

修士論文

地中レーダによる埋設位置, 管径, 比誘電率の
同時推定に関する研究

指導教員 野村 由司彦 教授

平成 22 年度

三重大学 大学院工学研究科 機械工学専攻

408M121 高木 耕平

目次

第1章 緒論.....	1
第2章 地中レーダの原理.....	3
第3章 管半径・埋設位置・比誘電率の同時推定.....	5
3.1 従来手法.....	5
3.2 提案手法.....	14
第4章 推定実験.....	16
4.1 実験方法.....	16
4.2 実験結果.....	19
4.3 考察.....	21
第5章 結論.....	23

参考文献

謝辞

図目次

2.1	Ground penetrating radar Antenna unit.	4
2.2	Ground penetrating radar Processing unit.	4
3.1	Pattern diagrams of COS method.	8
3.2	Original image.	8
3.3	Depth-depending noise-reduced image.	8
3.4	Condition of buried pipe.	9
3.5	Pattern diagrams of CMP.	13
3.6	Condition of buried pipe.	13
4.1	Experimental setup.	17
4.2	One side synthetic-aperture angle θ	17
4.3	Experimental results of the theoretical values fitted to the observed ones. (Left picture is result by COS method and the other is result by CMP method.)	18

表目次

4.1	Estimated results by proposed method (COS+CMP).	20
4.2	Estimated results by conventional method (COS).	20
4.3	Parameter correlations.	20

第1章 緒論

現在、上下水道管、ガス管、通信ケーブルなどのライフラインのほとんど多くは、地下に網の目のように敷設されている。これらの多くは、敷設時の施工図面や工事が不正確であったり、改修・保全点検などの埋め戻し時に埋設位置がずれる場合も多く、地下埋設状況を正確に把握することは困難である[1]。道路工事の際には、埋設管やケーブル等のライフラインを傷つけてしまい付近の住民の生活に影響を与えてしまう恐れがあるため、これらの埋設物の位置・大きさなどの幾何学的情報が必要となる。そこで、地下埋設物を非破壊・非掘削で探索する方法として、地中レーダ(Ground Penetrating Radar:GPR)が一般的に用いられている[2]。しかし、アンテナから放射される電磁波は、時間的、空間的に広がって伝搬するため、アンテナ走査により得られるレーダ画像の分解能は低く、アンテナ走査により得られる観測画像は地下構造を直接反映したものではないため、観測画像からの埋設物の位置、形状を認識するのは困難である。

地中レーダの探査法方として、レーダを構成する送信機と受信機の間隔を一定に保持した状態で走査するCOS(Common Offset)法と、送信機と受信機を任意の一点に対してそれぞれ反対方向に等量だけ移動させながら観測するCMP(Common MidPoint)法が存在する。COS法の場合、埋設管に対しアンテナ走査を行った際の観測画像は双曲線形状を示すが、双曲線の曲率には管径と比誘電率が大きく関わっており、両者を同時に推定することは困難である。一方、CMP法は同一の反射点に対して複数の観測位置から反射波の伝搬時間を観測することにより、物理的關係から伝搬媒質中の伝搬速度に起因する比誘電率と埋設物の埋設深さを求めることができる[3]。CMP法を行う際には、事前に埋設物の水平位置を知る必要があるが、一般的には、COS法による探査を行い地中の情報を広く得た後、CMP法による探査を行う。

地中レーダから得られる情報の内、主要なものに埋設物からの反射波の伝搬時間と受信信号の強度の2つがある。伝搬時間は管の材質に依存せず、幾何学的関係によりモデル化できるため、利用しやすいこともあり、多くの研究がなされている。しかし、埋設管を対象としたCOS法探査により得られる観測画像からは、伝搬時間の情報だけでは、管半径と比誘電率は強い相関があるため、両者の同時推定は困難であることが知られている。そこで、これまでは一方を既知として他方を推定することでこの強相関問題を回避してきた。例えば、管半径を既知として扱い、伝搬時間の情報から土中の比誘電率を総当り的に求める手法などがある。観測画像からの対象物の認識を目的とした先行研究として、例えば、鉄筋コンクリート中に埋設されている鉄筋の径・埋設位置、さらには、波形解析を行うことにより管材質までも判別する手法などが存在する[4]~[6]。また、著者らもこれまでに、埋設管を対象として、管半径、埋設位置、さらには、伝搬時間に受信信号の強度情報を加味することにより伝搬媒質の比誘電率も推定する手法を開発してきた[7], [8]。受信信号の

強度情報を利用した比誘電率を推定する手法は他にも数多く存在するが、強度を利用した手法はノイズ環境下において観測強度の歪みが大きくなり推定精度が下がり、実用性に欠けると考えられる。

本論文でも、埋設管を対象として観測画像からの管径、埋設位置、比誘電率の認識を目的としている。従来研究の多くは、比誘電率を既知として扱うなど実用性に欠けていた。また、受信信号の強度情報を用いた手法は、ノイズ環境下において精度が著しく低下すると考えられる。そこで、第3章において、伝搬時間の情報のみを用いた比誘電率と管径を同時に推定することのできる実用的な手法を提案する。具体的には、COS法の管径を推定できる点とCMP法の埋設物の比誘電率と埋設深さを推定することのできる利点に着目し、COS法とCMP法を併用することにより、管半径、水平埋設位置、埋設深さ、さらには、比誘電率までも同時かつ高精度に推定することのできる手法を提案する。幾何学的位置関係に基づいたCOS法とCMP法における伝搬時間モデルを考え、これらを非線形最小二乗法に適用することにより、管半径、埋設位置、比誘電率を同時推定する。なお、前提条件として、土中は均質で等方性かつ分散がないものとしている。また、簡単化のため、アンテナは埋設管に対して垂直な方向に走査するものとしている。第4章において、提案手法の有効性を確認するため、土中における埋設管の探査実験を行ない、比誘電率および管半径と埋設位置が十分な精度で推定できることを示す。

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。パルス状の印加電圧のパルス幅は約 1nsec，電磁波の中心周波数は 700MHz である。アンテナユニットには，送信アンテナと受信アンテナで構成されている。地中レーダの探査原理は，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電磁波を放射する。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，電磁波が埋設物から反射するまでの伝搬時間 y_t を求めることができる。電磁波の伝搬時間 y_t は，

$$l = \frac{vy_t}{2} = \frac{c_0 y_t}{2\sqrt{\epsilon}} \quad (2.1)$$

を用いて，アンテナユニットから埋設物までの距離 l に変換できる。ここで v は電磁波の地中伝搬速度， c_0 は真空中における光速 (3.0×10^8 m/s)， ϵ は地中の比誘電率である。Fig.2.2 に示す処理装置によって，観測点毎に得られた観測波形を並べ，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。観測画像において，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である。アンテナから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，反射像は双曲線形状を呈する。埋設物が大きさを有する，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。



Fig.2.1 Ground penetrating radar Antenna unit.



Fig.2.2 Ground penetrating radar Processing unit.

第3章

管半径・埋設位置・比誘電率の同時推定

3.1 従来手法

3.1.1 COS(Common Offset)法

1) 概要

COS(Common Offset)法は、送信機と受信機の間隔を一定に保持した状態で、送信機と受信機を一体として走査する手法である。本論文では、送信機と受信機を一つの点とみなすモノスタティック配置として扱い、これらのアンテナは埋設管に対して垂直な方向に走査するものとする。模式図を Fig.3.1 に示す。地表面上をほぼ一定の速度で、送受信機を同一方向に移動させながら、送信器から電磁波を発信し、埋設物に反射した反射波を受信機で観測する。なお、送信器から発信された電磁波は、ある指向特性を持ちつつも広角度に放射される。したがって、指向特性の範囲内では送受信器を移動しても、同一物体からの反射波を受信することができる。次に、得られた観測波形を観測位置に従って順に並べることで、Fig.3.2 に示すように双曲線形状の観測画像を得ることができる。通常は、観測強度に応じた段階的な疑似カラー表示をすることが多い。ここで得られる情報には、比誘電率、管径、埋設位置が反映している。

事前に地表面波のみのデータを採っておき、埋設管を走査した際に得られるデータを差し引く直達波を除去した画像を用いる方法も存在するが、本研究では、実用性を重視しているため Fig.3.3 に示すような平均差分画像を用いて推定を行う。また、観測画像に平均差分などの処理を加えることにより、微弱な反射波を強調することができる。

2) 前提条件

次に COS 法で用いる伝搬時間モデルを示す。Fig.3.4 に半径 r の埋設管が、水平位置 l_u 、埋設深さ l_d の位置に埋設されているときの断面の様子を示す。管径 r と比誘電率 ϵ は、埋設管を探索した際に得られる観測画像の双曲線の形状に与える影響の仕方が似ており、一般的には COS 法での同時推定は困難となるため、一方の値を既知として扱うことが多く、本章でも未知パラメータ \mathbf{x} を $\mathbf{x}=[r, l_u, l_d]^T$ として扱う。また、埋設管からの反射モデルとして、電磁波が最短距離地点、すなわち埋設管の表面に垂直に入射する経路で伝搬時間のモデルを考える。

3) 回帰方程式

$i=0\sim n-1$ まで n 個の観測データのうち、 i 番目の観測地点 u_i において、送受信器から埋設管までの電磁波の伝搬距離 $l_{cos,i}$ は、

$$l_{cos,i} = \sqrt{(u_i - l_u)^2 + (r + l_d)^2} - r \quad (3.1)$$

と表わされる。よって、電磁波の伝搬時間 $y_{cos,i}$ は、

$$\begin{aligned} y_{cos,i} &= \frac{2l_i}{c_0/\sqrt{\varepsilon}} \\ &= \frac{2\sqrt{\varepsilon}}{c_0} \left\{ \sqrt{(u_i - l_u)^2 + (r + l_d)^2} - r \right\} \end{aligned} \quad (3.2)$$

と定式化できる。式(3.2)は非線形最小二乗法における回帰方程式となる。

4) 推定方法

次に推定方法を示す。未知パラメータ \mathbf{x} を $\mathbf{x}=[r, l_u, l_d]^T$ として先に求めた回帰方程式(3.2)に非線形最小二乗法を適用する。観測行列を \mathbf{H} 、観測値の共分散行列を Σ_y とすると、残差2乗和 $S(\hat{\mathbf{x}}^{(k)} + \Delta\hat{\mathbf{x}}^{(k)})$ を最小とする未知パラメータ \mathbf{x} の k 次の修正ベクトル $\Delta\hat{\mathbf{x}}^{(k)}$ は次式により推定できる。

$$\begin{aligned} \Delta\hat{\mathbf{x}}^{(k)} &= \arg \min_{\Delta\hat{\mathbf{x}}^{(k)}} S(\hat{\mathbf{x}}^{(k)} + \Delta\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\ &= \left(\mathbf{H}^{(k)T} \Sigma_y^{-1} \mathbf{H}^{(k)} \right)^{-1} \mathbf{H}^{(k)T} \Sigma_y^{-1} \Delta\mathbf{y}^{(k)} \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \Delta\mathbf{y}^{(k)} &= \tilde{\mathbf{y}} - \mathbf{y}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\ &= \begin{bmatrix} \tilde{y}_{cos,0} \\ \tilde{y}_{cos,1} \\ \vdots \\ \tilde{y}_{cos,n-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} y_{cos,0}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\ y_{cos,1}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\ \vdots \\ y_{cos,n-1}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{H}^{(k)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_{\cos,0}}{\partial r} & \frac{\partial y_{\cos,0}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{\cos,0}}{\partial l_d} \\ \frac{\partial y_{\cos,1}}{\partial r} & \frac{\partial y_{\cos,1}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{\cos,1}}{\partial l_d} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial y_{\cos,n-1}}{\partial r} & \frac{\partial y_{\cos,n-1}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{\cos,n-1}}{\partial l_d} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^{(k)}} \quad (3.5)$$

この $\Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)}$ を用いて、未知パラメータ $\hat{\mathbf{x}}^{(k)}$ は、

$$\Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k+1)} = \hat{\mathbf{x}}^{(k)} + \Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)} \quad (3.6)$$

これを反復することにより、 \mathbf{x} の最尤推定値 $\hat{\mathbf{x}}$ が得られる。また、 $\hat{\mathbf{x}}$ の共分散行列 $\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}}$ は次式により求められる。ただし、

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{H}^T \Sigma_y \mathbf{H})^{-1} \quad (3.7)$$

である。

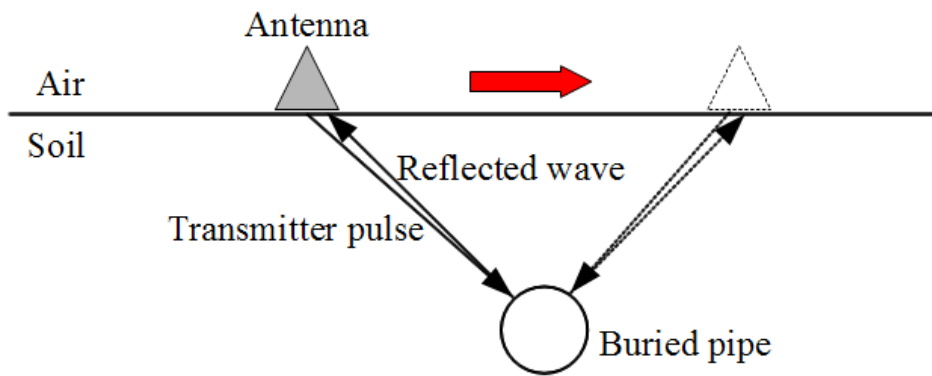


Fig.3.1 Pattern diagrams of COS method.

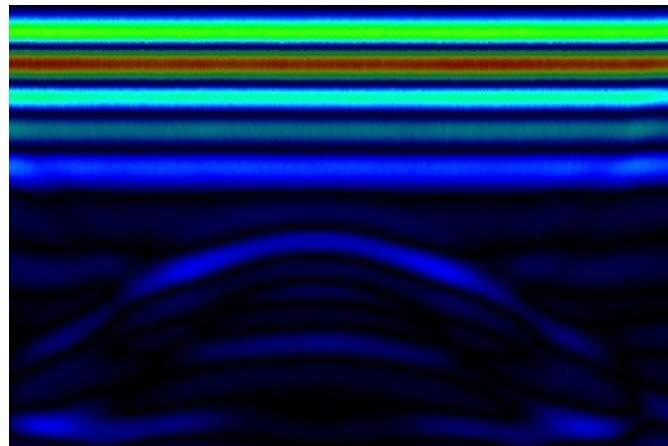


Fig.3.2 Original image.

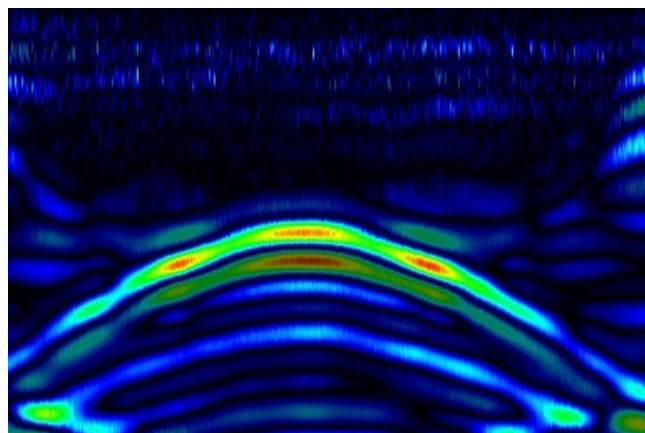


Fig.3.3 Depth-dependent noise-reduced image.

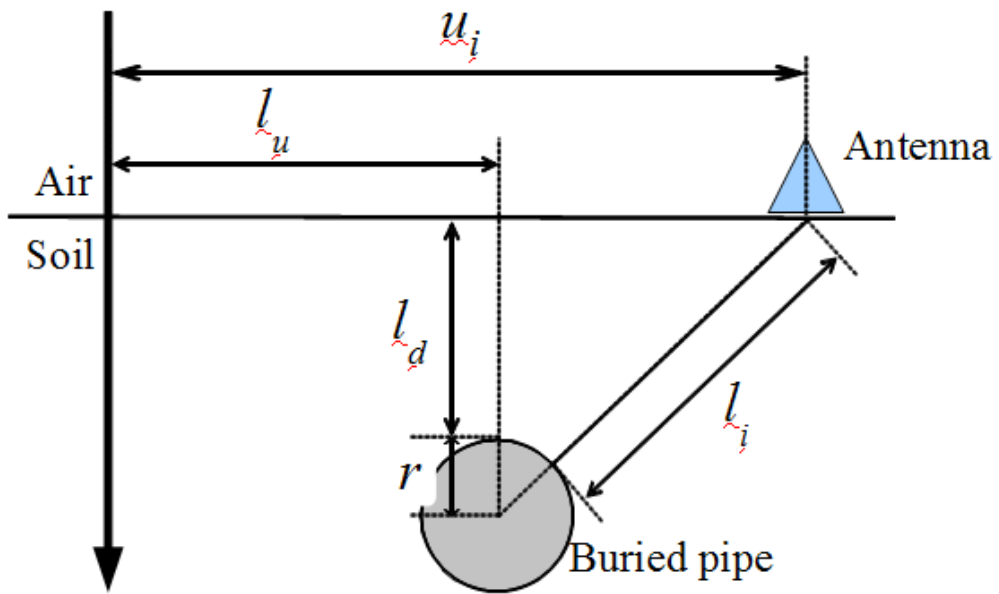


Fig.3.4 Condition of buried pipe.

3.1.2 CMP(Common Midpoint)法

1) 概要

CMP(Common Midpoint)法は、送信機と受信機を地表面に設置し、任意の1点を中心に送信機と受信機をそれぞれ反対方向に等しい量だけ移動させながら観測する手法である。模式図を Fig.3.5 に示す。Fig.3.5 に示すように本手法の特徴は対象物体が埋設管の場合、各観測において同一点からの反射波を観測することになる。また、各観測において幾何学的関係を考慮することで、伝搬距離を計算することができる。つまり、本手法を用いての埋設管の管径を推定することはできないが、同一点からの反射波の伝搬時間を複数の観測位置において観測することにより、埋設深さと土中の伝搬速度に起因する比誘電率を（道のり速さ時間の）物理的關係により同時に求めることができるという利点を擁する。CMP法を行う際には、事前に埋設物の水平位置を知る必要があるが、一般的には、COS法による探査を行い地中の情報を広く得た後、CMP法による探査を行う。

2) 前提条件

半径 r の埋設管が、水平位置 l_h 、埋設深さ l_d の位置に埋設されているときの断面の様子を Fig.3.6 に示す。本章では、未知パラメータ \mathbf{x} を $\mathbf{x}=[l_h, \varepsilon]^T$ として扱う。また、埋設管からの反射モデルとして、電磁波が埋設管の直上で反射するモデルを用いる。

3) 回帰方程式

$i=0\sim m-1$ まで m 個の観測データのうち、 i 番目の観測における送信機と受信機の間隔を $2\Delta x_i$ とする。送受信機から埋設管までの電磁波の伝搬距離 $l_{CMP,i}$ は、

$$l_{CMP,i} = \sqrt{\Delta x_i^2 + l_d^2} \quad (3.8)$$

と表わされる。このとき電磁波は、遅れを伴って観測されるので、COS法と同様に考慮すると電磁波の伝搬時間 $y_{CMP,i}$ は、

$$\begin{aligned}
y_{CMP,i} &= \frac{2l_i}{c_0/\sqrt{\varepsilon}} \\
&= \frac{2\sqrt{\varepsilon}}{c_0} \sqrt{\Delta x_i^2 + l_d^2}
\end{aligned} \tag{3.9}$$

と定式化できる．式(3.9)は非線形最小二乗法における回帰方程式となる．

4) 推定方法

次に推定方法を示す．COS法同様に，未知パラメータ \mathbf{x} を $\mathbf{x}=[l_d, \varepsilon]^T$ として先に求めた回帰方程式(3.9)に非線形最小二乗法を適用する．観測行列を \mathbf{H} ，観測値の共分散行列を Σ_y とすると，残差2乗和 $S(\hat{\mathbf{x}}^{(k)} + \Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)})$ を最小とする未知パラメータ \mathbf{x} の k 次の修正ベクトル $\Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)}$ は次式により推定できる．

$$\begin{aligned}
\Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)} &= \arg \min_{\Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)}} S(\hat{\mathbf{x}}^{(k)} + \Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\
&= \left(\mathbf{H}^{(k)T} \Sigma_y^{-1} \mathbf{H}^{(k)} \right)^{-1} \mathbf{H}^{(k)T} \Sigma_y^{-1} \Delta \mathbf{y}^{(k)}
\end{aligned} \tag{3.10}$$

$$\begin{aligned}
\Delta \mathbf{y}^{(k)} &= \tilde{\mathbf{y}} - \mathbf{y}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\
&= \begin{bmatrix} \tilde{y}_{CMP,0} \\ \tilde{y}_{CMP,1} \\ \vdots \\ \tilde{y}_{CMP,m-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} y_{CMP,0}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\ y_{CMP,1}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\ \vdots \\ y_{CMP,m-1}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.11}$$

$$\mathbf{H}^{(k)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_{CMP,0}}{\partial l_d} & \frac{\partial y_{CMP,0}}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial y_{CMP,1}}{\partial l_d} & \frac{\partial y_{CMP,1}}{\partial \varepsilon} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial y_{CMP,m-1}}{\partial l_d} & \frac{\partial y_{CMP,m-1}}{\partial \varepsilon} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^{(k)}} \tag{3.12}$$

この $\Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)}$ を用いて，未知パラメータ $\hat{\mathbf{x}}^{(k)}$ は，

$$\Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k+1)} = \hat{\mathbf{x}}^{(k)} + \Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)} \tag{3.13}$$

これを反復することにより， \mathbf{x} の最尤推定値 $\hat{\mathbf{x}}$ が得られる．また， $\hat{\mathbf{x}}$ の共分散行列は

次式により求められる。ただし,

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{H}^T \boldsymbol{\Sigma}_y \mathbf{H})^{-1} \quad (3.14)$$

である。

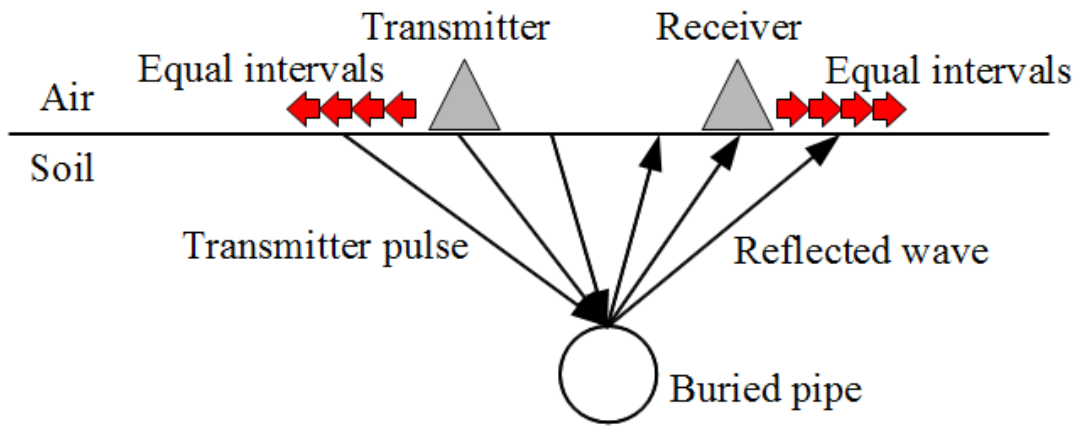


Fig.3.5 Pattern diagrams of CMP.

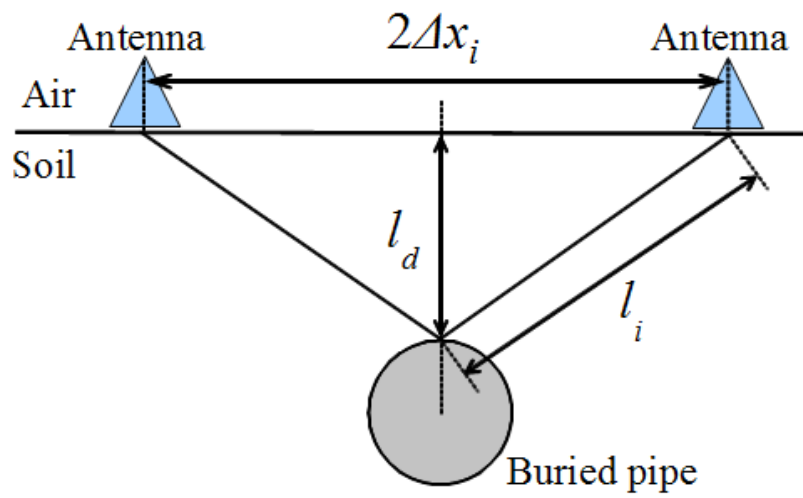


Fig.3.6 Condition of buried pipe.

3.2 提案手法

1) 概要

本論文では、未知パラメータの管半径、水平埋設位置、埋設深さ、さらには、比誘電率までも同時かつ高精度に推定することのできる手法を提案する。本提案手法では、管径と比誘電率を同時に推定することを目的としているが、先に述べたようにCOS法のみで推定を行う場合、埋設管を対象とした観測画像に双曲線の曲率には管径と比誘電率が大きく関わっており、両者を同時に推定することは困難である。そこで、COS法の管径を推定できる点とCMP法の物理的關係から埋設物の埋設深さと比誘電率を推定することのできる利点に着目し、これらの手法を併用することにより強相関問題を回避し、管径と比誘電率を同時に推定する。提案手法では、以下の手順で探査を行う。すなわち、

- ① COS法による探査を行う。さらに得られた探査データを用いて、3.1.1項の4)で述べた計算方法により、 $\mathbf{x}=[r, l_u, l_d]^T$ を推定する。
- ② 先に求めた、水平位置 l_u を中心としてCMP法による探査を行う。
- ③ 手順①で求めたCOS法による探査データ、および手順②で求めたCMP法による探査データの両者を用いて、次項3.2.2)で述べる計算方法により、 $\mathbf{x}=[r, l_u, l_d, \varepsilon]^T$ を推定する。

2) 推定方法

次に、未知パラメータ x を $x=[r, l_u, l_d, \varepsilon]^T$ として先に求めた回帰方程式(3.2), (3.9)に非線形最小二乗法を適用する。観測行列を H 、観測値の共分散行列を Σ_y とすると、残差2乗和 $S(\hat{\mathbf{x}}^{(k)} + \Delta\hat{\mathbf{x}}^{(k)})$ を最小とする未知パラメータ x の k 次の修正ベクトル $\Delta\hat{\mathbf{x}}^{(k)}$ は次式により推定できる。

$$\begin{aligned} \Delta\hat{\mathbf{x}}^{(k)} &= \arg \min_{\Delta\hat{\mathbf{x}}^{(j)}} S(\hat{\mathbf{x}}^{(k)} + \Delta\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\ &= \left(\mathbf{H}^{(k)T} \Sigma_y^{-1} \mathbf{H}^{(k)} \right)^{-1} \mathbf{H}^{(k)T} \Sigma_y^{-1} \Delta\mathbf{y}^{(k)} \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned}
 \Delta \mathbf{y}^{(k)} &= \tilde{\mathbf{y}} - \mathbf{y}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\
 &= \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{y}_{COS,0} \\ \tilde{y}_{COS,1} \\ \vdots \\ \tilde{y}_{COS,n-1} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \tilde{y}_{CMP,0} \\ \tilde{y}_{CMP,1} \\ \vdots \\ \tilde{y}_{CMP,m-1} \end{bmatrix} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{COS,0}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\ y_{COS,1}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\ \vdots \\ y_{COS,n-1}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} y_{CMP,0}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\ y_{CMP,1}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\ \vdots \\ y_{CMP,m-1}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \tag{3.16}
 \end{aligned}$$

$$\mathbf{H}^{(k)} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial y_{COS,0}}{\partial r} & \frac{\partial y_{COS,0}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{COS,0}}{\partial l_d} & \frac{\partial y_{COS,0}}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial y_{COS,1}}{\partial r} & \frac{\partial y_{COS,1}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{COS,1}}{\partial l_d} & \frac{\partial y_{COS,1}}{\partial \varepsilon} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial y_{COS,n-1}}{\partial r} & \frac{\partial y_{COS,n-1}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{COS,n-1}}{\partial l_d} & \frac{\partial y_{COS,n-1}}{\partial \varepsilon} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \frac{\partial y_{CMP,0}}{\partial r} & \frac{\partial y_{CMP,0}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{CMP,0}}{\partial l_d} & \frac{\partial y_{CMP,0}}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial y_{CMP,1}}{\partial r} & \frac{\partial y_{CMP,1}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{CMP,1}}{\partial l_d} & \frac{\partial y_{CMP,1}}{\partial \varepsilon} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial y_{CMP,m-1}}{\partial r} & \frac{\partial y_{CMP,m-1}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{CMP,m-1}}{\partial l_d} & \frac{\partial y_{CMP,m-1}}{\partial \varepsilon} \end{bmatrix} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^{(k)}} \tag{3.17}$$

この $\Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)}$ を用いて、未知パラメータ $\hat{\mathbf{x}}^{(k)}$ は、

$$\Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k+1)} = \hat{\mathbf{x}}^{(k)} + \Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)} \tag{3.18}$$

これを反復することにより、 \mathbf{x} の最尤推定値 $\hat{\mathbf{x}}$ が得られる。また、 $\hat{\mathbf{x}}$ の共分散行列は次式により求められる。ただし、

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{H}^T \Sigma_y \mathbf{H})^{-1} \tag{3.19}$$

である。

第4章 推定実験

4.1 実験方法

提案手法の有効性を確認するため、埋設管の探査実験を行った。Fig.4.1に示すように W1202×D600×H600 mm のアクリル製の水槽の中に乾燥させた土を満たした。乾土の比誘電率の真値は物性表より 3.2 とした。この水槽に半径 50.5 mm、長さ 550mm のステンレス管を埋設深さ 300 mm に埋設し、アンテナを水槽の幅方向に走査して（埋設管に対して垂直になるように）COS 法と CMP 法による探査実験を行った。COS 法における反射波形のサンプリング間隔は 2.5 mm で、測定時間は 8ns とした。また、CMP 法における反射波形のサンプリングは、埋設管の真上の地表面の位置を中心として Δx を 98mm から 428mm まで 30mm 間隔で変更して行った。以上の条件で埋設管に対し、COS 法と CMP 法による探査を行い埋設管からの反射波の伝搬時間の測定を行った。

伝搬時間モデルにより擬似双曲線を当てはめる範囲は片側合成開口角 θ により規格化した形で説明できる。この片側合成開口角 θ の大きさと推定精度との関係を調べるため、前処理として、以下のようにデータを抽出した。すなわち、

- ① COS 法の伝搬時間モデルにより計算される擬似双曲線を当てはめ、未知パラメータを仮に求める。
- ② それらの値を用いて Fig.4.2 に示すように埋設管の中心から左右対称に片側合成開口角 θ をとり、 $\theta=20^\circ\sim 50^\circ$ まで変更して伝搬時間モデルによる擬似双曲線を当てはめる範囲を決定する。

本研究における伝搬時間とは埋設管からの反射波の第一ピーク点までの時間を指し、Fig.4.3 に埋設管からの反射波の第一ピーク点を 7 点おきに○で表示して、COS 法の伝搬時間モデルによる最尤推定値を示す。なお、Fig.4.3 における左右の画像は、左が COS 法、右が CMP 法に対応している。



Fig.4.1 Experimental setup.

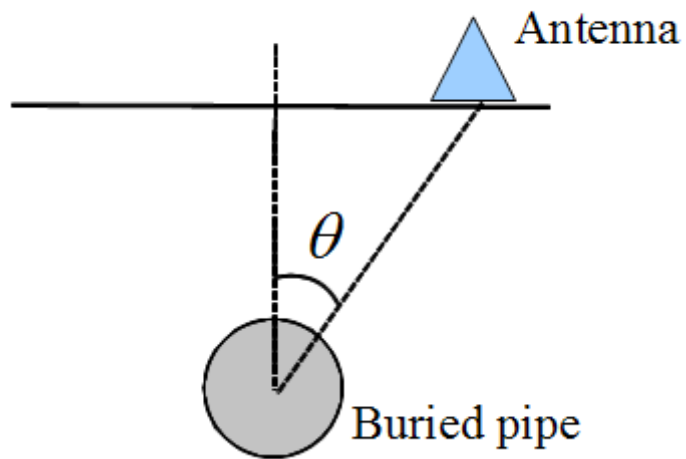


Fig.4.2 One side synthetic-aperture angle θ .

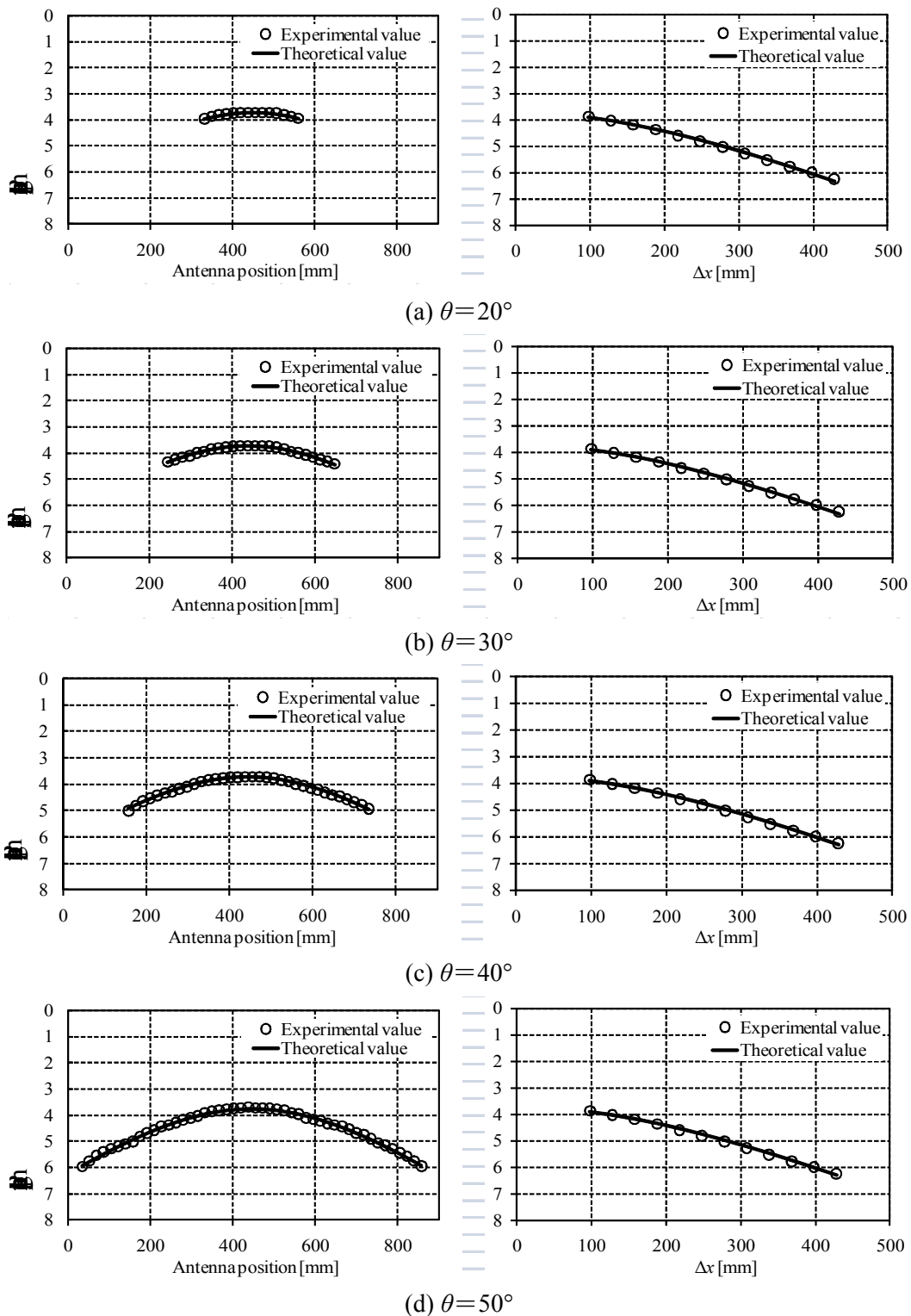


Fig.4.3 Experimental results of the theoretical values fitted to the observed ones.
 (Left picture is result by COS method and the other is result by CMP method.)

4.2 実験結果

θ を $20^\circ \sim 50^\circ$ までの 10° 刻みで変化させたときの提案手法 (COS+**CMP**) による未知パラメータの推定値と誤差を Table.4.1 に示し, 従来手法 (COS 法) により求めた未知パラメータの推定値と誤差を Table.4.2 に示す. また, Table.4.3 に $\theta=50^\circ$ のときの提案手法と従来手法により推定した際の各未知パラメータ間の相関係数を示す. 管径 r と比誘電率 ε の相関係数は $\rho_{r,\varepsilon}$ で表わされ, 同様に, 他の未知パラメータ間の相関係数は ρ_{ε,l_d} , ρ_{ε,l_u} , ρ_{l_u,l_d} , $\rho_{l_u,r}$, $\rho_{l_d,r}$ で表わされる.

従来手法では, θ に関わらず, l_u 以外のパラメータの推定誤差が大きくなっているが, 提案手法では, θ に関わらず, ε と l_d の推定誤差が一定になっており, 安定した推定ができてくる. また, 提案手法では θ が大きくなるにつれて r の推定誤差が小さくなる傾向が見られる. 最も精度の良い $\theta=50^\circ$ の結果に着目して従来手法と提案手法とを比較すると, 従来手法では ε が -33.4% , r が -317% , l_u が -1.7% , l_d が 27.7% と大きな誤差が出ているのに対し, 提案手法では ε が 0.01% , r が 36.8% , l_u が -1.7% , l_d が 4.1% の誤差で推定されており, 推定精度が大幅に改善されていることが確認された.

また, 提案手法における推定結果は従来手法と比べて, ε , r , l_d の推定精度が大幅に改善されている. これは, Table.4.3 からわかるように, 従来手法ではこれらのパラメータ間の相関係数はいずれも 0.99 となっており, 強い相関関係がある. これに対して, 提案手法ではこれらのパラメータ間の相関係数が小さくなっており, COS 法により得られた伝搬時間の情報に **CMP** 法による伝搬時間の情報を付加することで, これら3つのパラメータ間の従属性が低下していることを意味している.

Table.4.1 Estimated results by proposed method (COS+CMP).

θ	ε		r		l_d		l_u	
[deg]	-	error	[mm]	error	[mm]	error	[mm]	error
20	3.3	0.03%	95.2	88.5%	307.9	2.6%	431.8	-3.4%
30	3.32	0.04%	27.4	-45.5%	306.2	2.1%	437	-2.2%
40	3.28	0.03%	60.3	19.4%	310.1	3.7%	439.2	-1.7%
50	3.24	0.01%	69.1	36.8%	312.3	4.1%	439.5	-1.7%
true value	3.2		50.5		300		447	

Table.4.2 Estimated results by conventional method (COS).

θ	ε		r		l_d		l_u	
[deg]	-	error	[mm]	error	[mm]	error	[mm]	error
20	125.55	3823%	1367.8	2609%	132.4	-55.9%	435.8	-2.5%
30	0.73	-77.2%	-548.9	-1187%	653.5	117.8%	436.5	-2.3%
40	1.02	-68.1%	-405.2	-902%	551.9	84.0%	438.4	-1.9%
50	2.13	-33.4%	-109.6	-317%	383	27.7%	439.3	-1.7%
true value	3.2		50.5		300		447	

Table.4.3 Parameter correlations.

	COS+CMP	COS
$\rho_{\varepsilon,ld}$	-0.29	0.99
$\rho_{\varepsilon,lu}$	0.03	0.05
$\rho_{\varepsilon,r}$	0.49	0.99
$\rho_{ld,lu}$	-0.03	0.04
$\rho_{ld,r}$	0.68	0.99
$\rho_{lu,r}$	-0.01	0.05

4.3 考察

実験結果全体を見てみると、全ての条件において従来手法より提案手法の方が誤差を小さく抑えることに成功していることが見て取れる。特に提案手法における推定結果の比誘電率の誤差に注目すると、推定精度向上が顕著にうかがえる。次に、提案手法における θ の変化による推定精度の変化に注目すると、提案手法、従来手法とも θ の値が大きくなるにつれて推定精度が向上する傾向がうかがえる。これは θ の値が大きくなるにつれて推定に効果的な情報が付加されたことによるものと考えられる。つまり、Fig.3.9からも分かるように、 θ が小さいときには双曲線の頂点付近の情報のみを使うことになるが、 θ が大きくなると双曲線の情報量が増えるため、正確に管径を推定することができるようになったと考えられる。

また、 $\theta=50^\circ$ の結果に着目した時、提案手法では、比誘電率、管半径、埋設深さにおいて正確に推定されているのに対して、従来法では大きな誤差が出ていた。すなわち、Table.4.3 から、これらのパラメータ間の相関係数は、提案手法では-0.29, 0.49, 0.68といずれも小さく、強相関関係が回避できているのに対し、従来手法では0.99となっており強い相関関係が見られた。これには以下のような理由が考えられる。

- 1) 比誘電率と管径：COS 探査でのアンテナ走査により得られる双曲線の曲率は比誘電率と管径がともに影響する。つまり、比誘電率が小さいと双曲線の曲率は小さくなり、また、管径が大きくなると双曲線の曲率は小さくなる傾向がある。そのため両パラメータを未知としたときのCOS法での推定では、相関が大きくなる。一方、提案手法では、比誘電率の推定にCMP法のデータを用いることができ、両パラメータの相関を小さくすることができる。そのため推定誤差を小さく抑えられる。
- 2) 比誘電率と埋設深さ：埋設深さはアンテナ走査により観測された伝搬時間と媒質中の伝搬速度によって決定され、伝搬速度は媒質の比誘電率の関数である。そのため、両パラメータを未知とした際の従来手法による推定では両パラメータ間に大きな相関関係が存在した。一方、提案手法では、CMP法のデータが、比誘電率と埋設深さの推定を可能としている。
- 3) 管半径と埋設深さ：埋設深さと管半径も双曲線の曲率に影響を与えるパラメータである。そのため従来手法では両パラメータ間に大きな相関関係が存在した。一方、提

案手法では、CMP法で得られた埋設深さのデータを用いることができ、両パラメータの相関を小さくすることができる。そのため推定誤差を小さく抑えられる。

まとめると、比誘電率、管径、埋設深さはいずれもCOS法の探査により得られる双曲線の曲率に影響を与えるパラメータであり、比誘電率を未知パラメータとしたときの従来手法における推定では、それぞれのパラメータ間に大きな相関関係にあり、推定結果に重大な誤差を与えた。一方、伝搬時間から埋設深さと比誘電率を求めることができるCMP法を併用した提案手法では、CMP法が橋渡しとなりパラメータ間の相関を弱め、正確な推定を可能にしたと考えられる。

第5章 結論

本研究では、従来法である COS 法と CMP 法を併用し、4つの未知パラメータの比誘電率、管半径、水平位置、埋設深さを同時かつ高精度に推定する手法を提案した。そして、推定実験を実施することにより、高精度に同時推定を行えることを確認した。

本手法は地下埋設物だけでなく、コンクリート中の鉄筋探査などにも応用可能であるが、今後は、それらへの有効性の確認、湿土に適用範囲を拡大することについても検討したい。

参考文献

- [1] 神代晃治, 藤井邦男, ” 埋設管マッピングシステムを用いた地下埋設物の三次元非破壊探査の精度検証結果について, ” 第 19 回日本非開削技術研究発表会論文集, 2008.
- [2] 佐藤源之, “地中レーダ地下イメージング, ” 信学論 (C), vol.J85-C, no.7, pp.520-530, July 2002.
- [3] Chien-Ping Kao, Jing Li, Ying Wang, Huichun Xing and Ce Richard, “Measurement of Layer Thickness and Permittivity Using a New Multilayer Model From GPR Data,” IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol.45, no.8, pp.2463-2470, August 2007.
- [4] 高山潤也, 田中隆行, 早川輝, 大山真司, 小林彬: コンクリート構造物の診断・評価のための鉄筋および配管の位置・径推定と材質弁別, 計測自動制御学会論文集, 43(9), pp. 741-748, 2007
- [5] 若林正樹, 田中正吾: 電磁波レーダを用いた鉄筋の深度及び径の計測に関する一考察, 非破壊検査, 56 (7), pp. 364-370, 2007.
- [6] 田中正吾, 若林正樹, 大出康貴, 岡本昌幸: 電磁波レーダを用いた埋設管のかぶりおよび径の計測, 計測自動制御学会論文集, 44(8), pp. 629-638, 2008.
- [7] 小瀧裕史, 野村由司彦, 西口仁視, 松井博和, “地中レーダによる観測画像からの埋設管半径の推定とその誤差解析, ” 信学論 (B), vol.J91-B, no.9, pp.1104-1112, Sept. 2008.
- [8] 小瀧裕史, 野村由司彦, 加藤典彦, 松井博和, “地中レーダによる観測画像からの埋設管半径の推定とその誤差解析, ” 信学論 (B), vol.J92-B, no.9, pp.1538-1549, 2009.

謝辞

本研究にあたり，終始適切かつ丁寧なご指導を頂いた三重大学大学院工学研究科 野村由司彦 教授に深く感謝いたします。

本研究を進めるにあたり，地中レーダを提供して下さったアイエスエンジニアリング株式会社 須藤佳一博士にも深く御礼申し上げます。

また，三重大学メカトロニクス研究室で本研究と一緒に進めてきた，長沼陽一君には特に深く感謝します。

最後に，協力して下さった三重大学メカトロニクス研究室の皆様にも心より感謝いたします。