

アンサンブルカルマンフィルタを用いたコンクリート内部の比誘電率分布 推定に関する基礎的検討

A Fundamental Study on Estimation of Relative Permittivity Distribution in Concrete Using Ensemble Kalman Filter

山本 佳士 (法政大・デザイン工) 久保 洸太 (法政大・デザイン工) 藤森 竣平 (法政大・デザイン工)
Yoshihito YAMAMOTO, Hosei University
Kota KUBO, Hosei University
Shunpei FUJIMORI, Hosei University
E-mail: y.yamamoto@hosei.ac.jp

An application of data assimilation to the estimation of the permittivity distribution inside concrete in FDTD simulations is attempted. Specifically, the applicability of the method to the estimation of permittivity distribution is examined by using an ensemble Kalman filter as a data assimilation method for a two-dimensional electromagnetic wave propagation problem in a multi-layered material model that simply models concrete. As a result of the fundamental investigation, although the number of observed data is only one as a characteristic of radar tests, the relative permittivity of multiple internal regions could be estimated by targeting a series of radar movement processes.

1. はじめに

現在、橋梁等の既設コンクリート構造物の点検及び健全度評価は、目視を基本として実施されている。しかし、その表面に現れたひび割れが内部でどのように進展しているかは、劣化・損傷シナリオによって異なる。既設コンクリート構造物の安全性を精度良く評価するためには表面に現れるひび割れ情報のみならず、構造内部の位置、寸法、角度等を含む3次元分布情報の効率的な取得手法の確立が望まれる。

著者ら^{1),2)}は、敵対的生成ネットワーク (Generative adversarial networks : GAN) の応用技術の一種である pix2pix を用いてレーダ画像からの逆問題推定を行い、コンクリート供試体内の欠陥の有無のみならず、位置、形状、寸法 (長さおよび厚さ情報)、角度情報を含む内部の構造を断面画像として再構成する手法を提案している。これまでの研究では、ひび割れを模擬した人工欠陥を有するコンクリート供試体を対象として推定精度の検証を行っている。検証の結果、提案手法は、欠陥の幾何情報がある程度再現できるものの、欠陥位置が深くなるほど、また、欠陥長さおよび厚さが小さくなるほど、骨材等のコンクリート内部の材料非均質性に起因する不要散乱波と比較して、欠陥からの電磁波の反射強度が相対的に小さくなり、推定精度が低下することを明らかにしている。

提案手法の精度向上のための方法の一つとして、有用な学習データを大量に取得することが考えられるが実験等により学習データを取得するにはコストが大きく限界がある。そこで著者ら^{1),2)}は、有限時間領域差分法 (FDTD 法) を用いたシミュレーションにより、内部欠陥を有するコンクリートのレーダ画像を再現することで有用な学習データセットを大量生成し、学習に利用することを試みている。ただし、現状では、コンクリート内部の比誘電率分布モデル等の再現に問題があり、シミュレーションデータを学習データとして利用することには課題が残っていた。

そこで本研究では、FDTD シミュレーションにおけるコンクリート内部の比誘電率分布の推定にデータ同化を適用することを試みる。本報では、適用の基礎的な検討として、コンクリートレーダ試験を模擬した簡単な複層材料モデルに対する2次元の電磁波伝播問題を対象とし、データ同化

手法としてアンサンブルカルマンフィルタ^{3),4)}を使用して、比誘電率分布の推定に対する適用性を検証した。

2. 解析手法

本研究では、マクスウェル方程式を離散化した FDTD 法による2次元電磁波伝播解析に対してアンサンブルカルマンフィルタを適用する。マクスウェル方程式中の変数は、 $\mathbf{E}$: 電場(V/m)、 $\mathbf{H}$: 磁場(A/m)、 $\mathbf{D}$: 磁束密度(Wb/m²)、 μ : 透磁率(H/m)、 σ : 導電率(S/m)、 ε : 誘電率(F/m)である。本研究ではアンサンブルカルマンフィルタによる比誘電率の同定を考えるにあたり、状態ベクトルを以下のように定義した。

$$\mathbf{x}_t^i = [E_{z,1}^i \cdots E_{z,n}^i | H_{x,1}^i \cdots H_{x,n}^i | H_{y,1}^i \cdots H_{y,n}^i | \varepsilon_1^i \cdots \varepsilon_k^i] \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x}_t$ は時刻 t における状態ベクトル、 E_z は z 方向の電場、 H_x および H_y はそれぞれ x 方向および y 方向の磁場を示し、それぞれの末尾の n は格子点数、 k は材質区分数である。また、 i はアンサンブルメンバーのサンプルインデックスである。一般的なカルマンフィルタの方法により、各アンサンブルメンバーの状態ベクトルは各時間ステップにおいて次式のように更新される。

$$\mathbf{x}_t^{a,i} = \mathbf{x}_t^{f,i} + \mathbf{K}_t(\mathbf{y}_t - \mathbf{H}_t \mathbf{x}_t^{f,i} + \mathbf{w}_t) \quad (2)$$

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_t \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_t \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_t)^{-1} \quad (3)$$

ここで、添え字の f と a はそれぞれ予測時の状態ベクトルと観測データに基づいて更新された状態ベクトルを表している。 $\mathbf{x}_t^{f,i}$ は各アンサンブルメンバーの $\mathbf{x}_{t-1}^{a,i}$ から非定常シミュレーションモデルの実行により得られる。また、 $\mathbf{K}_t$ はカルマンゲイン、 $\mathbf{y}_t$ は観測ベクトル、 $\mathbf{H}_t$ は線形観測演算子、 $\mathbf{w}_t$ は観測ノイズ、 $\mathbf{R}_t$ は観測誤差共分散行列である。 $\mathbf{P}_t$ は状態ベクトルの誤差共分散行列であり、アンサンブルカルマンフィルタでは以下のように、多数のアンサンブルメンバーの状態ベクトルを用いて近似する。

$$\bar{\mathbf{x}}_t \approx \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mathbf{x}_t^i \quad (4)$$

$$P_t \approx \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_t^i - \bar{x}_t)(x_t^i - \bar{x}_t)^T \quad (5)$$

ここで、 m はアンサンブルメンバー数である。

3. 模擬観測データを用いた数値実験

数値実験の概要を Fig. 1(a)に示す。対象の供試体モデルは、モルタル領域（比誘電率 12.0）、および比誘電率の異なる3つの骨材領域（比誘電率はそれぞれ 6.0, 8.0 および 10.0）からなる。レーダ試験を模擬して、供試体表面上の1点から電磁波を送信し、受信点で電場を計測する。データ同化実験の手順は、まず、あらかじめそれぞれの領域に比誘電率の真値を設定して FDTD シミュレーションを行い、受信点の電場を取得してこれを模擬観測値とする。つづいて、上述の比誘電率とは異なる初期比誘電率（ここでは平均値 4.0、標準偏差 1.0）を設定し、模擬観測値を用いてアンサンブルカルマンフィルタを実行してデータ同化を行う。本研究では格子間隔は 10mm、時間刻みは 1×10^{-11} sec とした。ここでは、アンサンブルメンバー数が 300 のケースの結果を示す。

Fig. 2 に、3つの骨材領域のそれぞれの比誘電率のアンサンブル平均と真値を時系列で比較したものを示す。図より、推定値が真値から大きく乖離していることが確認できる。これは、観測データ数が1つと少ないためであると考えられる。

なお、Fig. 1(b)に示すように、実際のレーダ試験では、電場の受信点すなわち観測データ数は1つではあるが、送信点および受信点を供試体表面上で移動させながらデータを取得する。したがって、この一連の移動過程をシミュレートすれば情報が増え、結果として推定精度が向上する可能性がある。

Fig. 3 に、以下のような数値実験をした結果を示す。すなわち、送信点および受信点を一定箇所固定してシミュレーションを実行し、一定時間たった後で、送信点および受信点を 10mm 移動させ、再度送信点から電磁波を入射させ電磁波伝播シミュレーションを実行する。この移動と電磁波の送信、および受信を対象供試体端部に達するまで繰り返す一連のシミュレーションにより模擬観測データを取得し、その模擬観測データを用いて、同様な一連のシミュレーションでアンサンブルカルマンフィルタを実行した。図より、このケースでは、送信点および受信点の移動を繰り返す毎に推定値が真値に近づき収束していることが分かる。

4. まとめ

コンクリートのレーダ試験を対象とした FDTD シミュレーションのモデルパラメータ同定手法として、アンサンブルカルマンフィルタの適用を試みた。基礎的な検討の結果、レーダ試験の特徴として観測データ数は1つであるが、レーダの移動過程を対象とすることで本検討の範囲内では、内部の比誘電率の分布を推定することができた。今後は実際の問題に近い状態で適用性を検討していく予定である。

謝辞

本研究の実施に当たり、仙台高等専門学校の園田潤教授には、FDTD シミュレーションのソースコードを提供いただくとともに、有益なご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

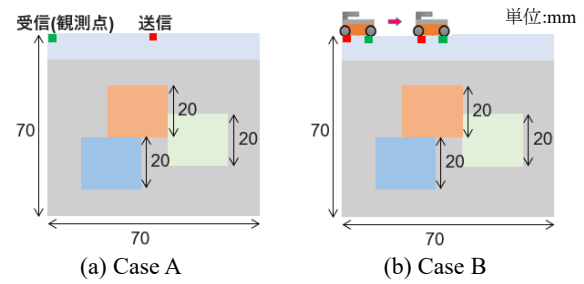


Fig. 1 Overview of the simulation models.

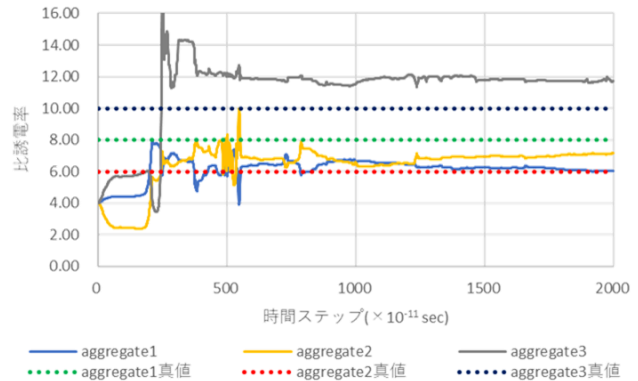


Fig. 2 Estimation results of relative permittivity in Case A.

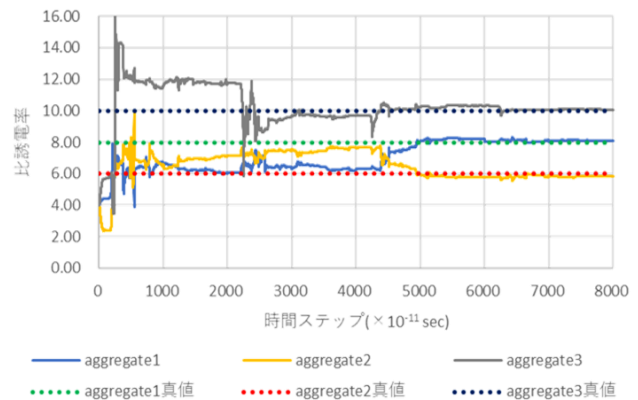


Fig. 3 Estimation results of relative permittivity in Case B.

参考文献

- 1) 光谷和剛, 山本佳士, 園田 潤, 木本 智幸:レーダ画像および GAN を用いたコンクリート内部欠陥の位置・寸法情報の可視化に関する基礎的検討, 日本計算工学会論文集, 2021, doi: 10.11421/jscs.2021.20211001
- 2) 山本佳士, 光谷和剛, 園田潤, 木本智幸:GAN および FDTD 法を用いたレーダ画像からの内部欠陥推定手法の高度化に関する検討, AI・データサイエンス論文集, 2/J2, pp. 700-711, 2021.
- 3) Evensen, G.: Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics, Journal of Geophysical Research 99(5), pp.10143-10162, 1994.
- 4) 山本真哉, 本多眞, 櫻井英行:アンサンブルカルマンフィルタによる地下水流動モデルの逐次データ同化, 清水建設研究報告, No.96, pp.27-34, 2018.