

橋梁の GNSS 変位観測に基づく状態空間モデルの適用に関する研究

山口大学大学院 非会員 ○西村 勇輝
山口大学大学院 正会員 渡邊 学歩
株式会社長大 正会員 有井 賢次

1. はじめに

GNSS は、カーナビやスマートフォンの位置情報、農作業や建設作業の自動化、防災への適用など様々な分野で活用が進んでいる。本研究では、GNSS 変位観測による橋梁の維持管理や防災への活用を念頭に、状態空間モデルに基づく、カルマンフィルタによる長期トレンド把握、および粒子フィルタによる異常検知について研究を行う。

2. カルマンフィルタによる長期間モニタリング

GNSS 計測変位や金融データのように多量の誤差や大きな変動を含む観測データ y_t から、真値 x_t やトレンドを推定する際、状態空間モデル¹⁾を用いたフィルタ処理がなされる。ここでは、図-1 および式(1)、(2)で表されるカルマンフィルタ（以後 K-Filter）を適用する。

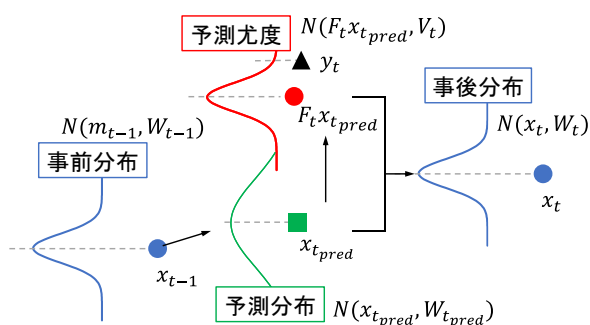


図-1 K-Filter の逐次更新過程

$$x_t = G_t x_{t-1} + w_t \quad w_t \sim N(0, W_t) \quad (1)$$

$$y_t = F_t x_t + v_t \quad v_t \sim N(0, V_t) \quad (2)$$

ここで、 G_t は時間更新を表すトレンド行列、 F_t は観測値

を表す行列、 v_t は観測ノイズ、 w_t は大型車の通行など時間更新で生じる過程誤差であり、 v_t および w_t は平均 0、分散 V_t 、 W_t のガウス分布に従う。同フィルタは、マルコフ過程に基づき、真値の事前分布と、観測データの予測尤度から、真値の事後分布を更新する確率モデルである。事前分布、予測尤度、および事後分布にガウス分布を仮定し、 x_{t-1} から x_t を線形予測する点が特徴的である。

図-2 には、GNSS 計測による橋梁変位に K-Filter を適用した結果を、別途計測した変位と合わせて示す。K-Filter 処理による変位の推定値は、温度変化による橋梁の変動や、115 日や 160 日付近での急速载荷試験に伴うスパイク状の変動には追従していないが、長期的変動トレンドをよく再現している。図-3 には、増加期、移行期および定常期の各時期における、観測値 (Obs)、計測変位 (Pipe) および変位の推定値 (Smoothing) を比較して示す。いずれも、観測結果の変動を捉えており、K-Filter による長期トレンド把握が可能である。

3. 粒子フィルタを用いた異常検知の検討

K-Filter による長期間トレンド把握では、温度変化による橋梁の変動や、スパイク状の変動を捉えきれない。ここで、粒子フィルタ (以後 P-Filter) を用いて、詳細分析により異常検知を検討する。状態空間モデルを確率表現すると式(3)となるが、第一項の真値 x_t は K-Filter で、第二項のパラメータ $\theta_t(W_t, V_t)$ は P-Filter による逐次更新を用いる。式(4)、(5)で表される P-Filter について F 、 H は関数を表し、 w_t 、 v_t は非ガウス分布に対応可能である。

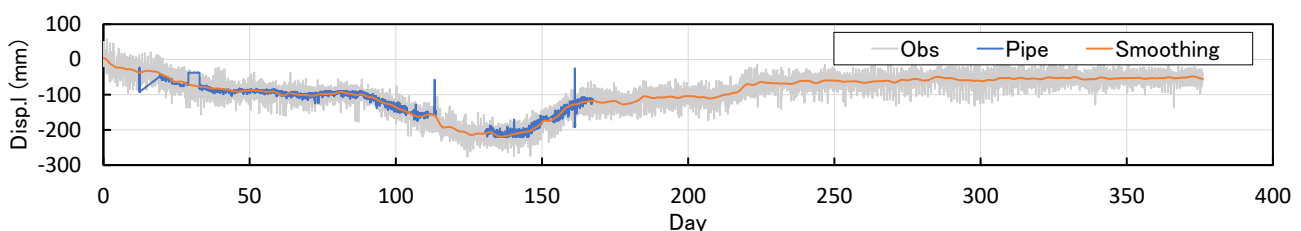


図-2 GNSS 変位計測データへの K-Filter の適用結果

GNSS, 状態空間モデル, カルマンフィルタ, トレンド推定, 粒子フィルタ, 異常検知
連絡先 〒755-0097 山口県宇部市常盤台 2 丁目 16-1 山口大学

T E L 090-3840-7094

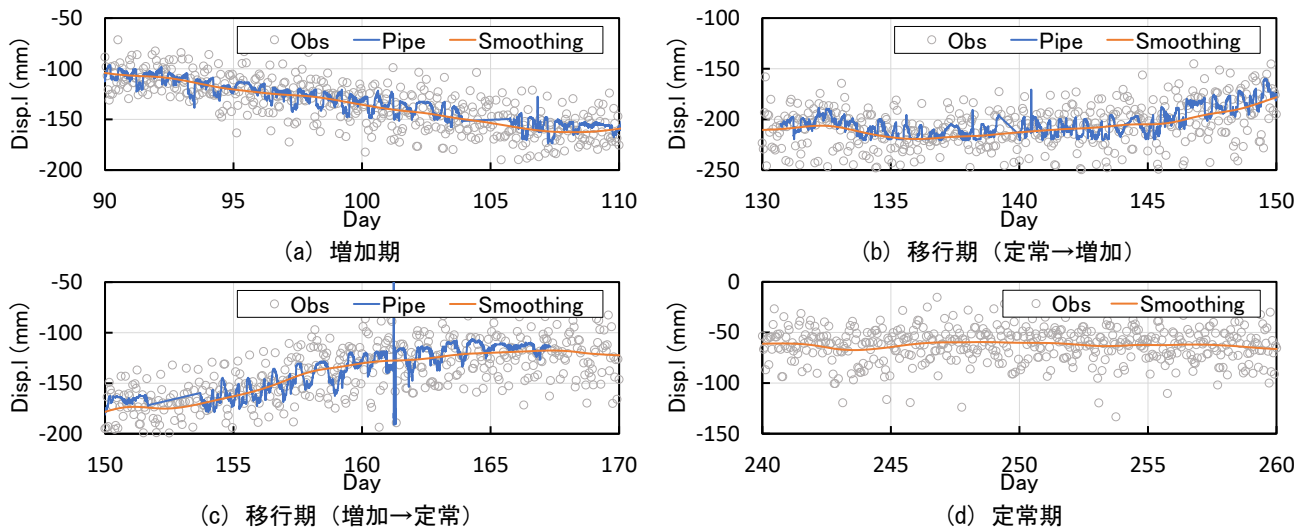


図-3 詳細図

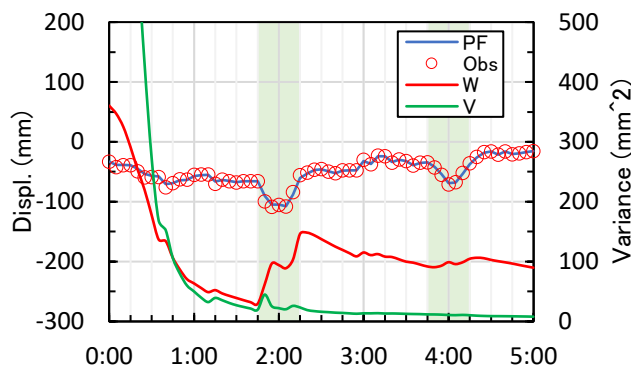
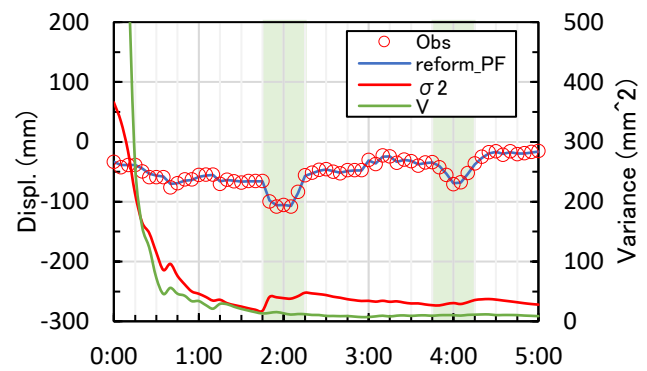
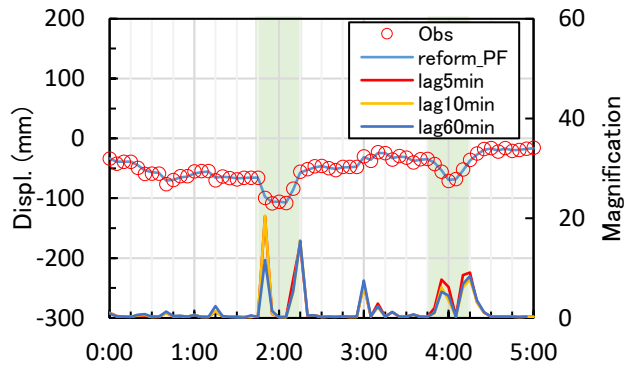


図-4 分散の推移

図-5 時不変成分 σ^2 の推移図-6 時変の倍率 λ_t の推移 (固定ラグ平滑化)

時刻 $t-1$ で推定した真値 x_{t-1} に対し、時刻 t で推定した真値 x_t に変化が生じた場合、その変化分は w_t に起因する。非ガウス分布で示される w_t は、何もなければ時間経過に連れて収束するが、変化が生じた時に信頼度の低い確率分布となり、分散が急増する。

$$p(x_t, \theta_t | y_{1:t}) = p(x_t | y_{1:t}, \theta_t) p(\theta_t | y_{1:t}) \quad (3)$$

$$x_t = f(x_{t-1}, w_t) \quad (4)$$

$$y_t = h(x_t, v_t) \quad (5)$$

図-4 には、分散の推移と P-Filter 結果を示す。同図において、2 時前後の変位の変化に反応し、分散は大きくなっているが、4 時前後の変化は捉えられない。これは、2 時前後における分散急増の影響であると考えられる。

ここで、分散を時変成分(時変の倍率 λ_t)と時不変成分 σ^2 に分けて考えることで、4 時前後の変化への対応を目指す。図-5 に時不変成分の分散推移を示す。同図において図-4 と比べると、変化する成分を取り除けたことが分かる。また、図-6 に時変成分の固定ラグ平滑化結果を示す。固定ラグ平滑化は、ラグ数分の未来の情報(状態変数値)を考慮して真値を推定する手法で、ラグ数を変えても倍率 λ_t に変化が殆ど見られないため、実時間での変化点の抽出(リアルタイム異常検知)が可能であると示唆され、構造解析により橋梁変位の異常値を求めておけば、異常検知の閾値設定に繋がる。

4. まとめ

- 1) 長期間モニタリングに対し、K-Filter を利用することでトレンド把握が可能である。
- 2) 実時間の変化点検出が可能ことから、構造解析等により橋梁変位の異常値が分かれば、それに応じて時変の倍率 λ_t の閾値設定が可能である。

参考文献

- 1) 萩原, 瓜生, 牧山: 基礎からわかる時系列分析, 術評論社, p.400, 2018.