

## 審査の結果の要旨

氏名 山口 貴浩

近年、地中埋設インフラの老朽化が大きな社会問題となっている。下水道管渠について総延長は約 47 万 km に達しており、その内の約 3% である 1.4 万 km が耐用年数 50 年を経過している。また、下水道管渠の老朽化に伴い空洞が発生し、路面陥没に至る場合がある。下水道管渠に起因する路面陥没は年間約 4,000 件発生しており、大きな社会問題となっている。埋設管について、道路管理者が把握していない埋設管が存在する場合、工期の遅れや、破損により周辺地域へ経済的影響を及ぼす場合がある。

既往の空洞・埋設物を検出する点検手法は主にキャンペーン型の手法であり、センサの設置や計測に時間を要する。一方で、本研究では **Ground Penetrating Radar (GPR, 地中レーダー)** 法に着目している。**GPR** 法は、アスファルト表面に対して、車両などに取り付けられたアンテナにより電磁波を送信し、反射した電磁波を受信することで、アスファルト表面下 0.5–1.5 m 付近の幅広い深さ範囲について、内部の異状を検知する点検手法である。車載システムを用いる場合、交通規制を行う必要がなく、高速かつ高密度にレーダー画像を得ることができる。しかし **GPR** 法で計測したレーダー画像の解釈は一般的に難解であるため、人力の場合、検査員の熟練度に大きく依存し、また熟練点検員であっても画像の分析に多大な時間と労力を要し、それに付随してコストも高くなる。そのため **GPR** 法を大規模に活用するためには全自動でレーダー画像を分析し、埋設管、空洞を検知する必要がある。

このような背景のもと、本研究では、人工知能および解析学的信号処理を高度に導入し、全自動で画像を解析することで、「地中レーダーを用いた地中埋設管・空洞の探査の三次元自動検知アルゴリズムの開発及びマッピング手法を提案」することを目的とした。

埋設管については検査員の目視の検知に基づく多数の教師データを収集しているが、空洞については教師データ数が少なく、人工知能の学習においては十分ではない。そこで、空洞について、**FDTD** 法に基づく電磁界シミュレーションにより、教師画像を生成した。二次元の画像について学習を行う場合は、

2D-FDTD 法により空洞画像を生成可能である。一方で、三次元的な特徴を学習する場合は、3D-FDTD 法による電磁界シミュレーションは計算コストが膨大で、教師データの生成においては現実的ではない。そこで、各投影断面についての二次元空洞モデルの解析結果を組み合わせることで、2D-FDTD 法により三次元空洞データを生成する手法を提案している。

検知アルゴリズムの適用において、人工知能を含むパターン認識による手法では、偽信号であるマンホールやジョイント下の多重反射を埋設管や空洞として誤検知することが分かった。そこで、本研究では、SVM による表面反射からのマンホール・ジョイントの検知アルゴリズムを構築し、埋設管・空洞の探査領域から除外している。

人工知能による自動検知手法として三次元の Convolutional Neural Network (3D-CNN) を用いて、レーダー画像から深層学習により埋設管・空洞の三次元的な反射パターンを検知することで、アルゴリズムの高精度化を図っている。本研究で構築した 3D-CNN による埋設管検知アルゴリズムは 3 カテゴリ分類により、埋設管の有無だけでなく、走行直角・走行方向の埋設管の向きも高精度に推定可能である。一方で、実用的なマンホール・ジョイント・埋設管・空洞のマッピングを行うため、検知領域から対象物の位置を特定する手法が必要である。そこで、対象となる領域を移動させながら全データを走査するしらみつぶし探索を行い、検知領域に対して逆解析手法を適用することで対象物の位置の特定を試みている。SVM で検知された領域に対して、ハフ変換により円及び直線を抽出することで、マンホール・ジョイント形状を描画した。3D-CNN により検知された領域に対してマイグレーション手法の一種である Kirchhoff マイグレーションを適用することで、埋設管及び空洞位置を三次元空間上にプロットした。本研究では、電磁界シミュレーション・人工知能・逆解析アルゴリズムを組み合わせることで、高速かつ高精度にマンホール・ジョイント・埋設管・空洞と多岐にわたる対象物を三次元空間上に全自動でマッピングするアルゴリズムを構築できたことを示した。これは、土木工学において重要な地中の空間情報収集にパラダイムシフトをもたらす技術の根幹を構築したといえ、大きな成果を挙げたといえる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。