

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：51303

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02997

研究課題名(和文) 上空・地上の複合レーダと自律航法技術による大規模自然災害の効率的な搜索手法の開発

研究課題名(英文) Effective searching method with airborne and ground-penetrating radar and autonomous navigation techniques for large-scale natural disasters

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) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：東日本大震災のような大規模自然災害における行方不明者の工学的搜索手法を開発した。本研究では、上空からの航空機搭載レーダと地上での地中レーダにより広域の行方不明者搜索手法を提案し、実証実験として名取市閉上における東日本大震災の行方不明者搜索に適用した。この結果、数多くの物体を地中から検出し、本手法の有効性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We develop a effective searching method for large-scale natural disasters such as the Great East Japan Earthquake. In this study, a searching method with airborne and ground-penetrating radar is proposed for wide-area searching. Moreover the proposed method is applied to search for missing people of the Great East Japan Earthquake. It is shown that many underground objects are detected by the proposed method.

研究分野：電磁波工学

キーワード：地中レーダ 航空機搭載レーダ 自然災害 工学的搜索手法 人工知能 深層学習 ディープラーニング

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日の東日本大震災では現在でも2556名が行方不明であり、警察、海上保安庁、ボランティア団体等による捜索が続いているが、人海戦術によるものがほとんどであり工学的手法による効率化が必要であった。地中レーダは、地上から電波を入射し地中からの反射波により地下構造を推定する技術であり、このような大規模自然災害における行方不明者や遺留品の捜索支援にも適用できると考えられる。

2. 研究の目的

これまでに地中レーダによる瓦礫中の人体検出が検討されているが、不均質な瓦礫中からの人体検出は困難であり、実際にはほとんど使用されていなかった。一方、砂浜や津波の堆積物で覆われた大地は比較的均質であり、地中レーダが適用できる可能性がある。例えば、均質な雪中における地中レーダによる人体検出の研究も行われており、砂浜では地中レーダが有効に使用できる。我々は2013年3月から地中レーダを用いた行方不明者捜索を実施しているが、東日本大震災のような大規模自然災害では捜索範囲は広大であり、地中レーダのみでは効率的ではなかった。本研究では、Lバンド人工衛星・航空機搭載レーダによる上空からの探査と、地中レーダによる地上での精査を組み合わせた複合レーダによる大規模自然災害の捜索手法について提案し、宮城県名取市閉上において実証実験を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

地中レーダは図1のように地上から数百MHz帯の電波を入射し、地中の誘電率の変化により生じる反射波を地上で観測する技術である。このため、地中媒質の誘電率との差が大きく、かつ大きな物体ほど検出されやすい。砂浜の地中はおおよそ均質と考えられ、砂の比誘電率は4.0程度であり、探査対象の比誘電率は人体各組織でおおよそ20.0以上で、家屋の建材等も砂の比誘電率より大きいので検出可能であると考えられる。例えば、図1のように深さ50cm程度に埋めた鳥の骨は検出できる。地中レーダはピンポイントで地中物体を検出することができるが、広大な領域の探査には時間を要する問題がある。我々は広大な領域を探査するために、図2のJAXAのLバンド航空機搭載レーダPi-SAR-L2と地中レーダの組み合わせにより、航空機搭載レーダで上空から粗い探査を行い、反射が強い箇所を地上で地中レーダにより精査する複合レーダによる捜索手法を開発している。Pi-SAR-L2はLバンド全偏波の合成開口レーダであり、地中深さ数十cm程度は到達する。また、水平方向分解能が1.76mであることから、特に、津波の漂流物はある程度固まりで地中に沈下していることが考えられるので、Pi-SAR-L2で大きな固



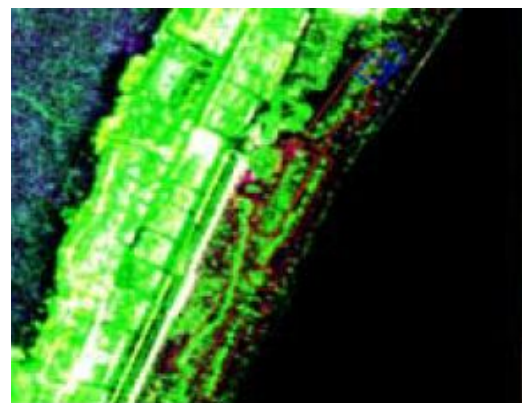
(a) 地中レーダの探査風景



(b) 鳥の骨のレーダ反射画像

図1 地中レーダと鳥の骨の反射レーダ画像

まりとして沈下している地中物体を上空から検出できると思われる。ここで、航空機搭載レーダの反射信号には、地表面と地中の物体両方が含まれるため両者の識別が必要になるが、本研究では無人航空機 UAV による地表面3次元復元とレーダ画像の差分をとることによりこれらを識別する。



(a) 航空機レーダ SAR 画像

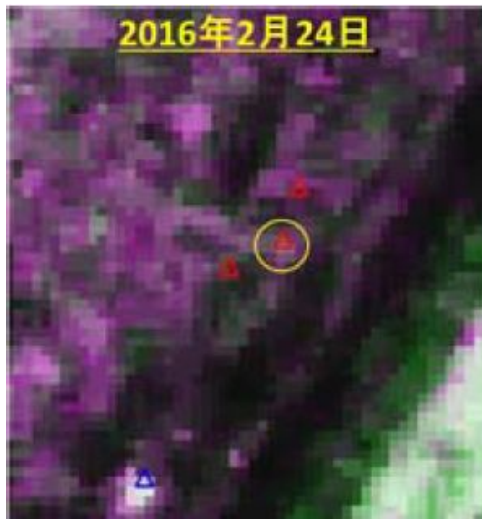


(b) 可視光画像

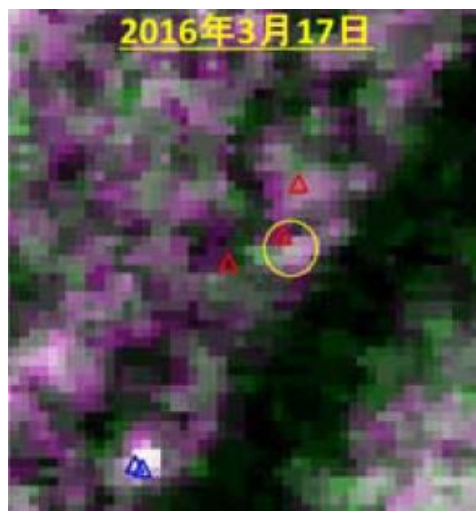
図2 航空機搭載レーダ画像と可視光画像

4. 研究成果

地中レーダと航空機搭載レーダによる広域地中探査を検証するために、宮城県名取市閑上浜において2016年2月24日と3月17日にPi-SAR-L2とUAV-SfMによる地中物体検出の同期実験を実施した。検出実験は、地中物体として1辺50cmの3面正方CR3個を入射角を合わせて上部が完全に埋まるように深さ70cm程度に設置し、同じものを1個地表に設置した。埋設したCR周辺の地表面をUAV Phantom 3 Professionalで動画撮影し、抽出した静止画から砂浜の3次元形状を復元する。図3に2月24日と3月17日に取得したPi-SAR-L2の全偏波画像を示す。HH赤、VV青、HV緑で示しており、赤色が埋設、青色が地表設置CRである。アメダスの記録では2月24日は4日前に14mm、3月17日は3日前に1.5mmの降水が記録されていることから、地中での減衰のため図3(a)は(b)に比べ反射が小さいが、図3(b)では埋設CR付近で反射が大きいたことが分かる。



(a) 2016年2月24日



(b) 2016年3月17日

図3 Pi-SAR-L2の全偏波画像



(a) UAVによるオルソ画像



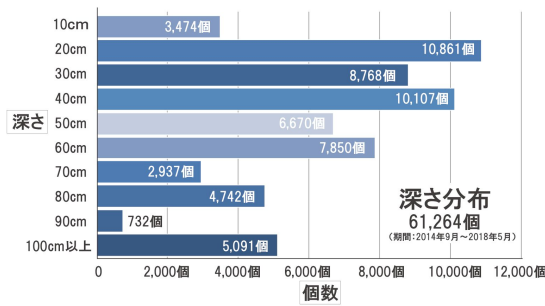
(b) SfMによる表面形状復元

図4. UAVによるオルソ画像とSfMによる表面形状復元

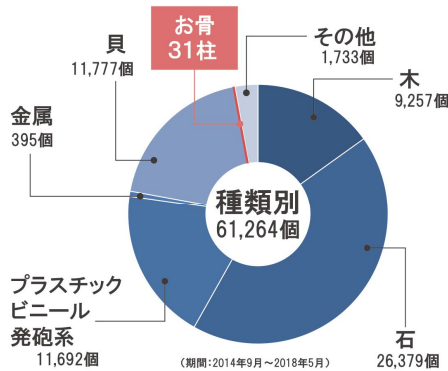
図4にUAVの空撮画像から生成したオルソ画像と、SfMで復元した地表面形状を表す点群を示す。図4(a),(b)から、図3の地表CR左上の反射の強い箇所は漂流物を集めた塊によるものであることが分かる。一方、埋設CR付近では地表面には大きな物体等は存在しないので埋設CRからの反射波が観測されたものと考えられる。地中レーダと航空機搭載レーダを用いた複合レーダ技術による広域地中探査を2014年9月から名取市閑上浜において東日本大震災の行方不明者捜索に適用している。図2のようにPi-SAR-L2のレーダ画像で反射が強い箇所を地中レーダで精査し、図1のような地中物体の可能性が高い箇所をボランティアが掘り出す方法で実施している。これまでに33回実施し、延べ818名で6,864m²の領域を捜索し、43,163個の物体を掘り出している。



図5 レーダ捜索で掘り出した地中物体の例



(a) 深さ毎の物体の個数



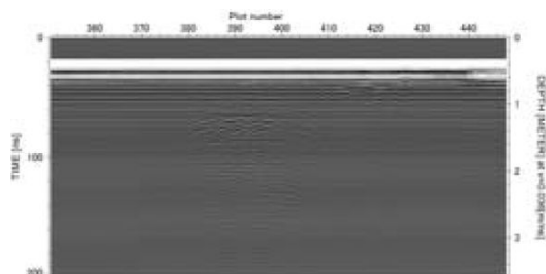
(b) 物体の種類と個数

図6 掘り出した物体の統計量

図5に掘り出した物体の例を示す。掘り出した物体の統計量として、図6(a)に掘り出した物体の深さと個数、(b)に種類と個数を示す。図6(a)から80%程度が深さ60cmからであり、(b)から多くが木・石・貝であったが、手がかりにつながるお骨は31柱であった。地中レーダのレーダ画像からは物体の有無は検出できるものの種類は特定できない問題があるが、現在ディープラーニングによるレーダ画像からの物体識別を試みている。



(a) 地中レーダによる海底探査の実際



(b) 海中レーダ画像

図7 地中レーダによる海底搜索

また、地中レーダにより関上広浦湾の海底探査も検討しており、海水は導電率も高く減衰が大きいためこれまで使用されておらず、実際に広浦湾の海水の複素比誘電率を測定した結果から導電率は5 S/m程度以上であったが、図7のように400 MHz帯の地中レーダにより深さ数m程度まで探査可能なことをFDTD法による理論計算とともに確認している。

謝辞

本研究を遂行するにあたり復興支援プロジェクト STEP ほかにボランティアの協力を得た。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計6件)

[1] 園田潤, 今野海航, 橋本瑞樹, 金澤靖, 佐藤源之, "屋内外シームレス電波環境解析のためのUAV-SfMによるFDTD実環境マルチスケール数値モデル構築", 電子情報通信学会論文誌B, pp.773-781, Sept. 2017.

[2] 園田潤, 昆太一, 佐藤源之, 阿部幸雄, "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, pp.302-309, Aug. 2017.

[3] 渡邊学, 米澤千夏, 園田潤, 島田政信, "L-band SAR(PALSAR-2)を用いた、広域データからの土砂災害域検出", 日本リモートセンシング学会誌, vol.37, no.1, pp.21-26, Jan. 2017.

[4] J. Sonoda, K. Kaino and M. Sato, "A Simple Approximation Formula for Numerical Dispersion Error in 2-D and 3-D FDTD Method", IEICE Trans. Electronics, vol.E99-C, No.7, pp.793-796, July 2016.

[5] R. Sato, K. Kaino and J. Sonoda, "Transmission Properties of Electromagnetic Wave in Pre-Cantor Bar: Scaling and Double-Exponentiality", IEICE Trans. Electronics, vol.E99-C, No.7, pp.801-804, July 2016.

[6] 今野海航, 園田潤, 金澤靖, 佐藤源之, "深度センサで構築したFDTD数値モデルの誤差が電磁界解析に及ぼす影響の定量評価", 電子情報通信学会論文誌C, Vol.J99-C, No.5, pp.243-246, May 2016.

〔学会発表〕(計34件)

[1] J. Sonoda and T. Kimoto, "Object Identification from GPR Images by Deep Learning Using FDTD Simulation with GPU Cluster", Proc. of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2018, Aug. 2018.

[2] 園田潤, 木本智幸, "ディープラーニング

による地中レーダの物体識別におけるシミュレーション画像と転移学習による実験画像の識別”,人工知能学会全国大会, June. 2018.

[3] 園田潤, 木本智幸, 橋本瑞樹, 金澤靖, “阿蘇山における地中レーダ探査と火山灰の複素比誘電率の周波数特性”, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, May 2018.

[4] 園田潤, 木本智幸, 橋本瑞樹, 金澤靖, “阿蘇山における地中レーダ探査と火山灰の複素比誘電率特性”, 電子情報通信学会 2018 年総合大会講演論文集, B-2-35, March 2018.

[5] 園田潤, 木本智幸, “ディープラーニングを用いた地中レーダ画像識別におけるシミュレーション画像と実験画像による識別特性”, 電子情報通信学会 2018 年総合大会講演論文集, CS-2-7, March 2018.

[6] 園田潤, “地中レーダによる海底探査と FDTD 法による海水中の電波伝搬解析”, 電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会, SANE2017-, pp.-, Jan. 2018.

[7] 古屋聡, 米澤千夏, 渡邊学, 園田潤, 金澤靖, “海岸における行方不明者および遺留品捜索のための GNSS 受信機の精度評価”, 地理情報システム学会 2017 年度学術研究発表大会, Oct. 2017.

[8] 園田潤, 木本智幸, “VGG 構造を一部に持つ CNN による地中レーダ画像からの物体識別”, 電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会, PRMU2017-91, pp.161-166, Sept. 2017.

[9] 園田潤, 木本智幸, “ディープラーニングによる地中レーダ画像からの物体の誘電率と大きさの識別”, 伝送工学研究会, Vol.2017, No.592-4, Sept. 2017.

[10] 園田潤, 木本智幸, “ディープラーニングを用いた地中レーダ画像の物体識別における多層化と高解像度化による識別特性”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, p.173, Sept. 2017.

[11] 園田潤, 渡邊学, 米澤千夏, 金澤靖, “複合レーダ技術を用いた大規模自然災害における地中・水中捜索手法の開発”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, pp.S7--S8, Sept. 2017.

[12] 橋本瑞樹, 松永竜太郎, 金澤靖, 園田潤, “ドローン映像からの砂浜などの形状に対する高精度なリアルタイム 3 次元復元” 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2017)DS-7, Aug. 2017

[13] 園田潤, 木本智幸, “ディープラーニングによる地中レーダ画像の物体識別特性”, 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会, EST2017-25, pp.89-94, July. 2017.

[14] 園田潤, 丹治紀彦, 海野啓明, 佐藤源之, 小幡常啓, 若原昭浩, “分割幅可変コントロール多層平板におけるマイクロ波帯の透過特性”, 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会, May, 2017

[15] 園田潤, 木本智幸, “ディープラーニングによる地中レーダ画像の物体識別”, 電子情報通信学会 2017 年総合大会講演論文集, CS-1-1, March 2017.

[16] 園田潤, 昆太一, 阿部幸雄, “GPU を用いた FDTD 法による電子メール物体推定支援システム”, 電子情報通信学会 2017 年総合大会講演論文集, C-15-13, March 2017.

[17] 園田潤, 渡邊学, 米澤千夏, 金澤靖, “大規模自然災害における Pi-SAR-L2 と地中レーダを用いた高効率な捜索支援手法の開発” 第 3 回 Pi-SAR-L2 ワークショップ, Feb. 2017.

[18] 園田潤, 木本智幸, “GPU クラスタを用いた FDTD 法による地中レーダ画像生成とディープラーニングによる地中レーダの物体識別”, 電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会, SANE2016-103, pp.41-46, March 2017.

[19] 園田潤, 渡邊学, 米澤千夏, 金澤靖, 郷右近巧, 五十嵐悟, 満留あゆみ, “地中レーダと航空機搭載レーダによる大規模自然災害の捜索手法開発と東日本大震災の行方不明者捜索への適用”, 日本災害情報学会第 18 回研究発表大会予稿集, pp.-, Oct. 2016.

[20] 園田潤, 木本智幸, “GPU クラスタを用いた FDTD 法による地中レーダ画像生成と CNN による物体識別システムの開発”, GTC Japan 2016, Oct. 2016.

[21] 園田潤, 渡邊学, 米澤千夏, 金澤靖, “L バンド航空機レーダと UAV-SfM による地中物体の検出実験” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, Sept. 2016.

[22] 園田潤, 今野海航, 金澤靖, 佐藤源之, “ディープラーニングによる地中レーダ物体識別のための GPU クラスタを用いた FDTD 法による学習用レーダ画像生成” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, Sept. 2016.

[23] 園田潤, 昆太一, 佐藤源之, “GPU で高速化した FDTD シミュレーションによる地中レーダを用いた鉄筋コンクリート下の異常箇所検出特性”, 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会技術報告 EST2016-44, pp.181-186, Sept. 2016.

[24] R. Matsunaga, M. Hashimoto, Y. Kanazawa, and J. Sonoda, “Accurate 3-D reconstruction of sands from UAV image sequence,” Proc. of 2016 ICAICTA, Aug. 2016. (査読付き)

[25] 園田潤, 今野海航, 橋本瑞樹, 金澤靖, 佐藤源之, “屋内外シームレス電波環境解析のための UAV-SfM による FDTD 実環境マルチスケール数値モデル構築”, 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会技術報告 EST2016-39, pp.175-180, July. 2016.

[26] 渡邊学, 米澤千夏, 園田潤, 大木真人, 富井直弥, 島田政信, “L-band SAR(PALSAR-2)を用いた、広域データからの建物倒壊域・土砂災害域検出”, 日本リモー

トセンシング学会 第 60 回 (平成 28 年度
春季) 学術講演会, May 2016.

[27] 渡邊学, 米澤千夏, 園田潤, 大木真人,
富井直弥, 島田政信, "L-band
SAR(PALSAR-2)を用いた、広域データから
の建物倒壊域・土砂災害域検出", JpGU 2016,
May 2016.

[28] 園田潤, 今野海航, 橋本瑞樹, 金澤靖,
佐藤源之, "屋内外シームレス電波環境解析の
ための SfM や深度センサによる FDTD 実環
境マルチスケール数値モデル構築", 電子情報
通信学会総合大会講演論文集 BCS1-3,
March 2016.

[29] 園田潤, 昆太一, 佐藤源之, "地中レー
ダを用いた鉄筋コンクリート下の異常箇所
検出の FDTD シミュレーション", 電子情報
通信学会総合大会講演論文集 C-15-17,
March 2016.

[30] 園田潤, 渡邊学, 米澤千夏, 金澤靖, "地
上・上空の複合レーダによる大規模自然災
害の搜索手法の開発" 電子情報通信学会ソサ
イエティ大会, Sept. 2015.

[31] 園田潤, 今野海航, 金澤靖, 佐藤源之, "深
度センサを用いた複数の物体が存在する
複雑な室内実環境 FDTD 数値モデル構築"
電子情報通信学会ソサイエティ大会, Sept.
2015.

[32] 我妻達也, 園田潤, "UAV で空撮した
動画と SfM による FDTD 数値モデル構築の
精度検討", 平成 27 年度電気関係学会東北支
部連合大会講演論文集, Aug. 2015.

[33] 園田潤, 今野海航, 金澤靖, 佐藤源之, "深
度センサで構築した FDTD 数値モデルの
誤差が電磁界解析に及ぼす影響の定量評価",
電子情報通信学会電磁界理論研究会技術報
告 EMT2015-21, pp.71-75, July. 2015.

[34] 渡邊学, 米澤千夏, 園田潤, "L-band SAR
データを用いた、東日本大震災津波による砂
浜埋設遺留品搜索の試み", 日本リモートセン
シング学会第 58 回 (平成 27 年度春季) 学術
講演会, Sept. 2015.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

名称: 状態推定支援方法および計算機

発明者: 園田潤

権利者: 園田潤

種類: 特許

番号: 特願 2016-228381

出願年月日: 平成 28 年 11 月 24 日

国内外の別: 国内

名称: 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

発明者: 園田潤, 木本智幸

権利者: 園田潤, 木本智幸

種類: 特許

番号: 特願 2016-173205

出願年月日: 平成 28 年 9 月 5 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

渡邊学 (WATANABE, Manabu)

東京電機大学・理工学部・研究員

研究者番号: 10371147

金澤靖 (KANAZAWA, Yasushi)

豊橋技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 50214432

米澤千夏 (YONEZAWA, Chinatsu)

東北大学・農学研究科・准教授

研究者番号: 60404844

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし