

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23246076

研究課題名(和文)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)Development of Radar Imaging by Compressive Sensing and Spatial Sampling

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) 34,900,000円、(間接経費) 10,470,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、少ないデータで効率的にレーダ・イメージングを行うためにコンプレッシブ・センシング(CS)や、効率的なデータの内挿などを開発した。カンボジアで取得した実データに開発したModel Based CS Imaging アルゴリズムを適用し高分解のイメージを得た。またカンボジアにおいて2台のALISにより地雷・不発弾を83個、44ヘクタールの農地を地雷除去し、農民に返還する実績を挙げた。宮城県・荒砥沢に設置するGB-SAR装置による地滑り計測のインターフェロメトリ処理で大気補正を定量的に検討した。ランダムサンプリングによるサブイメージで、即時性のある干渉相関点を検出する手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：We developed effective radar imaging technologies using less numbered sampled data set with imaging algorithm including Compressive Sensing (CS), and data interpolation. We applied the Model Based CS algorithm to the real GPR data sets acquired in Cambodia Mine fields, and found it gives higher resolution image. 2 ALIS systems have detected 83 buried landmines and UXO in Cambodia, and we have cleared 44ha mine contaminated field. We evaluated the atmospheric effect in the interferometric analysis of GB-SAR system for land slide monitoring, and proposed sub-image method to detect coherent radar points.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：合成開口レーダ処理 コンプレッシブ・センシング 人道的地雷除去 ALIS 大気補正 データ内挿

1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは人道的地雷除去を目的とした地中レーダシステム ALIS を開発し、カンボジアにおいて実展開してきた。

この成果は、センサ位置情報を電波計測技術に導入することで達成した技術的ブレークスルーに依るものであり、信号の画像化や合成開口レーダ(SAR)が有効に利用されている。こうした基礎技術に基づき、本研究では信号処理による画像化機能を加えた電波計測技術を積極的に減災技術へ応用することを目標とし、これを「電波イメージング科学」として推進することをめざした。

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手法を確立する。

地雷のような孤立したターゲットの計測に、ナイキスト原理に拘束されるフーリエ変換に基づかない超解像度イメージング手法を取り入れる。こうした新しい手法は、粗いデータサンプリングから高精度な画像再構成を可能にするからデータ計測の高速化、低廉な装置によるシステムの実現などにつながる。

研究成果はカンボジアをはじめとする地雷除去活動への応用を試みる。加えて異なるレーダシステムでも、より一般的なレーダ・イメージングへの応用に展開する。

3. 研究の方法

- (1) 超解像イメージングの GPR への適用やランダムな位置で取得されたデータに対する合成開口レーダ・イメージングの適用検討を行い、より効率的な埋設物検知のためのアルゴリズムを開発する。
- (2) こうしたアルゴリズムを既にカンボジアで稼働実績をもつ我々が開発した人道的地雷除去用センサ(ALIS)へ導入する。その上でカンボジアを主体とする地雷被災国において、改良 ALIS の実展開によるデータ取得と技術評価を行う。一方、次世代のセンサ開発を狙い、地中レーダに利用できる簡便なセンサ位置追跡技術の改良を行う。
- (3) 開発した手法を不整地での地中レーダや、地表設置型合成開口レーダ(GB-SAR)などへ適用していく。

4. 研究成果

(1) コンプレッシブ・センシング(CS)と地雷検知用センサ ALIS への応用

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。カンボジアで取得した実データに、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。図1はカンボジアでALISがデータを取得する状況であり、図2にはアンテナの軌跡を示している。軌跡の各点でレーダデータが取得されている。図3は、このデータを全て使用して従来のフーリエ変換に基づく再構成を行った図である。地雷がイメージングできているが解像度が十分ではない。



図1 ALISの運用 (カンボジア)

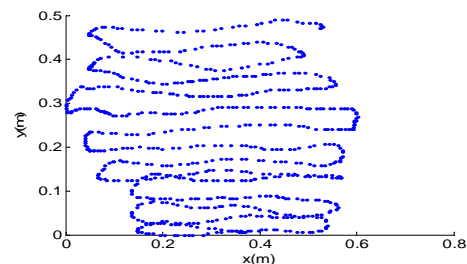


図2 ALISのデータ取得点

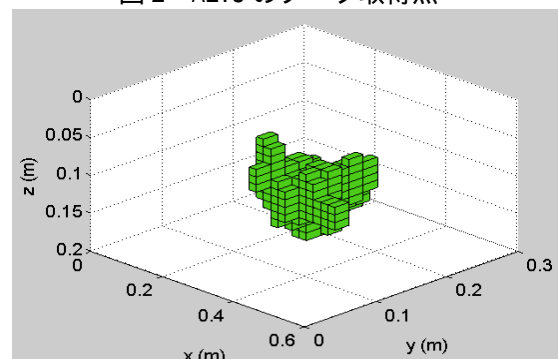


図3 フーリエ変換に基づく再構成画像 (100% データ使用)

ここでは図2に示すように、レーダデータはおよそ2cm間隔で取得されているが、このデータを約50%間引いて、本研究で開発したModel Based CS Imaging アルゴリズムで像の再構成を行った結果を図4に示す。CSの利用により従来より疎なデータサンプリングであるのも関わらず、従来法より高分解のイメージが得られている。

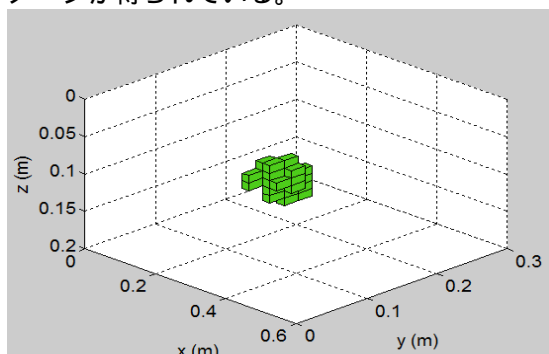


図4 Model Based CS 法による再構成画像 (50% データ使用) ($K=1$)

(2) GB-SAR を利用した最適サンプリング手法の開発

SARは通常衛星に搭載され、地上の観測を行うリモートセンシングに使われているがGB-SAR (地表設置型合成開口レーダー) は地表に設置した合成開口レーダー装置であり、地表面や崖面の画像を3次的に作成するのに利用している。本研究ではまず室内実験用GB-SAR装置を試作し、空中に置かれた金属球をイメージングする実験で、CS (コンパクトセンシング) 手法の適用を試みた。理論計算と照合しながら、CSにより、データ取得量をナイキスト制限の10%程度にしても十分な像再構成が可能であることを示した。

(3) 地滑りモニタリングへのGB-SARの利用

我々は岩手・宮城内陸地震によって発生した地滑りで被災した車両の捜索を現地で行うなど、宮城県・栗原市と協力して実践的な電波科学による防災・減災技術の検証を行ってきた。栗原市では同市荒砥沢地域の犬崩落現場をジオパークとして保存することなどを想定しながら、2次災害防止のための崖面モニタリングの方法について検討していたが、GB-SARがこの目的にふさわしいことが分かった。東北大学は栗原市と連携協力協定を締結し、GB-SARによる地滑り計測手法の有効性を検証する目的で、荒砥沢地区をモデルケースとしたリアルタイム連続モニタリングシステムを2011年11月に設置した。GB-SARによる崖面モニタリングでは高さ100m、幅400m程度の範囲を繰返し計測する。栗原市の現場試験では0.2mm程度の変化が捉えられている。

2012年6月より荒砥沢に設置するGB-SAR装置による連続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た。本手法は特許出願中である。

(4) 人道的地雷除去用センサの実展開

地雷被災国カンボジアにおけるALISの実展開をカンボジア地雷除去センターCMACと共同で続けている。人道的地雷除去への実践的な応用カンボジアで展開しているALISによる地雷除去活動に関して、本研究の成果を活用した活動の効率化を図った。また、装置開発やALISのより多くの地雷被災国における展開に関して、外務省、JICAまた現地機関との交渉を継続した。2台のALISをCMAC隊員により運用し、これによって地雷・不発弾を83個、44ヘクタールの農地を地雷除去し、農民に返還する実績を挙げた。

(5) GPR データサンプリング密度の検討

従来型の地中レーダ(GPR)を利用し、データ取得密度と再構成されるイメージの精度を理論的ならびに実験的に検討した。ここでデータの有効な内挿手法と3次元SAR処理を利用した。

特に我々が開発してきた3DGPRの効率化高精度な位置情報と同時にレーダ信号を取得する3DGPR装置を利用しGPR手法の効率化を行うための検討を行った。データ取得数と、これによるイメージングの精度に関して系統的な検討を行った。これにより、従来の経験則によるデータ取得数より、数分の1程度のデータでも、イメージ再構成が可能なおあることを示した。図5に市販地中レーダを利用して1.2m x 2.4mの範囲で取得したデータを間引いたデータポイントを示す。

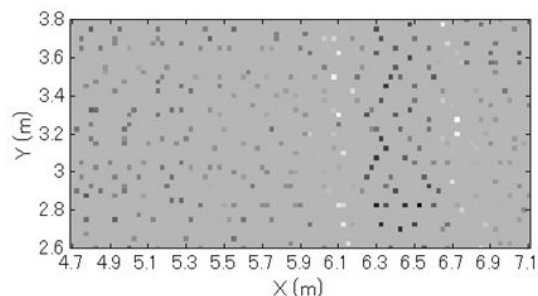


図5 データ取得点

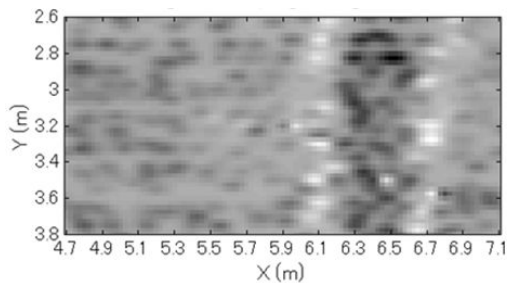


図6 深度80cmにおける生データ

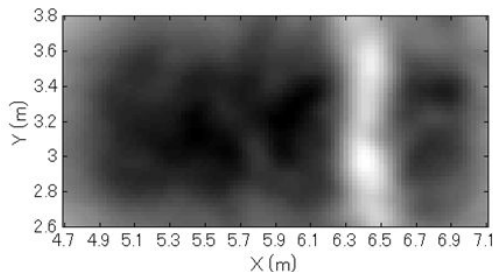


図7 内挿したデータに対してマイグレーション処理を行って得られた深度80cmにおけるイメージ

図6には、信号処理をしない生データを深度80cmの水平面で示しているがデータが疎であるため、イメージは粗い。このデータに対して、信号の補間を行った上で、3次元合成開口処理した結果が図7である。埋設管を明瞭にイメージ化している。本研究により、現実的なGPR計測で、データサンプリング間隔を粗くしても、適切な信号処理で3次元画像の再構成が可能な事を示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)(すべて査読有り)

- [1] 高橋一徳, 岡村菜花, 佐藤源之, “偏波GB-SARによるコンクリート壁内部損傷の非破壊センシングのための基礎実験,” 電気学会論文誌 A, 134 4, 166-172, 2014.
- [2] H. Liu, M. Sato, “Determination of the phase center position and delay of a Vivaldi antenna,” IEICE Electronics Express, Vol 10, No.21, 1-7, 2013 DOI: <http://dx.doi.org/10.1587/elex.10.20130573>
- [3] K. Takahashi, M. Matsumoto and M. Sato, “Continuous Observation of Natural-Disaster Affected Areas Using Ground-Based SAR Interferometry,” IEEE JSATRS, vol.6, no.3, 1286 – 1294, June 2013. DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2249497
- [4] Motoyuki Sato, Yuya Yokota, “ALIS : GPR System for Humanitarian Demining and Its Deployment in Cambodia,” Journal of the Korean Institute of Electromagnetics Engineering and Science, Vol 12 No.1 pp56-62, 2012.
- [5] Khamis Mansour, Motoyuki Sato, “Subsurface fracture characterization using full polarimetric borehole radar data

analysis with numerical simulation validation,” Exploration Geophysics, 43, 125-135, 2012. DOI:10.1071/EG11040

〔学会発表〕(計28件)(すべて査読有り)

- [1] 佐藤源之・高橋一徳, “墳丘の地中レーダによる遺跡調査,” 電子情報通信学会宇宙航行エレクトロニクス研究会, 2013年11月22日、仙台
- [2] Yi, L., Takahashi, K., and Sato, M., “Investigation on 3D migration of non-gridded GPR data,” 電子情報通信学会宇宙航行エレクトロニクス研究会, 2013年11月22日、仙台
- [3] K. Takahashi and M. Sato, “Imaging of buried structures by a GPR combined with a self-tracking total station,” The 11th SEGJ International Symposium, 2013年11月18日、横浜
- [4] Hai Liu, Jie Chen, Lilong Zou, Kazunori Takahashi and Motoyuki Sato, “Development of an Array GPR System for Large-scale Archeological Investigations,” 11th SEGJ International Symposium, 2013年11月18日、横浜
- [5] Yi, L., Takahashi, K., and Sato, M., “Archaeological Survey of Dangoyama Kofun by 3DGPR,” proceeding of the 11th SEGJ International Symposium, 2013年11月18日、横浜
- [6] K. Takahashi, M. Sato, “3D GPR survey of an ancient tomb using a self-tracking total station,” Near Surface Geophysics Asia Pacific Conf., 2013年7月17日、中国、北京
- [7] Riafeni Karlina, Motoyuki Sato, “Compressive Sensing Applied for Handheld GPR Sensor System for Landmine Detection,” 電気学会電磁界理論研究会, 2013年6月14日、東京
- [8] H. Liu, X. Xie, and M. Sato, “New Ground Penetrating Radar System for Quantitative Characterization of Snow and Sea Ice,” Proc. IET International Radar Conference, 2013年4月14日、中国・西安
- [9] Motoyuki Sato, “ALIS- GPR 3-D Imaging for Humanitarian Demining,” Near Surface Geoscience, 2012年9月3日、フランス・パリ
- [10] Kazunori Takahashi, Daniele Mecatti, Devis Dei, Masayoshi Matsumoto, and Motoyuki Sato, “Landslide observation by ground-based SAR interferometry,” IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012年7月27日、ドイツ・ミュンヘン
- [11] Hai Liu, Yuya Yokota, Kazunori Takahashi, Motoyuki Sato, “Quantitative Monitoring

- of dynamic groundwater level by ground penetrating radar,” IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012年7月25日、ドイツ・ミュンヘン
- [12] Motoyuki Sato, Ahmed Gaber and Yuya Yokota, “3D Dimensional GPR Applied to Archaeological Survey and Mitigation of Natural Disaster,” IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012年7月25日、ドイツ・ミュンヘン
- [13] Motoyuki Sato, “ALIS: Dual sensor (GPR+MD) Imaging for Humanitarian Demining,” MIRAN Land Mine Workshop, 2012年6月26日、イギリス・マンチェスター
- [14] M. Sato, “Data Sampling Density and Image Reconstruction in Near Range Synthetic Aperture Radar”, KJJC2012, 2012年5月18日、韓国・ソウル
- [15] Riafeni Karlina, M.Sato, “Compressive Sensing for 2D Scan GB-SAR System,” CoSeRa 2012, Int. Workshop on Compressed Sensing and Radar, 2012年5月14日、ドイツ・ボン
- [16] M. Sato, “3D GPR applications to archaeology,” the 14th Int. Conf. Ground Penetrating Radar, 2012年5月5日、中国・上海
- [17] Motoyuki Sato, “GPR for Disaster Mitigation and Beyond,” The 14th Int. Conf. Ground Penetrating Radar, 2012年5月5日、中国・上海
- [18] Motoyuki Sato, Yuya Yokota, Kazunori Takahashi and Mark Grasmueck, “Landmine detection by 3DGPR system,” Proc. SPIE Defense, Security, and Sensing, 2012年4月23日、アメリカ・ボルチモア
- [19] Motoyuki Sato and Kazunori Takahashi, “ALIS deployment in Cambodia,” SPIE Defense, Security, and Sensing, 2012年4月23日、アメリカ・ボルチモア
- [20] Motoyuki Sato, Kazunori Takahashi and Yuya Yokota, “3DGPR for Disaster Mitigation and Archaeological Survey in Japan,” 25th Symp. Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 2012年3月28日、アメリカ・ツーソン
- [21] Motoyuki Sato, Kazunori Takahashi and Yuya Yokota, “ALIS- GPR 3-D Imaging for Humanitarian Demining,” 25th Symp. Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 2012年3月28日、アメリカ・ツーソン
- [22] Motoyuki Sato, “Humanitarian demining sensor ALIS and its deployment in Cambodia,”(Key Note Speech), International Conference on Microwaves, antenna,

propagation & remote sensing, 2011年12月6日、インド・ジョードプル

- [23] A.Gaber, Y. Yokota, and M. Sato, “Land subsidence damage detection and imaging using 3D-GPR in Iwaki city, Japan,” the 10th SEGJ International Symposium, 2011年11月20日、京都
- [24] R. Karlina, and M. Sato, “Compressive Sensing Applied to Imaging by Ground Based Polarimetric SAR,” 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011年7月27日、カナダ・バンクーバ
- [25] Andrey Klovov, Motoyuki Sato, “Application of 3-D migration algorithm to GPR on an irregular ground surface” IGARSS, 2011年7月25日、カナダ・バンクーバ
- [26] Y. Yokota, M. Matsumoto, A. Gaber, M. Grasmueck, M. Sato, “Estimation of Biomass of Tree Roots By GPR With High Accuracy Positioning System,” IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011年7月25日、カナダ・バンクーバ

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 1 件)

名称：合成開口処理を伴うセンサ
発明者：佐藤 源之、松本正芳、高橋一徳
権利者：同上
種類：特許
番号：特許願 2013-150994 号
出願年月日：平成 25 年 7 月 19 日
国内外の別：国内、国外(検討中)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等
<http://magnet.cneas.tohoku.ac.jp/satolab/satolab-j.html>

6. 研究組織

- (1)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
- (2)研究分担者
園田 潤 (SONODA, Jun)
仙台高等専門学校・知能エレクトロニクス
学科・准教授
研究者番号：30290696
高橋 一徳 (TAKAHASHI, Kazunori)
東北大学・東北アジア研究センター・助教
研究者番号：60431475