

超高速シミュレーション技術に基づいた地中レーダによる 社会インフラ劣化高精度診断システムの研究開発 (162302004)

Development of High-Accuracy Degradation Diagnosis System for Social Infrastructure
by Ground Penetrating Radar with Ultra-Speed Simulation Technique

研究代表者

園田 潤 仙台高等専門学校

Jun Sonoda National Institute of Technology, Sendai College

研究分担者

木本 智幸[†] [†]大分工業高等専門学校

Tomoyuki Kimoto[†] [†]National Institute of Technology, Oita College

研究期間 平成 28 年度～平成 30 年度

概要

トンネルや道路などの社会インフラの劣化による事故が社会問題化しており、異常箇所の早期発見が喫緊の課題となっている。本研究課題では、地中レーダによる社会インフラ劣化検出を高精度化することを目的に、超高速シミュレーション技術に基づいた異常箇所の検出判定システムを開発する。探査現場でシミュレーションによる判定が可能になれば、その場で再探査でき検出精度を向上でき、地中レーダ探査の高精度化・高効率化が可能になる。

1. まえがき

地中レーダは、数百 MHz 帯の電波を地中に入射し誘電率差で生じる反射波を地上で受信することで地中物体を検出する技術であり、近年劣化が深刻な道路やトンネルなどの社会インフラのセンシングや、自然災害に対する地盤や河川堤防などの防災・減災対策に有効である。しかし、地中レーダで得られる地中の断面に相当するレーダ画像から物体の材質や大きさを識別することが課題であった。本研究では、地中レーダによる社会インフラ劣化検出の高精度化を目的に、超高速シミュレーション技術に基づいた異常箇所検出判定システムを開発する。地中レーダ探査結果を高精度化するために本研究では、①電子メールベースの高速地中レーダシミュレーションシステムの開発、②深層学習によるレーダ画像の識別・画像化、③河川堤防点検や東日本大震災の不明者搜索など地域課題に適用する。

2. 研究開発内容及び成果

①電子メールベースの高速地中レーダシミュレーション画像処理プロセッサ GPU を用いて電磁波解析手法である FDTD 法による地中レーダシミュレーションプログラムを高速化するプログラムとともに、誤差と計算時間を考慮した最適計算パラメータ導出およびファイル入出力高速化のプログラムを開発した。この結果、従来の高速 CPU の並列計算でも 2 時間を要する 3 次元地中レーダシミュレーションを 2 分程度で実現できた。地中レーダ画像から推定した地中の状態を探査現場で確認・チェックできるようにする電子メールベースの計算・状態推定支援システムを開発した。本システムは、地中物体の大きさ、深さ、材質などの計算パラメータを計算サーバにメールで送り、計算サーバではメールで添付されたパラメータで地中レーダシミュレーションを実行し、数分程度で結果の地中レーダ画像を返信するものである。本システムにより探査現場で推定した地中をシミュレーションで検証できるため、迅速な再探査や詳細探査が可能になり、検査時間の短縮化や探査精度の向上に貢献できる。

②深層学習によるレーダ画像の識別・画像化システム
レーダ画像から深層学習 (人工知能) により物体の材質や

大きさを自動識別するシステムを開発した。①の高速シミュレーションプログラムにより、人工知能学習用地中レーダ画像を数十万個規模で生成した。さらに、5 層の畳み込みニューラルネットワーク CNN を構築しレーダ画像を学習させ、複雑さの異なる 10 種類の土壌における地中レーダ画像からの物体識別率を調べ、人工知能による識別率の基本性能を理論的に検証した。生成した地中レーダ画像は、ターゲットとなる地中物体の周囲に、平均大きさ $m \times m \times m$ cm で 1 m^3 あたり n 個の不要物体をランダムに配置することで複雑さの異なる土壌をモデル化した。生成した地中レーダ画像を CNN で学習させ、未学習のレーダ画像に対する物体の比誘電率の識別率を調べた。図 1 に学習画像数による比誘電率 4 の土壌中の比誘電率 1、3、4、5、9、完全導体の物体の比誘電率の識別率特性を示す。図 1 はシミュレーションで生成した地中レーダ画像を土壌毎にランダムに選択して学習し、同じ土壌の同数の未学習レーダ画像でテストした 10 回の平均値である。図 1 より、学習した画像数が多いほど識別率は高くなるが、不要物体の平均サイズ m が 3 cm で、 1 m^3 あたりの個数 n が 25 や 50 のように、土壌の不均質性が高くなるほど識別率が低下することを理論的・定量的に明らかにした。

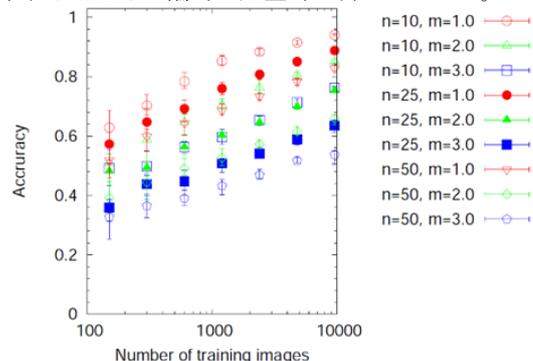


図 1 土壌 10 種類の学習枚数による誘電率の識別率次に、実際の実験画像を用いた識別率を調べた。ここでは市販のコンクリートブロックを組み合わせさせたモデル実験で検証した。実験では、ブロック中の深さ 12、18、24 cm に幅 7、14、21 cm の空洞、土、水を設置した。シミュレ

ーションで生成した画像からランダムに各 20 枚計 80 枚を 5 層 CNN で学習させ、各 20 枚の実験画像の比誘電率を識別した結果、識別率は平均 71 % であった。これは土とコンクリートブロックの比誘電率差が小さいためであり、土を除いた物体なし、空洞、水の 3 種類での識別率は平均 84 % であった。このように、シミュレーション画像の学習だけでも実験画像を 80 % 程度で識別できることを示した。

シミュレーションで生成した学習画像から実験画像の識別を高精度化するために、転移学習を検討した。ここでは、ImageNet の自然画像を学習した VGG16 の結合加重を用いてシミュレーション画像を転移学習し、モデル実験によるレーダ画像の識別率を検証した。この結果、シミュレーション画像で学習した 5 層 CNN では比誘電率の識別率は 70% 程度であったが、ImageNet の転移学習により識別率を 80% 程度に向上できた。さらに識別率向上のために、新しい人工知能技術である敵対的生成ネットワーク GAN による画像生成技術を適用した。シミュレーション画像を疑似実験画像に変換後に CNN で学習させ実験画像を識別した結果、識別率を 95% 程度まで向上できた。

地中レーダ画像からの高度な物体検出として、敵対的生成ネットワーク GAN を適用したレーダ画像の地中逆推定を検討した。シミュレーションで生成したレーダ画像とその計算モデルのペアを学習させ、未学習のレーダ画像から生成した地中モデルの精度を検証した。この結果、図 2 に示すように実験画像に対しても物体の材質、大きさ、位置を良好に逆推定できることを確認した。また、物体検出で用いられている YOLO による地中物体の比誘電率や位置の検出について検討した。ここでは、シミュレーション画像を実験画像に近づけるために、ニューラルスタイル変換を適用し、シミュレーションで生成した比誘電率 4 の地中にある比誘電率 1、3、5、9、金属の 5 種類の物体検出を評価した。この結果、図 3 に示すように、レーダ画像から地中物体の比誘電率や位置を良好に検出できた。

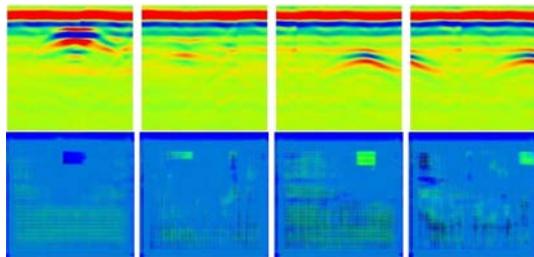


図 2 敵対的生成ネットワーク GAN による地中逆推定 (上段：地中レーダ画像、下段：推定した埋設物形状で物色は物体の比誘電率)

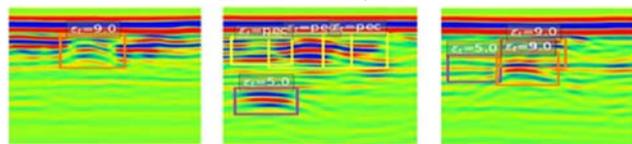


図 3 YOLO によるレーダ画像中の物体検出

(枠：検出した埋設物、枠の色：埋設物の比誘電率)

③河川堤防点検や震災不明者捜索など地域課題へ適用

東日本大震災の津波で損壊した宮城県亘理町の新設水門において、コンクリート水路下の遮水板の設置状況を地中レーダで調査した。厚さ 1.0m の鉄筋コンクリート下に設置されている金属製遮水板を地中レーダで調査したが、一部地中レーダ探査が行えず遮水板全体の反射波を観測できなかった。これを①の高速地中レーダシミュレーションで検証した結果、鉄筋コンクリート下の遮水板のレーダ画像を再現し、レーダ探査が不可能な箇所を検証できた。

東日本大震災では宮城県内で現在も 1218 名が行方不明であり、地中レーダで地中物体を特定できれば早期発見が期待できる。②の人工知能技術による物体自動識別システムを行方不明者捜索で検証した結果、レーダ画像から捜索現場でリアルタイムに物体識別ができることを確認した。今後は物体識別の精度評価や高精度化を検討する。

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取組

今後の展開として、開発した技術を用いたスマートフォンアプリやインターネットサービスによるインフラ検査自動化サービスを考えている。また、点検・検査画像やシミュレーション画像をデータベース化し提供することを検討している。東北地方だけでなく人口減少により労働人口減少が問題になっているが、専門技術者による労働に変わる新技術による新たな雇用が期待でき、またインフラ点検の自動化による持続可能な社会の実現に貢献できる。本研究では研究期間 3 年間にわたって当初から研究成果を東日本大震災の復興に貢献すべく、主に宮城県内の各所でフィールド実験を数多く実施している。東日本大震災の復興はまだ道半ばであり、今後も精度向上のための社会実験や地域貢献などを継続して実施していく予定である。

4. むすび

地中レーダによる社会インフラ点検の高精度化として、高速高精度シミュレーションと人工知能技術による手法を開発し、実際の地域問題に適用した。今後は、実際の社会インフラ点検の現場への適用や高精度化を目指す。

【誌上发表リスト】

- [1] 園田潤、昆太一、佐藤源之、” FDTD 法による地中レーダを用いた鉄筋コンクリート下の空洞検出特性”、電子情報通信学会論文誌 C、Vol.J100-C No.8 pp302-309 (平成 29 年 8 月 1 日)
- [2] J. Sonoda and T. Kimoto, "Object Identification form GPR Images by Deep Learning", 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), pp1298-1300 (平成 30 年 11 月 9 日)
- [3] 園田潤、木本智幸、” 畳み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識別と画像化”、地盤工学会誌 Vol.67 No.6 pp737-740 (平成 31 年 6 月 1 日)

【申請特許リスト】

- [1] 園田潤、木本智幸、学習データ生成方法およびこれを用いた対象空間状態認識方法、日本、平成 28 年 9 月 5 日 (特願 2016-173205)
- [2] 園田潤、状態推定支援方法および計算機、日本、平成 28 年 11 月 24 日 (特願 2016-228381)

【受賞リスト】

- [1] 園田潤、電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ・エレクトロニクスシミュレーション研究会優秀論文発表賞、H29 年 3 月 24 日

【報道掲載リスト】

- [1] “地中画像 AI が識別”、河北新報、H28.11.7
- [2] “地中レーダーに AI”、日刊工業新聞、H28.11.22
- [3] “災害救助を効率的に”、地中のヒトやモノを深層学習で識別、日経 xTECH、H30.9.7