

論文 慣性センサを用いた ハンディ軌道検測器の開発

新井 朋也¹・永沼 泰州²

¹正会員 東海旅客鉄道株式会社 技術開発部 (〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545 番 33)

E-mail: tomoya.arai@jr-central.co.jp

²正会員 東海旅客鉄道株式会社 技術開発部 (〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545 番 33)

E-mail: yasukuni.naganuma@jr-central.co.jp

軌道工事後の仕上り検測の効率化を目的として、数種類の小型軌道検測装置が利用されている。しかし既存の装置は重く高価であるため、機動性が求められる小規模な軌道作業では依然として糸張り検測が行われている。そこで、著者らはさらに軽量で安価なハンディ検測器を開発した。既存の装置は、安定した姿勢での測定が不可欠のため T 字型や H 字型の形状であるが、本開発では、抜本的な軽量化のため、軌間ゲージのような I 字型の形状とした。I 字型は測定時の姿勢が不安定であるが、MEMS 慣性計測装置を利用することによるリアルタイムな座標変換と、「微分・差分法」と名付けた独自開発の軌道検測法がこれを可能にした。測定は 2 つのモードを使い分けることが特徴である。試作試験の結果、本装置は所望の精度で全項目の軌道狂いを測定できることがわかった。

Key Words: IMU, handy track geometry measuring device, differential-difference method, attitude angle

1. はじめに

東海道新幹線の開業以降、本線の軌道狂い検査は軌道検測車によって実施されているが、その他の軌道狂い検査や仕上り検査は長い間、糸張り検測により行われていた。現在では、人力で行う軌道検測を機械化し、効率化かつ高精度化を可能とする小型の軌道検測装置が数多く開発されている。これにより、まくらぎ更換などの大規模な軌道工事の仕上り検測や、軌道の検査において小型軌道検測機器が広く使用されている。

しかし、現在においてもなお、一つの作業班が複数箇所を施工するむら直しのように、機動性が求められる小規模の人力作業では依然として糸張り検測が行われているのが実情である。この理由としては、従来の小型軌道検測装置は軽量化されているものの、小規模な軌道作業においては、さらに軽快に使用できる機器が求められていることにある。また、高い測定精度を求められる大規模工事に対応しているため、検測装置の価格は安くない。

以上を背景に、最新のセンサとデータ処理技術を用いた軽量・安価な小型軌道検測装置を開発し、小規模作業を含む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
- 2) 複数台購入が可能な低価格
- 3) 糸張り検測以上の精度

それぞれ具体的には、「5kg 以下」「50 万円以下」「再現性 1.0mm 以下^{※1}」として開発を進めた。

※1 複数測定における同地点データの差の標準偏差。

小規模な軌道作業における使用を想定しており、軽量性を満足するためには図-1 に示すような従来の検測装置の T 字型形状から脱却する必要があると考えた。一般的な軌道検測機装置は 30kg であり、既存の検測装置としては軽量な部類であるが、使用用途に応じてさらなる軽量化が求められる。

コンセプトの低価格については部材数や稼動機構を抑えることによって必要な費用の低減を図ることとした。

また、検測精度については後述するが、選定するジャイロの性能に依るところが大きく精度と価格のバランスをとることが重要となる。



図-1 一般的な軌道検測装置

開発するハンディ検測器の試作イメージを図-2に示す。最大の特徴は従来のT字型から脱却したI字型形状であり、これにより更なる軽量性を獲得することができる。これは、後述する微分・差分法を用いて2点間の角速度をジャイロを用いて測定しているため、軌間測定以外の稼動機構を排除できるためである。ただし、I字型形状であるため、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。そのため、軌間・水準モード及び高低・通りモードの2つの測定モードの切り替えを行うことで軌道狂い全項目を測定可能とする。

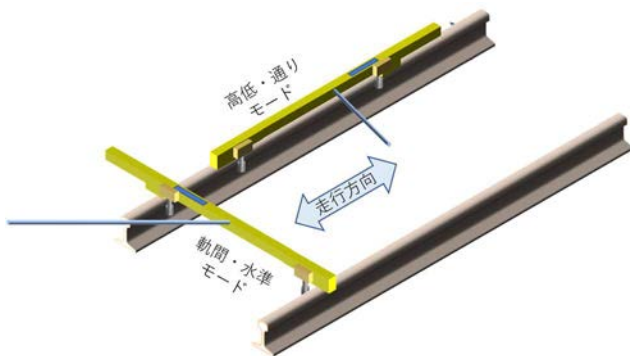


図-2 ハンディ検測器イメージ

(2) 測定座標系

軌道検測における座標系は一般的には図-3に示すうちの移動座標系を用いる。これは、軌道検測車や従来の左右レールに跨る軌道検測装置の測定軸であり、線路形状に沿って測定軸が変化する座標系である。これに対して、開発したハンディ検測器では、いずれのモードでも線路形状に沿う測定挙動を保つことはできない。そのため、測定座標系としては同図中の固定直交座標系を用いることになる。この座標系は線路形状によらず、ある点を基準とした水平・垂直の座標系であり、中心線測量などで用いられる。なお、図示しているのはまくらぎ方向だが、

レール方向においても同様である。

つまり、厳密に言えば、開発するハンディ検測器は通常の検測器とは異なる定義での検測を行っていることになる。ただし、小規模作業では検測延長も短いことから、その影響は無視できるほど小さく、代替元である糸張り検測もまた固定直行座標系での検測であり、実用上問題ないとする。

ただし、この固定直行座標系上にハンディ検測器が固定されているわけではないため、測定中には機器の姿勢変化が生じる。つまり、固定直行座標系を用いること自体に問題がなくとも、機器の姿勢変化により測定座標系とセンサ座標系が一致しないという問題が起こる。

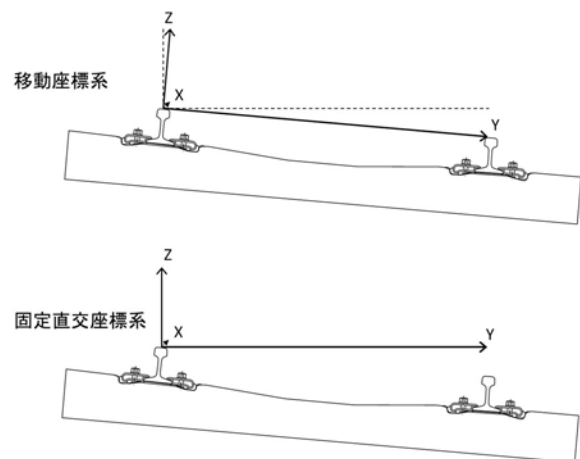


図-3 測定座標系

(3) 姿勢変化（ふらつき）の補正

片側レール上のみを走行測定するハンディ検測器は、図-4のようにロール方向への姿勢変化（姿勢変化）を制御していない（軌間／水準モード時のピッチングも同様）。そのため、測定者の熟練度にもよるが、少なからず測定中に不要なローリングが発生してしまうこととなる。本来、測定すべき角速度（高低測定ではピッチング角速度）は図-5中のY軸回りであるが、ローリング時にはセンサ座標面が回転することでY'回りの角速度を測定してしまう。

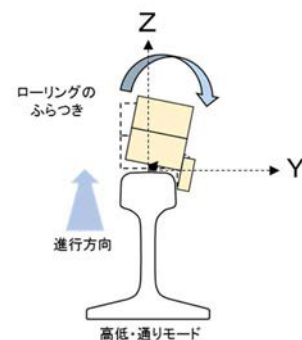
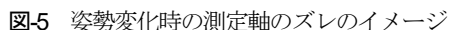


図-4 機器の姿勢変化イメージ



姿勢角演算には、センサの持つ座標系から前述した固定直行座標系へと変換する回転行列を用いる¹⁾。搭載するジャイロで測定した角速度からロール・ピッチ・ヨー角への変換するためには、センサ座標系における角速度を3軸の回転速度(微分値)へ変換する必要がある。式(1)に角速度から3軸の微分値への変換式を示す²⁾。

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

ここで、 φ , θ , ψ はそれぞれロール角, ピッチ角, ヨー角であり, ω_x , ω_y , ω_z はそれぞれX軸, Y軸, Z軸の角速度である. これにより, 測定中に発生する姿勢変化を補正し, 常に測定座標系での測定値を演算することができる.

3. 軌道檢測原理

(1) 従来の軌道検測手法

既存の小型軌道検測装置を調査した。図-6 に一般的な軌道検測手法を示す。軌道検測原理には大別して「差分法」と「慣性測定法」があり、現存する軌道検測車や小型軌道検測装置はいずれかの方法を採用している。



図-6 軌道検測手法

一方、慣性測定法は欧州の軌道検測車に数多く採用されており、日本でも慣性正矢軌道検測装置、状態監視装置 RAIDARSS[※]、凹凸測定装置に用いられている。

※東海道新幹線における営業車軌道検測システム

(2) 微分・差分法

コンセプトとした軽量性に対する課題解決の一つとして、複雑な稼動機構を不要とすることが挙げられる。今回開発した検測装置は従来の差分法、慣性測定法のいずれの手法ではなく、2点間の角速度より演算される「微分・差分法」による検測手法を採用することにより実現した³⁾。

角速度を用いて軌道検測を行う方法を図-7 に示す.

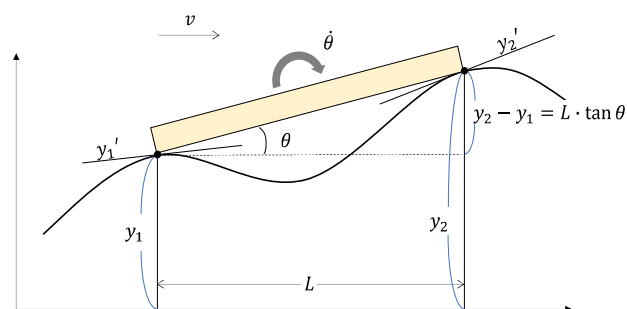


図-7 角速度を用いた新しい軌道検測法

図-7において2点における傾斜角の差 g は、

$$g = y_2' - y_1' \quad (1)$$

である。図より明らかに $y_2 - y_1 = L \cdot \tan \theta$ であるので、この両辺を微分して、

$$\begin{aligned} y'_2 - y'_1 &= (L \cdot \tan\theta)' \\ &= L \frac{1}{\cos^2\theta} \cdot \frac{d\theta}{dx} \\ &= L \frac{1}{\cos^2\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdot \frac{dt}{dx} \cong \frac{L\dot{\theta}}{v} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで, $d\theta/dt = \dot{\theta}$ とおいた. また, θ は微小なので $\cos \theta \cong 1$ と近似した. v (m/s) は測定速度である.

この測定法によれば、測定基準となる長さ L の梁上に角速度計（ジャイロセンサ）を設置し、出力されるピッチ角速度（またはヨー角速度）に L を乗じるとともに、測定速度 v で除算するだけで、測定速度に依存しない高低狂い（または通り狂い） g が得られる。通常、加速度計や角速度計（これらは「慣性センサ」と呼ばれる）を用いた物理量計測では時間積分が必須と考えられており、

この積分演算によってドリフト等の問題が生じる。しかし、本方法は積分演算が不要であることから、常に安定して軌道形状を計測することができる。

(3) 微分・差分法の検測特性

微分・差分法の(1)式は $L=2l$ において(3)式で表される。

$$g(x) = (y(x+l) - y(x-l))' \quad (3)$$

両辺をフーリエ変換して、

$$\begin{aligned} G(\omega) &= j\omega(X(\omega)e^{j\omega l} - X(\omega)e^{-j\omega l}) \\ &= j\omega(e^{j\omega l} - e^{-j\omega l})X(\omega) \end{aligned} \quad (4)$$

従って、周波数応答関数 $H(\omega)$ は、

$$\begin{aligned} H(\omega) &= \frac{G(\omega)}{X(\omega)} = j\omega(e^{j\omega l} - e^{-j\omega l}) \\ &= j\omega(2j \sin \omega l) \\ &= -2\omega \sin \omega l \end{aligned} \quad (5)$$

振幅および位相特性は、

$$H(\omega) = |H(\omega)|e^{j\theta(\omega)}$$

といて、

$$\begin{aligned} |H(\omega)| &= 2\omega |\sin \omega l| & (\text{振幅}) \\ \theta(\omega) &= 0 & (\text{位相}) \end{aligned} \quad (6)$$

微分・差分法の振幅特性を図-8に示す。後述するが、今回の開発品は $L=1.0\text{m}$ である。比較のため、既存の軌道検測手法の検測特性を併記した。微分・差分法は短い波長の利得が相対的に高く、軌道検測と同時にレール凹凸の状態も診断できる可能性がある。

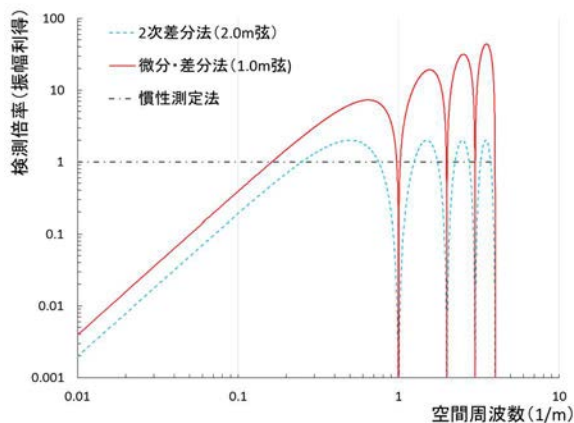


図-8 検測倍率

(4) 正矢への変換

微分・差分データは簡単な演算で正矢に変換できる。

(3)式で示したとおり、微分・差分データは1次差分デー

タの距離微分である（あるいは距離微分の1次差分）から、次のいずれかの方法で微分・差分データを正矢に変換できる。

- ・微分・差分データを距離積分して1次差分データを得た後、更に1次差分演算を行う
- ・微分・差分データに1次差分演算を行った後、これを距離積分する。

後者の方法は1次差分演算を積分安定化に利用できる点で優れている。以下にこの手順の詳細を説明するとともに、更に効率的な演算法について述べる。

2m弦正矢法検測は(7)式で表すことができる。

$$y(\xi) = x(\xi) - \frac{x(\xi+1) + x(\xi-1)}{2} \quad (7)$$

この(7)式は因果律を満たしていない（1m 未来のデータが使われている）ので、1mシフトして、

$$y(\xi) = x(\xi-1) - \frac{x(\xi) + x(\xi-2)}{2} \quad (8)$$

サンプリング間隔を0.25mとしてz変換すると、2m弦正矢法の伝達関数は、

$$\begin{aligned} H_{VS}(z) &= -\frac{1}{2} + z^{-4} - \frac{1}{2}z^{-8} \\ &= -\frac{1}{2}(1 - 2z^{-4} + z^{-8}) \\ &= -\frac{1}{2}(1 - z^{-4})^2 \end{aligned} \quad (9)$$

となる。図-9に2m弦正矢法のブロック図を示す。

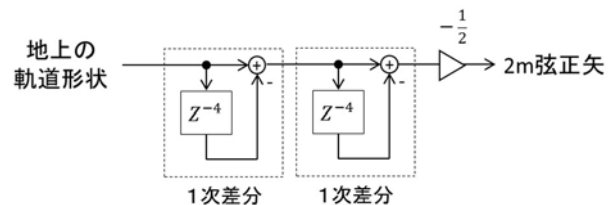


図-9 2m弦正矢法のブロック図

一方、微分・差分法の伝達関数は、

$$H_{DFD}(z) = \underbrace{(1 - z^{-1})}_{\text{微分}} \underbrace{(1 - z^{-4})}_{\text{差分}} \quad (10)$$

であり、ブロック図は図-10となる。

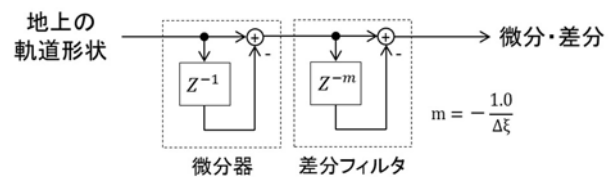


図-10 1m微分差分法のブロック図

取得した微分・差分データである(10)式から、求めた正矢データ(9)式への変換は、

$$H_{VS}(z) = -\frac{1}{2}(1-z^{-4}) \left(\frac{1}{1-z^{-1}} \right) \cdot H_{DFD}(z) \quad (11)$$

差分 積分

とすることができる。この(11)式は「微分・差分データに差分演算と積分演算を行った後、係数0.5を乗ずれば正矢になる」ことを示しており、ブロック図は図-11となる。

さらに、差分演算 $1-z^{-4}$ と積分演算 $1/(1-z^{-1})$ は合成することが可能であり、

$$\frac{1-z^{-4}}{1-z^{-1}} = 1+z^{-1}+z^{-2}+z^{-3} \quad (12)$$

多項式の割り算によって(12)式となるが、これは差分演算と積分演算の合成が単なる「移動和」になることを示している。つまり、1mを基準弦とする微分・差分データに1m間の移動和演算を行い、係数0.5を乗ずれば2m正矢が得られる。この演算は極めて単純で（積分演算が不要なので）終始安定である。図-11のブロック図のうち、差分演算と積分演算を移動和に置き換えたブロック図を図-12に示す。

微分・差分法による測定および正矢への変換は極めて単純かつ負荷の少ない演算で行うことができる。2m弦から10m弦、20m弦、40m弦への変換も僅かな計算量であり、これらの演算に最新のCPUは必要ない。従って、これら演算の工夫は製品化の際、低廉化と省電力化に有利に働くと言える。

4. 試作器の概要

(1) 試作器の特徴

試作した検測器を図-13に示す。試作した測定器本体の重量は6.9kgである。目標とする重量は5kgであるため、今後の改良により更なる軽量化も実現していく。

前述した測定モードの切り替えは、図-14に示すように、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」と、図-15に示すように機器を上下反転させて左右レールに跨る「軌間・水準測定モード」の2つのモードとした。高低・通り測定モードでは、2つの測定輪の間隔は1mとした。検測に使用する3軸ジャイロに加えて、3軸加速度計を有しているため、機器の反転を重力加速度で検知することでモードの切り替えを実現している。また、コンセプトの「低価格」と「糸張り以上の検測精度」を満足するために低価格の3軸ジャイロを選定した。

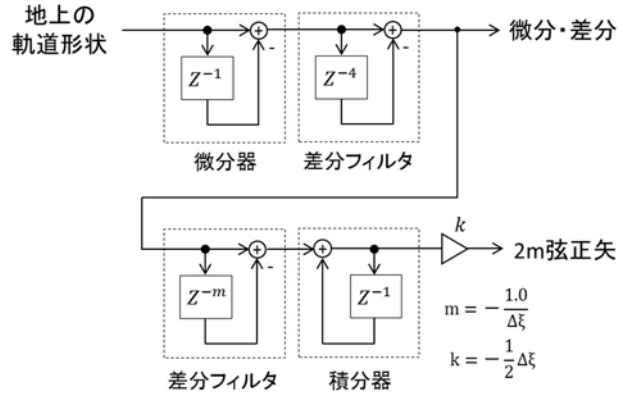


図-11 微分・差分データから正矢への変換(1)

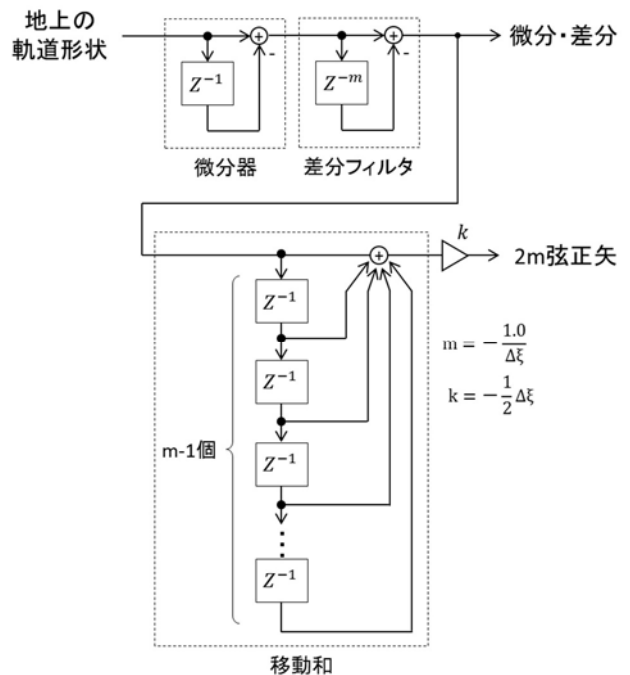


図-12 微分・差分データから正矢への変換(2)

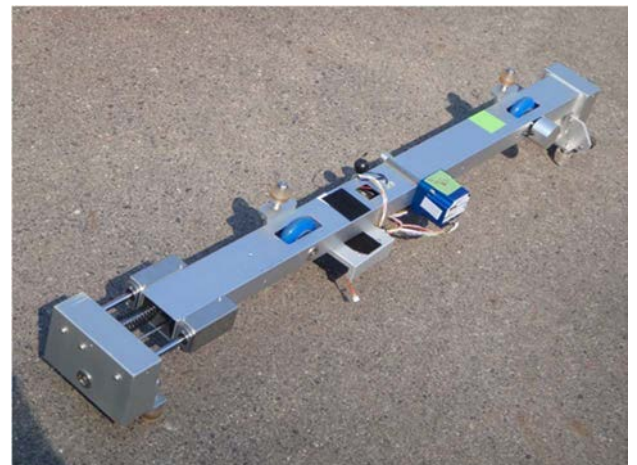


図-13 試作したハンディ検測器



図-14 高低・通りモード



図-15 軌間・水準モード

(2) 精度確認試験の結果

製作したハンディ検測器の精度確認を試験軌道にて実施した。再現性を把握するため、測定は各3回行った。

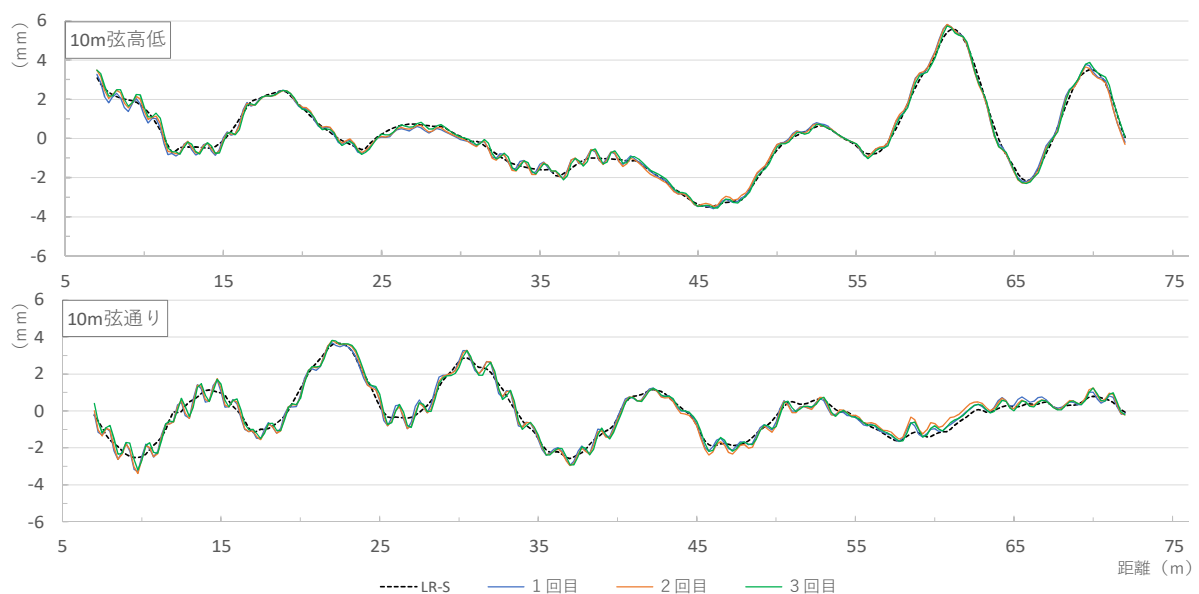


図-17 測定結果

比較対象として、図-16 に示す LR-S^{※2} の検測も合わせて実施した。通り狂いおよび高低狂いの測定結果を図-17 に示す。

※2 同様の検測原理を用いた高性能軌道検測装置



図-16 比較対象の高性能軌道検測器 (LR-S)

3 回測定時の再現性は、高低・通りとも、短い波長 (2m 弦) 及び、仕上り検測時に必要となる波長 (10m 弦) においても十分に高く、目的である糸張り検測に代わる装置としての性能を確認できた。水準狂いについても糸張り検測に代替できる性能を有していることを確認できた。

LR-S との比較では 10m 弦高低では最大 0.5mm の差、10m 弦通りでは最大 0.7mm の差を確認した。また、LR-S とハンディ検測器の測定差の標準偏差は 10m 弦高低で 0.2mm、10m 弦通りで 0.3mm であった。この結果はハンディ検測器の使用用途を鑑みれば十分な性能を有していると言える。

また、今回の精度確認試験の結果は良好であり、複数回の測定においても再現性の低下は見られなかった。そのため、今回の試験結果に対しての姿勢変化の補正は行っていないが、意図的にふらつきを発生させた場合に検討した姿勢変化の補正が必要となるかを今後検証する予定である。

5. まとめ

本開発では、重機を用いない少人数の軌道作業を想定し、より軽量・安価な軌道検測機器としてI字型の検測器を試作した。これは、新たな軌道検測手法である微分・差分法を適用することにより複雑な移動機構を排除できたことによる。また、これにより軽量化及び製造コストの削減が実現できた。さらに、測定時の姿勢が不安定であるが、MEMS 慣性計測装置を利用することによるリアルタイムな座標変換が可能である。

今後はさらなる軽量化のための部材の見直し及び、検測結果の表示方法などの実際の使用に適すよう改良を加えていく。さらに、コストに対して大きな割合を占めるジャイロセンサについて、さらに安価なセンサを使用して高い精度を実現することを課題として取り組んでいく。

参考文献

- 1) David Titterton, John Weston: Strapdown Inertial Navigation Technology, 2005
- 2) 廣瀬圭, 近藤亜希子: 人間工学・人間工学のための計測手法・第1部: 動作計測(2)-慣性センサによる動作計測-, pp182-190, 2014
- 3) 永沼泰州, 奥村隆之: ポータブル軌道検測器の開発, 土木学会第64階年次学術講演会, 2009

(2019.4.5受付)

Development of a handy track geometry measuring device using an inertial sensor

Tomoya ARAI, Yasukuni NAGANUMA

For the purpose of improving the efficiency of finish inspection after orbiting construction, a hand-operated small track inspection device is used. However, its weight and price become a impediment, and manual track inspection is still carried out in small scale track maintenance such as spot tamping. Therefore, we developed a lightweight and inexpensive handy track inspection device. In order to realize a fundamental weight saving, it is not a conventional T shape or H shape but a single I shape like a track level gauge. It is characteristic that device can use two different modes. When longitudinal level / alignment measurement, run on one side rail and change to cross over rails at the time of gauge / cross level measurement. Although the measurement attitude of this device is unstable as a price of weight reduction, it can be corrected by the attitude angle by the IMU. As a result of the prototype test, we found that this device can measure the track irregularity of all parameter with desired accuracy.