

慣性正矢法を用いた営業車による軌道検測

[土] 〇坪川 洋友 [土] 矢澤 英治 ((財) 鉄道総合技術研究所)

[土] 森高 寛功 (九州旅客鉄道株式会社)

Track Irregularity Measurement Using Inertial Mid-chord Offset Method
Installed On Commercial Railway Vehicle

〇Yosuke Tsubokawa, Eiji Yazawa, (Railway Technical Research Institute)

Hirokatsu Moritaka, (Kyusyu Railway Company)

We have developed an inertial mid-chord offset method which is combined the characteristics of the inertial measuring method and mid-chord offset method. As reported so far, our method satisfies practical accuracy when the car installing the method runs over 20km/h. As the next stage, we manufactured a prototype track measurement device for the Kyushu Shinkansen commercial railway vehicle. The device is mounted on the pilot motor car and we have been testing its durability since October, 2006. The paper describes the measurement principle of inertial mid-chord offset method, the summary of the device newly produced and measurement performance after about two years passed from production.

キーワード：慣性正矢法，軌道検測車，2軸レール変位検出装置，再現性

Key Words: Inertial mid-chord offset method, Track inspection car, two-axis rail displacement sensor, Reproducibility

1. はじめに

鉄道総研では、慣性測定法に正矢法の演算を組み合わせた慣性正矢法を用いた軌道検測装置の開発を進めてきた。これまで報告してきたとおり¹⁾，時速20km/h以上の検測では実用精度を満足している。次の段階として，九州新幹線営業車で軌道検測を実現するため，確認車搭載型の軌道検測装置を製作し，2006年10月より耐久性確認試験を実施している。本稿では，本手法の測定原理，製作した装置の概要および製作から約2年経過後の検測性能について報告する。

2. 慣性正矢法の検測原理

慣性正矢法は，慣性測定法の欠点であった低周波の2回積分演算が発散する現象，あるいはそれを防止するためにフィルタ処理を行うことで波形がひずむ現象を，波形処理時に正矢法の検測特性を組み合わせることで解決したものである。したがって，これまでの慣性測定法では得られなかった，曲線正矢のような長い波長の成分も得ることが出来る。

加速度の2回積分の周波数特性を図1(a)に示す。この特性は周波数0でゲインが無限大となるため，演算が不安定となる。このため既存の慣性測定法では，破線のようなバンドパスフィルタ形の積分回路を構成して演算の安定化をはかっていたが，この特性は波形にひずみを生ずる原因ともなる。

一方，10m弦正矢法の検測特性を，図1(b)に示す。正矢法の検測特性は低周波域で減衰し，その減衰の勾配は2回積分の低周波域での増加の勾配に等しい。したがって，両者を合成した図1(c)の特性で加速度を処理すれば，周波数0でのゲインが有限の値となり，安定した演算を行うことができる。しかもその出力は，数多く利用されている正矢狂い波形となる。この図1(c)の合成特性は以下の式で表現される。

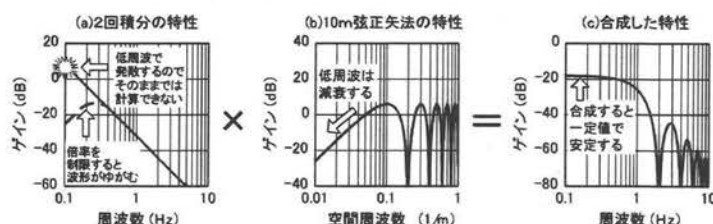


図1 慣性正矢法の検測原理 (積分正矢複合演算)

$$G_2(s) \cdot G_1(s) = \frac{1}{s^2} \left[\exp\left(-\frac{s}{2\omega_1}\right) - \frac{1}{2} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{s}{\omega_1}\right) \right\} \right] \dots\dots\dots(1)$$

$$\omega_1 = \frac{v}{l_1} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 s : ラプラス演算子

$G_1(s)$: 正矢法の伝達関数

$G_2(s)$: 2 回積分の伝達関数

v : 走行速度 (m/s)

l_1 : 正矢法の弦長 (m)

この特性は理論的には単独のデジタルフィルタで実現可能だが、入力となる加速度が通常高周波域で大きなパワーを持っているため、これを直接 A/D 変換してフィルタ処理すると、エイリアシングが原因となる誤差を生じることが予想される。また、空間周波数に対して考えると、積分特性は速度に依存して変化することになるが、これをどのように調整するかという問題もある。これらの問題を解決するため、この特性をいくつかに分割して処理することでこの演算を実現することにした。

この分割処理の方法はいくつか考えられる。まず加速度信号を高周波成分と低周波成分に分けて別々にアナログフィルタ処理を行い、その後で再合成して式(1)の特性を得る方法があり、開発当初、実験室レベルでこの回路のテストを行った²⁾。しかし本装置では、より実用的で高精度が期待できる分割処理として、加速度信号をローパスフィルタ型の積分器に通し、高周波成分を減衰させた後に、デジタルフィルタ処理を行って式(1)の特性を得る方法を採用している。この場合のブロック図を図2に、装置各部の周波数特性を図3に示す。

この構成による処理は、積分処理部の特性がローパスフィルタ型となっているので、加速度信号の A/D 変換時の誤差を抑え込むことができ、正矢法復元処理で精度の

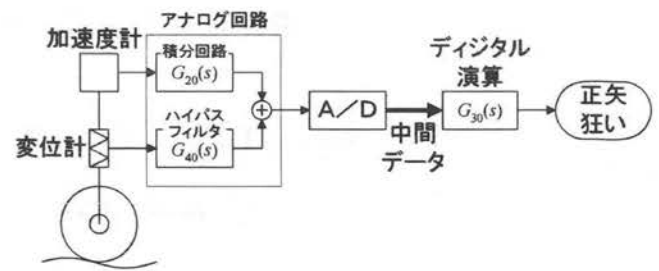


図2 慣性正矢法の基本構成ブロック図

高いデジタルフィルタ処理が実行できる。また、このデジタルフィルタは、アナログ回路部で生じた位相の遅れを補正するような特性となっている。さらに、この構成の場合、走行速度変化による積分特性の調整はアナログフィルタ部の周波数特性の変更だけで行うことができ、デジタルフィルタ部の特性は速度に依存しない。このデジタル処理の簡便さが、実際に検測装置を設計する上で適しているため、センサ部を含めた装置全体の試作開始以降、演算部はこの手法で設計を行っている。

3. 九州新幹線用慣性正矢軌道検測装置の開発⁴⁾

3.1 慣性正矢軌道検測装置の製作コンセプト

本手法は、文献1)に示すように、在来線用試作機の試験走行では、時速 20km/h 以上で実用精度が得られている。そこで 2011 年度の九州新幹線全線開業までに、営業車での軌道検測を実現することを目標に、そのプロトタイプとして確認車搭載型の軌道検測装置を製作した。製作にあたってのコンセプトは次の2点である。

- ・ 1 台車内で検測を完結すること
- ・ 九州新幹線 800 系台車への装架を想定した形状とすること

このような、営業車で稼働させる検測装置としては、JR東海が高低のみ測定可能な慣性測定装置の開発を発表

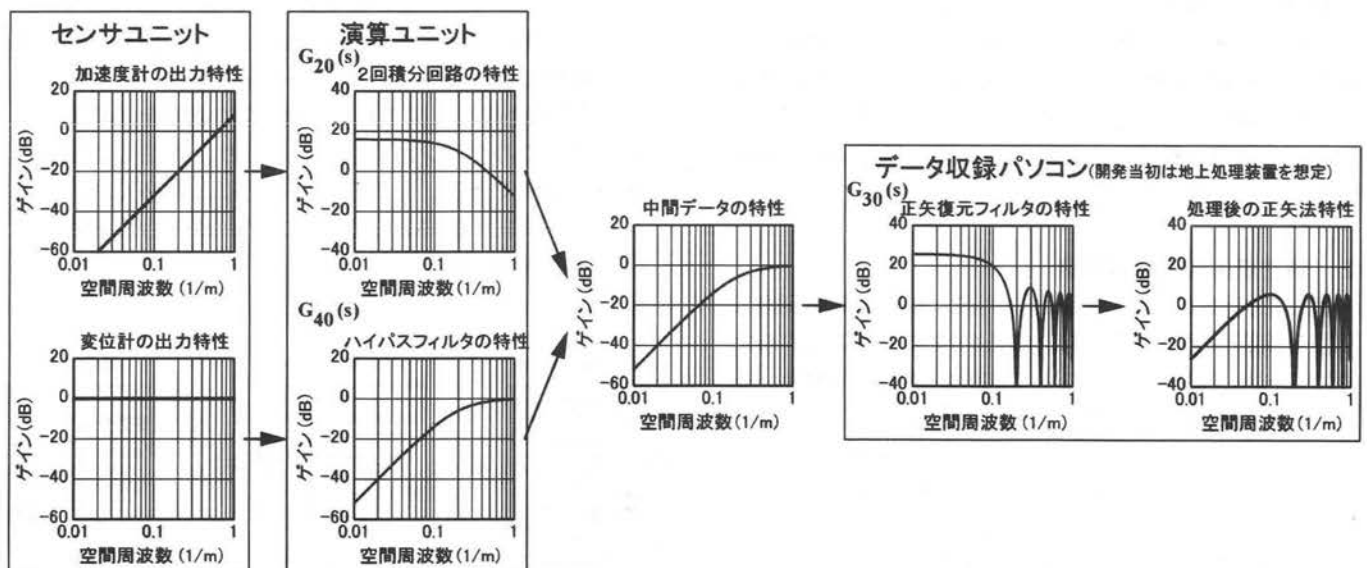


図3 慣性正矢軌道検測装置各部の周波数特性 (走行速度 36km/h の場合)

している⁵⁾。これは、軌道状態の常時モニタを志向した装置で、小型化を徹底し、床下装置を軸箱加速度のみとしている。

それに対し、本装置は、通常の軌道検測車で得られるすべての軌道検測項目の測定が可能な範囲で、出来る限りの小型化を図ったものである。このため、装置は床下装置と車上装置に分け、レールとの相対変位を測定する床下装置は台車へ取付け、車上装置は信号の分岐箱とデータ収録装置のみとして、営業車の業務用室の一角へ搭載可能な構成とした。

3.2 耐久性確認試験用軌道検測装置の構成

今回製作した装置は、検測ユニット、中継箱、電源・変換ユニット、データ処理・収録用パソコンで構成した。装置の構成と装架位置を図4に示す。検測ユニットの寸法はW=1,720mm、H=225mm、B=320mmで、質量は100kg程度である。検測ユニット内部には加速度計、ジャイロ、2軸レール変位検出装置、演算回路の一部を内蔵している。本装置では、全電動車の九州新幹線営業車に搭載した場合に、加速度計の出力がアナログ出力で、その電圧も小さいため、車両モータのノイズの影響を受け、検測精度が低下することが予想された。そのため、加速度計の出力を増幅してS/N比を改善した上で、デジタル変換して出力するようにしている。また、中継箱で検測ユニットからのデータを光信号に変換し、ノイズの影響を受けない光ファイバケーブルで、車上の電源・変換ユニットに伝送するようにした。

本装置の構成部品で特徴的なのは、検測ユニット内部

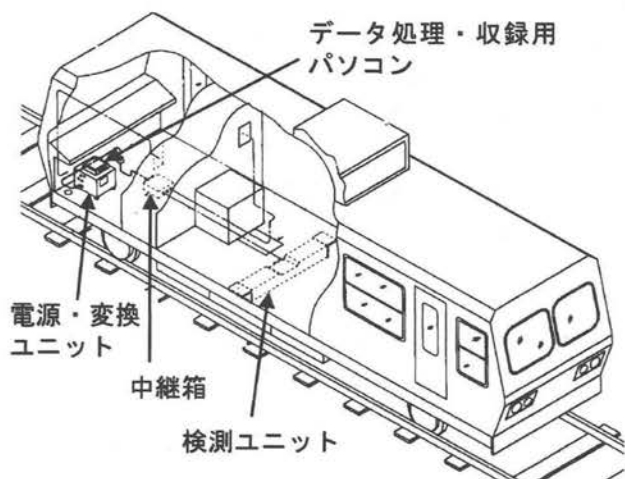


図4 軌道検測装置構成図

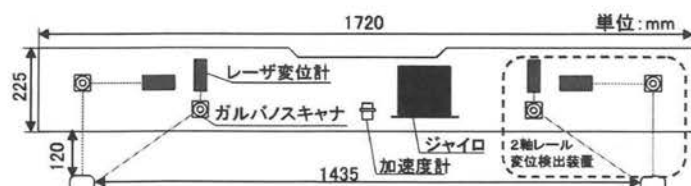


図5 検測ユニットの構成

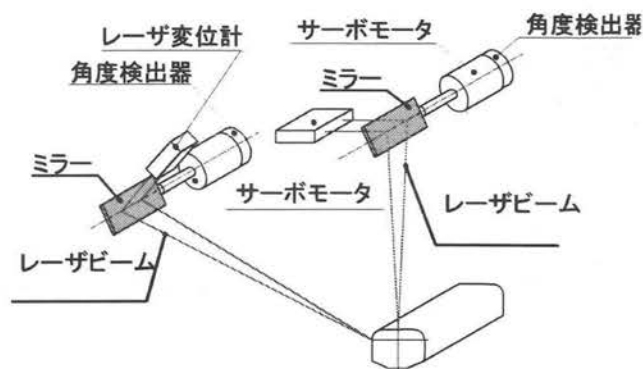


図6 2軸レール変位検出装置

に内蔵されている2軸レール変位検出装置である。これは小型軽量で測定範囲が広く、低価格で製作可能な光式レール変位検出装置を目指したものである。

この装置の仕組みを図6に示す。本装置は、光路の途中にガルバノスキャナミラーを配置し、レーザの照射方向を変化させて、レール頭頂面と側面を追尾している。この2方向から照射しているレーザビームの測長結果と、双方の反射鏡の角度から、三角形の閉合計算によってレールと装置の相対変位を求めている。装置とレールの相対位置が変化すると、レーザ変位計の出力が変化し、この三角形が閉合しなくなるので、再び閉合するまで反射鏡の角度を変更することで、レーザビームがレールを追尾する。本装置では、この演算を約1ミリ秒に1回のサイクルで繰り返している。なお、この三角形の閉合計算と、反射鏡の制御指令にはF A用の汎用マイコンを採用し、装置全体のコストダウンを目指した。

このような制御により、2軸レール変位検出装置は、激しい上下振動により受光素子が狙っている位置が軌間線から外れるという、これまでのレール変位検出装置の問題を解消し、レールとの相対変位が大きくなる台車への取付を可能としている。測定レンジは軸ばねのストロークに対応できるように、上下 $\pm 50\text{mm}$ 、左右は軌間外75mm、軌間内50mmである。

また、これまでの面状の光を利用した変位検出装置では、レールの近くに光を乱反射する物体が存在すると測定値が乱されていたが、この装置はピンスポットのレーザ光でレールを捉えるので、レール以外の物体の影響を受けにくくなっていることも特徴である。このため、フランジウェイが確保されていれば、これまでの光式検出装置では困難と考えられていた、積雪中の検測も可能であると考えられる。

3.3 本装置の検測精度

製作した装置は、2006年10月より確認車の本線走行の運用に併せて、精度および耐久性の確認試験を実施している。

新幹線の軌道整備目標は、10m弦通りで4mm、40m弦通りで6mmである。さらに整備後の仕上がりは双方とも

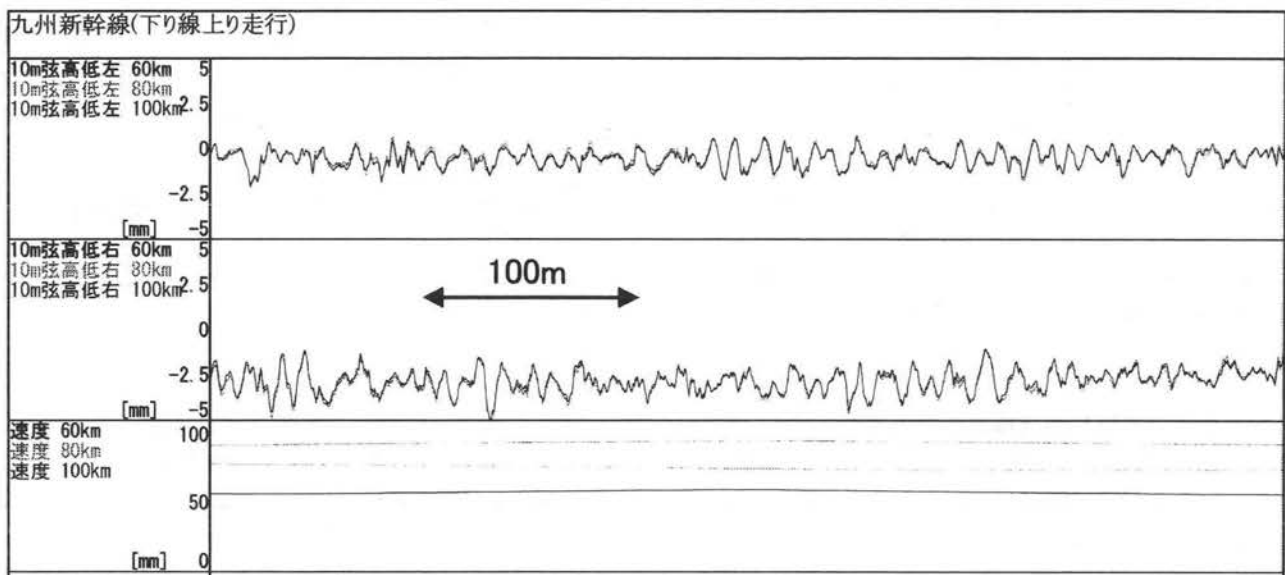


図 7 本線走行試験結果

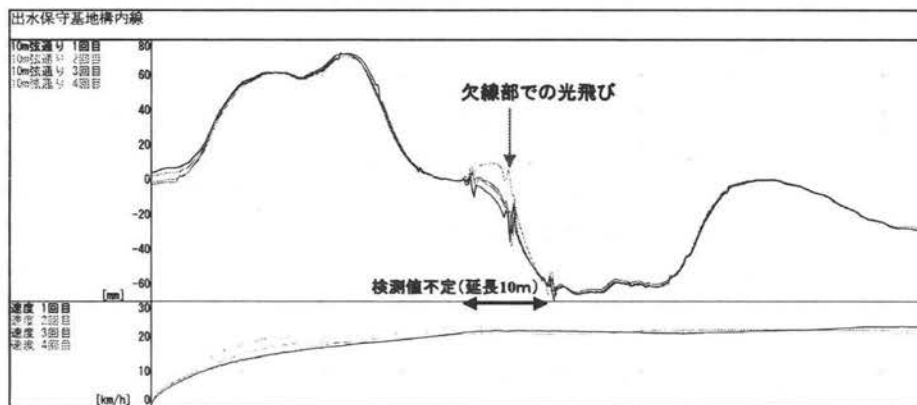


図 8 低速・急曲線測定時の繰り返し試験結果

3mm 以内とすることが求められている。この精度で軌道整備を行うためには、その基となる軌道検測は 0.1mm の桁での精度、0.01mm の桁での分解能を必要とする。このため、繰り返し測定時の再現性は、新幹線の場合標準偏差にして 0.3mm 以内を仕様上の目標としており、本装置もこの検測精度を目指して設計・製作を行っている。

本装置で得られた新幹線本線の軌道検測波形例を図 7 に示す。3 回の検測速度は 40km/h 程度速度差を有しているが、時速 60km/h 以上の走行で再現性誤差 0.2mm 程度となっており、目標とする再現性を有している。

また、低速・急曲線測定時の検測精度の確認を、出水保守基地構内線で行った。図 8 に新幹線用 9 番分岐器とその付帯曲線通過時の通り狂い検測波形例を示す。本装置では、分岐器の欠線部でレール変位検出装置に光飛びが生じると、正矢波形復元フィルタ $G_{30}(s)$ による処理の結果、その前後 5m のデータに影響が現れる。しかしその箇所を除けば、検測走行開始直後の加速区間であるため区間内の速度差が大きく、分岐器通過速度制限の関係で最高速度も 20km/h をわずかに上回る程度に抑えられ

ているにも関わらず、ほぼ正確に曲線正矢が得られている。

なお、耐久性確認試験開始から現在までに約 2 年間の経過し、約 35800km の測定を実施したが、検測精度の低下は確認されていない。

4. おわりに

九州新幹線用慣性正矢軌道検測装置の実用 1 号機は来春に完成し、800 系台車に搭載して、走行試験を実施する予定である。

また、本装置を車体に装架することを目標に、測定範囲を拡大した 2 軸レール変位検出装置の開発も行っており、来年から動的な精度確認試験を実施する予定である。

参考文献

- 1) 矢澤, 吉田, 坪川, 岡井: 慣性正矢軌道検測装置用高精度演算ユニットの開発, 土木学会第 59 回年次学術講演会, 4-043, 2004.9
- 2) 竹下邦夫: 営業車による軌道検測手法, 鉄道総研報告, Vol.9, No.2, pp.29-34, 1995.2
- 3) 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, 2000.4
- 4) 坪川, 矢澤, 森高, 松本: 九州新幹線向け長期耐久試験用慣性正矢軌道検測装置の製作, 土木学会第 62 回年次学術講演会 4-285, 2007.9
- 5) 永沼, 小林, 奥村: 新幹線営業列車を用いた軌道状態監視のための慣性測定演算法, 鉄道力学論文集 No.12, pp.43-49, 2008.7