

三次元畳込みニューラルネットワークと FDTD 法によるレーダー信号からの空洞検知

東京大学 学生会員 ○山口 貴浩
東京大学 正会員 水谷 司

1. はじめに

近年、空洞による路面陥没が大きな社会問題となっている。博多駅前の路面陥没事故は記憶に新しい。約 130 万 km に及ぶ道路延長に対して、年間 1 万件以上の路面陥没が報告されている¹⁾。特に都市部で 3,000 件以上発生しており、道路利用者の安全性や近隣住民への影響を考えると、路面下に発生した空洞を早期に発見し対処することが望ましい。

本研究では、車載レーダーにより、約 80km/h で高速に路面下を探索可能な地中レーダー法に着目する。図 1 に示す商用システムでは、マルチチャンネルにより、cm オーダーの解像度の三次元データが得られる。一方で、レーダー画像の解釈は難解であり、さらに既往手法や慣行の画像からの目視による検知精度は 8 割程度といわれ精度向上が必要である²⁾。そこで本研究では、三次元の畳込みニューラルネットワーク (3D-CNN) により高精度に空洞の反射パターンを検知する。また、計測データの得られている例は非常に限られるため、二次元の時間領域差分 (2D-FDTD) 法により、現実的な計算時間で三次元の学習データを生成する手法を提案する。

2. 2D-FDTD 法による学習データの生成

FDTD 法では、対象領域をグリッドに分割し、電場と磁場の微分方程式を時間・空間方向に差分化することで各時刻・各位置の電界・磁界を計算する。空洞はアスファルト層下、土層中の楕円体の空気層で表される。等方性の送受信点对を移動させ、各位置で計測波形を得る。一方で、三次元 FDTD 法は、極めて多大な計算コストを要し、最新の Graphics Processing Unit (GPU) を用いても 1 データの生成に約 1 日かかる。そこで本研究では、2D-FDTD 法により三次元反射パターンを近似する手法を提案する。

三次元の空洞モデルにおいて、図 2 に示す通り、空洞の中心を原点とする円筒座標系を設定する。ピッチ角 $\Delta\theta$ として、各角度 θ の断面モデルにおいて、送受信点を投影し、2D-FDTD 法による解析を行う。続いて、断面 $I(r, \theta_n)$, $I(r, \theta_{n+1})$ 間を以下に示す式で線形に内挿する。

$$I_i(r, \theta) = \frac{\theta_{n+1} - \theta}{\Delta\theta} I(r, \theta_n) + \frac{\theta - \theta_n}{\Delta\theta} I(r, \theta_{n+1}) \quad (1)$$

本手法において、 $\Delta\theta$ がパラメータとなる。 $\Delta\theta$ が大きい場合、内挿に伴う近似精度は低下するが、 $\Delta\theta$ が小さい場合、シミュレーションを行う断面数が増加するため、計算コストは増大する。一般的な空洞の解析結果から、 $\Delta\theta = 15^\circ$ において各断面の反射パターンが収束するような十分な近似精度が得られた。反射パターンの対称性から、1 象限で解析を行えばよい。従って、提案手法による 1 データ当たりの計算時間は 10 分程度であり、3D-FDTD と比較して 0.2% 程度と大幅に低減された。

一方で、十分に小さな $\Delta\theta$ においても、三次元の空洞モデルを二次元モデルで近似したことによる誤差が生じる。本研究では、代表的な空洞のケースとして、舗装路面 0.5m 下、比誘電率 3、電気伝導率 0.005s/m の



図 1 車載レーダー

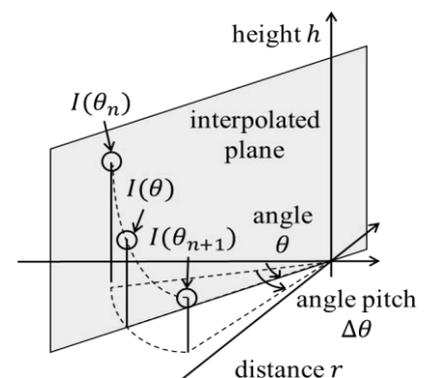


図 2 円筒座標における内挿

キーワード 地中レーダー, 路面下空洞, 深層学習, FDTD 法, 自動検知, 非破壊検査

連絡先 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所 TEL 03-5452-6008

土層内に存在する深度方向長さ 0.3m, 長軸方向長さ 1.5m, 短軸方向長さ 0.5m の空洞を仮定し, 二次元・三次元反射パターンを比較した. 二次元化に伴う誤差は, 近似平面に直交する方向のモデルの一様性に依存する. 検討したケースでは, 長軸方向断面において最も厳しい条件となるが, 空洞上面・下面のピーク値の誤差は最大でも 20%程度であった. また, 図 3 に実空洞とシミュレーションの比較を示すが, 仮定した空洞モデルは妥当であり, 提案手法は十分な近似精度を有することが示された.

3. 3D-CNN による空洞の学習

図 1 に示すシステムを用いて, 計 88 個の模擬空洞及び実空洞について計測を行った. また, 500 個のシミュレーションデータを作成した. 計測データおよび二次調査の結果を参考に, 土層の比誘電率, 電気伝導率, 空洞深度, 長さ, 幅をランダムに変化させた. 空洞の存在しない健全部のデータも同数抽出した. 全シミュレーションデータおよび計測データの半数を用いて転移学習を行い, 残りの半数で評価した.

本研究では, 図 4 に示す 3D-CNN モデルを用いた. モデル構造は, 比較のため二次元モデルの既往研究を参考にした²⁾. 三次元の入力データに対して, 三次元の畳込みフィルタを 4 層, 全結合層を 2 層設置し, 各カテゴリの確率を出力する. 比較のため, 入力データおよび畳込みフィルタを二次元化した 2D-CNN モデルも同様に作成した. 学習の結果, 全体の分類精度は 2D-CNN の約 79% に対して 3D-CNN で約 87% と大幅に向上し, Area Under the Curve (AUC) も約 0.79 から 0.91 まで上昇した. 三次元の畳込みフィルタの分類精度への寄与は 6% 程度であった. これらの結果から, 反射パターンの三次元的な特徴を用いることで, 高精度な空洞検知手法を構築することができた.

4. まとめ

三次元の空洞反射パターンを二次元の FDTD 法で近似する手法を提案した. 三次元の畳込みニューラルネットワークモデルを構築し, 二次元の場合と比較して空洞反射パターンの三次元的な特徴を学習することで, 10% 近くの大規模な分類精度向上を実現することができた.

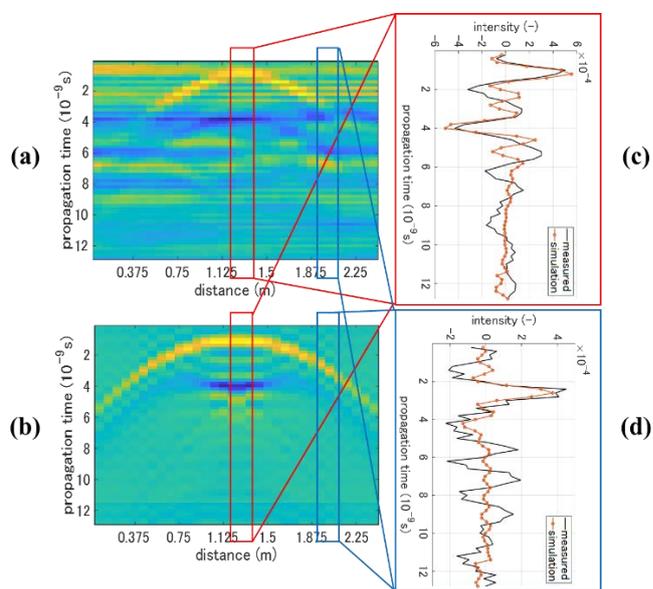


図 3 反射パターンの比較 (a) 計測 (b) シミュレーション (c) 中央点の波形 (d) 中央から 0.5m 位置

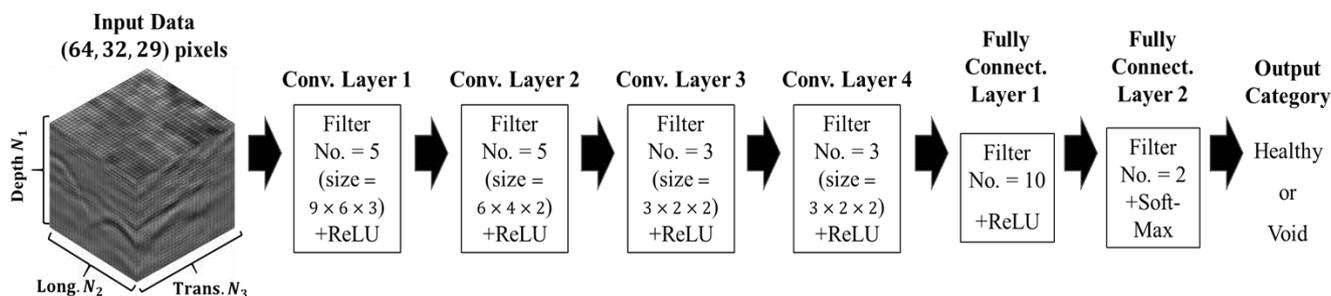


図 4 提案する 3D-CNN による深層学習モデル

参考文献

- 1) M. Sato and R. Kuwano, "Influence of location of subsurface structures on development of underground cavities induced by internal erosion," *Soils and Foundations*, Vol. 55, No. 4, pp. 829 – 840, 2015.
- 2) 園田潤, 木本智幸, 畳込みニューラルネットワークと敵対的生成ネットワークを用いた深層学習による地中レーダ画像の物体認識とイメージング, *地盤工学会誌*, Vol. 67, No. 6, pp. 12 – 15, 2019.