

慣性センサを用いたハンディ軌道検測器の開発

東海旅客鉄道株式会社 正員 ○新井 朋也

東海旅客鉄道株式会社 正員 永沼 泰州

1. 目的

1964年の東海道新幹線の開業以来、本線の軌道狂いは軌道検測車によって10日毎に測定されており、効率的で高精度な軌道メンテナンス実現の基礎となっている。一方、軌道工事後の仕上り検査は、長い間、伝統的な糸張り検測により行われてきた。現在、糸張り検測を装置化・効率化・高精度化する小型軌道検測装置が数多く開発され販売されているが、それらは依然として高価で気軽に持ち運べる重量でない。このため小型軌道検測装置の使用は高い測定精度を要求される大規模工事での使用に留まり、むら直しなど機動性が求められる小規模の人力作業では、従前どおり糸張り検測が行われている。以上を背景に、小規模作業を対象とした軽量・安価な軌道検測器を開発し、全ての保線作業において仕上り検査の装置化を目指すこととした。

2. 開発コンセプト

(1) 基本アイデア

開発する軌道検測装置（以下、ハンディ検測器と称す）のコンセプトを以下に示す。

- 1) 片手で運搬できる軽量性（重量 5kg 以下）
- 2) 複数台購入可能な低価格（価格 50 万円以下）
- 3) 糸張り検測以上の精度（再現性 1.0mm 以下）

従来の軌道検測装置は安定した測定走行を重視し、いずれも T、今回開発すべき装置は他に類を見ない I 字型形状にした。ハンディ検測器のイメージを図-1 に示す。測定原理として独自開発した「微分・差分法¹⁾」を採用したので、可動部は軌間測定機構のみとなり、大幅な軽量化を実現できた。本装置は I 字型形状なので、一度の走行ですべての軌道狂いを測定することはできない。従って、図-1 に示すように「軌間・水準モード」と「高低・通りモード」を使い分ける。例えば、作業後に必要な区間を往復すれば、全ての軌道狂い項目を測定できる。

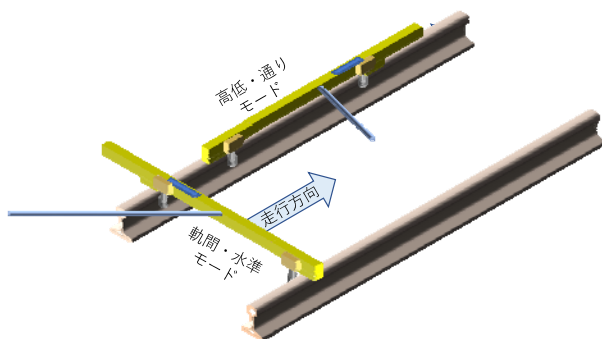


図-1 ハンディ検測器イメージ

従来の軌道検測装置は安定した測定走行を重視し、いずれも T、今回開発すべき装置は他に類を見ない I 字型形状にした。ハンディ検測器のイメージを図-1 に示す。測定原理として独自開発した「微分・差分法¹⁾」を採用したので、可動部は軌間測定機構のみとなり、大幅な軽量化を実現できた。本装置は I 字型形状なので、一度の走行ですべての軌道狂いを測定することはできない。従って、図-1 に示すように「軌間・水準モード」と「高低・通りモード」を使い分ける。例えば、作業後に必要な区間を往復すれば、全ての軌道狂い項目を測定できる。

(2) 姿勢変化（ふらつき）の補正

ハンディ検測器は I 字型なので、高低・通りモードではロール方向の姿勢変化が生じ（図-2）、軌間・水準モードではピッチ方向の姿勢変化が生じる。これら姿勢変化は（僅かだと思われるが）明らかに誤差の要因になるので、その補正方法について検討した。検測器のセンサ測定座標を固定直交座標に変換する回転行列は式(1)の通りであり、検測器に内蔵されたジャイロで測定した角速度は 3 軸の回転速度（角度の微分値）へ変換される。

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sin\phi\sec\theta & \cos\phi\sec\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

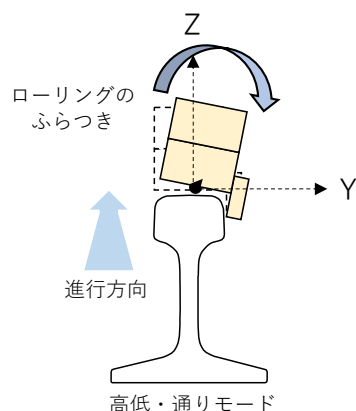


図-2 高低・通りモードの姿勢変化

キーワード ハンディ検測器、微分・差分法、座標変換

連絡先 〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545 番 33 東海旅客鉄道株式会社 総合技術本部 技術開発部 TEL 0568-47-5374

ここで $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ はそれぞれセンサ座標 3 軸の角速度である。また φ, θ, ψ はそれぞれロール角, ピッチ角, ヨー角で, IMU の 6 軸データを用いてリアルタイム演算される。この座標変換演算によって, 測定中に発生する姿勢変化は補正され, この補正された回転速度に「微分・差分法」を適用することで, 姿勢変化に影響されない軌道狂いを知ることができる。

3. 試作器の概要

(1) 試作器の特徴

試作装置の外観を図 3, 4 に示す。重量は 6.9kg で目標重量である 5kg を超過してしまった。

図-3 は片側の測定レール上を測定走行する「高低・通り測定モード」, 図-4 は左右レールに跨る「軌間・水準（平面性）測定モード」であり, それぞれのモードは機器を上下反転させて切り替える。形状の相違による精度比較のため,



図-3 高低・通りモード

図-4 軌間・水準モード

試作装置には, T 字型装置である LR-S100 が採用している高精度 MEMS 慣性計測装置 (IMU) を用いたが, 今後「低価格」と「糸張り以上の検出精度」を両立させるため, 製品にはより低価格な IMU を採用する予定である。

(2) 精度確認試験の結果

研究開発施設の試験軌道において試作装置の精度確認試験を実施した。図-5 に, 座標変換によるふらつき補正前の 10m 弦高低および通りの測定結果を示す。再現性誤差は予想以上に小さく, 4 回測定時の再現性誤差 (同地点の最大値と最小値の差) は 10m 弦高低で最大 0.4mm, 10m 弦通りで最大 0.6mm であった。軌間・水準も再現性誤差は小さく, 全ての測定項目において T 字型検測装置である LR-S100 の結果と良く一致した。なお今回, 座標変換による補正効果は実感できなかったが, 今後, 曲線区間やふらつきが著しい場合について再確認したいと考えている。

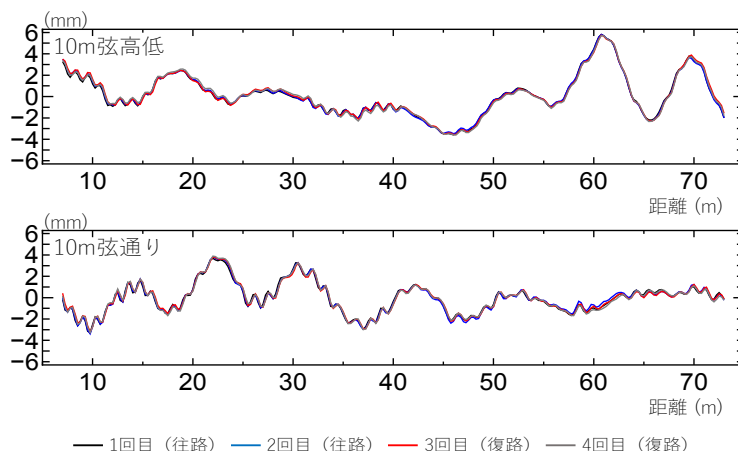


図-5 10m 弦高低・通りの再現性

4. まとめ

今回, 全項目の軌道狂いを測定でき, 他に類を見ない I 字型形状のハンディ検測器を開発した。高精度ジャイロを用いた試作器での精度確認試験の結果, 姿勢変化による精度低下は僅かであり, コンセプトである, 1) 軽量・2) 安価・3) 糸張り以上の精度, を実現する検測器の誕生を確信することができた。今後は世界の保線関係者必携の測定器になることを夢見て, 軽量化・コストダウン・ユーザビリティ向上の検討を進めたい。

参考文献

- 1) Naganuma, Y. & Yada, T., Development of truly portable track geometry recording trolley and accompanying new measurement principal. Computers in Railways XV: Railway Engineering Design and Operation, 162(14), pp. 329–342, 2016.