

III-146

GPS 地盤変位計測結果の適応フィルタリングによる評価法

山口大学 正 清水則一 江上知幸(現 中電技術) 正 中川浩二 神戸大学 正 桜井春輔

1. はしがき

GPS は人工衛星を用いる測量システムで観測点の三次元座標を求めるものであるが、筆者らは大規模領域の地盤変位計測に適用できることを明らかにしてきた^{1),2)}。これまでの適用結果から、1km 程度の測線長に対し、GPS によって地盤の三次元変位を水平方向については 5 mm 程度、鉛直方向については 10 ~ 20mm の精度(標準偏差)で計測できることが示されている^{2),3)}。本報告では、GPS によって経時的に測定された地盤変位の計測結果を合理的に評価するために、適応フィルタリングを用いる方法を述べる。

2. GPS 測量結果への適応フィルタリングの適用

本報告では簡単のために一次元問題として記述する。

2.1 地盤変位の推移式 —状態方程式の誘導—

まず、地盤変位 u が次式で表されるようなクリープ的な挙動を示す場合について考える。

$$a_0 u(t) + a_1 \frac{du(t)}{dt} = f(t) \quad (u(t); \text{時刻 } t \text{ の変位}, a_0, a_1; \text{定数}, f(t); \text{外力項}) \quad (1)$$

式(1)において、 $du(t)/dt \approx (u_{t+1} - u_t)/\Delta t$, $u_t = u(t)$, $f(t): \text{const.}$ とし、若干の変形を行うと次式を得る。

$$X_{t+1} = \theta X_t \quad (X_t = u_{t+1} - u_t, \theta = 1 - \frac{a_0}{a_1} \Delta t) \quad (2)$$

式(2)は状態方程式となる。

2.2 観測点座標の拘束条件式 —観測方程式の誘導—

図1に示す観測点配置において、GPS のアンテナを観測点および基準点1と2に置くものとする。GPS によって測定されるのは、基準点 i ~ 観測点間の相対座標 $\Delta x_{i,t}$ である。基準点座標を x_{0i} とすると、時刻 t において観測点の真の座標 x_t は観測誤差 v_t^i を考慮して次のように表される。

$$x_{0i} + \Delta x_{i,t} = x_t + v_t^i \quad (i = 1, 2) \quad (3)$$

上式は GPS 測量における観測点間の幾何学的な拘束条件である。

式(3)を用いて次の観測方程式が誘導される。

$$\mathbf{Y}_t = \mathbf{C} \mathbf{X}_t + \mathbf{v}_t \quad (\mathbf{v}_t; \text{誤差ベクトル}) \quad (4)$$

ただし、

$$\mathbf{Y}_t = \begin{pmatrix} \Delta x_{1,t+1} - \Delta x_{1,t} \\ \Delta x_{2,t+1} - \Delta x_{2,t} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

2.3 適応フィルタリング

式(2)と(4)は一つのシステムをつくる。ここで、 θ はクリープ挙動を示す地盤の力学的な性質を反映するパラメータであり、観測時において未知である。また、 $\mathbf{Y}_t$ は GPS 測量によって直接得られる基準点~観測点間の相対座標から求められる。したがって、式(2)および(4)は、観測値 $\mathbf{Y}_t$ が与えられた時に X_t と θ を同時に求めるシステムとなる。これは適応(adaptive)フィルタリング⁴⁾と呼ばれる。式(2)および(4)に拡張カルマンフィルタの解法を適用すると次のように未知数 X_t, θ が求められる。

$$\hat{\mathbf{Z}}_{t/t} = \begin{pmatrix} \hat{X}_{t/t} \\ \hat{\theta}_{t/t} \end{pmatrix} = \hat{\mathbf{Z}}_{t/t-1} + \mathbf{K}_t \left[\mathbf{Y}_t - \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_{t/t-1} \right], \quad \hat{\mathbf{Z}}_{0/-1} = \bar{\mathbf{Z}}_0 \quad (5)$$

ただし、 $\mathbf{K}_t$ はカルマンゲイン、 $\bar{\mathbf{Z}}_0$ は初期値である。

3. 数値シミュレーション

提案方法の妥当性を調べるために数値シミュレーションを行う。ここでは、図2に示すようなクリープ変位を真値とし誤差を正規乱数によって与え観測値とする。シミュレーションの一例として、計測変位の標準偏差 5mm とし、GPS 測量を1日1回行う場合についての結果を図3~5に示す。

図3は θ の収束状況で、 θ の初期値 $\theta_0 = 0.5, 1.0, 1.5$ (ただし、正解値 $\bar{\theta} = 0.967$)とした3ケースについて示している。また、図4は X_t の推移である。いずれも、観測開始後10日目頃から徐々に収束する様子が分かる。図5は各観測時においてそれまでの観測結果から最終変位を推定した結果である($\theta_0 = 1.0$ のケース)。このケースでは最終変位の推定値は、観測開始後30日目頃から正解値との相対誤差が10%程度の値に収束することがわかる。

4. むすび

本報告では、GPSによる地盤変位計測結果の新しい評価法を提案した。本方法是一种の逆解析法であるが、逆解析の過程で観測点の幾何学的拘束条件を考慮しているところが、従来の逆解析法にはない特徴である。数値シミュレーションの結果、提案方法によって概ね妥当な解を得られることが示された。

参考文献: 1) 清水・桜井, 資源素材学会誌, 109(1), pp.1-7, 1993. 2) S. Sakurai and N. Shimizu, J. Mining Research, 1992(submitted). 3) 桜井・清水, 土木学会論文集, 1992(投稿中). 4) R. K. Mehra, IEEE Trans. Automat. Contr., AC-17(5), pp.693-698, 1972.

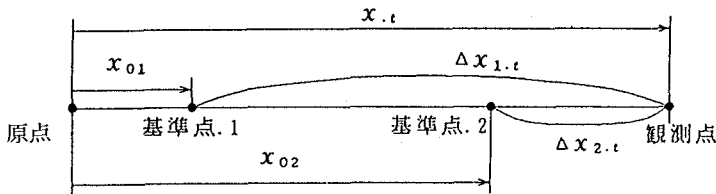


図1 観測点の配置(一次元問題)

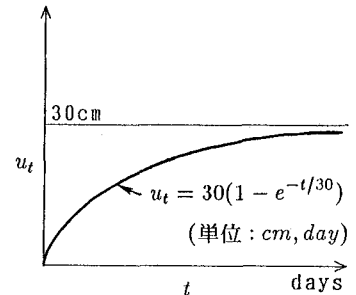


図2 クリープ変位

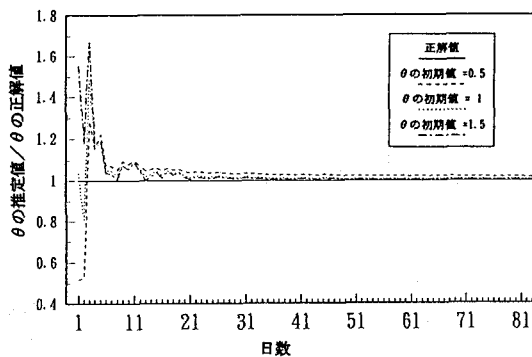


図3 パラメータ θ の収束状況

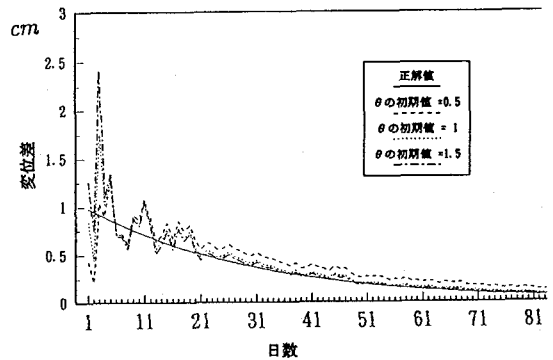


図4 変位差 X_t の収束状況

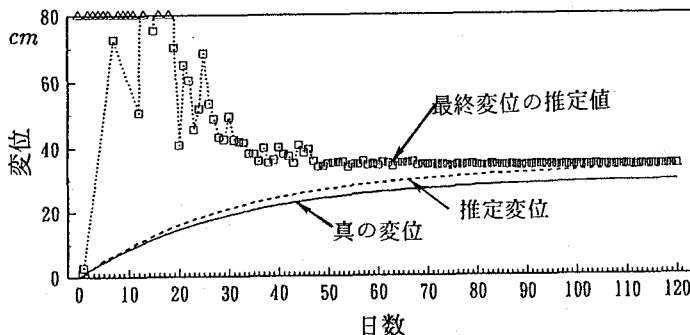


図5 最終変位の予測