

令和元年6月10日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26249058

研究課題名(和文) 圧縮センシングと最適空間サンプリングによる地雷検知用レーダ・イメージングの効率化

研究課題名(英文) Optimization of Spatial Sampling and Radar Imaging for GPR for landmine detection

研究代表者

佐藤 源之 (Sato, Motoyuki)

東北大学・東北アジア研究センター・教授

研究者番号：40178778

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 25,100,000円

研究成果の概要(和文)：熊本県南阿蘇村にフルポーラリメトリGB-SARを設置し、地滑りモニタリングを行いつつ大気補正法を提案した。1次元、2次元のMIMO型GB-SAR装置を試作し、2次元、3次元のイメージング実験を行った。データ取得は1秒間に100回程度行え、干渉SAR画像で2次元的な振動の計測・画像化に成功した。また一部の画像化にCSを取り入れ、虚像の発生を抑えるアルゴリズムを開発した。地雷除去センサALISのデータ取得とイメージ再構成を高速で実行するソフトウェアを開発し、ALIS装置2台をカンボジア政府に貸与し、2018年1月よりカンボジア地雷除去対策センタ(CMAC)によって、実地雷原での運用が開始した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

GPRならびにGB-SARという新しいレーダ技術の開発、更にコンプレッシブセンシング(CS)などの新しいアルゴリズムを2つのレーダ装置に実装し、レーダイメージングの性能を飛躍的に高める可能性を本研究では提示できたことに学術的意義が高い。更にカンボジアにおける人道的地雷除去活動へ開発したシステムを導入し、実際の地雷除去活動を開始した。また熊本地震被災地における地滑りモニタリングにフルポーラリメトリGB-SAR装置を設置、長期モニタリングを行い、そのデータを利用した早期警戒警報システムを整備し、現場への情報提供を実際に開始した。こうした人道的な目的にレーダ技術を応用することの社会的意義は高い。

研究成果の概要(英文)：A full-polarimetric GB-SAR was installed at Minami-Aso, Kumamoto, and used for landslide monitoring, and atmospheric correction method was investigated. 1-D and 2-D MIMO GB-SAR was developed, and 2D and 3D imaging was achieved. About 100 images can be acquired per second, and 2D vibration imaging was achieved by In-SAR method.

A new data acquisition and processing algorithm was developed for landmine detection sensor ALIS, and 2 units of ALIS was rented to the Cambodian government, and CMAC (Cambodian Mine Action Centre) started operation in mine fields in January 2019.

研究分野：電波応用工学

キーワード：GPR GB-SAR CS ALIS 人道的地雷除去 地滑りモニタリング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究代表者はイメージング・レーダを応用した環境計測、減災・防災技術への応用に関する研究を行ってきた。地雷検知用地中レーダ ALIS は、カンボジア政府に 2 台のシステムを供与し、2009 年以来 80 個近くの地雷を検知・除去し、20ha 以上の農地を農民に返還した。また、宮城県栗原市役所と共同して荒砥沢大規模地滑り地域に設置した地表設置型合成開口レーダ (GB-SAR) で 2012 年以来継続的に干渉計測により地滑りの早期警戒に利用している。また 8 台の地中レーダを合成したアレイ型地中レーダ装置を 2013 年に開発し、津波被災者捜索や被災地における住宅建設推進のための遺跡調査を宮城県、福島県文化財保護課と実施している。

これらのレーダ技術はアンテナを移動しながらデータを取得しレーダ・イメージを信号処理によって再構成する「合成開口レーダ：Synthetic Aperture Radar: SAR」である。衛星 SAR では地球を周回しながら計測を行い、地表イメージを処理・合成するのに数分から数時間かかって問題はないが、地上で計測を行うレーダシステムでは、データ取得とイメージングを行う処理時間の短縮が強く望まれる。

SAR はデータ取得の間隔が計測時間に反映し、またイメージングの精度を向上させるために、データ処理時間が長くなる。この問題を解決するために、最近注目されている手法が「圧縮センシング：Compressive Sensing：CS」技術である。CS 技術をレーダ・イメージングに導入することで、疎な計測データを利用しながら対象物の形状を高精度にイメージングできることが示されている。研究代表者は、科研費基盤(A)において、CS を地雷検知用地中レーダ ALIS で取得したカンボジア実地雷原でのデータに利用することで、従来の 50% 程度の計測データを利用しながら、フーリエ変換に基づく従来手法より高精度な地雷のイメージングが可能な事を実証した。

本研究では CS に代表される信号処理技術を利用し、レーダ・イメージングの性能向上をめざすことを目標とした。

2. 研究の目的

地雷検知用センサとして世界で唯一画像化可能な地中レーダを利用した ALIS の開発とカンボジアにおける地雷除去実活動を通じた実践的経験に基づき、空間的なデータの効率的な取得法とそれを組み合わせた CS 法に代表されるナイキスト原理に拘束されないレーダ画像再構成アルゴリズムを開発し、3 次元レーダ・イメージングの効率的な信号処理理論を進展させる。

更に地滑り計測に利用している地表設置型合成開口レーダ (GB-SAR) や遺跡調査用アレイ型 GPR など減災・防災に関わる大量データに対する高速なイメージング法として CS 法の適用をめざすのと同時に、大気補正を行うサブトラック法の実用化を進める。

以上 2 つの課題を核とし、合成開口レーダの効率的なイメージング手法の開発を進める。

3. 研究の方法

(1) GB-SAR を利用した最適サンプリング手法の開発

SAR において、いかにナイキスト定理の制限を超えた、疎なデータサンプリングにより同等の画像再構成が可能かについて、データ取得と再構成がより簡便な地表設置型合成開口レーダ (GB-SAR) を利用した模擬実験と、アルゴリズムの開発を行う。従来手法は、等間隔でサンプルされたデータに対するイメージング手法が多かった。本研究ではデータのランダムサンプリングと、イメージング手法の組み合わせが鍵であると考えている。原理的な実験を研究室が所有する室内で計測可能な GB-SAR 装置を用いて行う。高密度のデータサンプルと、ランダムなデータ抽出によって最適な画像化について検討する。

(2) GB-SAR の CS 法によるイメージング

レーダデータのイメージング手法として、Stoltz 法による高速イメージングと、CS 法による高精度イメージングの 2 つの手法を開発する。いずれの手法も、汎用的に地中レーダ (GPR) や GB-SAR に利用できる手法であり、その場合にクラッタの高い環境での安定したイメージング手法の開発が必要である。本手法に対し、既にベイズ定理を導入した CS 法などを検討してきており、これらの成果を進展させる。

(3) 地滑りのモニタリングへの GB-SAR の利用と大気補正

我々は 2012 年 6 月より宮城県栗原市荒砥沢に設置する GB-SAR 装置で地滑りモニタリング

を開始した。実データを連続的に取得することで、インターフェロメトリ処理における位相精度に関して、大気補正の必要性を定量的に検討した。また従来、振幅の安定性から干渉相関性の高い地点を検知していたが、データのランダムサンプリングを行ったサブイメージの作成で即時性のある干渉相関点の検出法を新たに提案し、特許出願を行った。従来大気補正を行うために利用されている PSinSAR の手法は、時系列的に多数のイメージを取得して、その中から干渉性の高い地点(PS)を検出し、それを基準に電波伝搬遅延を推定する手法であった。

これに対して我々が考案した手法は1回の計測で得られたレーダ・イメージを分割して作成したサブブロック・イメージの独立性を利用して、干渉点を検出する手法である。この手法は定点で、密度の高いデータのサンプリングが可能な場合に適用できる手法であり、地表設置型合成開口レーダ(GB-SAR)や地中レーダ(GPR)のように、計測対象が動かない合成開口レーダ手法に、非常に良く適合する。本研究では、この手法を発展させ、大気補正だけでなく、地中媒質の主として水分率による不均質をレーダ・イメージングにおいて補正する手法にまで発展させる。

(4) 地雷検知センサ ALIS への CS の利用

我々が開発した地雷検知装置 ALIS は地雷のイメージングを主体として地雷識別を行うが、データは操作員がアンテナを手動で走査しながら取得するため、非常にランダムな位置でのデータが得られる。このデータに、コンプレッシブ・センシング(CS)の手法を利用したイメージングを試みたところ、原理的なイメージングが可能な事を実験データで証明できた。

CS などの信号処理手法を積極的に導入し、地雷検知レーダ ALIS の高速画像化を図る。

4. 研究成果

(1) GB-SAR を利用した最適サンプリング手法の開発 (文献 4,5,6,7,10)

スパースアレイ、MIMOGB-SAR の概念を取り入れた1次元ならびに2次元のMIMO型GB-SAR装置(図1)を試作し、2次元ならびに3次元のイメージング実験を行った。MIMO型であるため、データ取得は1秒間に100回程度行え、SAR画像間の位相から干渉SAR画像を構成することができ、2次元的な振動の計測・画像化に成功した。図2は建物を2次元MIMO型GB-SARで3次元可視化した例である。

(2) GB-SAR の CS 法によるイメージング (文献 1,2,3,5,8,9)

また一部の画像化にCSを取り入れ、虚像の発生を抑えるアルゴリズムを開発した。

(3) 地滑りのモニタリングへの GB-SAR の利用と大気補正 (文献 11)

熊本県南阿蘇村に2017年1月に東北大学が設置したGB-SARを利用し、地滑りの長期的なモニタリングを行いつつ、学術的な研究にデータを利用してきた。本装置はフルポーラリメトリのデータを取得できることから、特徴を活かしたデータ処理として大気補正への利用を提案した。GB-SARで干渉SAR画像を構成する場合、大気中の湿度、温度、気圧の変化により電波伝搬速度が変化するため、対象物の変位と大気の影響による位相変化の区別がつかない。そのため、一次元の位相変化プロファイルの平均値を差し引き、局所的な位相変化のみを取り出す大気補正法が一般に利用されてきた。これに対して本研究ではフルポーラリメトリで取得されるHH、HV、VV偏波の相互には、大気の等方性から大気の影響による位相差は生じないとした仮定の下、観測される偏波相互間の変化が計測対象物の反射メカニズムの変化によるものであるとして検知したところ、従来手法と良い一致を見た。つまり、大気補正を行わずに対象物の変異を検知できる可能性を示した。

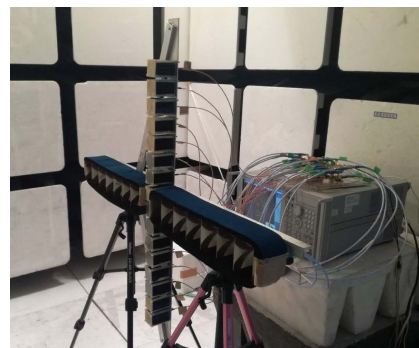


図1 MIMO型GB-SAR試験装置と2次元クロスアレイアンテナ

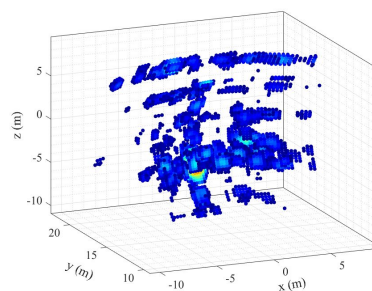


図2 MIMO型GB-SAR試験装置にブロックCSアルゴリズムの導入で得られた3次元画像[5]

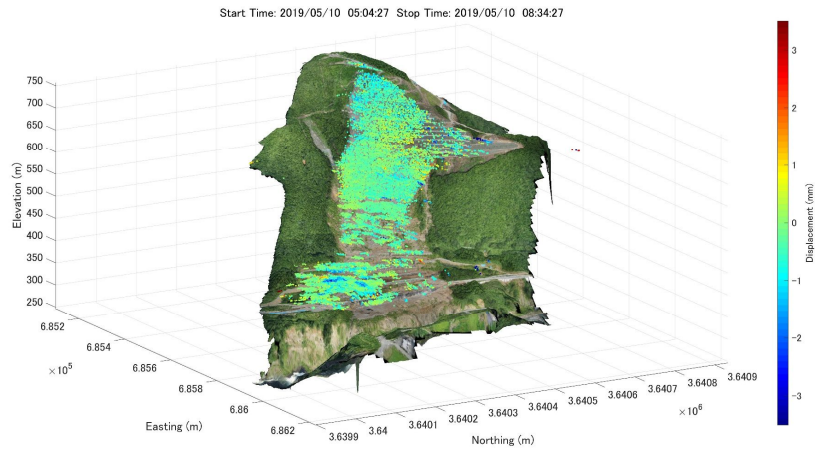


図3 南阿蘇村立野地区差分干渉 SAR 画像 (地表面の変位)

(4) 地雷検知センサ ALIS への CS の利用 (文献 12, 13)

地雷除去センサ ALIS に関しては加速度センサを利用したアンテナ位置追尾アルゴリズムを開発し、データ取得とイメージ再構成を高速で実行するソフトウェアを開発した。

本研究では合成開口レーダのイメージングに圧縮(コンプレッシブ)・センシング(CS)法を導入することでこの問題の解決をめざした。CS は信号の Sparsity (空疎性)を利用して、こうした限界を打破する技術である。地雷は比較的疎に埋設されており、1組のレーダデータには数個のターゲットしか含まれないから CS を適用する条件を満たしている。しかし地雷は点散乱体ではなく、また非常に強いクラッタ環境下であるため、CS の適用は容易ではない。

そこで本研究では Model based CS 法の導入を提案した。Model based CS 法は他の CS 法に比べてモデルに適合する対象を的確に推定できる。更に地雷からの電波散乱を幾つかのピクセルからの散乱の集合と見なすブロック構造を導入することで埋設地雷のイメージングに成功した。提案手法は実験室データだけでなく、東北大学がカンボジア実地雷原で取得した実データへも適用することでその有効性を検証した。この研究をまとめた論文[13]は電子情報通信学会論文賞、喜安善市賞を受賞した。開発したソフトウェアを搭載した ALIS2 台は、2018 年 1 月よりカンボジア地雷除去対策センタ(CMAC)によって、実地雷原での運用が開始された。



図4 ALIS のカンボジア地雷原での活動

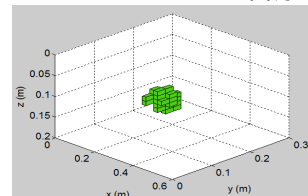


図5 Model based CS 法でイメージングした地雷 (カンボジアでデータ取得)

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 18 件)

Weike Feng, Jean-Michel Friedt, Grigory Cherniak, and Motoyuki Sato, "Batch compressive sensing for passive radar range Doppler map generation," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2019, DOI: 10.1109/TAES.2019.2897474.

Weike Feng, Jean-Michel Friedt, Grigory Cherniak, and Motoyuki Sato, "Passive radar imaging by filling gaps between ISDB digital TV channels," *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, 2019, DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2891114.

Weike Feng, Jean-Michel Friedt, Zhipeng Hu, Grigory Cherniak, and Motoyuki Sato, "Direct path interference suppression for short range passive bistatic SAR imaging based on atomic norm

minimization and Vandermonde decomposition,” *IET Radar Sonar Nav.*, 2019, DOI: 10.1049/iet-rsn.2018.5214.

Weike Feng, Jean-Michel Friedt, Giovanni Nico, and Motoyuki Sato, “Three-dimensional ground based imaging radar based on C band cross-MIMO array and tensor compressive sensing,” *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2019, DOI: 10.1109/LGRS.2019.2906077.

Weike Feng, Giovanni Nico, and Motoyuki Sato, “GB-SAR Interferometry based on dimension-reduced compressive sensing and multiple measurement vectors model,” *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 16, no. 1, pp. 70-74, Jan. 2019.

Weike Feng, Jean-Michel Friedt, Gwenhael Goavec-Merou, and Motoyuki Sato, “Passive radar delay and angle of arrival measurements of multiple acoustic delay lines used as passive sensors,” *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 2, pp. 594-602, Jan. 2019.

A. Lyulakin, I. Chernyak, M. Sato, “Optimization of a sparse array antenna for 3D imaging in near range,” *IEICE Transactions on Electronics*, E102-C(1), pp1-5, 2019.

Weike Feng, Jean-Michel Friedt, Giovanni Nico, and Motoyuki Sato, “Passive bistatic radar using digital video broadcasting–terrestrial receivers as general-purpose software-defined radio receivers,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 89, no. 10, p.104701, Oct. 2018.

Weike Feng, Li Yi, and Motoyuki Sato, “Near range radar imaging based on block sparsity and cross-correlation fusion algorithm,” *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, vol. 11, no. 6, pp. 2079-2089, June 2018.

Iakov Chernyak and Motoyuki Sato, “Near Range Radar Image Reconstruction Algorithm by Weighted Envelopes Transformation,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 15(10), pp1515-1519, 2018, 10.1109/LGRS.2018.2846763

佐藤 源之・鄒 立龍・菊田和孝, “南阿蘇村立野地区における GB-SAR による地滑りモニタリング.[国際火山噴火史情報研究集会,] 講演要旨集, pp84-96, 2018.

高橋 一徳、佐藤 源之, “金属探知機に対する土壌の影響と地雷探知性能の評価,” *電子情報通信学会論文誌 C*, J100-C(12), pp589-596, 2017.

Riafeni Karlina and Motoyuki Sato, “Model-Based Compressive Sensing Applied to Landmine Detection by GPR,” *IEICE Transactions on Electronics*, E99-C(1), pp44-51, 2016. (2017 年電子情報通信学会論文賞、喜安善市賞受賞)

〔学会発表〕(計 25 件)

M. Sato, K. Kikuta, “Image Reconstruction and Processing Algorithm of GPR for Humanitarian Demining Sensor ALIS,” *ICEAA2018*, 2018.

M. Sato, K. Kikuta, Evaluation of ALIS GPR for Humanitarian Demining in Colombia and Cambodia,” *ICEAA2018*, 2018.

中谷匡志、大沼和弘、宇津木慎治、佐藤 源之, “大規模土工事における地表設置型合成開口レーダを利用したのり面計測,” *土木学会第 73 回学術講演会*, VI-676, 1351-1352, 2018.

Kazutaka Kikuta, Motoyuki Sato, “Handheld Bistatic Subsurface Radar Using Accelerometer,” *.PIERS2018*, 2018.

Motoyuki Sato, “Evaluation test of Dual sensor ALIS for landmine detection in Cambodia,” *.PIERS2018*, 2018.

〔図書〕(計 3 件)

佐藤 源之 (大内和夫 編著) *レーダの基礎 (分担 地中レーダ)*. コロナ社, 2017.

ISBN978-4-339-00894-4

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称：位置検出装置および位置検出方法

発明者：佐藤 源之、菊田 和孝

権利者：東北大学

種類：特許

番号：特願 2017-116337

出願年：2017

国内外の別：国内、国外

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：高橋 一徳

ローマ字氏名：(TAKAHASHI Kazunori)

所属研究機関名：東北大学

部局名：東北アジア研究センター

職名：助教

研究者番号(8桁): 60431475

研究分担者氏名：園田 潤

ローマ字氏名：(SONODA Jun)

所属研究機関名：仙台高等専門学校

部局名：総合工学科

職名：教授

研究者番号(8桁): 30290696

研究分担者氏名：菊田 和孝

ローマ字氏名：(KIKUTA Kazutaka)

所属研究機関名：東北大学

部局名：東北アジア研究センター

職名：助教

研究者番号(8桁): 70801249

研究分担者氏名：ゾウ リーロン

ローマ字氏名：(ZOU Lilong)

所属研究機関名：東北大学

部局名：東北アジア研究センター

職名：助教

研究者番号(8桁): 00795859

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。