

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：62603

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25280010

研究課題名(和文) データ同化による日射量・風力の確率分布予測

研究課題名(英文) Probabilistic estimation of solar radiation and wind power by data assimilation

研究代表者

上野 玄太 (Ueno, Genta)

統計数理研究所・モデリング研究系・准教授

研究者番号：40370093

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：正確な気象条件の予測のため、関東地方を対象として空間間隔5kmの格子点上で、日射量・風力の毎時の予測確率分布を推定するデータ同化システムを開発する。初期アンサンブルの作成にはシミュレーションの実行結果とグラフィカルモデルによる行列の正規化手法を利用した。観測誤差共分散行列の推定には、全非対角要素をベイズ推定するアルゴリズムを開発した。

研究成果の概要(英文)：I have developed a Bayesian technique for estimating the parameters in the observation-noise covariance matrix for ensemble data assimilation. I designed a posterior distribution by using the ensemble-approximated likelihood and a Wishart prior distribution and presented an iterative algorithm for parameter estimation. The temporal smoothness of the covariance matrix can be controlled by an adequate choice of two parameters of the prior distribution, the prior covariance matrix and the number of degrees of freedom. The number of degrees of freedom can be estimated by maximizing the marginal likelihood. The present formalism can handle cases in which the number of data points or data positions varies with time. I verified that the proposed algorithm works well and that only a limited number of iterations are necessary.

研究分野：データ同化

キーワード：データ同化

1. 研究開始当初の背景

近年注目されているスマートグリッドは、太陽電池や風力発電などの自然エネルギーをもととした電力を既存の系統制御に最大限に取り込むことができる次世代送配電システムである。しかし、太陽電池の発電量は天候によって左右されるなど、これらの再生可能エネルギーは気象条件に左右される不安定な出力を持つのが運用上の難点である。また、今後も電力供給の主力を担うと考えられる火力発電は、起動停止に6時間程度の時間を要する。これらの発電システムの系統的に運用するためには、6時間以上のリードタイムで、日射量・風力を高分解能で予測することが必要である。

新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」において、気象数値予報モデルを用いた日射量予測が行われている。この研究では、数値予報モデルによる日射量予測は曇天時に外れやすいこと、モデルでの雲の再現が課題であることが示され、今後は数値モデルの雲物理過程の改良が計画されている。数値モデルによる雲の再現のためには、

(案1) モデル内の雲物理過程を改良[モデルプロセスの不確実性を改善]

(案2) 観測データに基づいた初期値を再構成し、モデル内に雲を再現[初期値の不確実性を改善]

の2案が考えられる。案1は先行研究の計画が該当し、従来から広く行われている物理的モデリングの方針である。これに対して本提案は案2の方針をとり、これまでに申請者が研究を進めてきたアンサンブルデータ同化手法を用いて、雲がより正しく再現される数値予報モデルの初期値を観測データを用いて再構成するものである。数値モデルの初期値は、短期予報の精度に決定的に重要であることが知られている。

研究代表者はこれまでに、データ同化手法、特にアンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)や粒子フィルタ(PF)などのアンサンブル型の手法の研究を進めてきた。応用対象として熱帯太平洋でのエルニーニョ現象、地球磁気圏の大規模電流、化学プラントを扱っている。最近では、本提案で用いる気象数値予報モデルにも取り組んでいる。データ同化の特徴は、シミュレーションモデルが扱う変数の数や観測データ地点数が非常に大きくなることである。上述の応用先ではモデル変数の数は数万以上、観測地点数は数百から数千以上である。データ同化の枠組みは、従来から状態推定の方法として知られているカルマンフィルタおよび非線形フィルタと同じであるが、大規模なシミュレーションモデルおよび観測システムを対象として、適正な時間と計算資源内で扱うために、計算量を抑えるための様々なケアが必要となることが特徴的である。

ある。

本研究課題では、データ同化手法を用いて、気象数値予報のシミュレーションモデルと、地上・衛星・レーダーでの気象観測データを統合することで、関東地方を対象とした高精度・高分解能(空間間隔5km、時間間隔1時間)の日射量・風力の確率分布予測システムを開発する。本研究は、以下の2点から、独創的であり、学術的に高い意味を持つと考えられる。

(1) データ同化によるアプローチ[モデルの初期値の改善]はなされていないこと。

(2) 数値予報モデル(状態変数の数120万)への適用を通して、研究代表者が確立した、データ同化における誤差の推定法をより一般化するものであること。

日射量・風力の予測分布および気象物理変数の予測分布が地理的に高分解能で得られる。日射量・風力の予測から、太陽光発電、風力発電による電力供給の予測が、気温・湿度の予測から、空調利用を主とした電力需要の予測が可能になる。また、これらの予測が地理的に高分解能で実施できることから、分散して存在する需要と供給の予測を可能にし、地産地消型のエネルギー需給システムの構築に資するものと考えられる。したがって本研究は、社会的・経済的にも大きな意味を持つものである。

2. 研究の目的

太陽電池や風力発電などの自然エネルギーの発生量は日射量・風力によって左右されるため、これらの予測には正確な気象条件の予測が必要である。この目的のため、関東地方を対象として空間間隔5kmの格子点上で、日射量・風力の毎時の予測確率分布を推定するシステムを開発する。日射量予測のポイントはシミュレーションモデルによる雲の再現である。そのために、データ同化手法を用いて、気象数値予報モデルと、地上・衛星・レーダーでの気象観測データを統合し、観測に応じた雲をモデル内に発生させる。予測確率分布はリスク管理を含めた電力配電システムの構築に、また、本システムで同時に得られる気温・湿度などの物理量により、高精度の需要予測に貢献できる。

3. 研究の方法

気象庁数値予報モデル(非静力学モデル, NHM)と地上・GPS衛星・レーダー等の観測データをアンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)を用いて同化し、雲量と風速の予測確率分布を求める。NHMとEnKFの計算プログラムは開発・検証済みである。計算資源を考慮して、グラフィカルモデルを用いて少ないアンサンブルメンバーでも有意な推定値を得る方法、およびEMアルゴリズムによる観測誤差の分散共分散行列の推定法を適用する。1年目は、開発済みのプログラムになるべく手を加えない形で最小構成システム

を構築し、模擬観測データでシステムの検証を行う。2 年目は、実データを取り込む構成へと更新するとともに、プログラムの高速化を図る。3 年目は、初期アンサンブルと観測誤差の推定過程を組み込み、システムを完成させる。

4 . 研究成果

まず、数値予報モデル(NHM) と模擬観測データを用いて、開発済みのプログラムにできるだけ手を加えない形でデータ同化システムを構成した。必要な計算資源やアンサンブルメンバー数を見積もる最小構成のシステムである。このため、アンサンブルとしてNHMを同時に実行するためのプログラム、モデル変数を観測量に変換する観測演算子のプログラムを作成した。システムの検証が主な目的であるため、粗い空間間隔 50km の格子点での設定で、模擬観測データを用いて同化計算を実行した。また、継続的に日射量・風力の予測計算を行うための専用の計算機環境の整備を行うとともに、NHM の計算結果の 2 次元・3 次元の可視化プログラムの開発を行った。

続いて、NHM と模擬観測データを用いて、前年度に開発した最小構成のデータ同化システムの高速化を行った。また、観測誤差に

Step 0: Select $S \in \mathbb{R}^{m \times m}$ that are positive definite and $v \geq m + 1$.
Compute the weight λ of S as

$$\lambda = \frac{v - m - 1}{v - m}. \quad (25)$$

Step 1: Select a positive-definite matrix $R_t^{(0)} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ and tolerances $\varepsilon > 0$ and $\delta > 0$. Set an iteration counter $k = 0$.

Step 2 (E-step): Compute the posterior probability:

$$z_n^{(k)} = \frac{\phi(y_t; \mathbf{h}_t(x_{t|t-1}^{(n)}), R_t^{(k)})}{\sum_{n=1}^N \phi(y_t; \mathbf{h}_t(x_{t|t-1}^{(n)}), R_t^{(k)})}, \quad (26)$$

for $n = 1, \dots, N$.

Step 3 (M-step): Update $R_t^{(k)}$ to $R_t^{(k+1)}$:

$$R_t^{(k+1)} = (1 - \lambda) \sum_{n=1}^N z_n^{(k)} (y_t - \mathbf{h}_t(x_{t|t-1}^{(n)})) \times (y_t - \mathbf{h}_t(x_{t|t-1}^{(n)}))^T + \lambda S. \quad (27)$$

Step 4: Quit if $R_t^{(k+1)}$ satisfies the stopping criteria:

$$\begin{aligned} & \bar{\ell}_t(R_t^{(k+1)}) + \log f(R_t^{(k+1)}; S, v) \\ & - \bar{\ell}_t(R_t^{(k)}) - \log f(R_t^{(k)}; S, v) \\ & < \varepsilon \left| \bar{\ell}_t(R_t^{(k)}) + \log f(R_t^{(k)}; S, v) \right|, \quad (28) \\ & \|R_t^{(k+1)} - R_t^{(k)}\| < \delta \|R_t^{(k)}\|. \quad (29) \end{aligned}$$

Step 5: Set $k = k + 1$ and go to Step 2.

図 1 ベイズ推定のアルゴリズム

よる不確実性を見積もるための誤差モデルの開発を行った。

その後、初期アンサンブルと観測誤差のパラメータを推定するプロセスを開発中のシステムに組み込んだ。初期アンサンブルの作成にはシミュレーションの実行結果とグラフィカルモデルによる行列の正則化手法を利用した。観測誤差共分散行列の推定には、最尤推定値を得る EM アルゴリズムを用いることを計画していたが、それを拡張し全非対角要素をベイズ推定するアルゴリズムを開発した(図 1)。さらに、グラフィカルモデルの適用において、NHM の 120 万変数に対してはメモリ不足となる可能性があることを考慮して、グラフィカルモデルのパラメータを分割して推定することを繰り返し、最終的に大域的な推定値を得るアルゴリズムの開発を行った。

5 . 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 5 件)

Ueno, G., and N. Nakamura, Bayesian estimation of observation error covariance matrix in ensemble-based filters, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, DOI: 10.1002/qj.2803

Kato, H., A. Yoshizawa, G. Ueno, and S. Obayashi, A data assimilation methodology for reconstructing turbulent flows around aircraft, *Journal of Computational Physics*, Volume **283**, 15 February 2015, Pages 559–581, doi:10.1016/j.jcp.2014.12.013, 2015.

A. Ieda, S. Oyama, H. Vanhamäki, R. Fujii, A. Nakamizo, O. Amm, T. Hori, M. Takeda, G. Ueno, A. Yoshikawa, R. J. Redmon, W. F. Denig, Y. Kamide and N. Nishitani, Approximate forms of daytime ionospheric conductance, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, pages 10397–10415. doi:10.1002/2014JA020665, 2015.

Ueno, G., and N. Nakamura, Iterative algorithm for maximum likelihood estimation of observation error covariance matrix for ensemble-based filters, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*,

140, Issue 678, January 2014 Part A, Pages: 295–315, DOI: 10.1002/qj.2134, 2014.
Chaston, C. C., Y. Yao, N. Lin, C. Salem, and G. Ueno, Ion heating by broadband electromagnetic waves in the magnetosheath and across the magnetopause, *J. Geophys. Res. Space Physics*, **118**, doi:10.1002/jgra.50506, 2013.

[学会発表](計16件)

上野玄太, データ同化システムの作り方, 文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業ビッグデータ駆動型創薬システム研究拠点第2回シンポジウム、慶應義塾大学理工学部(神奈川県横浜市)、2016年3月17日。

Ueno, G., Bayesian estimation of observation error covariance matrix in the equatorial Pacific, Ocean Sciences Meeting, New Orleans (United States), February 26, 2016.

山本凌大、町田忍、三好由純、上野玄太、宮下幸長、データ同化を用いたAU指数変動の推定、第138回地球電磁気・地球惑星圏学会、東京大学(東京都文京区)、2015年11月2日。

Ueno, G., Estimation of Large-scale Graphical Models for Data Assimilation, ISM High Performance Computing Conference, The Institute of Statistical Mathematics (Tachikawa, Tokyo), October 10, 2015.

上野玄太, アジョイント法によるシミュレーション最適化、第8回技術セミナー、応用数理ものづくり研究会、日本応用数理学会、筑波大学東京キャンパス(東京都文京区)、2015年10月8日。

上野玄太, データ同化と観測誤差共分散行列推定, SICE 制御部門ユビキタスコンピューティングを背景とした適応学習制御調査研究会第1回講義会「モデリング、最適化および非線形性へのアプローチ、統計数理研究所(東京都立川市)、2014年12月11日。

Ueno, G., Covariance localization with a graphical model and its application to the ensemble Kalman filter, International Symposium on Data Assimilation, Munich (Germany), Feb 24,26, 2014.

Ueno, G., Ensemble Kalman filtering with localization by a graphical model, American Meteorological Society Annual Meeting Atlanta (United States), February 6, 2014.

上野玄太, アンサンブル感度解析: アジョイントコード不要論、第6回EFD/CFD融合ワークショップ、秋葉原コンベンシ

ョンホール(東京都千代田区)、2014年1月30日。

上野玄太, グラフベース・アンサンブルカルマンフィルタ、第7回気象庁数値モデル研究会・第4回データ同化ワークショップ、気象庁(東京都千代田区)、2014年1月8日。

Haruto Toyama, Yoshizumi Miyoshi, Kazuo Shiokawa, Genta Ueno, Hideki Koshiishi, Haruhisa Matsumoto, Investigation on the internal acceleration process of the outer radiation belt using particle filter, 2013 AGU Fall Meeting, San Francisco (United States), December 9, 2013.

外山晴途, 三好由純, 上野玄太, 越石英樹, 松本晴久, 塩川和夫, データ同化による放射線帯内部加速機構の推定、地球電磁気・地球惑星圏学会第134回講演会、高知大学(高知県高知市)、2013年11月4日。

Ueno, G., Ensemble Kalman filtering with regularization through a graphical model, 6th WMO Symposium on Data Assimilation, Maryland (United States), October 7-8, 2013.

中村永友, 土屋高宏, 上野玄太, 一部の観測領域でランダムな欠測のあるデータに対する混合分布モデルのあてはめ、2013年度統計関連学会連合大会、大阪大学(大阪府豊中市)、2013年9月10日。

外山晴途, 三好由純, 上野玄太, 越石英樹, 松本晴久, 塩川和夫, データ同化を用いた放射線帯モデルの改良、日本地球惑星科学連合2013年大会、幕張メッセ(千葉県千葉市)、2013年5月21日。

Ueno, G., Ensemble Kalman filtering with a graphical model, EGU General Assembly 2013, Vienna (Austria), April 11, 2013.

[産業財産権]
取得状況(計1件)

名称: 計測点産出装置及び方法
発明者: 村瀬道夫、土谷隆、伊藤聡、上野玄太、染谷博司、石黒真木夫
権利者: 株式会社小野測器、大学共同利用機関法人情報・システム研究機構
種類: 特許
番号: 特許5443283号
取得年月日: 平成25年12月27日
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上野玄太 (UENO, Genta)
統計数理研究所・モデリング研究系・准教授
研究者番号: 40370093