5J-03

LSLOCK による気象レーダーデータのリアルタイムなノイズ除去・短期予測

石曽根毅 †　中村和幸 †‡
明治大学 †　JST さきがけ ‡

1　はじめに

気象予測においては，得られたデータに特有に現れるノイズをリアルタイムに除去し，次の予測に繋げることが求められる．昨年の全国大会では，リアルタイムに時空間データのノイズ除去・短期予測が可能な手法として LSLOCK を提案し，複数のシミュレーションデータに対し既存手法を上回る結果が得られたことを報告した [1]．本発表では，LSLOCK を国土交通省が保有する気象レーダーデータである XRAIN に適用した結果，ノイズ除去・短期予測の面で既存手法より有益な結果が得られ，リアルタイム性も担保されていたことを報告する．

2　状態空間モデル

LSLOCK は，データが状態空間モデル

$$\boldsymbol{x}_t = F_t \boldsymbol{x}_{t-1} + \boldsymbol{v}_t,\ \boldsymbol{v}_t \sim N(\boldsymbol{0}, Q_t), \tag{1a}$$

$$\boldsymbol{y}_t = H_t \boldsymbol{x}_t + \boldsymbol{w}_t,\ \boldsymbol{w}_t \sim N(\boldsymbol{0}, R_t) \tag{1b}$$

に従って生成されると仮定し，モデルパラメータである状態遷移行列 F_t と状態変数 $\boldsymbol{x}_t \in \mathbb{R}^{N_x}$ を同時推定する手法である．状態空間モデルでは，観測変数列 $\{\boldsymbol{y}_t\}_{t=1}^T \in \mathbb{R}^{T \times N_y}$ が，未観測な状態変数列 $\{\boldsymbol{x}_t\}_{t=1}^T$ の遷移方程式 (1a) と状態から観測を生成する観測方程式 (1b) によって生成されると仮定する．ここで，H_t は観測行列，$\boldsymbol{v}_t$ は状態遷移ノイズ，$\boldsymbol{w}_t$ は観測ノイズ，$N(\boldsymbol{\mu}, \Sigma)$ は平均 $\boldsymbol{\mu}$，分散共分散行列 Σ の正規分布である．

状態空間モデルのパラメータ F_t, H_t, Q_t, R_t が既知であれば，Kalman filter (KF) によって状態を逐次的に推定することができる．また，未知の場合でも，EM アルゴリズム [4] によって状態とパラメータの同時推定が可能であるが，高次元データに対しては計算コストが $O(TN_y^3)$ と重く，非現実的である．LSLOCK を用いることでこの問題点を解決し，リアルタイムで高精度な同時推定が可能となる．

3　LSLOCK

LSLOCK は，高次元時空間データに対し，状態遷移行列 F_t と状態変数 $\boldsymbol{x}_t$ をリアルタイムに同時に推定する手法として提案された [1, 3]．本手法は，擬似的な観測遷移方程式

$$\boldsymbol{y}_t = G_t \boldsymbol{y}_{t-1} + \boldsymbol{u}_t,\ \boldsymbol{u}_t \sim N(\boldsymbol{0}, S_t) \tag{2}$$

を用いた推定手法である LOCK[2] がベースとなっている．LOCK では，観測遷移行列 G_t を最小二乗推定あるいはベイズ推定し，その結果を用いて状態遷移行列を逐次的に更新していく．最小二乗推定の場合，更新式は，

$$\hat{G} = Y_t Y_{t-1}^-,\ Y_t = (\boldsymbol{y}_{t-\tau+1}, \cdots, \boldsymbol{y}_t), \tag{3a}$$

$$F_t = F_{t-\tau} + \eta \min\{\max\{H^- \hat{G} H - F_{t-\tau}, -c\}, c\} \tag{3b}$$

で与えられ，ベイズ推定の場合は，

$$Z_{t,s} = Y_t Y_s^T, \tag{4a}$$

$$C = S^{-1} \otimes Z_{t-1,t-1} + \gamma \mathrm{diag}(\mathrm{vec}(\Lambda_{t-\tau})), \tag{4b}$$

$$\boldsymbol{\beta} = \mathrm{vec}(S^-1 Z_{t,t-1} + M_{t-\tau} \circ \Lambda_{t-\tau}), \tag{4c}$$

$$M_t = \mathrm{matrix}(C^- \boldsymbol{\beta}), \tag{4d}$$

$$\Lambda_t = \mathrm{diag}(S^{-1}) \mathrm{diag}(Z_{t-1,t-1}^T + \Lambda_{t-\tau})^T, \tag{4e}$$

$$G_t \sim IsoN(M_t, I \oslash \Lambda_t), \tag{4f}$$

$$F_t = H^- G_t H \tag{4g}$$

で与えられる．ここで，$IsoN(M, \Sigma)$ は平均行列 M，分散行列 Σ の等方ガウス分布（相関のないガウス分布），diag はベクトルの対角行列化若しくは行列の対角成分を抽出したベクトル化，matrix はベクトルの平方行列化，vec は行列のベクトル化をそれぞれ表している．

この LOCK に局所化と（局所）空間一様性を導入した手法が LSLOCK である [1, 3]．局所化とは，各次元

Real-time Denoising and Short-term Prediction for Weather Radar Data by LSLOCK
Tsuyoshi Ishizone† Kazuyuki Nakamura†‡
Meiji University† JST, PRESTO‡

Copyright ©2021 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.

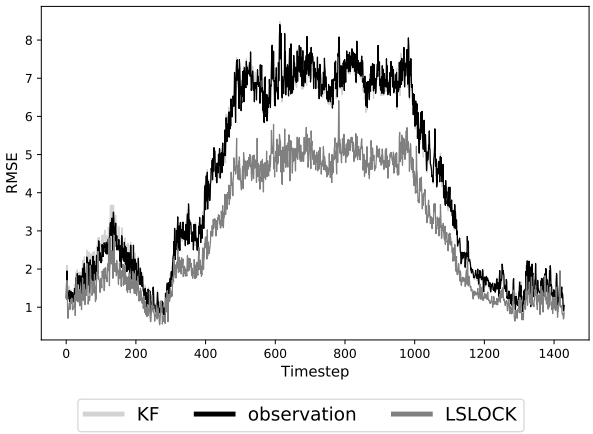

図 1: 2 期先予測 RMSE

（画像の場合はピクセル）毎に局所空間を構成し，その局所空間において推定をすることを意味する．局所空間一様性とは，対象とする局所空間内の各点 i とその近傍点 $N(i)$ の間の関係を与えるパラメータは，i に依らず近傍との位置関係に依ってのみ定まることを意味する．画像の例で言い換えると，局所的な画像をあるフィルタを用いて畳み込む状況を考え，そのフィルタ値を推定することに相当する．これらのアイディアによって，LSLOCK は劣決定な行列方程式を回避し，安定した推定結果を提供することができる．

4 数値実験

国土交通省によって提供されている XRAIN データセットを用いて LSLOCK の有効性に関する検証を行った．XRAIN データセットとは，X-band MP レーダーを用いた日本各地の降雨の高精度な観測によって得られたデータが集めらたものである．このデータには，頻繁に特徴的なノイズが乗っており，今回の数値実験では，ノイズの部分だけを有効に除去できているか，また短期予測が可能であるかの 2 点に焦点を絞って実験を行っている．

XRAIN データセットのうち，2016 年 8 月 22 日に関東甲信地域で 1 分毎に観測されたデータに対する適用実験を行った．なお，画像はダウンサンプリングし，46×66 のサイズとしている．

図 1 は，観測データとの 2 期先予測 RMSE

$$RMSE_t = \sqrt{\frac{1}{N_y}\sum_{i=1}^{N_y}(\hat{y}_{t+2,i} - y_{t+2,i})^2} \qquad (5)$$

である．ここで，$\hat{\boldsymbol{y}}_{t+2}$ は時刻 t における 2 期先予測推定値である．なお，凡例の observation は，時刻 t における観測をそのまま時刻 $t+2$ の予測値とした場合であり，KF は真の状態遷移行列が未知であるため恒等行列を用いている．図から，LSLOCK は KF や観測推定値より予測誤差を低減していることが分かる．また，定性的な観察から，ノイズだけを有効的に削減し，ノイズがない箇所では降雨の構造を保っていることが分かっている．定性的な結果と実験の詳細については，当日報告する．

5 まとめ

本研究では，発表者らが提案した LSLOCK の実用性を示すために，XRAIN データセットに対する数値実験を行った．実験結果から，LSLOCK は有効にノイズを削減し，ad hoc な KF や観測推定値を用いるよりも短期予測精度が向上することが分かった．今後は，更なる予測精度の向上・計算時間の短縮を実現するアルゴリズムの開発に取り組む予定である．

謝辞

本研究は JST，さきがけ，JPMJPR1774 の助成を受けた．利用した XRAIN データは，国土交通省より提供されたものである．利用したデータセットは，データ統合解析システム（DIAS）の下で，収集・提供されたものである．

参考文献

[1] 石曽根毅・中村和幸，時空間的連続性を用いたリアルタイムな動画像のノイズ除去，第 82 回情報処理学会全国大会，6M-02，2020.

[2] Ishizone, T., Nakamura, K. “Real-time Linear Operator Construction and State Estimation with the Kalman Filter,” *arXiv preprint arXiv: 2001.11256*, 2020.

[3] Ishizone, T., Nakamura, K. “LSLOCK: A Method to Estimate State Space Model by Spatiotemporal Continuity,” *14th International Conference on Automatic Control and Soft Computing*, 2020.

[4] Shumway, R. H., Stoffer, D. S. “An approach to time series smoothing and forecasting using the em algorithm,” *Journal of Time Series Analysis*, 3, 4, 253–264, 1982.

Copyright ©2021 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.