関法のパラメーター一覧

項目	パラメータ
相互相関係数の下限値	0.8
位置補正失敗ロットの下限値	75%
相互相関係数の算出ロット長	40m
位置補正区間の始点の間隔	10m
検測データのサンプリング間隔	0.25m

表-2 分析に用いた線区の概要

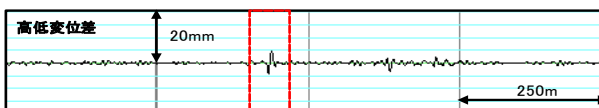
年間通トン	約3000万トン
最高速度	95km/h
営業車による測定本数	平均7.8本/日



(a) 測定日の異なる2つの高低変位



(b) 従来の位置補正手法による高低変位差



(c) 相互相関法による高低変位差

図-8 高低変位と高低変位差の例
(軌道変位の急進を捉えた例)

よって、一日当たり平均7.8本の軌道検測データが取得されていたが、位置補正成功率が最も高いものをその日の代表データとして選定した。

(1) 相互相関法による位置補正と軌道変位進みの算定例 a) 軌道整備実績の無い区間

図-8に、高頻度に検測された軌道変位データの一例として、検測日の異なる2つの高低変位データおよびその差分データ(以下、「高低変位差」という。)の例を示す。何れも、営業車が駅間を走行している区間の検測データであり、両データの検測間隔は7日間である。なお、高低変位差には、従来の位置補正手法、および図-5に示

したように、従来の位置補正手法を適用した上でさらに相互相関法を適用した2通りの結果を示している。

図-8(a)より、両波形間には、全体としては顕著な変化は見られない。しかしながら、図-8(b)のように、従来の位置補正手法を適用した場合における高低変位差は、ほぼ全区間にわたって比較的大きな値となっていることがわかる。これは、前述した微小な位置ずれに起因して軌道変位進みが算出された結果である。一方で、図-8(c)のように、相互相関法による位置補正手法を適用した場合における高低変位差は、ほとんどの区間においてほぼゼロである一方、無道床区間（橋りょう）との境界部等において3mm程度となっており、この箇所における軌道変位進みを的確に捉えていることがわかる。このことから、相互相関法を適用して、波形間の微小な位置ずれを補正することによって、波形レベルでの軌道変位進みの算出が可能となったことを確認できた。

b) 軌道整備実績のある区間

図-9 および図-10 に、2回の検測間に軌道整備が実施された区間の高低変位データおよび高低変位差の例を示す。何れも、営業車が駅間を等速で走行している区間のデータであり、両データの検測間隔は7日間である。図-9 は MTT による連続的な軌道整備が、図-10 は TT による局所的な軌道整備が、図中の点線の範囲内において行われていた。

図-9(a)より、MTT が施工された区間においては、波形レベルで軌道変位が良化していることがわかる。しかしながら、図-9(b)に示すように、MTT 施工による波形の良化の影響についても、高低変位差として算出されている。

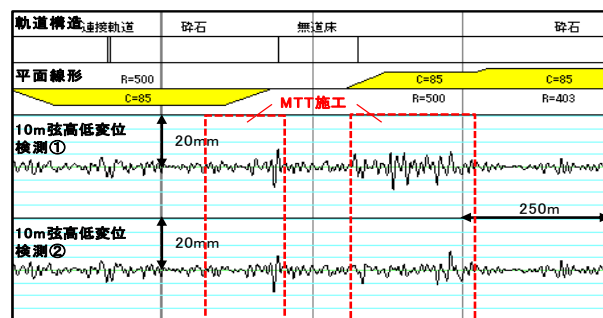
同じく、図-10(a)より、TT が施工された箇所においては、波形レベルでは軌道変位が良化していることがわかる。しかしながら、図-10(b)に示すように、当該箇所において TT 施工による軌道変位の良化に伴って局所的に大きな高低変位差が算出されている。

したがって、前述したように、高低変位差のみからでは、軌道変位進みか軌道整備かを自動判別することは困難であることがわかった。

(2) 軌道変位進みと軌道整備箇所の判定例

a) 軌道変位進み箇所の抽出方法の検証

図-11 に、図-8 から図-10 に示したそれぞれ 1km 間の高低変位差において、軌道変位進みが絶対値で 3mm（7 日あたり）が超過した箇所数を示す。なお、この段階で、高低変位差の波形は 0.25m サンプリングから 1m サンプリングに間引き処理を行っているため、データ個数の分母は 1000 個となって

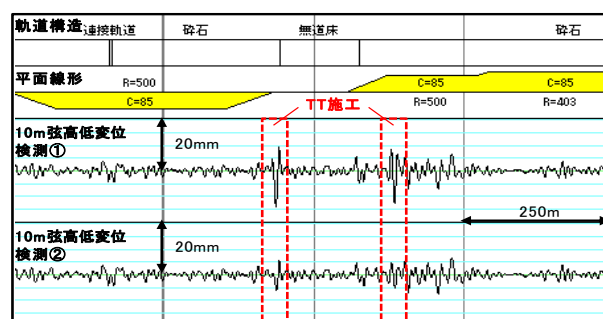


(a) 軌道整備前後の高低変位



(b) 高低変位差

図-9 軌道整備区間の高低変位と高低変位差の例
(MTT による連続施工区間の例)



(a) 軌道整備前後の高低変位



(b) 高低変位差

図-10 軌道整備区間の高低変位と高低変位差の例
(TT による局所的な整備箇所の例)

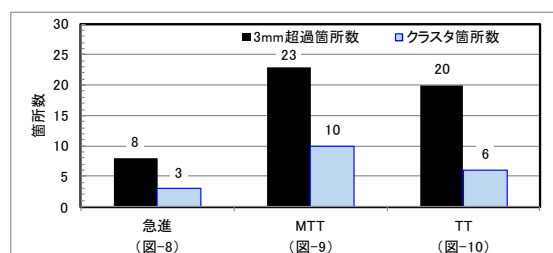


図-11 軌道変位進みが±3mmを超過した箇所数の例

いる。同図には、1m 値において±3mm/7 日を超過した箇所数、および連続する±3mm/7 日超過箇所を 1 つのまとまり（クラスタ）とした場合の箇所数を示している。

同図より、この例の場合、クラスタ化によって 3mm/7 日超過箇所数は半数以下になることがわかった。これは、軌道変位は線路長手方向に連続的に変化するためであり、実際の急進箇所数を把握するためには、しきい値超過箇所のクラスタ化が有効で

あることもわかった。

次に、図-12 に、図-11 に示した軌道変位進みが $\pm 3\text{mm}/7$ 日を超過したクラスタにおける、急進箇所、あるいは軌道整備箇所の比較前後の標準偏差を示す。その際、最適な標準偏差のロット長を検証するために、ロット長を 11m, 25m, 51m, 101m と変更してパラメータスタディを行った。同図には、各クラスタの平均値および誤差範囲を示している。同図より、軌道変位の急進箇所では、波形の比較前後で標準偏差が増加しているのに対し、MTT 施工箇所および TT 施工箇所では標準偏差が減少しているため、標準偏差の増減の判定ロジックによって軌道変位急進箇所と軌道整備箇所を判定できることがわかる。またその際、ロット長が長くなるに従って比較前後の標準偏差の差が小さくなっており、判定の感度が低下することがわかる。ここで、誤差範囲による誤判定の可能性も考慮すると、最適なロット長は 25m 程度であると考えられる。

(3) 軌道変位進み箇所の軌道変位の推移例

ここまでの検討によって、波形レベルでの軌道変位進みの算定が可能となった。この手法を活用し、複数世代の軌道検測データの位置補正を行うことにより、局所的な軌道変位の推移の把握も可能となる。

図-13 に、軌道変位データの推移の一例として、図-10 の右の破線内に示した箇所の高低変位の推移を示す。図中には、営業車によって高頻度取得された高低変位に加えて、従来頻度の軌道検測車による高低変位も示している。同図より、営業車による高頻度データからは、当該箇所は、複数回の軌道整備が短期間に行われていること、また軌道整備後の初期沈下が大きいこと等が確認できる。一方で、軌道検測車による従来頻度データからは、このような詳細な軌道変位の推移は確認することはできない。

したがって、営業車による高頻度データを用いて、任意の地点の軌道変位進みを確認することによって、当該箇所の軌道変位が過去にどのような挙動を示していたのか、あるいはどのような保守履歴があったのか等を把握することができる。これらの情報を有効活用することによって、軌道保守を検討する上で適切な工種を選定するのにも、本手法は活用できると考えている。

7. まとめ

本論文では、営業車両に搭載された慣性正矢軌道検測装置によって高頻度取得された軌道検測データから、

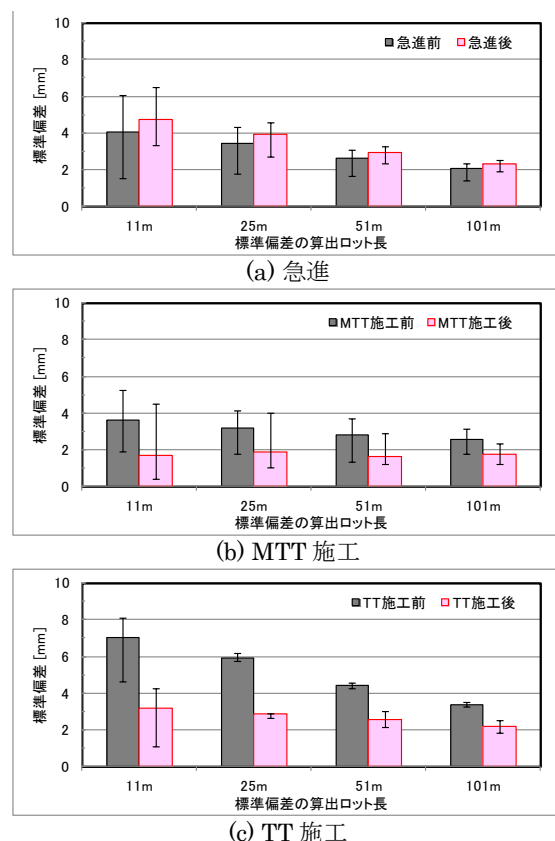
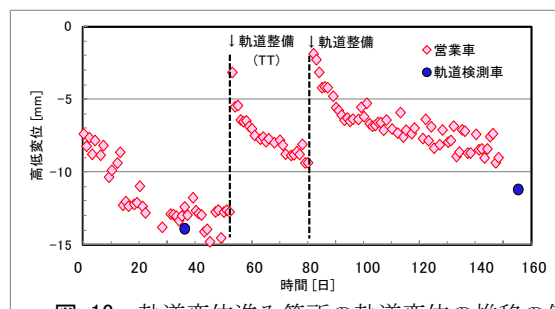


図-12 軌道変位進み $\pm 3\text{mm}$ 超過箇所の標準偏差の例



軌道変位の急進箇所を自動で抽出する手法について検討した。その際、抽出された軌道変位進み箇所から、実際の軌道変位の急進に伴って軌道状態が悪化した箇所と、軌道整備によって軌道状態が良化した箇所を自動で判別する手法についても検討した。最後に、開発した手法に対し、実際の高頻度の軌道検測データを用いてその有効性を検証した。以下に、得られた主な知見を示す。

- (1) 従来の位置補正手法では困難であった軌道変位の波形レベルでの軌道変位進みを算出するために、総合相関法という新たな位置補正手法を開発した。本手法は、2つの波形間の類似性を相互相関係数を算出して検測データの位相を補正し、さらに波形間のサンプリング間隔を一致させるデータ処理手法である。この位置補正手法の適用によって、軌道変位の波形間の差分から自動的に軌道変位進みを算定することが可能となった。

- (2) 相互相関法を適用した軌道変位波形の差分によって軌道変位急進箇所を自動抽出する手法、およびその際に軌道の保守実績を用いずに、軌道変位急進箇所と軌道整備箇所を判定する手法を開発した。本手法は、軌道変位の差分データに急進を判定するためのしきい値を設定して軌道変位急進箇所を抽出する手順と、比較前後の波形の標準偏差の増減から軌道整備箇所を判定する手順から構成される。
- (3) 開発した位置補正手法および軌道変位急進箇所抽出手法を、営業線で高頻度取得された軌道検測データに適用し、その有効性について検証した。その結果、上記の手法は、営業車両によって高頻度取得された軌道検測データから、軌道変位の急進箇所を自動で抽出する手法として実用的なものであることを確認した。

なお、今後、営業車による高頻度軌道検測が多数の路線で実施される予定となっている。それらは、取得されるデータの頻度も、線路の管理状況も大きくなることがわかっている。これらの多様な高頻度および線路の管理状況における本手法の実用性について、さらなる検証を行う予定である。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準（軌道編）の手引き，pp.9-110，2007.
- 2) 寺島令，瀧川光伸，堀山功：営業列車搭載用線路設備モニタリング装置の開発，第 19 回鉄道技術連合シンポジウム（J-Rail2012）講演論文集，pp.163-164，2012.
- 3) 葛西亮平，西藤安隆，小松佳弘，小木曾清高，矢作秀之，小西俊之：線路設備モニタリング装置の概況と今後の方向性，JR EAST Technical Review，No.55，pp.21-24，2016.
- 4) 竹下邦夫：営業車による軌道狂い検測手法，鉄道総研報告，Vol.9，No.2，pp.29-34，1995.
- 5) 竹下邦夫，矢澤英治：慣性正矢法による軌道狂い検測装置の開発，鉄道総研報告，Vol.14，No.4，pp.25-30，2000.
- 6) 坪川洋友，矢澤英治，小木曾清高，南木聡明：車体装架型慣性正矢軌道検測装置の開発，鉄道総研報告，Vol.26，No.2，pp.7-12，2012.
- 7) 吉村彰芳，吉田康夫，細川岳洋，菊地勝浩：軌道保守管理データベースシステム：マイクロ LABOCS-II+の開発，鉄道総研報告，Vol.6，No.11，pp.69-78，1992.
- 8) 田中博文，猿木雄三，芳賀昭弘，福山幹康：可搬型軌道状態モニタリング装置のための車上測定データ距離化手法，第 17 回鉄道技術連合シンポジウム（J-Rail2010）講演論文集，pp.337-340，2010.
- 9) 鉄道総合技術研究所：軌道保守管理データベースシステム LABOCS Ver.3.0 コマンドリファレンス，2002.
- 10) 三和雅史，木村寛淳，山中雅司：レールおよび道床状態を考慮した軌道保守方法の最適選択モデルの構築，鉄道総研報告，Vol.26，No.2，pp.13-18，2012.
- 11) 佐野弘典，三和雅史，山口剛志，吉田尚史，矢坂健太，坂口和弘：高頻度軌道検測データの軌道状態診断および保守計画策定への活用方法，鉄道総研報告，Vol.29，No.8，pp.47-52，2015.
- 12) 田中博文，山本修平，森忠夫，西藤安隆：相互相関法を用いた波形レベルでの軌道変位進み算定手法の開発，第 23 回鉄道技術連合シンポジウム（J-Rail2016）講演論文集，pp.95-98，2016.
- 13) 田中博文，山本修平，葛西亮平：相互相関法による軌道検測データの高精度位置補正処理の効率化の検証，第 72 回土木学会年次学術講演会，2017（現在投稿中）.
- 14) 田中博文：軌道保守管理データベースシステム LABOCS（ラボックス）の機能紹介と新バージョンのリリース，新線路，Vol.69，No.7，pp.24-26，2015.

(2017.4.7 受付)

DEVELOPMENT OF DETECTION METHOD OF TRACK IRREGULARITY OF QUICK GROWTH USING HIGH FREQUENCY TRACK MEASUREMENT DATA THAT APPLIES THE CROSS CORRELATION METHOD

Hirofumi TANAKA, Shuhei YAMAMOTO, Takashi OSHIMA, Tadao MORI and Yasutaka SAITO

In this paper, we examined the automatically extracting technique for the track irregularity of quick growth using high frequency track measurement data obtained by the measurement device aboard the commercial train. First of all, we developed a highly accurate positional correction technique. This positional correction technique calculates the cross correlation coefficient between two waveforms, corrects the phases of the waveforms, and then makes the sampling intervals of two waveforms agree with each data. By applying this positional correction technique, it has become possible to calculate the track irregularity growth automatically from the difference between two waveforms of track irregularities. Next, we developed an automatically classifying technique for two kinds of growth rate of track irregularity, the one corresponding to the track settlement section, and the other corresponding to the rectified section. Finally, we applied the developed technique to the high frequency data, and verified its practicality.