

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：51303

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K21064

研究課題名（和文）深層学習で自己学習する電磁波レーダによるインフラ内部自動点検ロボットの開発

研究課題名（英文）Development of an Automatic Infrastructure Interior Inspection Robot Using Deep Learning Self-learning Electromagnetic Radar

研究代表者

園田 潤（sonoda, Jun）

仙台高等専門学校・総合工学科・教授

研究者番号：30290696

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、広範囲の河川堤防などのインフラ内部の異常箇所を自動で検出し、画像化する自動走行地中レーダロボットを開発することである。令和2年度には、人工衛星測位や複数センサで自動走行するクローラ型地中レーダロボットを開発した。また、地盤やコンクリートのレーダ画像から内部物体を画像化する深層学習プログラムを開発した。令和3年度には、実際に河川堤防の異常箇所の調査点検において、研究開発した自動走行地中レーダを適用し、河川堤防法面や天端における走行性能を評価するとともに、AIで自動検出をするための教師あり・なし学習のためのレーダ画像収集が可能であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の挑戦的研究としての意義は、これまで実現できていなかった内部の自動推定・3次元画像化と、人手によらない自動走行化を実現することで、現状から2段階の飛躍を目指すことである。これが実現できれば、労働人口の減少問題で懸念されている社会インフラ点検が自動化され、的確な補修による長寿命化など高度な安全・安心社会の実現に貢献できる。他にも、例えば御嶽山の火山災害のような火山灰に埋もれた不明者の捜索など、人が立ち入りにくい場所を昼夜問わず長時間にわたって捜索できるようになるなど、インフラ全般の検査点検に加え災害時の捜索など地中内部のセンシング問題に広く適用できるものである。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to develop an automatic traveling ground-penetrating radar robot that can automatically detect and image anomalies inside infrastructure such as river banks over a wide area. In FY2020, we developed a crawler-type ground-penetrating radar robot that automatically travels using satellite positioning and multiple sensors. In addition, we developed a deep learning program to visualize internal objects from radar images of ground and concrete. In FY2021, we applied the developed automatic traveling ground-penetrating radar robot to an actual survey and inspection of abnormalities in a river embankment, and evaluated its traveling performance on the slope and top of the embankment, and confirmed that it is capable of collecting radar images for supervised and unsupervised learning for automatic detection by AI.

研究分野：電磁波工学

キーワード：地中レーダ 電磁波レーダ 内部可視化 自動走行 深層学習 ロボット インフラ点検 災害

1. 研究開始当初の背景

地中レーダでは熟練技術者がレーダ画像を判読し内部を推定しているが、精度は高くなく技術者によるばらつきも大きかった。また、地中レーダは人や自動車が牽引して使用するため、時間や人的コストがかかる問題があった。本研究の挑戦的研究としての意義は、これまで実現できていなかった内部の自動推定・3次元画像化と、人手によらない自動走行化を実現することで、現状から2段階の飛躍を目指すことである。これにより労働人口減少で懸念されている社会インフラ点検が自動化され、的確な補修による長寿命化など高度な安全・安心社会実現に貢献できる。

2. 研究の目的

数百 MHz 帯の電波で非破壊に内部を推定する地中レーダは、近年問題になっている道路空洞やコンクリート亀裂など社会インフラ点検に有効である。しかし、地中レーダは人や自動車が牽引するもので、時間とコストがかかる問題があり、自動化が求められている。自動走行は自動車や農業機械等で盛んに研究されているが、自動走行地中レーダはほとんど研究されていない。本研究では、RTK (Real Time Kinematic) や CLAS (Centimeter Level Augmentation Service) による高精度なセンチメートル級衛星測位を用いた自動走行地中レーダについて研究する。また都市部や屋内など衛星測位が困難になる場所においても使用できるように LiDAR や超音波ビーコンによる屋内外自動走行地中レーダについても研究を行う。

3. 研究の方法

3.1 高精度人工衛星測位による自動走行地中レーダ開発

人工衛星による位置測位は GNSS (Global Navigation Satellite System) と呼ばれ現在広く使われているが、一般的な単独測位では測位誤差が数 m 程度である。近年、複数衛星からの搬送波の位相情報を用いる RTK や、JAXA 測位衛星みちびきの補強信号を用いた CLAS により数センチオーダーの精度で測位が可能になっている。

本研究では、センチオーダーの人工衛星測位による自動走行レーダを開発する。開発する自動走行レーダは、クローラ型であり、市販の地中レーダを搭載し指定した経路を自動走行する。図1にシステム構成を示す。測位信号を基に姿勢センサや方位センサを用いて複数のウェイポイントを経由するようにマイコン制御で走行する。自動走行アルゴリズムは、Park らの提案する車両前方の軌道上に設定するウェイポイントを追従する手法を適用する。本アルゴリズムにおける車両の現在位置情報および対地速度の推定に GNSS 測位情報を用いる。

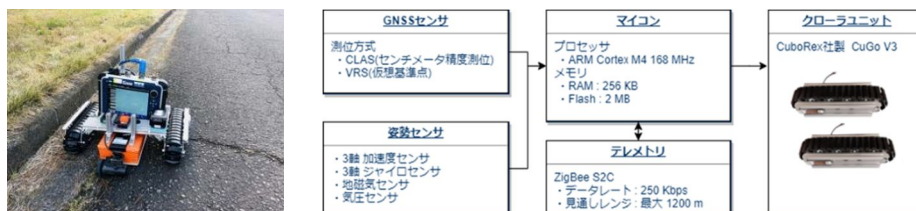


図1 GNSS 測位による自動走行地中レーダの外観とシステム構成図

3.2 LiDAR SLAM による自動走行地中レーダ

屋内での自己位置推定の手法として LiDAR を用いた SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) を使用する。LiDAR は、パルス状に発光するレーザ照射に対する散乱光により対象物までの距離などを測定するものである。SLAM は、自己位置推定と環境地図作成を同時に行うもので、既存の地図上での衛星測位を用いた自己位置推定とは異なり、地図の存在しない屋内など環境でも自己位置推定が可能である。また、本研究では ROS (Robot Operating System) を使用して自動走行地中レーダを開発する。ROS はロボット開発を容易にするプラットフォームである。

開発した自動走行地中レーダの外観とシステム構成図を図2に示す。SLAM のソフトウェアは ROS のパッケージである hector_slam を使用する。ロボットの制御には同じ ROS パッケージの move_base を使用する。これは SLAM で作成した地図上で、設定した目的地へのナビゲーションや障害物回避などを行う。LiDAR による測距には plidar_ros、ウェイポイントの設定には follow_waypoints を使用する。モータ制御には motor_control を用いる。

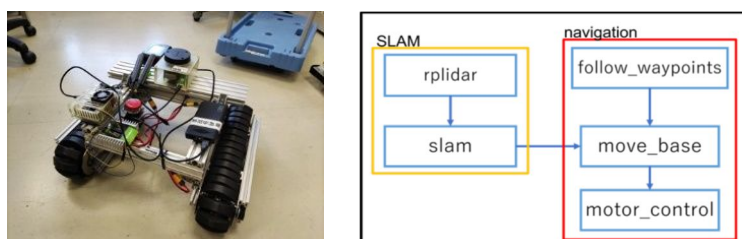


図2 LiDAR SLAM による自動走行地中レーダの外観とシステム構成図

3.3 超音波ビーコンによる自動走行地中レーダ

本研究では、自動走行に用いる測位手法として超音波ビーコン(Marvelmind 社 Super-Beacon) を使用する。特徴として、他の屋内測位手法である UWB や BLE/WiFi よりも高精度かつ安価である点や、自動走行に必要な電子コンパスの代替に使用できる点などが挙げられる。測位精度は公称値約 2 cm である。Super-Beacon では、複数の固定ビーコンと 1 つの移動ビーコンを用い、31kHz の超音波を用いて各ビーコン間の相対的な距離を測定する。

図 3 に開発した超音波ビーコンによる自動走行地中レーダの構成図を示す。自己位置の測位と電子コンパスの代替の方位センサとなる移動ビーコンを搭載し、クローラで地中レーダを搭載して自動走行する。自動走行は、制御コンピュータで設定したウェイポイント座標と Super-Beacon で取得した座標と方位を用いて、RaspBerry Pi4 で動作する ROS (Robot Operating System)の制御プログラムで現在地からウェイポイントまでの距離や方位の差を計算して行う。

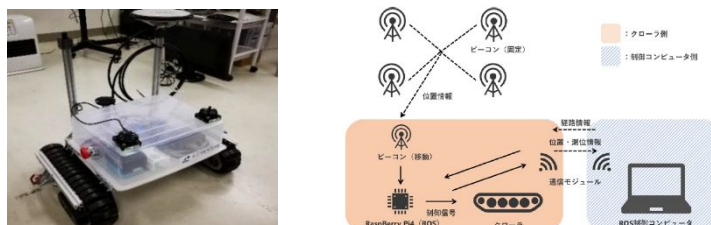


図 3 超音波ビーコンによる自動走行地中レーダの外観とシステム構成図

4. 研究成果

4.1 高精度人工衛星測位による自動走行地中レーダ開発

高精度人工衛星測位によるクローラ型の自動走行性能を仙台高等専門学校の構内で評価する。RTK にはネットワーク型 RTK の VRS を用い受信機は株式会社コアの QZNEO を、CLAS には L6 信号を受信できる株式会社コアの Chronosphere-L6 を用いる。クローラには株式会社 CuboRex の CuGo V3 を用いる。比較に用いる単独測位には、U-blox 社の NEO-M8N を用いる。図 4 に走行軌跡を示す。図 4 は、コース四隅の 4 点にウェイポイントを設定し 3 周させたもので、赤が CLAS、白が単独測位である。図 4 より、CLAS による走行はウェイポイント間をばらつきが小さく走行できているが、単独測位では走行のばらつきが大きいことが確認できる。



図 4 高精度人工衛星測位 CLAS による自動走行地中レーダの走行精度評価

4.2 LiDAR SLAM による自動走行地中レーダ

自動走行地中レーダの走行性能を評価するため、机や椅子などがある室内オフィス環境で行実験を行った。図 5 に自動走行経路と走行結果を示す。図 5 左の赤丸がウェイポイントで図 5 右が室内を反時計回りに走行させた結果である。この結果から走行誤差は最大 30cm 程度、平均誤差 15 cm 程度の精度で走行することができた。

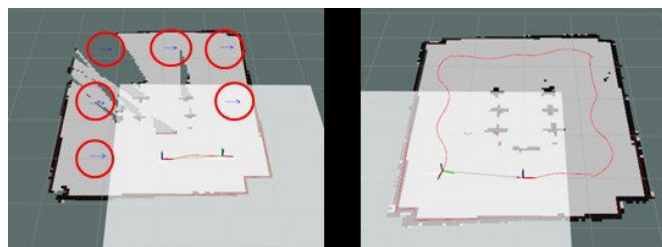


図 5 LiDAR SLAM による自動走行地中レーダの走行精度評価

4.3 超音波ビーコンによる自動走行地中レーダ

超音波ビーコンを用いた自動走行地中レーダの走行性能を評価するために室内での走行実験を行った。図 6 右に走行実験の評価条件を示す。4 台の固定ビーコンを横約 2.1 m と縦約 6.4 m の間隔で配置し、走行車に搭載した 2 台の移動ビーコンで座標と方位を取得する。走行車の初期状態は左下の固定ビーコン 3 の方向を向くように置き、星マークの位置にウェイポイントを設

定した。図6右に走行実験の結果を示す。初期地点から走行の軌跡を点で示している。図6右の結果から、超音波ビーコンによる自己位置と方位取得により、指定したウェイポイントまでを小さいばらつきで走行できることを確認できた。

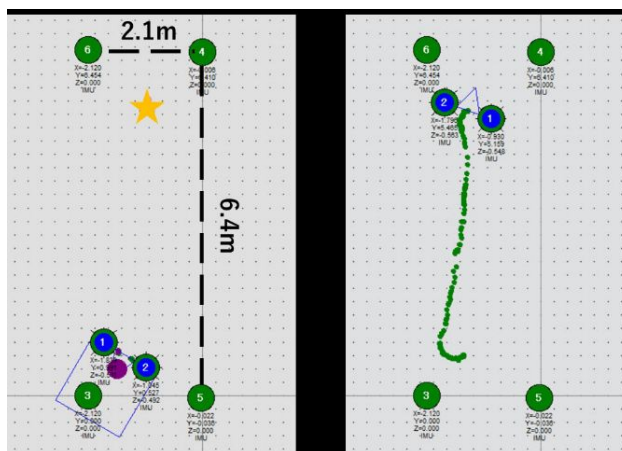


図6 超音波ビーコンによる自動走行地中レーダの走行精度評価

4.4 自動走行地中レーダによるAI学習用レーダ画像学習と内部構造可視化

前節のように、人手を介さずに地中レーダ探査ができるようになったことで、AIの学習に必要な地中レーダ画像を自動で大量生成することができる。これにより、走行させるごとにAIの識別精度の向上が期待できる。

本研究で開発した自動走行地中レーダによる実際の河川堤防の内部空洞調査の実証実験を図7のように実施した。図7のように河川堤防の法面を自動走行でき、内部の空洞等を3次元で可視化できるようになった。

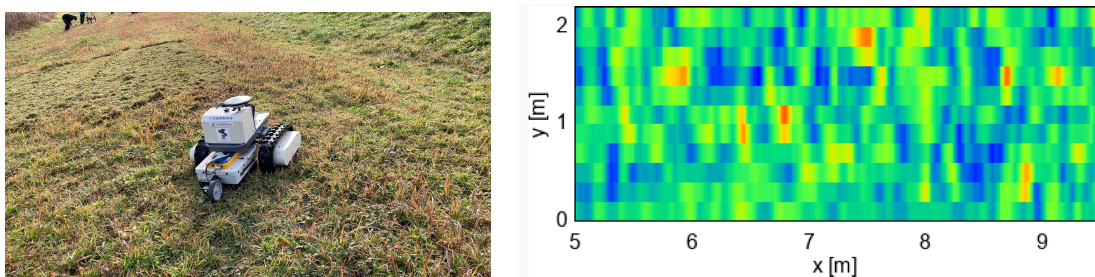


図7 自動走行地中レーダによる河川堤防空洞調査と3次元可視化の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 園田潤	4. 巻 69
2. 論文標題 AIと自動運転技術によるインフラ内部自動点検ロボット	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JETI	6. 最初と最後の頁 74-77
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 増田楓真, 園田潤
2. 発表標題 LiDARを用いた屋内外自動走行地中レーダの開発
3. 学会等名 2022電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 園田潤, 斎藤龍真, 佐々木匠, 林翔也, 増田楓真
2. 発表標題 高精度衛星測位を用いたクローラ型自動走行地中レーダの開発
3. 学会等名 2021電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林翔也, 園田潤
2. 発表標題 超音波ビーコンを用いた屋内外自動走行地中レーダの開発
3. 学会等名 2022電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 園田潤
2. 発表標題 地中レーダによる補修造影剤を用いた空洞亀裂検出と自律走行ロボットによるインフラ自動点検
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2022年大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 電磁波レーダ装置および電磁波レーダ装置の学習方法	発明者 園田潤, 木本智幸	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-42833	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 作業装置	発明者 園田潤, 石井智久	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-047098	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------