

誤差を含む観測における粒子フィルタを用いた異常検知のシミュレーション

山口大学大学院 学生会員 ○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

ICT(Information and Communication Technology)の利用が進む中、本研究では、GNSS(Global Navigation Satellite System)による橋梁の異常検知を目指す。しかし、GNSSは誤差により実際の変形を検知できない場合があるため、状態空間モデルに基づく粒子フィルタを用いたシミュレーションで、異常検知の閾値について検討する。

2. 状態空間モデル及び粒子フィルタの概要

状態空間モデルには、カルマンフィルタ、粒子フィルタ、マルコフ連鎖モンテカルロ法など複数のモデルがあり、式(1)、(2)で定義される。 $f(\cdot)$ と $h(\cdot)$ は任意の関数で、モデルによって異なる。 x_t と y_t は時点 t における状態、観測値を表している。 w_t と v_t は、それぞれ状態雑音、観測雑音と呼ばれる確率分布である。

$$x_t = f(x_{t-1}, w_t) \quad (\text{状態方程式}) \quad (1)$$

$$y_t = h(x_t, v_t) \quad (\text{観測方程式}) \quad (2)$$

図-1 に状態空間モデルの概要を示す。同図のように、状態空間モデルは入手されたデータが時間前後で関連すると考え、確率的に捉えることで時間更新するモデルである。このように、状態空間モデルは確率的なモデルに基づき、推定対象(状態 x_t)は値そのものではなく、確率分布であり、観測値 y_t はその分布からたまたま得られた標本である¹⁾という考え方のもと処理がなされる。

状態空間モデルの中でも、粒子フィルタは順次得られるデータに適した解法であるため、異常検知にも適用できると考え、本研究に用いることとした。

図-2 に粒子フィルタの概要を示す。粒子フィルタは、同図の通り、時間更新される確率分布を粒子(計 N 個)の分配によって決定する特徴を持ち、粒子が密である程、確率が高くなり、モデルに反映される。

3. 異常検知のシミュレーション

3.1 粒子フィルタによる変化点の検出

本研究では、式(1)の状態雑音 w_t の分散(2 時刻間の変化量)に着目し、異常検知を目指す。長い安定期(2300 時

間)に続き、30mm の急変を与えた異常期(200 時間)、元に戻る急変を与え一定とした安定期(740 時間)を元データとする。図-3 に元データと粒子フィルタにおける状態雑音の分散を変化の倍率 λ として示す。同図より、変化点で倍率 λ が突出しており、粒子フィルタによる異常検知が可能であると示唆される。

3.2 誤差の影響による閾値精度の低下

GNSS のように誤差を含むデータには、実際の変形だけでなく、誤差の影響による誤った検知の可能性が示唆される。誤差の影響を再現するため、元データに対して正規分布に従うランダム誤差として、標準偏差 σ を5mm, 10mm, 30mm とした乱数を与え、各ケースの誤差の影響を確認した。その結果、検知できないケース

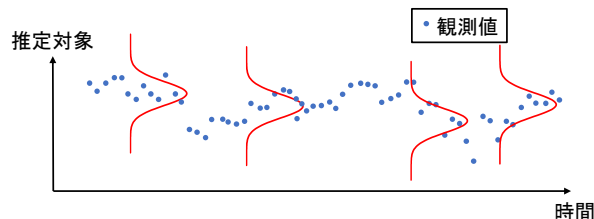


図-1 状態空間モデルの概要

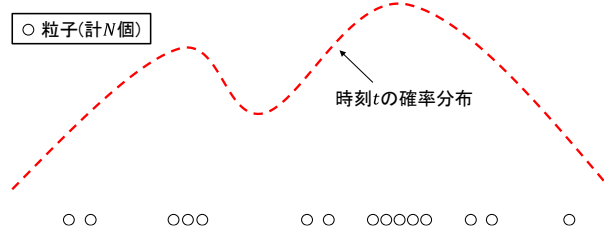


図-2 粒子フィルタの概要

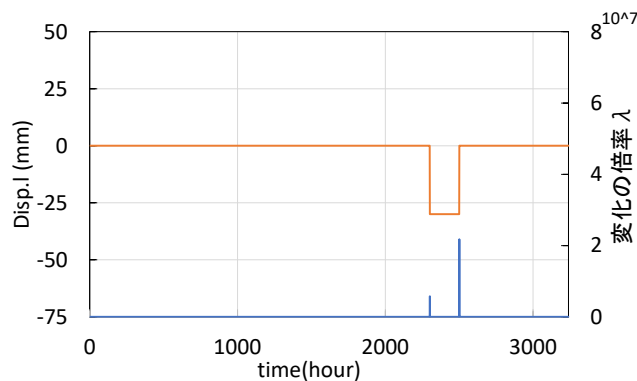


図-3 元データと変化の倍率 λ

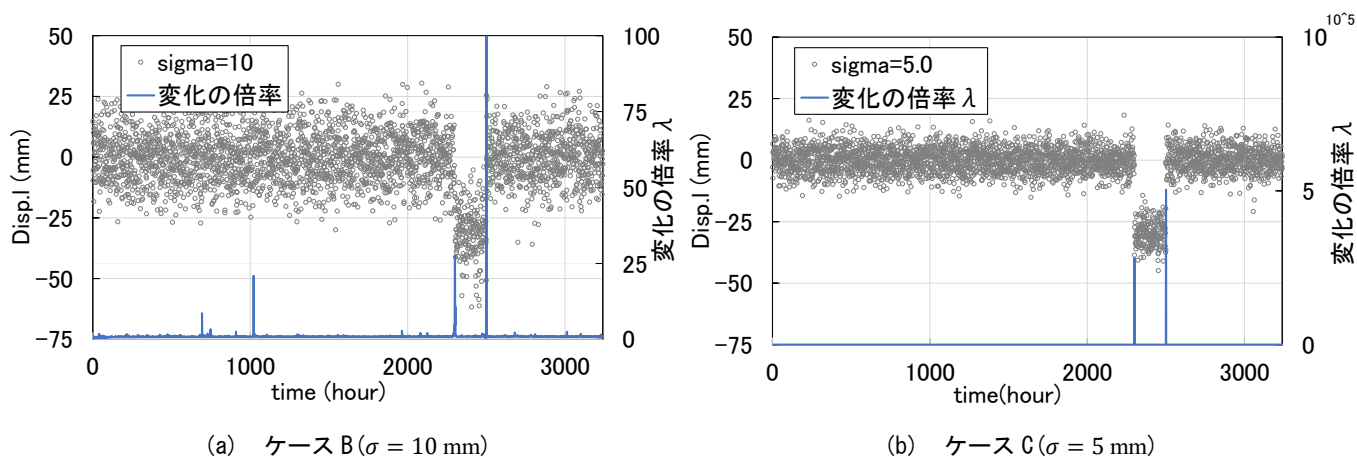


図-4 誤差を含むデータと変化の倍率 λ

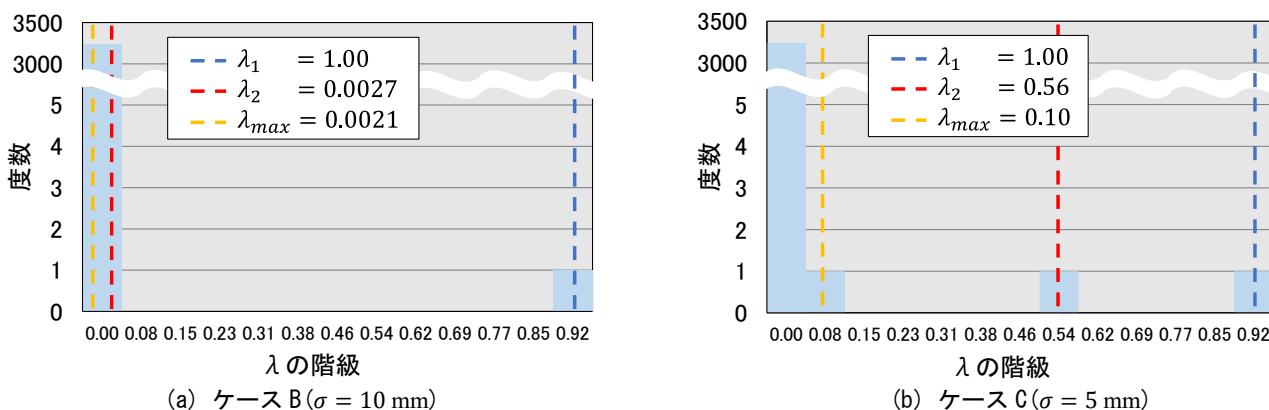


図-5 変化の倍率 λ のヒストグラム

A($\sigma = 30\text{mm}$), 検知が難しいケース B($\sigma = 10\text{mm}$), 検知可能なケース C($\sigma = 5\text{mm}$)となった。

ケース A では、安定期の λ が変化点の値を大きく上回り、閾値設定はできないと考えられる。ケース B, C の結果を図-3 と同様に図-4(a), (b) に示す。本手法の適用には、 λ の適切な閾値設定が必要であるが、図-4(a) では、誤差の影響により、安定期に変化点と同等な λ が検出される。また、発生した乱数によって結果が変化すると考えられ、閾値設定は難しいと言える。図-4(b) では、明らかに安定期と変化点が区別化されており、閾値設定が可能と言える。これにより、検知したい変形量に対して、誤差の改善次第で検知可能になると示唆される。

3.3 可視化による検出可否

誤差や乱数の影響により、ケース B の閾値は判断し難い結果となった。そのため、ケース B, C のヒストグラムをそれぞれ図-5(a), (b) に示す。青・赤破線は、2つの変化点における倍率($\lambda_1 \cdot \lambda_2$: 閾値とすべき値)が含まれる階級の位置を示している。また、黄破線は式(3)

$$\lambda_{max} = \max(\lambda) \quad \therefore \lambda \ni \lambda_1, \lambda_2 \quad (3)$$

の通り、安定期で最大の倍率(λ_{max})が含まれる階級を示している。なお、全ての倍率に対して、全時間で最大の

倍率(λ_1, λ_2 含む)を除すことで規格化しており、各階級の度数に大きな差があるため省略している。図-5(a)では、 λ_2 が λ_{max} と同階級に属している。これは、本来閾値であるべき値が安定期の値と大差ないことを示しており、閾値が期待できない。

図-5(b)では、青・赤・黄破線の位置関係より、 λ_1 及び λ_2 は λ_{max} よりもはるかに大きな値をとっていることから、閾値の設定が可能であると示唆される。

以上より、本手法によって、ランダム誤差に対して検知可能な変形量の割出しや閾値設定が可能であると示唆される。

4. まとめと今後の課題

- 1) 粒子フィルタにより、 $\sigma = 5\text{mm}$ の誤差に対して急変 30mm の検知が可能であると示唆される。
- 2) ヒストグラムの描画により、信ぴょう性のある閾値かそうでないかの判別が可能であると示唆される。
- 3) 今後の課題は、ランダム誤差の乱数を複数回発生させ、結果に精密性を持たせる研究を行いたい。

参考文献

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