

相補フィルタを用いた水準狂いの計測

東海旅客鉄道株式会社 正員 ○永沼 泰州
 東海旅客鉄道株式会社 正員 植松 嵩之

1. はじめに

鉄道軌道の左右レールの高低差（水準狂い）の計測には、傾斜計・加速度計・ジャイロなどのいわゆる「慣性センサ」が用いられる。例えば、軌道検測車での水準狂い計測には、高精度な3軸ジャイロと3軸加速度計を内蔵し、これらの信号から姿勢角を高速演算するINS（慣性誘導装置）またはAHRS（姿勢計測装置）が使用されている。一方、手押し式や牽引式の簡易軌道検測装置での水準計測には、設置スペースやコスト等の制約から傾斜計や加速度計のみが用いられることが多い。この場合、測定走行に伴って生じる運動加速度成分が全て測定誤差となってしまふ。本稿は以上を背景に、近年、高精度化・低廉化が著しいMEMS慣性センサを用いた簡易軌道検測装置の水準狂い計測精度向上について検討したものである。

2. 加速度計によるロール角計測

まず、簡易軌道検測装置上に3軸加速度計を設置し、得られた信号 (a_x, a_y, a_z) から(1)式を用いて水準狂い計測のためのロール角 $r(\text{rad})$ を求めた。

$$r = \tan^{-1} \left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}} \right) \quad (1)$$

加速度計や傾斜計は重力加速度成分を検出できるので、静止状態では安定した姿勢角が得られ、ドリフト等の問題は生じない。しかし、動的測定では運動加速度成分が誤差となり、これは主に高周波成分として重畳する。図-1はローパス・フィルタ(LPF)で高周波成分を除去した測定結果であるが、後述の図-2と比較すると、ロール角の低周波成分は安定して検出されていることがわかる。

3. ジャイロによるロール角計測

加速度計とともに設置したジャイロを用いて計測したロール角を図-2に示す。ジャイロが検出するのは角速度 $\omega(\text{rad/s})$ なので、これを時間積分してロール角を求めた。ジャイロは運動加速度の影響を受けないが、積分演算によって測定ノイズが増幅されてしまい、僅か3分の計測時間でも、かなりのドリフトを生じてし

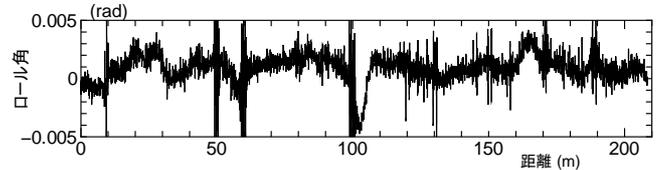


図-1 加速度から求めたロール角

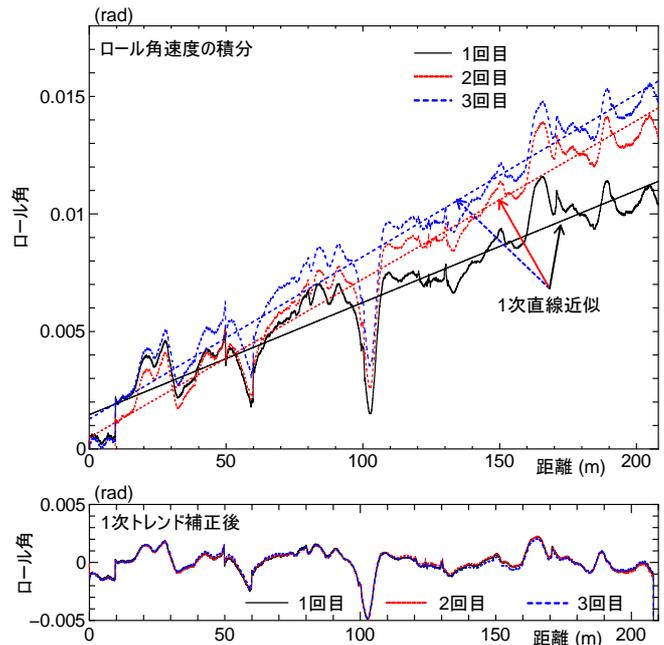


図-2 ジャイロから求めたロール角とトレンド補正

まう。図-2の下図はこれを適当な1次直線近似で補正した結果である。3回の測定結果は良く一致しており、ジャイロのみでの水準狂い計測にはハイパス・フィルタ(HPF)が不可欠であることがわかる。

4. 相補フィルタ

前述のとおり、加速度計(または傾斜計)による動的な姿勢角計測はLPFが不可欠であり、ジャイロによる計測はHPFが不可欠である。これら一長一短ある異種のセンサデータを融合して、信号のより良い推定値を得る方法は「センサ・フュージョン」と呼ばれ、カルマンフィルタ等を用いたいくつかの手法が提案されている。本稿では簡易軌道検測装置への搭載を考慮し、演算負荷が最も小さい「相補フィルタ(Complementary filter)」を用いることとした。相補フィルタを姿勢角

キーワード: 水準狂い, 相補フィルタ, ジャイロ, 角速度, 加速度

連絡先: 〒485-08014 愛知県小牧市大山1545番33 東海旅客鉄道(株)技術開発部 Tel 0568-47-5381/ Fax 0568-47-5364

$\theta(t)$ の推定に利用する場合、低域は加速度から求めた角度 $r(t)$ 、高域は角速度 $\omega(t)$ の積分結果を使用し、任意の周波数において利得の和が 1.0 になるよう LPF と HPF の遮断特性を調整する。時定数 T の 1 次フィルタを用いた相補フィルタのラプラス領域での関係式を (2) 式に示す。

$$\begin{aligned} \Theta(s) &= \underbrace{\frac{1}{1+Ts}}_{\text{1次 LPF}} R(s) + \underbrace{\frac{Ts}{1+Ts}}_{\text{1次 HPF}} \underbrace{\frac{1}{s}}_{\text{積分}} \Omega(s) \\ &= \underbrace{\frac{1}{1+Ts}}_{\text{1次 LPF}} (R(s) + T\Omega(s)) \end{aligned} \quad (2)$$

後退差分による微分の z 変換 ($s = (1 - z^{-1}) / \Delta t$) を用いて (2) 式を離散化すれば (3) 式となり、これを逆 z 変換すれば時間領域での関係式 (4) が得られる。

$$\Theta(z) = \frac{(1 - \alpha) R(z) + \alpha \cdot \Delta t \cdot \Omega(z)}{1 - \alpha z^{-1}} \quad (3)$$

$$\theta(k) = \alpha(\theta(k - 1) + \omega(k) \cdot \Delta t) + (1 - \alpha)r(k) \quad (4)$$

ここで、 $\Theta(s)$ 、 $R(s)$ 、 $\Omega(s)$ および $\Theta(z)$ 、 $R(z)$ 、 $\Omega(z)$ は、それぞれ $\theta(t)$ 、 $r(t)$ 、 $\omega(t)$ のラプラス変換および z 変換を表す。また、 $\alpha = T / (T + \Delta t)$ とおいた。 Δt はサンプリング間隔 (sec) である。

5. 相補フィルタによるロール角推定結果

(4) 式を用いて推定したロール角を図-3 に示す。3 回の測定結果は良く一致し、加速度および角速度計測の短所を互いに補い合って高精度なロール角が推定できていることがわかる。用いた時定数 T の値は 12.5 であり、サンプリング周波数を 200 Hz とした今回の測定条件における α の値は 0.9996 となる。

6. 軌道検測車との比較

前述の相補フィルタによる水準狂い計測の再現性、および軌道検測車データとの整合性を確認するため、小型軌道検測装置に 3 軸 MEMS ジャイロと 3 軸 MEMS 加速度計を内蔵する IMU (慣性測定装置) を設置し、東海道新幹線の急曲線区間において精度確認試験を行った。測定結果を図-4 に示す。距離 1100 m、測定時間約 20 分であったが、ドリフトやゼロ点オフセットは全く見られず、運動加速度の影響も最小限に留まっている。3 回測定の結果、ドクターイエローとの整合性も最大 1.0 mm 以下であり、相補フィルタを用いた水準狂い測定の有効性が確認できた。

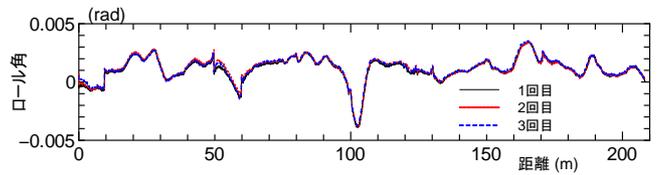


図-3 相補フィルタで推定したロール角

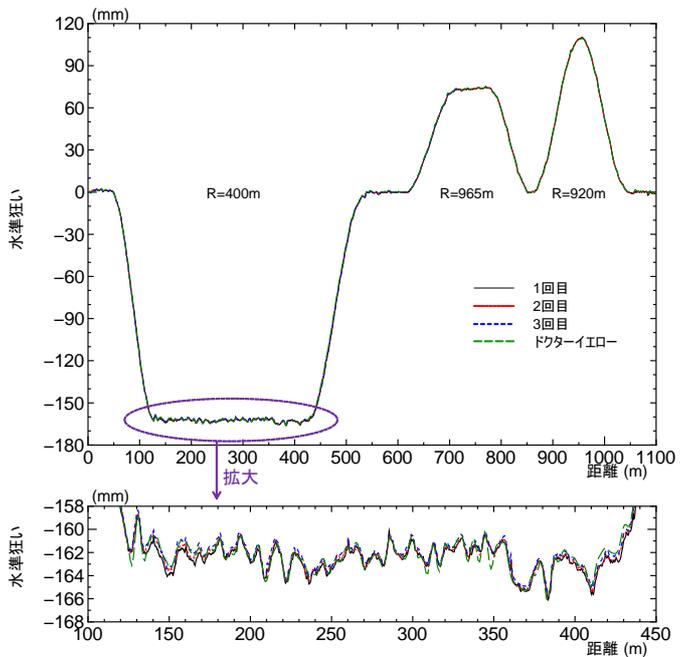


図-4 相補フィルタを用いた水準計測の再現性と整合性

7. おわりに

本検討の結果、相補フィルタによる水準狂い計測は必要十分な精度を有していることが確認できた。近年の自動運転技術やスマートフォン等の発展を背景に、MEMS の IMU は驚異的なスピードで小型化・高精度化・低廉化・堅牢化が行われており、現時点において、手押し式や牽引式の簡易軌道検測装置に十分採用できる。今後はカルマンフィルタやストラップダウン演算等、他のセンサ・フュージョン手法についても同様の検討を行い、簡易軌道検測装置における水準狂いの計測精度向上に寄与したいと考えている。

参考文献

- 1) WALTER T. HIGGINS, JR.: A Comparison of Complementary and Kalman Filtering, IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-11, no. 3, May 1975.
- 2) 足立修一, 丸田一郎: カルマンフィルタの基礎, 東京電機大学出版局, 2012 年.