

深層学習を用いた路面下空洞識別アルゴリズムの開発 Development of Detect Cavities Under Road using Deep Learning

秋山 靖浩[†] 服部 英春[†] 柿下 容弓[†] 定来 剛[‡] 山下 善弘^{†‡}
Yasuhiro Akiyama Hideharu Hattori Yasuki Kakishita Takeshi Sadaki Yoshihiro Yamashita

1. はじめに

安心・安全な舗装道路維持を目的として、定期的な路面下空洞検査および道路保守が実施されている。空洞検査方法の一つとして、レーダ波を路面下に照射してその反射波を画像として可視化し、人手による目視検査によって空洞箇所を見つけ出す手法がある。しかし、レーダ画像は解像度が低くノイズであることや地層境界などでの反射が空洞の反射パターンと似ているケースがあるなど、検査に熟練技術が要求され、作業難易度が高い。我々は路面下空洞を正確かつ効率良く検出することを目的に、深層学習を用いてレーダ画像から路面下空洞を識別する空洞識別アルゴリズムを開発した。以下に、同アルゴリズムの概要を述べる。

2. 路面下空洞探索業務について

Figure1 に路面下空洞探索業務の概要を示す。同業務形態の一つに、探査車両による地中レーダ(GPR:Ground Penetrating Radar)探索方法がある[1][2]。複数の地中レーダ送受信機を搭載した探査車両によってレーダ波を放射すると共に地中からのレーダ反射波を受信しながら高速道路や一般道路を走行して、道路の 1 レーン分の地中画像を連続収集する。

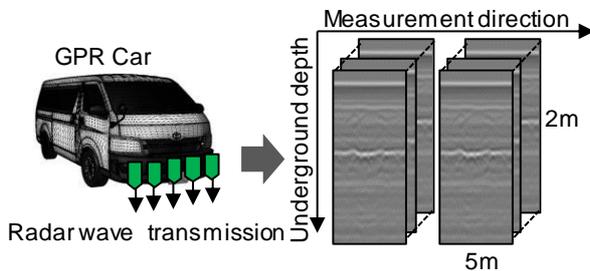


Figure1 Operation for cavity detection

収集した地中画像に対し空洞抽出のための目視によるオフライン解析を行う。抽出した空洞候補のうち特に道路陥没の恐れがあり危険と判断した箇所について、実際に該当箇所の地中を掘って空洞存在を確認した上で空洞を埋めるなどの道路補修計画を立案する。

2.1 空洞識別の課題

Figure2 に正解空洞パターンおよび非空洞パターンの一例を示す。(1)は正解空洞パターン(点線枠が正解空洞箇所)、(2)は非空洞パターンである。

(2)に示すような地層境界付近は、レーダ反射波と屈折波が複雑に重なり合うことに起因して空洞と酷似した反射パ

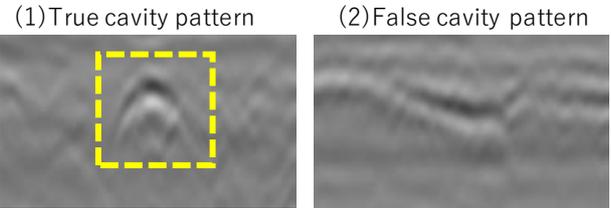


Figure2 True cavity and false cavity pattern

タンが並ぶように見えるため、空洞誤検知が生じやすい傾向がある。

空洞識別の目標は、実業務に耐える空洞検出の観点から再現率 100%、適合率 20%以上を目標に設定した。

空洞識別アルゴリズムの初期検討段階において、3 層 CNN 構成の単独識別器を試作した。総延長約 100km の実測データを用いて評価した結果、再現率 100%を達成したものの、適合率は 2.0%に留まった。

2.2 空洞識別アルゴリズムの提案

Figure3 に本提案の空洞識別フローを示す。

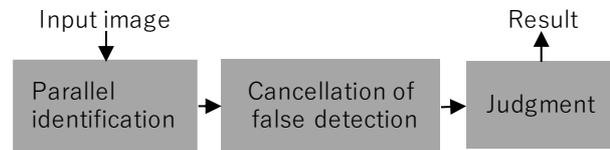


Figure3 Flowchart of improved method

空洞識別の目標性能を達成するために、並列識別処理および空洞誤検知キャンセル処理で構成する空洞識別処理アルゴリズムを考案した。

2.2.1 並列識別処理

Figure4 に並列識別による空洞誤検出抑制方法を示す。

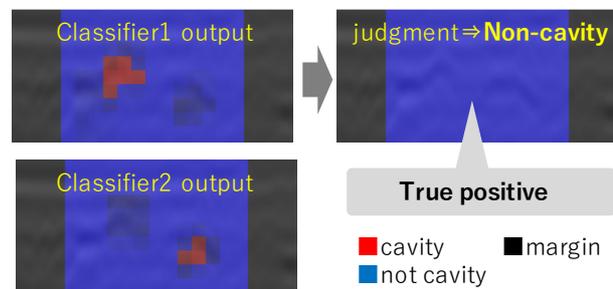


Figure4 Improvement of Non-cavity detection

並列識別処理では、識別器 1 および識別器 2 の両方が空洞と識別した箇所を空洞候補とするようにした。即ち、片方の識別器が空洞と識別しても他方の識別器が非空洞と識別すれば、出力は非空洞とする方法である。識別結果が空

[†] (株)日立製作所, Hitachi, Ltd.

[‡] (株)日立情報通信エンジニアリング, Hitachi Information & Telecommunication Engineering, Ltd.

^{†‡} 応用地質(株), OYO Corporation.

洞で一致しない箇所は、空洞パターンとしての特徴が薄い箇所であると仮定し、積極的にキャンセルする手法である。

並列識別処理の構成は、Figure3 記載の識別器をベースとし、それぞれ異なる識別特性となるようにファインチューニングを実施した。異なる特性を与える目的は、地層付近など検出が不安定となる箇所はどちらか一方が非空洞と確実に判定できるようにするためである。

2.2.2 空洞誤検知キャンセル処理

並列識別処理が出力した空洞候補について正解空洞と誤検知空洞を見分けるため、空洞形状検証機能および地層検証機能で構成する空洞誤検知キャンセル処理を開発した。

(1) 空洞形状検証機能

Figure5 に空洞形状検証の概要を示す。空洞形状検証は、並列識別処理の 1 次判定で空洞候補となったパッチ画像に対して (A) 空洞パーツ検証、(B) 空洞先端パターン検証および (C) 斜め直線検証の 3 種類の検証処理を実行し、全てにパスすれば空洞候補に継続確定する。

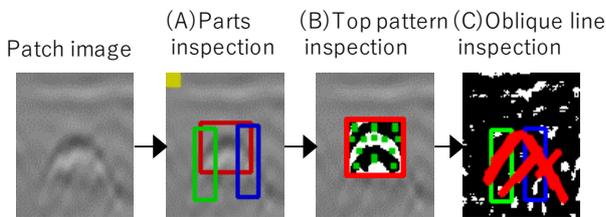


Figure5 Shape inspection flow

空洞パーツ検証は、空洞先端、左スロープおよび右スロープの 3 個の空洞パーツをパターンマッチングで探索して各空洞パーツの相対位置が基準条件を満たしていれば空洞候補とする処理である。

空洞先端パターン検証は、空洞パーツ検証で検出した空洞先端の 2 値化画像と基準観測パターンを比較し、一致度が所定閾値より高ければ空洞候補とする処理である。

斜め直線検証は、空洞パーツ検証で検出した左右スロープ箇所に適切な斜め直線が検出されれば空洞候補とする処理である。

(2) 地層検証機能

Figure6 に地層検証機能の概要を示す。

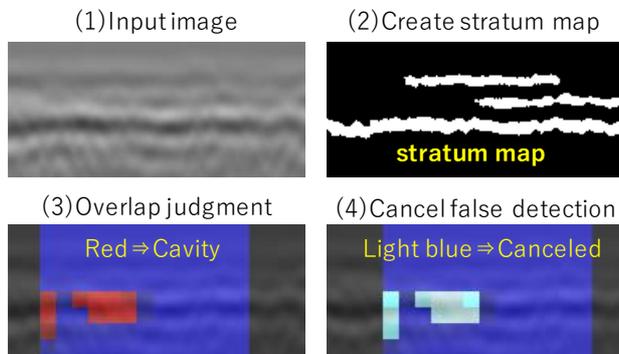


Figure6 Cavities cancellation process of false detection by stratum map

地層境界付近は特に空洞誤検出が発生しやすい傾向があるため、入力画像から地層境界線を示す地層マップを作成し、地層境界と重なる空洞誤検知箇所(空洞と酷似した反射パターン)をキャンセルする地層検証機能を開発した。

地層マップは、入力画像を領域適応 2 値化(注目画素を中心に一定画像領域の輝度ヒストグラムバランスから適応的に閾値を決定)して作成する。

地層マップには横に長い地層境界線が表現される。この地層マップと地層候補との重なりをパッチ単位で検査し、重なりが生じていれば誤検知と判断するようにした。

3. 評価結果

本提案の空洞識別アルゴリズムによる評価結果を述べる。評価データはアルゴリズム改良前(初期性能評価)と同様に実測トライアルデータ(画像数=6545)を用いた。正解空洞の全数検出を実現して再現率 100%を達成した。適合率は 20.9%に改善した。この結果、再現率および適合率の両方で目標を達成した。

Figure7 に空洞識別結果の例を示す。

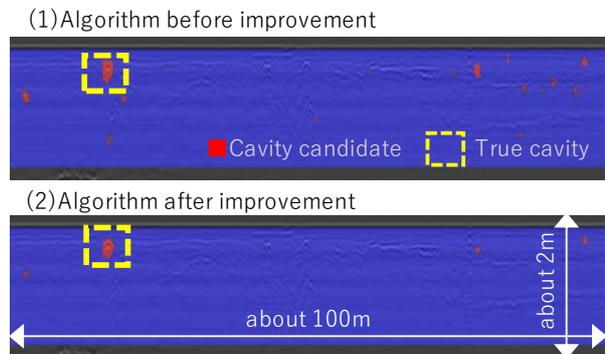


Figure7 Result of Cavity detection

同画像は、実測データの一部区間(距離約 100m)の識別結果である。上段がアルゴリズム改良前、下段がアルゴリズム改良後の結果である。赤マークは識別器で検出した空洞候補、点線枠が正解空洞である。点線枠以外の空洞候補は全て誤検出である。本開発の改良アルゴリズムにより、正解空洞には強く反応する特性を保持しつつ、空洞誤検知を精度良く低減できていることを確認した。

4. おわりに

本開発では、深層学習を用いた空洞識別処理とルールベースの空洞誤検知キャンセル処理を組み合わせた空洞識別アルゴリズムを考案した。この結果、再現率および適合率の両方で目標(再現率 100%、適合率 20%以上)を達成した。今後は、フィールドテストを実施しながら識別器本体および誤検知キャンセル処理の改良を行い、更なる精度向上を目指す予定である。

本開発の手法検討に際し、識別器教師データおよび評価用データは応用地質株式会社殿にご提供頂いた。

参考文献

- [1] W.Al-Nuaimy et al., "Automatic detection of buried utilities and solid objects with GPR using neural networks and pattern recognition", Journal of Applied Geophysics, (2000).
- [2] 応用地質(株)山下善弘,他, "機械学習を用いた地中レーダによる舗装道路下空洞箇所の自動抽出の試み", (2017).