

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K20990

研究課題名（和文）「どこでもレーダ」による地下空間3次元情報マップの構築

研究課題名（英文）Subsurface 3D Mapping by Ubiquitous Radar

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・名誉教授

研究者番号：40178778

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：RTK-GNSSを使用した精密な位置情報を地中レーダ(GPR)と同時に計測することで、計測データを精密に地図情報上に表示できるようになった。この手法を1対の送受信アンテナを持つ商用GPR装置、また我々が開発した4対の送受信アンテナを有するMIMO型GPR装置X-Yakumoに適用し、実用性を検証した。一方100MHz以下の低周波を利用し、光アナログ信号装置によって受信アンテナを送信アンテナから200m以上離すことができるバイスタティック・レーダシステムを利用し、エジプト・ピラミッド内部でピラミッドの構造計測を行った。これら柔軟性の高いシステムにより「どこでもレーダ」の実現に近づいた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地下構造の可視化は社会インフラの保守・管理など今後重要性が増大することが予想される。地中レーダ（GPR）はすでに埋設管検知、道路舗装状態のモニタリングなどの分野において、我が国においても実用的に利用されているが、本研究ではRTK-GNSSに加え、商用品としては入手できない独自に開発したMIMO型レーダ、バイスタティック・レーダシステムの応用がこうした目的に重要な貢献をする可能性を示すことができた。汎用性の高い地理情報システムであるGoogle Earthへのデータ表示などにより、レーダの専門家だけでなく応用分野の利用者がレーダ情報を広く利用できるシステム構築に近づいた。

研究成果の概要（英文）：By simultaneous acquisition of precise position information using RTK-GNSS and ground penetrating radar (GPR), it has become possible to display the measured data precisely on map information. We applied this method to a commercial GPR device with one pair of transmitting and receiving antennas, and to our MIMO-type GPR device X-Yakumo with four pairs of transmitting and receiving antennas, and verified its practicality. On the other hand, we used a bistatic radar system that uses low frequencies below 100 MHz and can separate the receiving antenna from the transmitting antenna by more than 200 m using an optical analog signal device, and performed structural measurements inside the pyramid in Egypt. These highly flexible systems have brought us closer to realizing "anywhere radar."

研究分野：電波応用工学

キーワード：GPR RTK-GNSS 地中レーダ バイスタティック・レーダ MIMOレーダ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

パッシブ型レーダでもアクティブ型レーダと同様、現状のレーダ計測はレーダの位置が既知でなければならない。そこで我々は、レーダ装置の位置を自分自身が送信するレーダ波を用いて、周囲の反射波から同定するアルゴリズムを開発した。パッシブ・レーダと自己位置推定アルゴリズムの2つの技術を組み合わせ、パッシブ型で、レーダ装置の位置を特定する必要が無いレーダーシステムを構築できる。

2. 研究の目的

送信電波源として、テレビ・ラジオ放送波、GNSS(GPS)、携帯無線基地局特に5G、スマートフォン携帯端末、更にIoT機器やスマートセンサなどを想定し、新たに提案するレーダ装置を「どこでもレーダ」と呼ぶ。「どこでもレーダ」は人や自動車の動きを観察する目的であれば現在町中や室内に置かれる監視カメラを置換することも可能である。また、道路、橋梁、トンネルなどの社会インフラに予め組み込むことで、大規模な分散型スマートセンサに利用可能である。

また「どこでもレーダ」を人間が身につけたり、自動車に装備することで町中を移動するだけで建物の壁の内部構造や道路の状況を計測するようなレーダーイメージングが可能となる。レーダはカメラと異なり、電波を出す方向を固定する必要が無いから、人間が身につけるスマートフォンや腕時計にこうした機能を持たせるだけで計測が実現できる。また多数の人間が持ち歩くセンサ同士の協調から大規模なイメージングが可能となる。このように「どこでもレーダ」はこれまでのレーダ概念を覆すと共に、これまで我々が持っていなかった分散型の多目的センサを実現し、社会の安全性を高める全く新しいアプローチの提案である。

「どこでもレーダ」を大量に使用することで、利用者が意識せず、地中情報を大量に、取得することができる。このデータを蓄積することで、膨大な地下空間のデータを取得し、AIによる自動判別とともに地下空間3次元情報マップを作成する。現在Google Earthのような地上空間の空間情報が大量に流通するが、その地下版を構築する。Google Earthは海底地形構造を表示するが地中構造は表示できない。ビッグデータの取得とAI解析は自然災害、通行中の道路、橋、トンネルの安全モニタリングなど、安全な社会の構築を実現する。

3. 研究の方法

パッシブ・レーダの原理を検証するとともに、レーダ位置の測位技術を組み合わせることによって、「どこでもレーダ」の基礎を実験的に進める。

4. 研究成果

(パッシブ・レーダ)

パッシブ・バイスタティック・レーダの原理実証を行うため、参照信号と反射信号を受信する2つのアンテナをUSRP X410 SDRに接続し、地上デジタル放送波、2GHz帯LTE信号の受信を確認した。SDRの設定は以下の通りである。

- ・受信設定 Ch1(基準信号)、Ch2(計測信号) ・中心周波数 地デジ帯 : 570 MHz
- ・受信設定 Ch3(基準信号)、Ch4(計測信号) ・中心周波数 LTE帯 : 2150 MHz
- ・トリガ設定 : 時間ドメイン

地表での計測として、アスファルト路面上でパッシブ・レーダ計測を実施し、図1に示す時間領域波形を取得し、FFTにより図2に示すスペクトルを得た。参照信号と反射信号時間領域波形に対して相関係数を求め、図3を得た。参照信号と計測信号間の相関が得られることを確認できた。

地表における反射体の計測として、マンホールのふた上でパッシブ・レーダ計測を行い、相関係数がアスファルト路面比45倍と強い相関が得られることを確認した。パッシブ・レーダの原理による地表物の認識が可能であることを確認したが、埋設物の検知には使用する周波数の選定、SN比向上のための工夫が必要である。

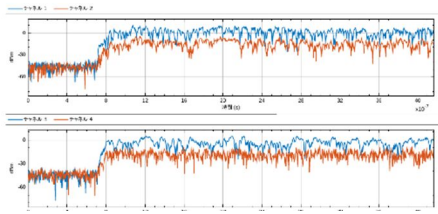


図1 SDRによるマンホールふた計測 時間領域波形

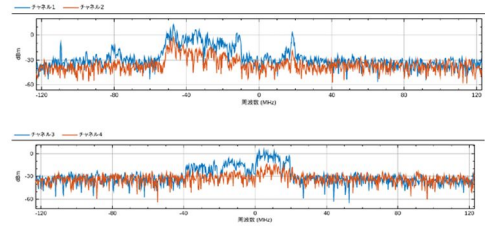


図2 SDRによるマンホールふた計測 周波数スペクトル

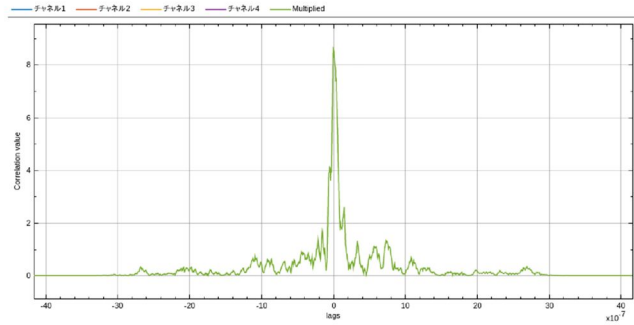


図3 参照信号と受信信号の相互相関係数

(RTK-GNSS 測位)

レーダ装置を任意の位置に動かしながら取得したデータを統合して地下構造マップを作成するのが「どこでもレーダ」の目的である。パッシブ・レーダを人間や車が移動してデータを取得する前の段階として、通常の地中レーダ(GPR)を利用した計測システムを構築した。このために RTK-GNSS 装置を GPR 装置に搭載し、精密位置情報と GPR データを同時に取得する。図4はそのために構築したシステムである。ベースとなる GNSS 受信機と、GPR 装置に搭載した移動型 GNSS 受信機から構成される。RTK-GNSS の動作検証のため、GPR アンテナを木枠に沿って一直線上を前後に動かしたときの測位情報を図5に示す。単独の GNSS 即位では数 m 程度の精度しか得られないが、RTK-GNSS により 1cm 精度を上回る位置計測ができることが確認できた。

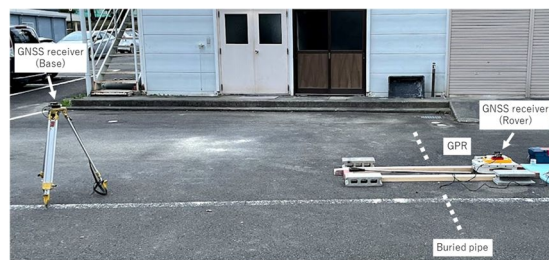
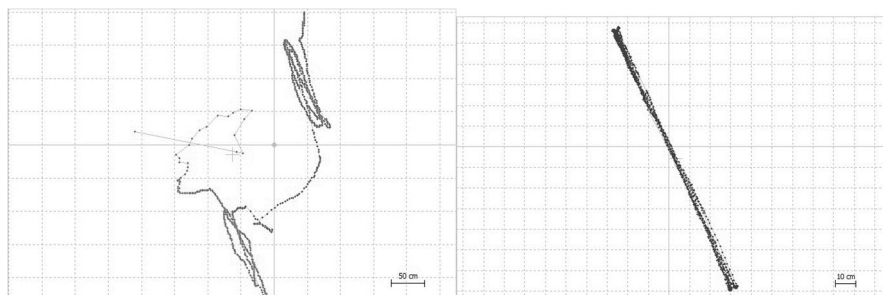


図4 RTK-GNSS の装置構成



(a)単独 GNSS 測位

(b)RTK-GNSS 測位

図5 アンテナを直線状に動かした場合の位置軌跡

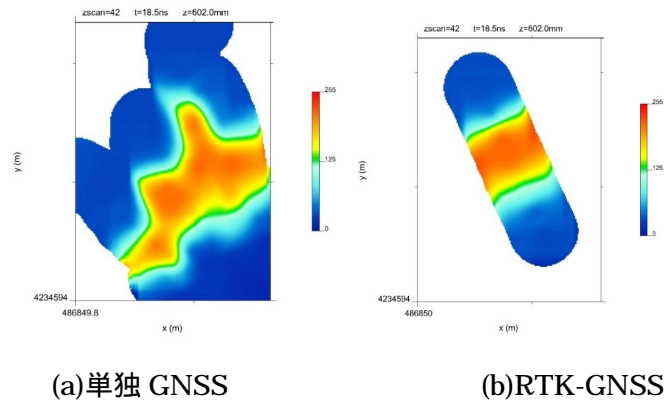
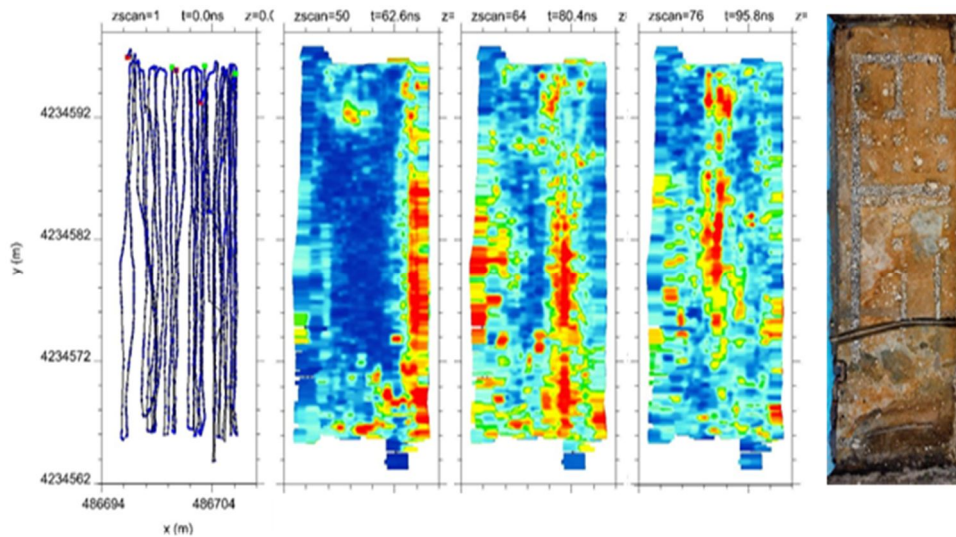


図6 埋設管計測

図6はこのシステムを利用して、埋設管をGPR計測した結果である。埋設管が直線状に正しく画像化されている。

図7は本システムを利用し、東北大学川内北キャンパス内の遺跡調査に利用した例である。旧日本帝国陸軍の営舎があった場所と考えられている場所であるが、GPR計測の結果基礎の石組みなどが規則正しく画像化できた。従来こうした計測には巻き尺などを用いて地表面に正確な測線グリッドをあらかじめ作成する必要があったが、本システムを利用すれば計測の範囲を定めるだけでGPR装置自体は自由に走査しながら取得したデータで画像再構成が可能となり、計測密度を向上させながら計測時間の大幅な短縮が図れる。例えばGPR装置を車両に搭載することで、同様の計測を行うことができる。



(a) 軌跡 (b) GPR 水平スライス画像 (3 深度) (c) 開削面

図7 東北大学構内における遺跡調査への利用例

(パシブ・レーダ)

パシブ・レーダは他者が設置した既存の送信機から放射される電波を利用し、任意の位置にある受信機で受信した電波から反射体のイメージングを行うことを目的としている。これはパシブ・パシブ・パシブ・レーダと呼ばれるが、それに至る前段階として、自分で設置した送信機からの電波を利用し、任意の位置にある受信機で受信した電波から反射体のイメージングを行うパシブ・レーダの構築を目指した。自分で設置した送信機を利用することで送受信機の同期をとることが可能となり、このため微弱な送信電力であっても高いSN比を実現でき、イメージングの可能性を飛躍的に広げることができる。

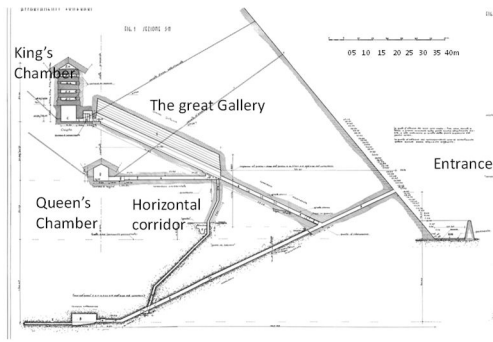


図8 クフ王のピラミッド内部構造



図9 クフ王のピラミッド

我々は以前よりエジプト・ギザにあるクフ王のピラミッドの内部構造を電波を利用してイメージングする研究を行ってきた。ピラミッドについては、以前より商用 GPR 装置をピラミッド表面、あるいは内部通路などの壁面に押し当てて岩石ブロック内部の計測を行う試みがなされている。しかし岩石ブロックは相互の間隙が 10cm 以上ある箇所が多く、岩石

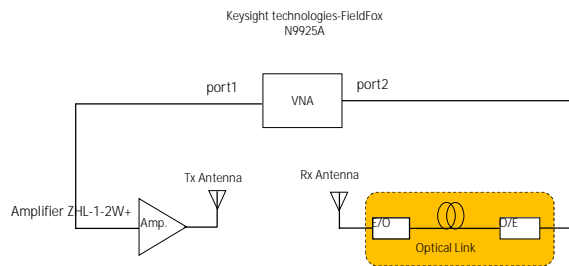
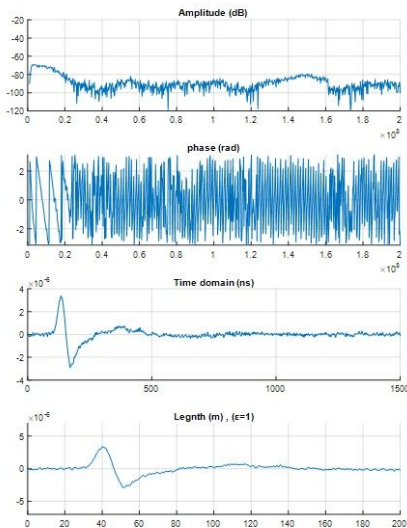


図10 光アナログ伝送回路を利用したバイスタティック・レーダシステム構成

ブロック壁面での電波散乱が大きいため電波の内部への浸透は非常に困難であった。我々は図10に示す光アナログ伝送回路を利用し、受信信号を光ファイバーを利用して 200m 伝送するシステムを構成した。送受信機にベクトル・ネットワークアナライザ(VNA)を利用し、送信アンテナを固定しながら受信アンテナを 200m の範囲で任意の位置に置くことができる。



振幅スペクトル

位相

時間領域波形

送信波形との相互相関をとることでパルス圧縮と時間校正を行った波形

図11 ピラミッド内部 20m 区間を伝送した信号

図11は本システムで図8に示す水平通路に送信アンテナを置き、大回廊に受信アンテナを配置し、ピラミッド内部の岩石中を 20m 区間伝送した信号を示している。非常に不均質性の高いピラミッド岩石中を伝搬した電波を SN 比の高い信号として得られたことが確認できる。この結果は、受信機を任意の位置に配置して計測を行う「どこでもレーダ」の重要な技術基盤になる。

本研究では「どこでもレーダ」実現のための基礎的な実験を主として行った。パッシブ・レーダでは十分な解像度は得られていないが、地下物体の有無の識別は行うことができた。RTK-GNSS 測位と GPR の組み合わせにより柔軟性のある計測を実現した。バイスタティック・レーダ構成は、パッシブ・レーダ、アクティブ・レーダいずれの場合にも、その能力を拡大すると考えており、より「どこでもレーダ」に近づくことができたと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 近藤智洋, 佐藤, 源之	4. 巻 vol. 121, no. 126, AP2021-33
2. 論文標題 クロスボウタイアンテナの設計と性能評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 55-60
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 -
1. 著者名 Anwer S. A, El-Hameed Motoyuki SATO	4. 巻 vol.121,236
2. 論文標題 Development of a New Low Frequency GPR System for Scanning Huge Structures.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 149-154
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 該当する
1. 著者名 Tsogtbaatar Amarsaikhan, Motoyuki Sato	4. 巻 vol.121,236
2. 論文標題 Analysis of Lateral wave observed in GPR data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 155-160
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 -
1. 著者名 近藤智洋, 佐藤源之	4. 巻 vol.121,236
2. 論文標題 フルポーラリメトリック地中レーダシステムの設計と性能評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 106-109
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 -

1. 著者名 齋藤龍真, 佐藤源之	4. 巻 vol. 121, 236
2. 論文標題 RTK-GNSS の地中レーダ計測への応用.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 16-21
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 -

1. 著者名 佐藤 源之、齋藤 龍真	4. 巻 vol. 122, no. 3, AP2022-1
2. 論文標題 フル・ポーラリメトリ計測可能な地中レーダ装置の開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 1-6
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 -

1. 著者名 佐藤 源之、齋藤 龍真	4. 巻 -
2. 論文標題 フル・ポーラリメトリックMIMO型GPR装置の開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 物理探査学会 学術講演会論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 -

1. 著者名 Amarsaikhan Tsogtbaatar, Motoyuki Sato	4. 巻 55
2. 論文標題 Characterisation of geological thin layer by borehole radar	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Exploration Geophysics	6. 最初と最後の頁 182-190
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/08123985.2023.2249926	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Ryuma Saito and Motoyuki Sato
2. 発表標題 PERFORMANCE EVALUAION OF FULL-POLARIMETRIC MIMO GPR
3. 学会等名 International Conference on GPR (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Motoyuki Sato, Amarsaikhan Tsogtbaatar, Ryum Saito
2. 発表標題 RTK-GNSS GPR Archaeological Survey for 3-D structures
3. 学会等名 International Conference on GPR (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryuma Saito, Motoyukoi Sato
2. 発表標題 Subsurface Imaging of Road Pavement by Full Polarimetric MIMO GPR
3. 学会等名 URSI GASS (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 URSI GASS
2. 発表標題 Consideration of Electromagnetic Wave Propagation Inside the Great Pyramid in Egypt
3. 学会等名 URSI GASS (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Motoyuki SATO
2. 発表標題 EM Measurement through Optical Fiber
3. 学会等名 5th International Workshop on Photonics applied to Electromagnetic Measurement (PEM2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 佐藤 源之	4. 発行年 2024年
2. 出版社 コロナ社	5. 総ページ数 252
3. 書名 地中レーダ	

1. 著者名 Motoyuki Sato	4. 発行年 2023年
2. 出版社 IntechOpen	5. 総ページ数 10
3. 書名 MIMO Communications Ch.14 MIMO radar	

〔産業財産権〕

〔その他〕

National Institute of Astronomy and Geophysics
--

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
研究 分 担 者	齋藤 龍真 (Saito Ryuma) (10967706)	東北大学・東北アジア研究センター・助手 (11301)	

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		
エジプト	天文学地球物理学研究所(NRIAG)		