ベクトルレーダによる地形適応走査時の地中レーダ信号処理*

川 合 康 弘^{*1}, 長谷川 泰久^{*2}, 佐 藤 慎 祐^{*1}
Zakarya ZYADA^{*1}, 松 野 隆 幸^{*3}, 福 田 敏 男^{*3}GPR Signal Processing on Geography Adaptive
Scanning with Vector RadarYasuhiro KAWAI, Yasuhisa HASEGAWA, Shinsuke SATO,
Zakarya ZYADA, Takayuki MATSUMOTO and Toshio FUKUDA^{*4}^{**} Department of Micro-Nano Systems Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

Ground Penetrating Radar (GPR) is a promising sensor for landmine detection, however there are two major problems to overcome. One is the non-planer (e.g. rough and/or undulating) ground surface. It remains unremovable clutters on a sub-surface image output from GPR. Geography adaptive scanning is useful to image objects beneath non-planer ground surface. The other problem is the distance between the antennas of GPR. When imaging the small objects such as an anti-personnel landmine buried in shallow depth, it increases the nonlinearity of the relationship between the time for propagation and the depth of a buried object. In this paper, we modify Kirchhoff migration so as to account for not only the variation of height and pose of the sensor head, but also the antennas alignment of the vector radar. The validity of this method is discussed through application to the signals acquired in experiments.

Key Words: Landmine Detection, GPR, Signal Processing, Migration

1. は じ め に

現在, 世界には 7000 万個の埋設地雷が未処理で放置されているといわれており, 重大な社会問題になっている⁽¹⁾. 現時点で作業者にもっとも信頼されているのは探針と金属探知機であるが, この二つにも問題がある⁽²⁾. 探針は, 作業者がかなり地雷に接近する必要があること, また地雷と物理的に接触する必要があることから, 危険性が非常に大きい. 金属探知機は, 近年のプラスチック製対人地雷の普及により, その効果が薄れてきている. プラスチック製地雷も信管などにわずかな金属を含むため, 探知できないわけではないが, 地雷原に散在する弾丸の破片など地雷以外の小金属片などとの識別はきわめて困難であり, 探知の効率を害している.

一方, 地中レーダ (Ground Penetrating Radar: GPR) は, 金属探知機の代替あるいは補助として, 最も期待されているセンサである⁽¹⁾⁽²⁾. 地中レーダは電磁波の

反射を利用したセンサで, もともとは遺跡探査や地中埋設管探知, コンクリート内の鉄筋や欠陥探知に用いられてきた. 探針を使った探知のように地雷に直接接触する必要はなく, また金属探知機と違いプラスチック製地雷に対しても有効である. さらに, 埋設物の深さや形状に関する情報を得ることもできる. 地雷探知にもきわめて有効と考えられており, 研究事例も多い⁽⁹⁾.

このように高い期待がもたれている地中レーダであるが, それ単体では問題も多い. まず, (1) 地雷が埋設されている土壌の状態, 特に水分によって電磁波の減衰が大きくなり, 性能が悪化する. また, (2) 不均質な土壌を調べるときにも, 探知結果の信頼性が低下する. さらに大きな問題として, (3) 地面に凹凸や傾斜があるときには, それらが探査結果の像に写りこみ, 地表面付近の埋設物を判別することが難しくなる. 最初の問題に関しては, 水分に影響されにくい周波数を選択することで, 2 番目の問題に対しては金属探知機との併用によってある程度緩和することができるが, 最後の問題は, 金属探知機との相乗効果が期待できる深さでの信頼性低下であり, 看過できない問題である. 地表面の影響としては (i) 細かな凹凸による地表面反射

* 原稿受付 2006 年 1 月 20 日.

^{*1} 名古屋大学大学院工学研究科 (☎ 464-8603 名古屋市千種区不老町).^{*2} 正員, 筑波大学大学院システム情報工学研究科 (☎ 305-8577 つくば市天王台 1-1-1).^{*3} 正員, 名古屋大学大学院工学研究科.

E-mail: fukuda@mein.nagoya-u.ac.jp

の変動と (ii) 傾斜による空気層の厚さの変動がもたらす速度場の不均質性ができ、地中イメージの計算機上での結像時に歪みが生じることが挙げられる。これらを抑制することを目的として、我々は3つのアンテナを有するベクトル型地中レーダ⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾（以下単にベクトルレーダと記述する）を地表面に倣い走査する方法について研究を行ってきた^{(4)~(8)}。アンテナ面を地表面に倣い走査することでベクトルレーダのアンテナ面と地表面が一定間隔で並行に向き合うことにより (i) 細かな凹凸による地表面反射の影響を計算機上で軽減でき、(ii) 空気層の厚みを一定に保つことで計算機上での速度場が正確に求められる。しかし、一方で migration 処理は断層計測などで主に用いられてきたため計測対象の位置が十分に深い場合には無視できるようなアンテナの位置誤差については論じられておらず、深度の浅い部分を電磁波で計測するためにはアンテナの位置も考慮に入れる必要がある。特に地形適応走査はベクトルアンテナの高さ、姿勢をマニピュレータによって走査中に変動させるため影響が大きく、問題となる。

本論文では、凹凸を有する地表面での地中埋設物探査における地形適応走査の必要性を述べ、地中埋設物の明確な像を得るためのベクトルレーダの特徴を考慮した pre-stack migration を拡張した信号処理手法を提案し、実機実験により有効性を確認する。

2. 地中レーダと信号処理

本章では、以降の議論の基本となる地中レーダの原理とその信号処理の概要について述べる。

2.1 地中レーダの原理 地中レーダ (Ground Penetrating Radar : GPR) とは、送信アンテナによって電磁波を地中に発射し、地下の反射体からの反射波を受信アンテナで受信、受信信号の時間的な変化から地下の構造を推定するセンサである。GPR には common source, common receiver, common midpoint, common offset などいくつかの計測法があるが⁽⁹⁾、本論文では後述するベクトルレーダによる common offset 計測を対象とする。

GPR の計測結果は、時間変動をそのままグラフとして表示するよりも、時間変動を色付して表し横方向に並べた時間断面や、後述する信号処理により空間的な反射強度の分布を求め、これを断面やボリュームレンダリングといった形で表示することが多い⁽⁹⁾。本論文では、埋設物を容易に判別可能な空間的反射強度分布を求めることを目的とする。表示形態としては、時間断面、水平断面、垂直断面を適宜使い分ける。

Fig. 1 Appearance of vector radar

Fig. 2 Transmission mode of vector radar

2.2 地中レーダの信号処理 地中レーダの信号処理はいくつかの段階を踏んで行われる。まず、地表面からの反射や送受信アンテナ間のカップリングを平均信号減算などの方法で除去する。この処理で地中の埋設物からの信号が強調された信号は、デコンボリューション、散乱行列処理、逆フーリエ変換、ゼロ時間調整、NMO 補正、migration、ゲインリカバリーなどの処理を経て 3 次元的な反射率の空間分布を表す地下の画像へと変換される。このうち、migration 処理は、ベクトルレーダによる地形適応走査時には特別な配慮が必要である。本論文ではこのための方法について論ずる。

2.3 本論文で対象とするレーダシステム 本論文では、ベクトル型地中レーダを使用する。このレーダの写真を図 1 に示す。このレーダは、3つのアンテナエレメントを有し一回の計測時に、図 2 に示すように 3つの送受信アンテナの組合せで計測を行う。これにより送受信アンテナの組合せに並行な方向の像が強調された計測信号が得られる。これを偏波モード呼び、本論文で用いるベクトルレーダは 3 組の偏波モードの信号から任意の方向が強調された信号を生成できると

Fig. 3 Appearance of manipulation system

いう特徴を有する。それぞれの送受信アンテナ対で取得された計測信号に散乱行列処理を加えることで、任意の送受信偏波角での計測信号を計算することができる。⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ このレーダのセンサヘッドを、図3に示す6軸マニピュレータによって、地表面に倣うように2次元的に走査し、一定間隔ごとに計測を行う。これは小菅らの研究グループが開発したマニピュレーション法である⁽⁵⁾⁽⁷⁾。データセットとしては、 $\phi_v(x, y, z, {}^B_S R, m, t)$ であらわされる反射波の場が計測されることになる。ここに、 $[x, y, z]^T, {}^B_S R$ は計測点でのセンサヘッド中心座標およびセンサヘッドフレームの回転行列、 m は偏波モード、 t は電磁波が送信アンテナから放出されてから受信アンテナで受信されるまでの時間である。ただし、 $z, {}^B_S R$ は地表面形状から決まる x, y の関数によって拘束される。

$$z = z_g(x, y) \quad (1)$$

$${}^B_S R = {}^B_S R_g(x, y) \quad (2)$$

よって引数として支配変数だけを残すと、ベクトルレーダの計測信号は $\phi_v(x, y, m, t)$ となる。

また、本論文で使用したレーダは広帯域ステップ周波数型レーダであり、計測は時間領域ではなく周波数領域で行われる。つまり、本来の計測信号は $\psi_v(x, y, z, {}^B_S R, m, f)$ で表される周波数域の信号である。時間領域の計測信号は逆 Fourier 変換を用いて計算できる。

$$\begin{aligned} \phi_v(x, y, z, {}^B_S R, m, t) &= \text{IFT}_f \{ \psi_v(x, y, z, {}^B_S R, m, f) \} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_v(x, y, z, {}^B_S R, m, f) e^{j2\pi ft} df \end{aligned} \quad (3)$$

3. 時間領域地形適応 migration

通常、レーダ計測においては地表面上を走査することで信号の空間的な分布 $\phi(x, y, t)$ を求める。しかし、

地中レーダのアンテナは通常それほど空間的な指向性が強くないため、ある空間座標 $\mathbf{p}_o = (x_o, y_o, z_o)$ に体積が十分小さい反射体があるとき、その影響は観測信号 $\phi(x, y, t)$ 中に空間的の広がりをもってあらわれる。つまり、反射波を単に距離に変換するだけでは、空間的な分解能が低い像しか得られない。

レーダ計測で得られる (x, y, t) に対する信号から、空間的な座標 (x, y, z) に対する信号を求める処理が、migration(マイグレーション)である。migrationは、波動伝播モデルに基づく一種の画像再構成手法で、人工地震による地下探査の分野で1970年代から活発に研究されてきた⁽¹³⁾。また、電磁波レーダに対しては、人工衛星や航空機の合成開口レーダとして広く知られている⁽¹⁴⁾。

3.1 Kirchhoff migration はじめに、同一点で送受信を行うレーダで平面計測を行う場合を考える。すなわち

$$z_g(x, y) = 0 \quad (4)$$

$${}^B_S R_g = I_3 \quad (5)$$

の場合である。

アンテナの座標を $\mathbf{p}_s = [x_s, y_s, 0]^T$ 、反射体の座標を $\mathbf{p}_o = [x, y, z]$ 、送信波を $h(t)$ とすると、時間領域の受信信号 $\phi(x_s, y_s, t)$ は、

$$\phi(x_s, y_s, t) = h\left(t - \frac{2\sqrt{(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2 + z^2}}{v}\right) \quad (6)$$

となる。ここで、 v は電磁波の伝播速度であり、観測領域中で一定と仮定する。送信波としてディラックのデルタ関数 $\delta(t)$ を考えると、観測信号場は、 $t = 2\|\mathbf{p}_s - \mathbf{p}_o\|/v$ で無限大、それ以外で0となる。これは、レーダの計測データには、座標 $\mathbf{p}_o$ にある点状の反射体が双曲面状のエネルギー分布をもって観測されることを意味している。migrationでは、この双曲面状に広がった信号を元に戻すため、以下の式を用いる。

$$\sigma(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \iint \frac{\cos \theta}{r^2} \phi(x_s, y_s, t_p) dx_s dy_s \quad (7)$$

$$r = \sqrt{(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2 + z^2} \quad (8)$$

$$\cos \theta = -z/r \quad (9)$$

$$t_p = 2r/v \quad (10)$$

ここで、 $\sigma(x, y, z)$ は座標 $[x, y, z]^T$ における再構成された信号の振幅である。式(7)はKirchhoff積分と呼ばれ、時間領域でのmigrationの基本となる式である。この計算は、双曲面上に広がった点 (x, y, z) の影響を集め、平均化することで (x, y, z) での反射率を復元するものである。すなわち、もし点状の反射体が座標 (x, y, z) に

Fig. 5 Distances for propagation

Fig. 6 Alignment of the sensor and an imaging point

果は埋設物がアンテナ対に近いときに顕著であり、イメージング精度の悪化を招く。そこで、migration中に同時にスタックを行う（Stacking with Migration）方法が編み出された。これを pre-stack migration という⁽³⁾。pre-stack migration では電磁波が注目する地中の点を通り受信アンテナに到達するまでの時間を忠実に織り込むように計算する。この手法により、上に挙げたような問題を回避して高精度なイメージを得ることが知られている⁽³⁾。地雷のように小さく、計測位置の近くに存在する埋設物をイメージングするためには、pre-stack migration が適している。

それに対して我々は地形適応 migration と pre-stack migration と同様に伝播時間を正確に求める手法を、ベクトルレーダによる地形適応走査に対する migration に対して実現するために、アンテナ配置と計測時のアンテナ姿勢から直接往復の伝播時間を求める。

図 6 に示すように、注目する地中の座標を $\mathbf{p} =$

Fig. 7 Alignment of antenna elements

$[x, y, z]^T$ 、計測点でのセンサヘッド中心の位置を $\mathbf{p}_S = [x_S, y_S, z_g(x_S, y_S)]^T$ とすると、

$$\sigma(x, y, z) = \sum_{m=0}^2 \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{\cos \theta}{r^2} \phi_v(x_S, y_S, m, t_p) dx_S dy_S \quad (19)$$

$$r = \|\mathbf{p}_S - \mathbf{p}\| \quad (20)$$

$$\cos \theta = \mathbf{n}_g(x_S, y_S) \cdot (\mathbf{p}_S - \mathbf{p}) / r \quad (21)$$

ただし t_p は電磁波の伝播時間で、

$$t_p = (\|\mathbf{p}_T - \mathbf{p}\| + \|\mathbf{p}_R - \mathbf{p}\|) / v \quad (22)$$

$$\mathbf{p}_T = \mathbf{p}_S + {}^B_S R(\mathbf{p}_S)^S \mathbf{h}(i_T(m)) \quad (23)$$

$$\mathbf{p}_R = \mathbf{p}_S + {}^B_S R(\mathbf{p}_S)^S \mathbf{h}(i_R(m)) \quad (24)$$

によって計算される。

$i_T(m)$ および $i_R(m)$ は、偏波モード m の信号を取得するのに使用する送受信アンテナエレメントの番号であり、

$$i_T(m) = m \quad (25)$$

$$i_R(m) = (m + 1) \bmod 3$$

によって決定される。また、 ${}^B_S R(\mathbf{p}_S)$ は計測点 $\mathbf{p}_S$ におけるセンサヘッドフレーム $\{S\}$ の基準フレーム $\{B\}$ に対する回転行列、 ${}^S \mathbf{h}(i)$ は i 番目のアンテナエレメントの $\{S\}$ からみた位置であり、図 7 から分かるように、次式で計算される。

$${}^S \mathbf{h}(i) = \begin{bmatrix} r_{AC} \cos\left(\frac{2\pi}{3}i + \theta_{offset}\right) \\ r_{AC} \sin\left(\frac{2\pi}{3}i + \theta_{offset}\right) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

ここで、 r_{AC} はアンテナが位置する円の半径である。

以上の式は以下のような意味を持つ。注目する地中の座標 $\mathbf{p}$ が、計測点 $\mathbf{p}_S$ での 3 つの偏波モードの信号に

Fig. 8 Type72 landmine model

Fig. 9 The sand tank used for the experiment

影響を与えた時刻を、アンテナの位置を正確に織り込んで計算し、その時刻における信号強度に指向性と伝播距離に由来する強度補正を加えつつ足し合わせている。各偏波モードの信号を平均的に加算するのは、散乱行列のトレース、すなわち等方的な反射成分を抽出することに相当する⁽¹⁰⁾ため、式(19)によって migration と偏波処理を同時に行っている (Polar Processing with Migration) と捉えることもできる。

4. 実データへの適用

4.1 実験環境 提案した手法の有効性を確認するため、ベクトルレーダによる模擬地雷の計測実験を行った。

使用した埋設物は、中国製 Type72 対人地雷を模したプラスチック製の模型 ($\phi 78[\text{mm}] \times 40[\text{mm}]$) である。外観を図 8 に示す。

屋内の土槽に乾燥した砂 (含水率 3%) を詰め、地表面を斜面状に整形し、この模擬地雷を水平かつ上面が地表面と同じ高さになるように埋設した。図 9 に模擬地雷埋設後の実験土槽を、図 10 にレーザー距離計によって得られた計測領域の地表面形状を示す。

4.2 地形適応走査と平坦走査の違い まず地形適応走査自体の有効性を示す。平坦走査および適応走査をかけて得られた地中レーダの信号に、式(19)による時間領域 migration を行う。得られた結果を水平断面として図 11 に示す。図 11(a) が平坦走査、図 11(b)

Fig. 10 The shape of the ground surface

Fig. 11 Horizontal slices reconstructed from the signals acquired by level scanning and geography adaptive scanning

が適応走査の結果である。平坦走査の結果 (a) においては埋設物の判別が難しいのに対して、地形適応走査の結果 (b) では、埋設物の丸い形状が正しく捉えられていることが分かる。

4.3 ベクトルレーダによる偏波処理の効果 次に、ベクトルレーダで得られる 3 つの偏波モードの信号を重ね合わせることを効果を示す。図 12 は地形適応走査して得られた信号に提案手法で migration を行った結果である。ただし、図 12(a)~(c) はそれぞれ式(19)外側の m に関する和をとらず、単一の偏波モードのみを使って migration を行った結果であり、図 12(d) は式(19)をすべて計算し、3 つの偏波モードを統合して得られた結果である。結果はすべて埋設深度の水平断面である。

単一偏波モードのみを使用した場合でも、埋設物の位置 ($(200[\text{mm}], 175[\text{mm}])$ 付近) は確認できるが、埋設状態の偏波特性によるとみられる反応の変形が見られる。また、目標とする埋設物以外の反応であるクラッタがやや目立つ結果になっている。特に $m=2$ において顕著であり、画面上方のクラッタの方が埋設物よりも強い反応を示している。これに対して、3 つの偏波モードを統合した場合は、より埋設物にフォーカスした、埋設物の丸い形状がはっきりと分かる像が得られている。さらに、クラッタも単一偏波モードの場合よりも抑えられている。

Fig. 12 Horizontal slices processed with various polar modes

Fig. 13 Horizontal slices processed with and without consideration of the alignment of antennas in the sensor head

4.4 ベクトルレーダに拡張した migration と通常の migration の違い 提案手法によりアンテナの配置を適切に織り込んで計算することで、正確な地中の像が得られることを示す。

センサヘッド中心点ですべて偏波モードの送受信が行われたと仮定して migration を行った結果を図 13(a) に (3つの偏波モードそれぞれに対して式 (11) でマイグレーションを行い加算), 提案手法で migration を行った結果を図 13(b) に示す。それぞれ埋設深度の水平断面である。

提案手法で処理した結果では、クリアな像が得られているが、同一送受信点仮定の結果では、3 偏波モードの信号を足し合わせても、アンテナ位置のずれの影響が出て反応が分散し、判別可能なほど強い反応は得られないことが分かる。

5. お わ り に

本論文では、pre-stack migration をベクトルレーダによる地形適応走査に拡張して適用し、平面でない地形において地表面付近に模擬地雷が埋設されている場合に、明瞭な対象物の像を得ることができることを示した。

今後は、地形適応の度合を変化させたときにイメージングの結果がどのように変化するかを調査したいと考えている。また、計算時間とイメージの精度を両立す

るため、計算量が少ないことで知られる f-k migration のベクトルレーダによる地形適応走査への応用もあわせて検討していく予定である。

謝 辞

本研究は科学技術振興機構の研究開発プロジェクト「人道的観点からの対人地雷の地雷探知・除去活動を支援するセンシング技術、アクセス・制御技術の研究開発」の一部として行われた。実験に用いたレーダは三井造船株式会社によって開発され、提供して頂いたものである。また、時間領域の migration に必要なパラメータ (距離減衰補正係数、開口角および指向性補正係数) を決定する際に、東北大学の藪下博士が作成された信号処理のプログラムを参考にさせて頂いた。

ここに謝意を表する。

文 献

- (1) Shimoi, N., *Technology for detecting and clearing LANDMINES*, Morikita Shuppan Co., Ltd., (2002), pp.43, pp.66–81.
- (2) Geneva International Centre for Humanitarian Demining, *A Guide to Mine Action*, <http://www.gichd.ch/96.0.html>, pp.63–77.
- (3) Feng, X., Sato, M., *Pre-stack migration applied to GPR for landmine detection*, “Inverse Problems”, 20, (2004), pp.99–115.
- (4) Fukuda, T. et al., *Land mine detection algorithm using Ultra Wide Band GPR*, “Proceedings of the first International Symposium on Systems & Human Science”, (2003), pp.295–300.
- (5) Yabushita, H. et al., *A small Reaction Manipulator for Maneuvering a GPR Sensing Head*, “Systems & Human Science - For Safety, Security, and Dependability; Selected Papers of the 1st International Symposium SSR2003, Osaka, Japan, November 2003”, Elsevier Science Ltd, (2005), pp.245–257.
- (6) HASEGAWA, Y. et al., *Landmine Detection Algorithm using UWB GPR*, “SICE System Integration Division Annual Conference (SI2004)”, (2004), pp.1033–1034.
- (7) Yabushita, H. et al., *Ground Adaptive Manipulation of GPR and Image Reconstruction for Landmine Detection*, “SICE System Integration Division Annual Conference (SI2004)”, (2004), pp.1029–1030.

- (8) Hasegawa, Y. et al., *Automatic Extraction for Mine Suspects from GPR*, "Proc. of the IARP International workshop on Robotics and Mechanical Assistance in Humanitarian Demining", (2005), pp.27-32.
  - (9) Daniels, D. J., *Ground Penetrating Radar 2nd Edition*, The Institution of Electrical Engineers, (2004), pp.278-292.
  - (10) Kimura, N. et al., *Development of Radar for Investigation of Buried Objects (First Report)*, "National Convention of the Institute of Electrical Engineers of Japan 1992", (1992), pp.P1-64-P1-65.
  - (11) Murasawa, K. et al., *Development of Radar for Investigation of Buried Objects (Second Report)*, "National Convention of the Institute of Electrical Engineers of Japan 1992", (1992), pp.P1-66-P1-67.
  - (12) Sato, M. et al., *Subsurface Investigation with Electromagnetic Wave*, The textbook for public recurrent education named "Subsurface Investigation with Electromagnetic Wave" held in Tohoku Univ., (2004), pp.93.
  - (13) Schneider, W. A., *Integral Formulation for Migration in Two and Three Dimensions*, "Geophysics", Vol.43, No.1, (1978), pp.49-76.
  - (14) Milman, A. S., *SAR imaging by $\omega - k$ migration*, "International Journal of Remote Sensing", Vol.14, No.10, (1993), pp.1965-1979.
  - (15) Sato, M., *Subsurface Imaging by Ground Penetrating Radar*, "IEICE Transactions", , Vol.J85-C, No.7, (2002), pp.520-530.
-