

修士論文

マルチスタティック合成開口地中レーダによる  
埋設物断面形状のノンパラメトリック復元

指導教員 野村由司彦 教授

平成 27 年度

三重大学工学部機械工学専攻

プロセス解析研究室

414M138 成田 卓己

# 目次

## 目次

第1章. 緒論.....	4
1.1. 研究背景.....	4
1.2. 本論文の構成.....	5
第2章. 地中レーダの原理.....	6
第3章. 埋設物形状復元手法.....	8
3.1. 従来手法.....	8
3.2. 提案手法の適用条件.....	9
3.3. 復元原理.....	9
3.4. 復元アルゴリズム.....	9
3.4.1. 基本的な関係式.....	9
3.4.2. 復元手順.....	11
第4章. 埋設物断面形状復元実験.....	13
4.1. 水槽試験.....	13
4.1.1. 実験条件.....	13
4.1.1. 実験結果.....	13
4.2. 実地試験.....	19
4.2.1. 実験条件.....	19
4.2.2. 実験結果.....	20
4.3. 考察.....	25
第5章. 結言.....	26
5.1. 結論.....	26
5.2. 今後の課題.....	26

## 图 目 次

Fig. 2.1 Ground penetrating radar antenna unit.....	7
Fig. 2.2 Ground penetrating radar processing unit.....	7
Fig. 2.3 B-scan image for a buried pipe .....	7
Fig. 2.4 B-scan image for a buried roof like object.....	7
Fig. 3.1 Schematic diagram showing a multiple root condition at a reflection point.....	12
Fig. 3.2 Axially-transformed error ellipse.....	12
Fig. 4.1 Radar units location of quasi-monostatic radar system.....	14
Fig. 4.2 Schematic diagram of radar scanning .....	14
Fig. 4.3 Roof-like aluminium plate .....	14
Fig. 4.4 B-Scan images of scanning a plate for each Distance of radar units .....	15
Fig. 4.5 B-Scan images of scanning a pipe for each Distance of radar units .....	15
Fig. 4.6 B-Scan images of scanning a Roof-like aluminium plate for each Distance of radar unit.....	15
Fig. 4.7 Reconstructed cross-sectional image for the flat plate.....	15
Fig. 4.8 Reconstructed cross-sectional image for the pipe.....	16
Fig. 4.9 Reconstructed cross-sectional image for the Roof-like aluminium plate .....	17
Fig. 4.10 Reconstructed cross-sectional image for the flat plate by RPM method .....	18
Fig. 4.12 Experimental situation .....	20
Fig. 4.13 B-Scan images of scanning a plate for each Distance of radar units .....	20
Fig. 4.14 B-Scan images of scanning a pipe for each Distance of radar units .....	21
Fig. 4.15 B-Scan images of scanning a Roof-like aluminium plate for each Distance of radar units.....	21
Fig. 4.16 Reconstructed cross-sectional image for the flat plate.....	21
Fig. 4.17 Reconstructed cross-sectional image for the pipe.....	22
Fig. 4.18 Reconstructed cross-sectional image for the Roof-like aluminium plate .....	23
Fig. 4.19 Reconstructed cross-sectional image for the flat plate by RPM method .....	24

## 表目次

Table 4.1 Root mean square errors of estimated results by proposed method and RPM method.....	19
Table 4.2 Root mean square errors of estimated results by proposed method and RPM method.....	24

# 第1章. 緒論

## 1.1. 研究背景

地下に存在する水道管、通信ケーブルなどの埋設物や建築物内にある鉄筋などを非破壊・非掘削で探査する手法として、地中レーダ(ground penetrating radar, GPR)がある。これはパルス状の電磁波を地中に向かって送信し、物体表面で反射した波を受信・信号処理を行うことで物体の有無、埋設深さ・大きさを探査する手法である。

地中レーダの信号処理手法としては、一般に、物体の形状ごとにモデルを定義してモデルパラメータ値を推定するパラメトリックな方法と、モデルを定義せず、対象物体を構成する点や微小線分を復元するノンパラメトリックな手法の二つが存在する。前者の手法としては、例えば平板や円管それぞれについてモデル式を定義し、埋設状況を推定する方法が提案されている[1] [2]。また、後者の手法は物体の断面形状の復元に使用されているほか、移動する物体の軌跡の推定などに用いられている[3]。それぞれの特徴を考慮して、両者を使い分けるとすれば、まずは後者のノンパラメトリック手法により埋設物の概形を知った上で、パイプなら円というように、何らかの形状モデルを定めた後に、前者のパラメトリック手法により形状を定めるモデルパラメータ値を推定することが考えられる。しかし、従来のノンパラメトリックな手法は、物体断面の輪郭が1次連続であることを前提として、物体上の反射点の伝搬経路長の整合性に基づいて求められた点群により断面を復元するものであった。そのため、例えば角を持つ物体など、物体断面の輪郭が1次連続ではないものに関しては厳密に表現できないという欠点があった。

本研究では、マルチスタティック合成開口地中レーダにより、多数の微小線素を鉛直断面内に位置決めし、この微小線素を重ね合わせることで埋設物上面の輪郭を復元する手法を提案する。ここで、「マルチスタティック合成開口」とは、送信アンテナと受信アンテナのそれぞれを異なる位置に配置することでマルチスタティックとし、さらに走査することで合成開口を可能としている。(以下、送信アンテナと受信アンテナの離隔を「TR 離隔」と呼ぶ) 取得した伝搬経路長のデータを、異なる TR 離隔の間で成立する「異離隔間整合条件」に基づいて処理し、方向も含め微小線素を位置決めする。実際に電磁波を反射した微小線素は、その時の送・受信器位置において伝搬経路長に基づいて描かれる楕円(以下、単に「楕円」と記す)の接線の一つになっている。したがって、ある微小線素が、複数の TR 離隔において反射面となっている場合には、各送・受信器に対応する楕円はその微小線素を共通接線とする1点で内接することになる。これが異離隔間整合条件であり、したがって、複数の送・受信器離隔で描かれる楕円の内接条件に基づいて微小線素を求めることができる。複数の B-Scan 画像間の幾何学的整合性を考慮する点に特徴がある。

## 1.2. 本論文の構成

第2章では、本研究で用いる地中レーダによる測定の原理について説明する。

第3章では、前述のマルチスタティック合成開口地中レーダを用いた微小線素群による埋設物断面形状を推定するノンパラメトリックな物体形状復元手法を提案する。

第4章では、提案手法を1次連続な物体と1次不連続な物体の測定結果に対してそれぞれ適用して性能評価を行った。

## 第2章. 地中レーダの原理

Fig.2.1 に、本研究で使用する地中レーダ（ライトエスパー2，アイレック技建（株））を示す．本レーダは、それぞれ独立した送信アンテナと受信アンテナからなるアンテナユニットを有している．このように、送信アンテナと受信アンテナが離隔したレーダはバイスタティックレーダと呼ばれている．本レーダの送信器からはパルス状の電磁波が発射され、印加電圧のパルス幅は約 1nsec、電磁波の中心周波数は 900MHz である．

地中レーダにおける探査原理は、アンテナユニット底部の送信アンテナから地中に向けてパルス様の電磁波を広角に放射する．放射された電磁波は地中を伝搬し、誘電率が異なる物体の境界で反射する．その反射波を受信アンテナで受信することにより、このとき、受信波は送信後の時間に対応する強度データとして、すなわち時系列データ(A-Scan 画像と呼ばれる)として観測される．このようにして受信した反射電磁波の伝搬時間や強度は、対象物の位置・形状・材質に関する情報を与える．具体的には、地中での電磁波の伝播速度  $v$  は、媒質の比誘電率といった電氣的性質によって定められる．ここで電磁波が伝播する媒質の比誘電率を  $\epsilon$ 、真空中における光速を  $c_0 (= 3.0 \times 10^8 \text{ m/s})$  とすると、地中レーダが受信した電磁波の伝搬時間が  $\tau$  に相当する電磁波伝播距離  $l$  は

$$l = \frac{v\tau}{2} = \frac{c_0\tau}{2\sqrt{\epsilon}} \quad (2.1)$$

と表される．

合成開口法では、TR 離隔のそれぞれにおいて、アンテナユニットを走査しながら、一定の間隔で観測波形(A-Scan)をサンプルする．Fig.2.2 に示す処理装置によって、合成開口法により観測点毎に得られた観測波形(A-Scan)を並べ、反射波の強度(振幅値)の大きさごとに応じ段階的な擬似カラー表示などで、地中断面の観測画像が表示される．この観測画像は B-Scan 画像と呼ばれており、観測画像の横軸はアンテナユニットの走査位置、縦軸は電磁波の伝搬時間(time-of-flight 情報)を表している．

アンテナから地中に向かって放射された電磁波は、ある指向特性を持ちながら広角度に放射される．したがって、指向特性の範囲ではアンテナを移動しても、同一物体からの反射波を受信する．その結果、埋設物が大きさのない点状の対象の場合でも、反射像は双曲線形状を呈する．埋設物が大きさを有し、管のような場合には、双曲線とは若干異なる擬似双曲線となる．また大きさを有し、例えば屋根のように物体の輪郭が 1 次連続ではない物体の場合には、アンテナユニットの走査位置によっては物体の角で電磁波が反射する．角で反射する場合は点上の物体とみなされるため、双曲線と直線が接続した形状の反射像が得られる．円管の物体と屋根状の物体に対して得られた B-Scan 画像を、それぞれ、Fig.2.3 と Fig.2.4 に示す．

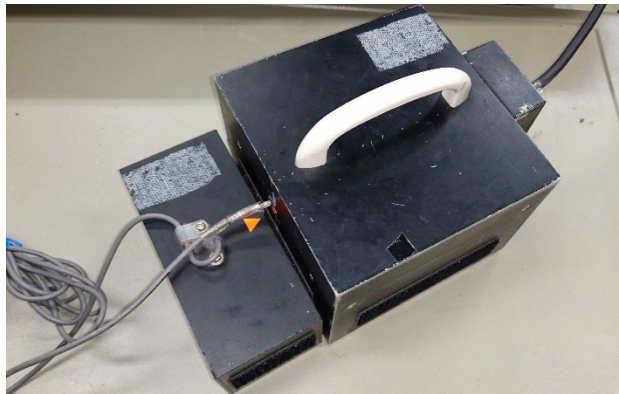


Fig. 2.1 Ground penetrating radar antenna unit



Fig. 2.2 Ground penetrating radar processing unit

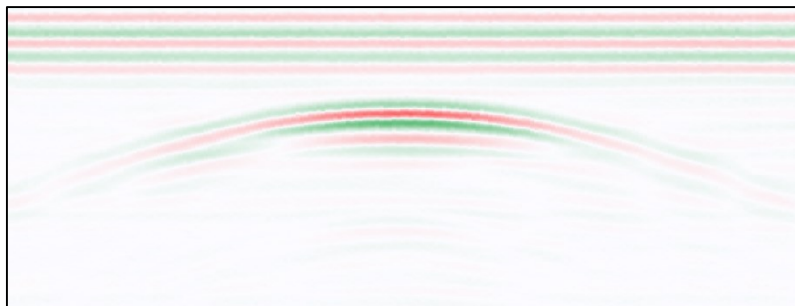


Fig. 2.3 B-scan image for a buried pipe

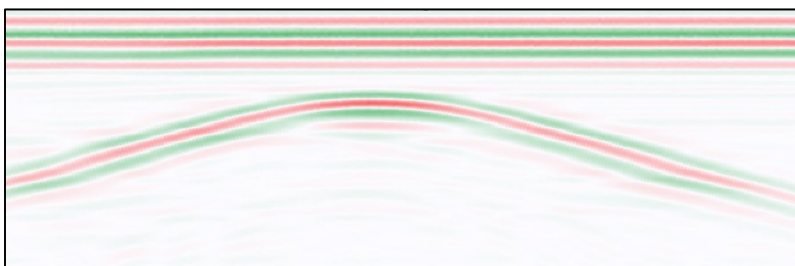


Fig. 2.4 B-scan image for a buried roof like object



## 第3章. 埋設物形状復元手法

### 3.1. 従来手法

物体の断面を復元するノンパラメトリック手法として、レーダによる波形を解析する MUSIC 法 [4], 境界散乱変換に基づいた形状推定法である SEABED 法[5]や RPM (Range Point Migration)法[6][7]などがある. いずれも対象物体が 1 次連続であることを前提としている. 特に MUSIC 法や SEABED 法では, 1 次連続性に基づいて観測された電波伝搬距離に微分処理を適用しており, それが観測データの誤差の影響を受けやすくなっている. これに対して RPM 法は同じく 1 次連続性を前提としつつも, 電波伝搬距離をそのまま用いていることから, 観測データの誤差の影響を受けにくい. そこで, 本論文では従来法の典型として, RPM 法を紹介する.

RPM 法は, 合成開口法による観測結果から各レーダ位置における電磁波の伝播方向を求め, 反射点を推定する手法である. あるレーダの位置 $(X,0)$ において電磁波の伝播距離 $Z$ が観測されたとすると, 反射点はレーダ位置を中心として伝播距離 $Z$ を半径とする円上にあると考えられる (送信レーダ円と呼ぶ). ここで反射点の存在確率 (ベイズ推定の枠組みにおいては, いわゆる「条件付確率」とよばれている) は, 注目している送信レーダ位置とは異なる受信レーダ位置 $(X_i,0)$ において得られた伝播距離 $Z_i$ の描く円との交点の位置で最大となる正規分布として近似できると仮定する. さらに, 送信レーダ位置 $(X_i,0)$ の信頼性 (ベイズ推定の枠組みにおいては, いわゆる「事前確率」とよばれている) に関しても, 注目している受信レーダ位置 $(X,0)$ から離れるほど信頼性が低いと考え,  $(X,0)$  の位置で最大となる正規分布として近似できると仮定する. これら二つの事象, すなわち送信レーダ位置 $(X_i,0)$ と反射点の位置の結合事象として, 当該受信レーダ位置に対する反射点の存在確率の評価値を得る. この受信レーダ位置対応評価値をすべての受信レーダ位置に関して累積することで, 全受信レーダ位置対応の評価値を得る. この評価値は, 送信レーダ円上の各点で求められ, これを最大とする点として, 対象物体 (点) を推定するものである. すなわち, 電磁波の到来角度 $\theta_{opt}$ はレーダの位置と交点と $x$ 軸のなす角度 $\theta(q, q_i)$ , レーダの位置の総数 $N_q$ を用いて以下のように表される.

$$\theta_{opt} = \arg \max_{\theta}$$

$$\left| \sum_{i=1}^{N_q} s(q_i) e^{-\left\{ \frac{(X-X_i)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(\theta-\theta(q, q_i))^2}{2\sigma_\theta^2} \right\}} \right|$$

と表される．これより各レーダ位置における反射点を重ね合わせ，点群の形として物体の形状復元を行う．

## 3.2. 提案手法の適用条件

本研究ではマルチスタティック合成開口地中レーダとして，送・受信器の離隔（TR 離隔）を複数種類設定し，それぞれの TR 離隔で伝搬経路長のデータ（B-scan 画像）を取得する．次に，取得した伝搬経路長を，異なる TR 離隔同士で成立する「異離隔間整合条件」に基づいて処理し，方向も含め微小線素を位置決めする．

各 TR 離隔，各アンテナユニット位置において得られた伝搬経路長から，反射点が存在しうる線素は送信器および受信器の座標を焦点とした楕円上にある[3][8]と考えられる．本提案手法は，基本的には，複数の TR 離隔を前提とするものであるが，以下では，二つの TR 離隔，具体的には一つは可能な限り送信器と受信器を近付け，他の一つは比較的大きな送・受信器離隔をもつものとして説明を進める．本論文では前者のようなレーダ配置を，送・受信器が同一の位置にあるモノスタティック地中レーダと近似できることから，quasi-モノスタティック地中レーダと呼称し，後者をバイスタティック地中レーダと呼称する．

## 3.3. 復元原理

マルチスタティック地中レーダにより得られたそれぞれの B-Scan 画像において，各走査点における time-of-flight 情報は，送信器ー埋設物反射点間距離と埋設物反射点-受信器間距離の和に相当する．したがって，埋設物上反射点はこの time-of-flight 情報に基づいて求められる伝搬経路長により定義される楕円上に在ることになる．逆に言うと，二つの送・受信器離隔条件で B-Scan 画像において，埋設物の表面上の同一線素で反射した電波に対応する time-of-flight 情報が導く二つの楕円は互いに内接すると考えられる．

## 3.4. 復元アルゴリズム

### 3.4.1. 基本的な関係式

ある位置での quasi-モノスタティック地中レーダによる伝搬経路から求められる楕円  $E_{qi}$  を前提として，バイスタティック地中レーダによる伝搬経路  $L_{qi}$  から求められる楕円  $E_{bj}$  の内で  $E_{qi}$  に最もよく内接する楕円  $E_{bj\_opt\ i}$  を与えるバイスタティック地中レーダの伝搬経路測定データ  $L_{bj}$  を抽出し，電磁波の反射点を計算する．二つの楕円が内接する場合の模式図を Fig.3.1 に示す．詳細は以下のとおりである．

地点  $X_i$  にある送・受信器離隔が  $L_{qi}$  となる quasi-モノスタティック地中レーダが受信した電磁波の伝達時間を  $t_i$ ，その伝達時間に整合する楕円（その輪郭上の少なくとも 1 点で反射していると考えられる）の半長軸，半短軸をそれぞれ  $a_{qi}$ ， $b_{qi}$  とする．そして，地点  $X_j$  にある送・受信器離隔が  $L_{bj}$  となるバイスタティック地中レーダが受信した電磁波の伝達時間を  $t_j$ ，その伝達時間に整合する楕円の半長軸，半短軸をそれぞれ  $a_{bj}$ ， $b_{bj}$  とする．そして，電磁波の伝達速度が  $v$  となる媒質に電磁波を放射したとき，楕円の式は，

$$\frac{(x_i - X_i)x^2}{a_{qi}^2} + \frac{y_i^2}{b_{qi}^2} = 1 \quad (3.1)$$

$$\frac{(x_j - X_j)^2}{a_{bj}^2} + \frac{y_j^2}{b_{bj}^2} = 1 \quad (3.2)$$

と与えられる．ここで楕円の係数はそれぞれ

$$a_{qi} = vt_i/2 \quad (3.3)$$

$$b_{qi} = \frac{1}{2}\sqrt{(vt_i)^2 - L_q^2} \quad (3.4)$$

$$a_{bj} = vt_j/2 \quad (3.5)$$

$$b_{bj} = \frac{1}{2}\sqrt{(vt_j)^2 - L_b^2} \quad (3.6)$$

である．次に，二つの楕円の内接する条件を最も満たす，すなわち式(3.1)と(3.2)の連立 2 次方程式の重根条件に最もよく適合するものの最適化条件により，物体上の反射点の座標  $\mathbf{x}_{Ri}=(x_{Ri}, y_{Ri})$  を推定する．

この反射点において，2 つの楕円は共通の勾配をもつ．その勾配はの傾き  $s_{(x_{Ri}, y_{Ri})}$  は

$$s_{(x_{Ri}, y_{Ri})} = -\frac{b_{qi}^2(x_{Ri} - X_i)}{a_{qi} \cdot y_{Ri}} \quad (3.7)$$

となる．また微小接線の長さ  $l_{(x_{Ri}, y_{Ri})}$  は，合成開口法によるレーダを等間隔  $I$  でスキャンしたとすると，その間隔  $l$  から

$$l_{(x_{Ri}, y_{Ri})} = \sqrt{(s_{(x_{Ri}, y_{Ri})} \cdot I)^2 + I^2} \quad (3.8)$$

と与える．ここで推定した微小線素を復元する際，その誤差範囲を考慮するため，誤差楕円を定める．誤差の大きさは，2次元正規分布に従うものとして，誤差楕円の確率密度に対応する色の濃淡によって近似して表す．Fig.3.2に示すように，二つの楕円が最もよく内接するとの条件の下で，得られた楕円  $E_{bj\_opt|i}$  上の座標  $\mathbf{x}=[x, y]^T$  に対して，接線の傾き  $\theta$  の直線を主軸とする座標変換を行う．変換後の座標を  $\mathbf{x}'=[x', y']^T$  とすると

$$(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{Ri})' = \mathbf{R}^T (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{Ri}) \quad (3.9)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

となる．また共分散行列  $\Sigma_x$  は回転行列  $\mathbf{R}$  を用いて

$$\Sigma_x^{-1} = \mathbf{R} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{R}^T \quad (3.10)$$

$$\mathbf{D} = l(x_{Ri}, y_{Ri})^2 \begin{bmatrix} 1^2 & 0 \\ 0 & 0.5^2 \end{bmatrix}$$

と表される．これより，復元される対象物体上の点に関わる確率密度関数  $f(\mathbf{x})$  は

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}) &= \frac{1}{2\pi|\Sigma_x|} e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{Ri})^T \Sigma_x^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{Ri})} \\ &= \frac{1}{2\pi|\Sigma_x|} e^{-\frac{1}{2}\mathbf{x}^T \mathbf{R} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{R}^T \mathbf{x}} \end{aligned} \quad (3.11)$$

と与えられる（図 3.2 参照）．

### 3.4.2. 復元手順

前項で説明した原理に基づいて，以下の Step にしたがって埋設物の 2 次元断面輪郭を復元する．

[Step1] マルチスタティック地中レーダによる B-scan 画像の各列において，それぞれ Savitzky-Golay フィルターを用いて伝搬時間の推定値に対してサブピクセル処理を行う．

[Step2]  $x, y$  に関する連立 2 次方程式(1),(2)から  $y$  を消去して得られる  $x$  の 2 次方程式の判別式を  $D_{ij}$  と表し，quasi-モノスタティック地中レーダの各  $i$  に対して  $D_{ij}$  が最も 0 に近くなるとの条件の下でバイスタティック地中レーダ  $j$  の最適値  $j^{(i)}$  を導き出す．

- [Step3]  $X_i$  の位置にある quasi-モノスタティック地中レーダの B-Scan 画像と 1q,  $X_{j(i)}$  の位置にあるバイスタティック地中レーダの B-Scan 画像から, それぞれ導き出される楕円の連立 2 次方程式の最適解を導くことで, 埋設物の反射点 R の座標  $(x_{Ri}, y_{Ri})$  を求め, さらに式(3.7), および式(3.8)から, それぞれ微小線素の傾き  $s_{(x_{Ri}, y_{Ri})}$  と長さ  $l_{(x_{Ri}, y_{Ri})}$  を導出する.
- [Step4] 各  $i$  に関して求めた微小反射線素群を重ね合わせることで, 埋設物の 2 次元断面輪郭が復元される.

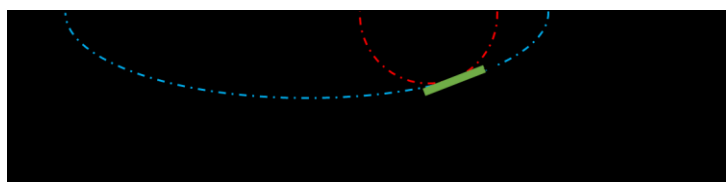


Fig. 3.1 Schematic diagram showing a multiple root condition at a reflection point

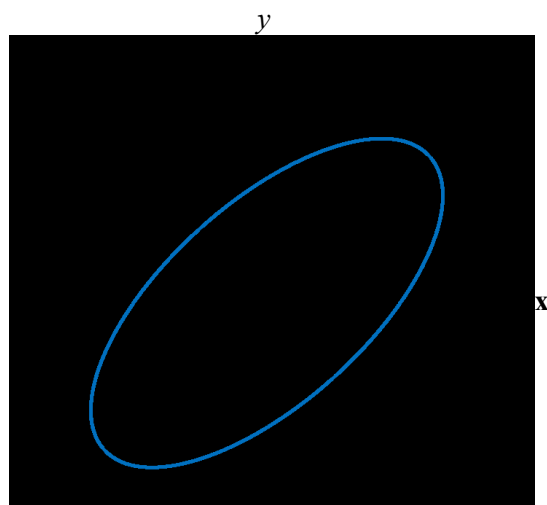


Fig. 3.2 Axially-transformed error ellipse

## 第4章. 埋設物断面形状復元実験

### 4.1. 水槽試験

#### 4.1.1. 実験条件

本研究では、最初に、媒質の比誘電率が一定となる水中での実験を行った。 $W1190[\text{mm}] \times D445[\text{mm}] \times H455[\text{mm}]$ の亚克力製水槽を水で満たし、厚さ  $5[\text{mm}]$ の亚克力板で蓋をして、B-Scan 画像を得た。水の比誘電率は 81 である。マルチスタティック地中レーダのサンプリング間隔は  $2.5[\text{mm}]$ 、測定レンジを  $0 \sim 24[\text{ns}]$ に設定し、埋設物に対して水平面上で走査する。走査の概要図を Fig.4.1 に示す。地中レーダの送・受信器離隔は  $0[\text{mm}]$ 、 $130[\text{mm}]$ 、 $180[\text{mm}]$ 、 $230[\text{mm}]$ の 4 種類で測定した。ここで、離隔  $0[\text{mm}]$ の場合は Fig.4.2 に示すように送・受信器を互い違いにするように配置し、また他の離隔においては地中レーダの走査線の方角に対して離隔して送・受信器を配置する。

本実験では、埋設物は  $200[\text{mm}] \times 200[\text{mm}]$ のアルミニウム製の板、 $\Phi 115[\text{mm}] \times 300[\text{mm}]$ の鉄製の管、Fig.4.3 に示すようにアルミニウム製の板 2 枚を  $120[^\circ]$ の角度をつけて屋根状に繋ぎ合わせた物体の計 3 つのそれぞれに対して実験した。埋設物の位置は走査開始点から水平方向に  $300[\text{mm}]$ 、深さ  $120[\text{mm}]$ である。

それぞれの埋設物に対して quasi-モノスタティック地中レーダとして送・受信器離隔  $0[\text{mm}]$ の測定結果を、バイスタティック地中レーダとして他の 3 つの離隔による測定結果に組み合わせた 3 通りのペアに対して提案手法を適用し、埋設物の断面を推定する。提案手法の復元性能を評価するため、微小線素の位置と傾きの角度の二つに関して、それぞれ平均二乗誤差を算出した。また、ノンパラメトリック手法の既存研究である RPM 法を用いて物体断面の推定を行い、提案手法との比較を行った。

#### 4.1.1. 実験結果

測定により得られた B-Scan 画像を Fig.4.4 ~ 4.6 に示す。提案手法によって得られた埋設物断面の復元画像を以下に示す。復元画像は実線、埋設物の真値は破線で示す。Fig.4.7 がアルミニウム製の板、Fig.4.8 が鉄製の管、Fig.4.9 がアルミニウム製の屋根状物体である。また Fig.4.7 ~ 4.9 それぞれの(a)から順に、三つのペア、すなわち  $0[\text{mm}]$ と  $130[\text{mm}]$ 、 $0[\text{mm}]$ と  $180[\text{mm}]$ 、 $0[\text{mm}]$ と  $230[\text{mm}]$ の測定結果を用いた復元断面画像である。また RPM 法による復元画像を Fig.4.10 に示す。RPM 法の推定画像は(a)から順に、平板、管、屋根状の物体のものになる。さらに Table.4.1 に提案手法による微小線素の推定位置と推定角度、及び RPM 法の推定位置に関する平均二乗誤差を示す。

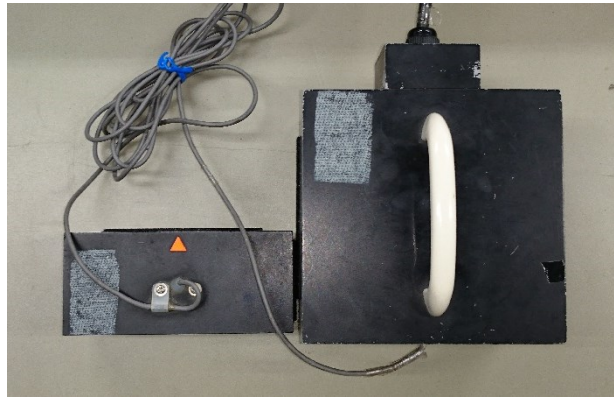


Fig. 4.1 Radar units location of quasi-monostatic radar system

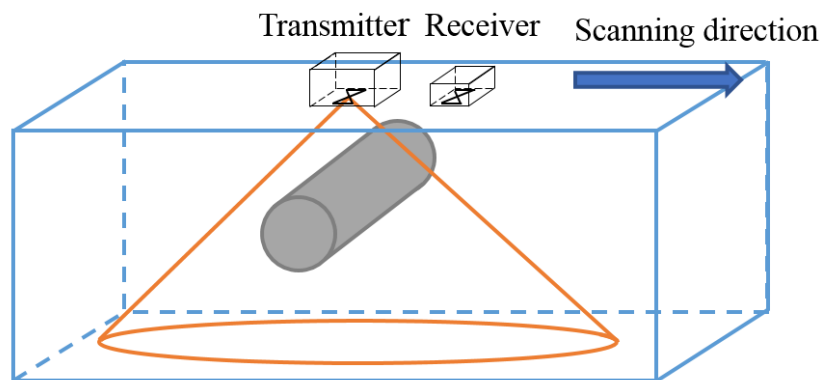
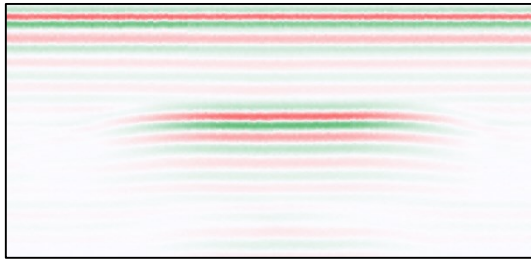


Fig. 4.2 Schematic diagram of radar scanning

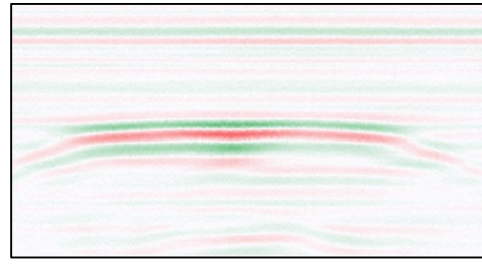


Fig. 4.3 Roof-like aluminium plate



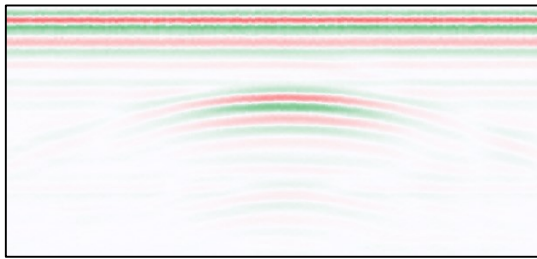


(a) Distance of radar units: 0mm

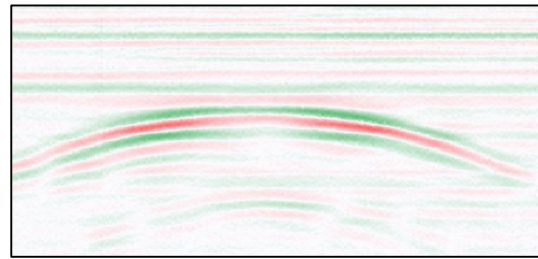


(b) Distance of radar units: 230mm

Fig. 4.4 B-Scan images of scanning a plate for each Distance of radar units

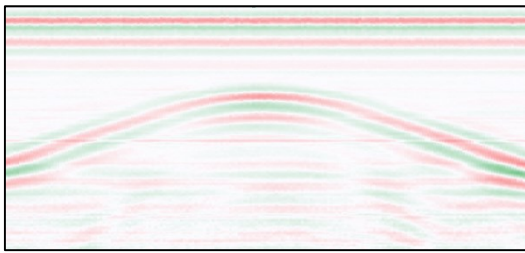


(a) Distance of radar units: 0mm

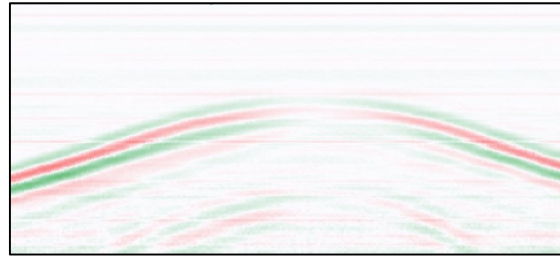


(b) Distance of radar units: 230mm

Fig. 4.5 B-Scan images of scanning a pipe for each Distance of radar units



(a) Distance of radar units: 0mm



(b) Distance of radar units: 230mm

Fig. 4.6 B-Scan images of scanning a Roof-like aluminium plate for each Distance of radar unit

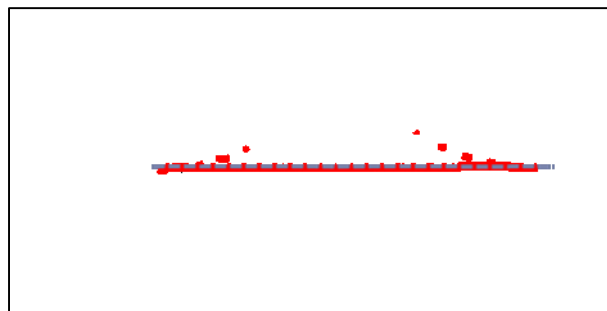


Fig. 4.7 (a) Reconstructed cross-sectional image for the flat plate based on the pair of a quasi-monostatic GPR and 130mm bi-static GPR data



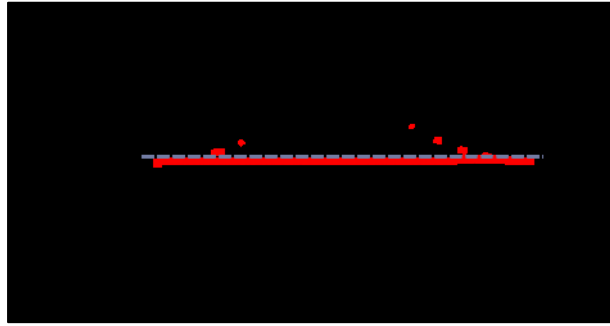


Fig. 4.7(b) Reconstructed cross-sectional image for the flat plate based on the pair of a quasi-monostatic GPR and 180mm bi-static GPR data

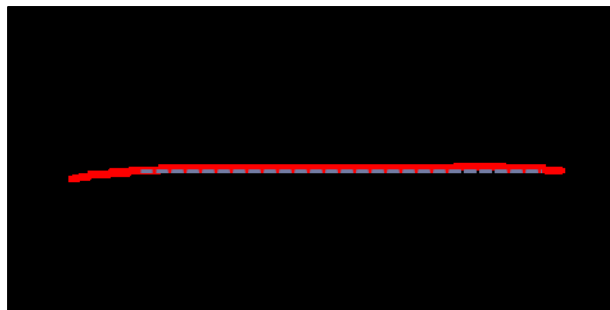


Fig.4.7(c) Reconstructed cross-sectional image for the flat plate based on the pair of a quasi-monostatic GPR and 230mm bi-static GPR data

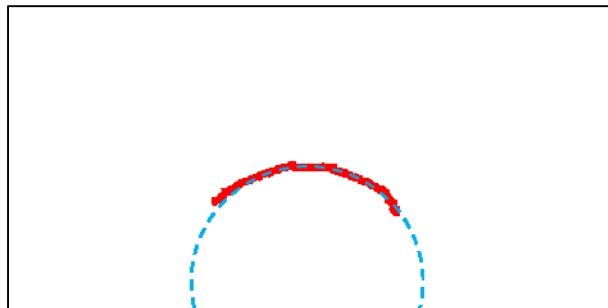


Fig. 4.8 (a) Reconstructed cross-sectional image for the pipe based on the pair of a quasi-monostatic GPR and 130mm bi-static GPR data

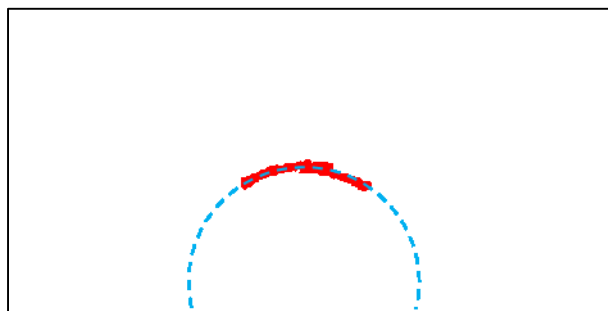


Fig.4.8(b) Reconstructed cross-sectional image for the pipe based on the pair of a quasi-monostatic GPR and 180mm bi-static GPR data

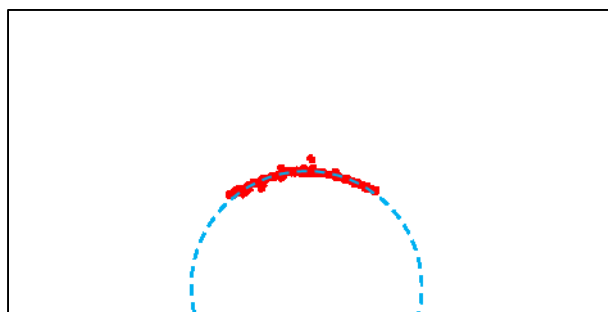


Fig.4.8(c) Reconstructed cross-sectional image for the pipe based on the pair of a quasi-monostatic GPR and 230mm bi-static GPR data

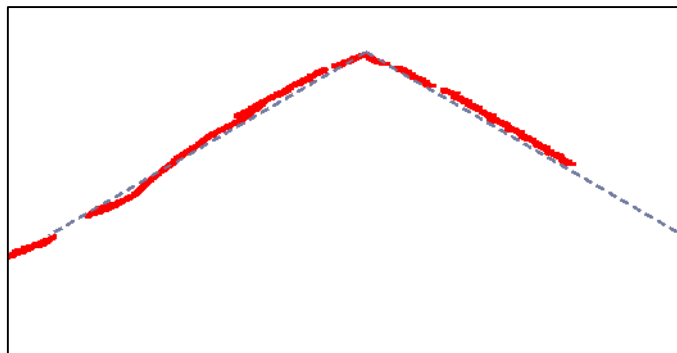


Fig. 4.9(a) Reconstructed cross-sectional image for the Roof-like aluminium plate based on the pair of a quasi-monostatic GPR and 130mm bi-static GPR data

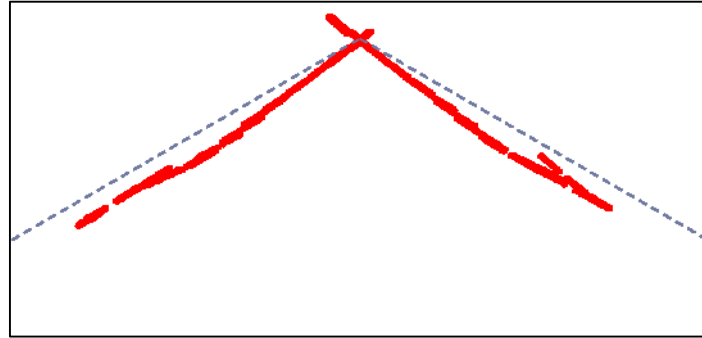


Fig.4.9(b) Reconstructed cross-sectional image for the Roof-like aluminium plate based on the pair of a quasi-monostatic GPR and 180mm bi-static GPR data

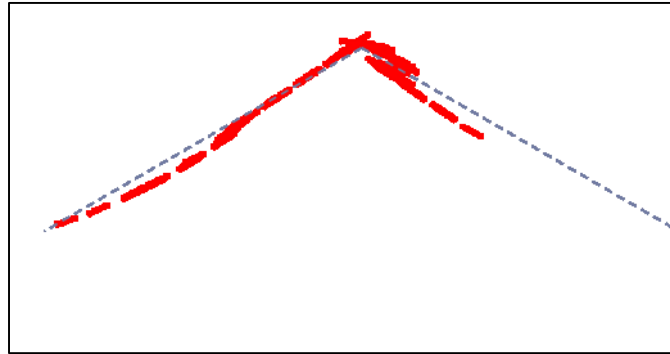


Fig.4.9(c) Reconstructed cross-sectional image for the Roof-like aluminium plate based on the pair of a quasi-monostatic GPR and 230mm bi-static GPR data

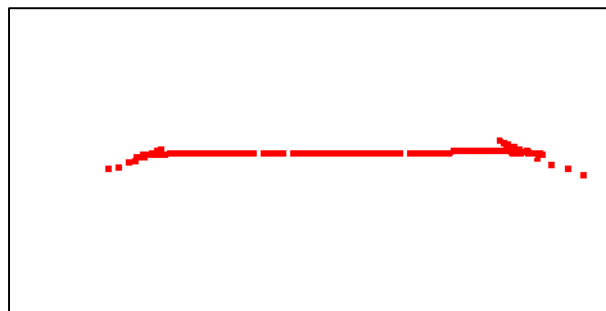


Fig. 4.10(a) Reconstructed cross-sectional image for the flat plate by RPM method

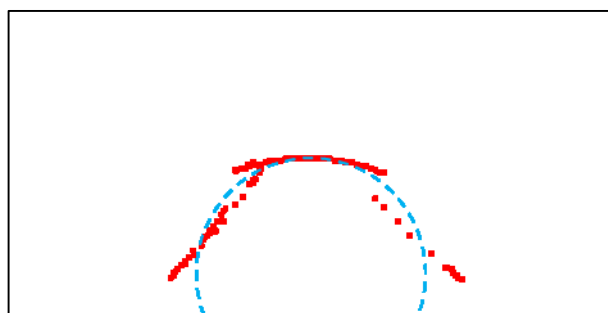


Fig.4.10 (b) Reconstructed cross-sectional image for the pipe by RPM method

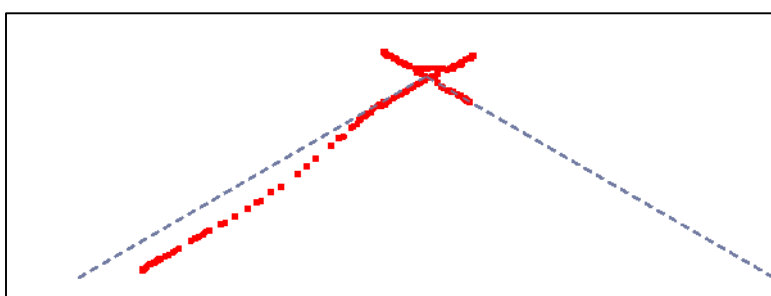


Fig.4.10 (c) Reconstructed cross-sectional image for the Roof-like aluminium plate by RPM method

Table 4.1 Root mean square errors of estimated results by proposed method and RPM method

		130[mm]	180[mm]	230[mm]	RPM method
Flat plate	RMSE of position[mm]	0.491	0.344	35.805	0.687
	RMSE of angle[°]	0.873	0.711	2.787	
Pipe	RMSE of position[mm]	1.278	1.039	1.692	4.962
	RMSE of angle[°]	13.002	10.456	12.225	
Roof-like plate	RMSE of position[mm]	3.579	11.325	13.275	13.311
	RMSE of angle[°]	11.171	7.736	14.729	

## 4.2. 実地試験

### 4.2.1. 実験条件

次に、実際に地中に埋設した物体を測定した結果に対して提案手法を適用した。実験場所は三重県津市の町屋海岸である。砂浜に物体を埋設し、水槽実験と同じくアクリル板を砂地盤の上に置いた。実験の様子を Fig.4.11 に示す。地中レーダのサンプリング間隔や送・受信器離隔、走査方向は水槽試験と同様だが、土は水に比べて比誘電率が小さく、電磁波の伝播速度が大きいので測定レンジは 8[ns]として測定を行う。なお、較正用の平板における測定結果に基づいて、砂浜の比誘電率は 3.5 と求められた。

実地試験で用いた埋設物は 300[mm]×300[mm]の亚克力製の板にアルミホイルを巻いた板,  $\Phi 170$ [mm]×300[mm]の鉄製の管に加え, 水槽実験でも用いたアルミニウム製の屋根状物体の 3 つである. 埋設物の位置はそれぞれ走査開始点から水平方向に 300[mm]の箇所に設置した. また深さは, 平板を 420[mm]で, 管と屋根状物体は 300[mm]で設置した. このように設置したのは平板の計測結果から比誘電率の校正を行うためである.

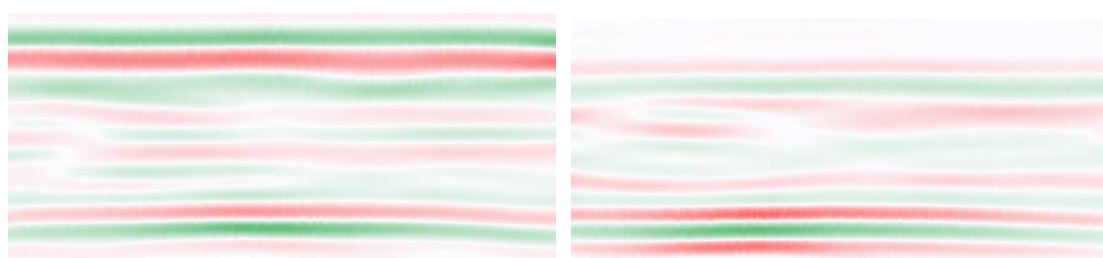
こちらでも quasi-モノスタティック地中レーダとバイスタティック地中レーダの組み合わせ 3 通りで物体の断面復元を行い, 微小線素の位置と傾きの角度の平均二乗誤差を算出と RPM 法による断面を復元し評価を行った.



Fig. 4.11 Experimental situation

#### 4.2.2. 実験結果

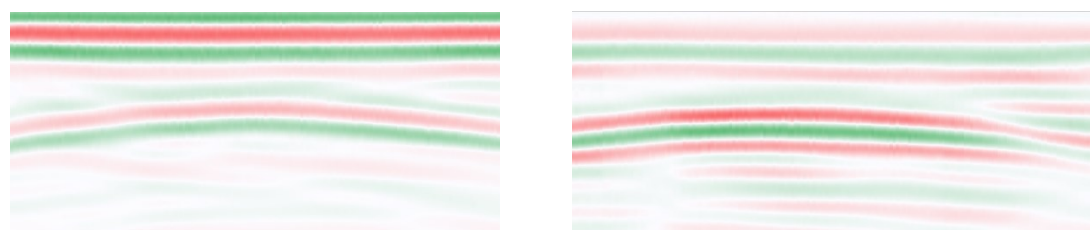
得られた B-Scan 画像を Fig.4.13 ~15 に, 提案手法と RPM 法による復元画像を Fig.4.16 ~19 に示す. さらに Table.4.1 に提案手法による微小線素の推定位置と推定角度, 及び RPM 法の推定位置に関する平均二乗誤差を示す.



(a) Distance of radar units: 0mm

(b) Distance of radar units: 230mm

Fig. 4.12 B-Scan images of scanning a plate for each Distance of radar units



(a) Distance of radar units: 0mm

(b) Distance of radar units: 230mm

Fig. 4.13 B-Scan images of scanning a pipe for each Distance of radar units

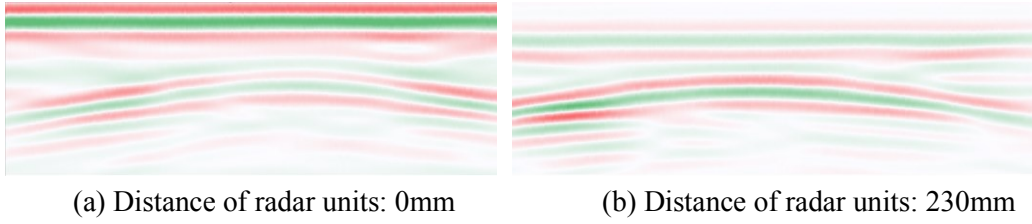


Fig. 4.14 B-Scan images of scanning a Roof-like aluminium plate for each Distance of radar units

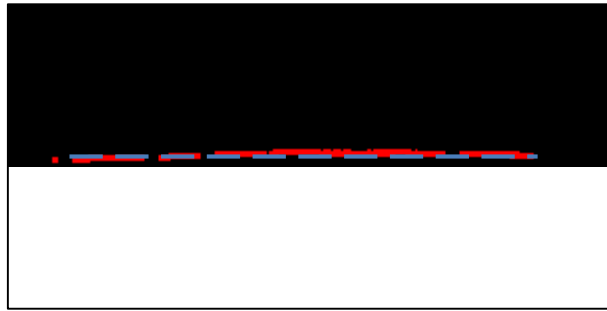


Fig. 4.15(a) Reconstructed cross-sectional image for the flat plate based on the pair of a quasi-monostatic GPR and 130mm bi-static GPR data

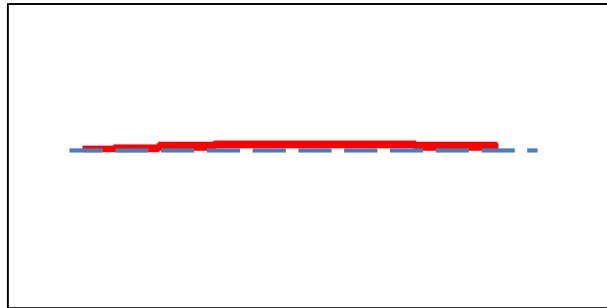


Fig.4.16(b) Reconstructed cross-sectional image for the flat plate based on the pair of a quasi-monostatic GPR and 180mm bi-static GPR data



Fig.4.16(c) Reconstructed cross-sectional image for the flat plate based on the pair of a quasi-monostatic GPR and 230mm bi-static GPR data

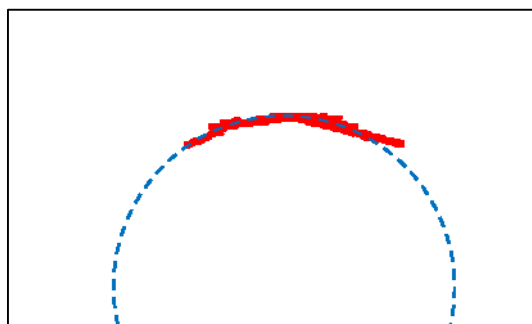


Fig. 4.16(a) Reconstructed cross-sectional image for the pipe based on the pair of a quasi-monostatic GPR and 130mm bi-static GPR data

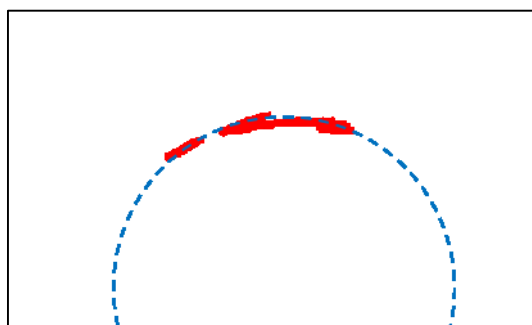


Fig.4.17 (b) Reconstructed cross-sectional image for the pipe based on the pair of a quasi-monostatic GPR and 180mm bi-static GPR data

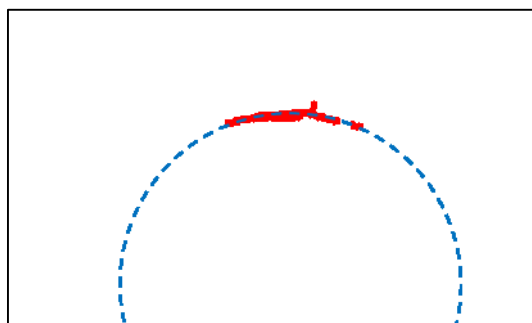


Fig.4.17(c) Reconstructed cross-sectional image for the pipe based on the pair of a quasi-monostatic GPR and 230mm bi-static GPR data

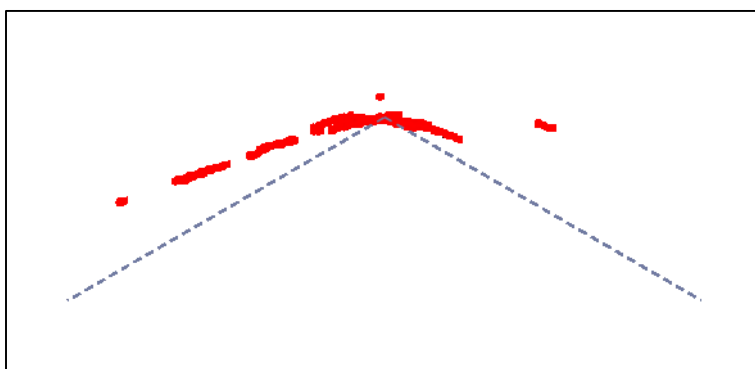


Fig. 4.17(a) Reconstructed cross-sectional image for the Roof-like aluminium plate based on the pair of a quasi-monostatic GPR and 130mm bi-static GPR data

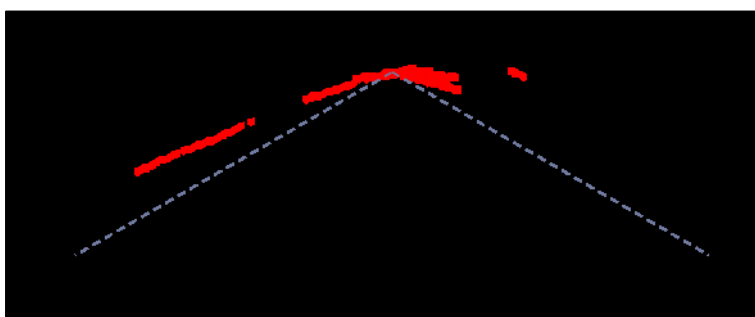


Fig.4.18(b) Reconstructed cross-sectional image for the Roof-like aluminium plate based on the pair of a quasi-monostatic GPR and 180mm bi-static GPR data

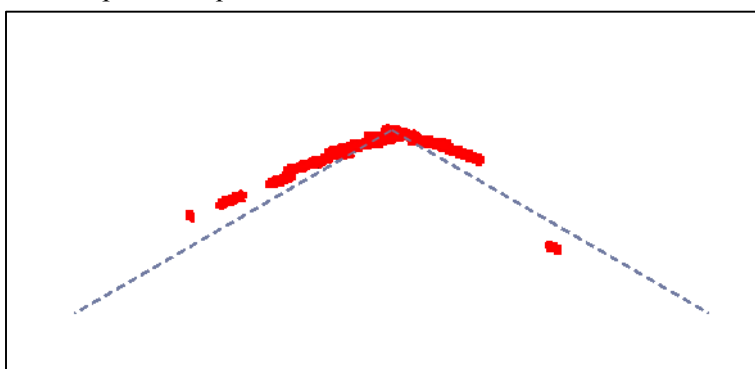


Fig.4.18(c) Reconstructed cross-sectional image for the Roof-like aluminium plate based on the pair of a quasi-monostatic GPR and 230mm bi-static GPR data



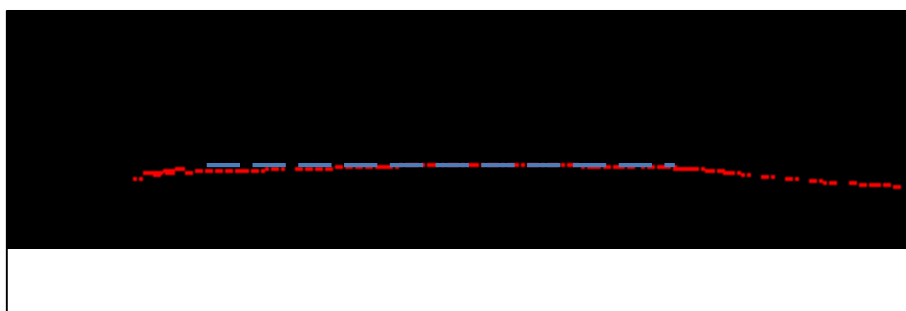


Fig. 4.18(a) Reconstructed cross-sectional image for the flat plate by RPM method

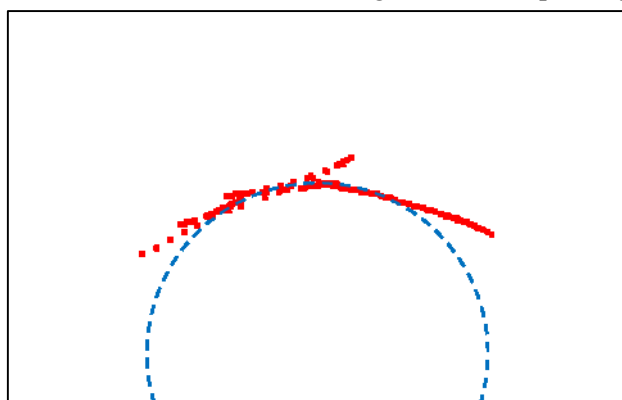


Fig.4.19 (b) Reconstructed cross-sectional image for the pipe by RPM method

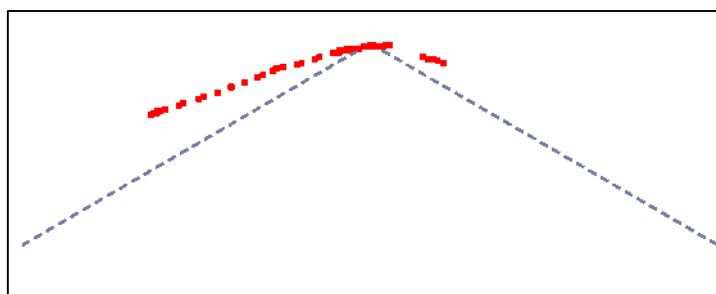


Fig.4.19 (c) Reconstructed cross-sectional image for the Roof-like aluminium plate by RPM method

Table 4.2 Root mean square errors of estimated results by proposed method and RPM method

		130[mm]	180[mm]	230[mm]	RPM method
Flat plate	RMSE of position[mm]	2.027	2.155	2.396	2.805
	RMSE of angle[°]	0.723	0.723	3.181	
Pipe	RMSE of position[mm]	1.697	4.429	4.125	2.467
	RMSE of angle[°]	10.322	12.980	12.747	
Roof-like plate	RMSE of position[mm]	17.194	13.629	11.606	10.726
	RMSE of angle[°]	24.738	19.899	22.282	

### 4.3. 考察

復元画像を見てみると、平板と円管はおおむね真値の輪郭に沿って推定位置が出来たことがわかるが、水槽実験の quasi -モノスタティック地中レーダと送・受信器離隔 230mm のバイスタティック地中レーダの復元画像以外の物は真値から外れてしまっている。また平均二乗誤差の表から特に角度では円管、屋根状物体の誤差が大きく出ている。

電磁波は伝播距離が長くなるほど指数関数的に強度が減衰する性質がある[9]。送受信機間距離が広くなると同じ地点で反射したとしても電磁波伝播距離が長くなることで強度が弱くなる。これによりノイズの影響を受けやすくなり、正確なパラメータ推定が困難になったのだと考えられる。また今回の実地試験では較正により求めた比誘電率を用いたが、厳密には場所によって比誘電率が変化するため、算出した電磁波の伝播距離と現実の伝播距離にずれが生じたことによって誤差が出たものと考えられる。

## 第5章. 結言

### 5.1. 結論

本論文では，マルチスタティック地中レーダを用いた埋設物の鉛直方向の断面形状復元方法を提案した．さらに，金属製の管や平板などが埋められた状況で提案の推定手法を適用した．復元画像では埋設管の形状が判別しやすくなったことから，この方法が有効であると示された．

### 5.2. 今後の課題

水中のように比誘電率がほぼ一様と考えられる媒質であれば比較的綺麗に物体断面を描画することができた．しかしながら，地中など比誘電率が不均一な媒質では復元した物体断面の輪郭に乱れが生じた．本論文では，微小線素を表現する誤差楕円の長軸・短軸はデフォルト値を用いたが，微小線素の位置や方向の推定誤差を踏まえて誤差楕円の長軸・短軸を定めるなどして，復元性能を高めたい．

## 参考文献

- [1] 長沼陽一, 野村由司彦, 加藤典彦, 須藤佳一, “地中レーダによる平板の傾きと長さの推定”, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. 94-B, No. 5 (2011), pp. 720-723.
- [2] 長沼陽一, 野村由司彦, 加藤典彦, 須藤佳一, “地中レーダによる管の埋設状況の推定”, 非破壊検査, Vol. 60, No. 9 (2011), pp. 548-553.
- [3] Kocur, Dušan, Mária Švecová, Jana Rovňáková. "Through-the-wall localization of a moving target by two independent ultra wideband (UWB) radar systems." *Sensors* 13.9 (2013), pp.11969-11997.
- [4] Le Bastard C., Baltazart V., Wang Y., Saillard J., “Thin-pavement thickness estimation using GPR with high-resolution and superresolution methods”, *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, Vol. 45, No. 8 (2007), pp. 2511-2519.
- [5] 佐藤 亨, 阪本拓也, “UWB パルスレーダによる物体像再構成アルゴリズム”, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. 88-B, No. 12 (2005), pp. 2311-2325.
- [6] Shouhei Kidera, Takuya Sakamoto, and Toru Sato. "Accurate UWB radar three-dimensional imaging algorithm for a complex boundary without range point connections." *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 48.4 (2010): 1993-2004.
- [7] Dušan, Mária Švecová, Jana Rovňáková. "Through-the-wall localization of a moving target by two independent ultra wideband (UWB) radar systems." *Sensors* 13.9 (2013), pp.11969-11997.
- [8] Martin-Neira, M., “A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry”, *ESA journal*, Vol. 17 (1993), pp. 331-355.
- [9] 提井 信力, 電磁波の基礎, 増補 2 版(1989), p. 101, 内田老鶴圃.

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり，終始懇切丁寧な御指導，御鞭撻を賜りました三重大学工学部 野村由司彦教授に厚く御礼申し上げます．この場をお借りして謹んで感謝の意を表します．

地中レーダの研究を行うにあたり，機材のご提供をしていただきましたアイエスエンジニアリング株式会社の須藤佳一博士にも深く御礼を申し上げます．

実験の協力や助言をいただきましたプロセス解析研究室の皆様に心より感謝いたします．

最後に，本論分の作成に当たり，多大な御協力を頂きました 野村由司彦教授に重ねて御礼申し上げます．