水平ボーリング搭載レーダ用リアルタイム画像処理の開発

中 内 啓 雅*・野 津 俊 光**・鈴 木 盛 雄**
上 坂 進 一**・荒 井 郁 男*³

Development of the Real-time Radar Image Processing for a Horizontal Drilling Machine

Takaharu Nakauchi*, Toshimitsu Nozu**, Morio Suzuki**,
Shin'ichi Uesaka** and Ikuo Arai*³

ABSTRACT

In order to identify the underground objects, we often use a Ground Penetrating Radar (GPR) from the point of reducing cost and time. But it is not a few cases that the pavement situation prevents from underground prospecting.

From such background, we produced the prototype of the small GPR system to set into the drill head of the horizontal boring machine. And we are sure that it is highly possible to realize improving the limitation of exploration distance and resolution.

In this report, we described the goal specification required to such a small GPR, basic design of system and its performance. And we introduce the technical details concerned to the real time image processing algorithm for radar system which is mounted in the jacking drill head of a horizontal boring system.

The main functions of the image processing to use for a horizontal boring system are the followings.

- 1) Distance presumption: Presumes the distance between a drill head and pipe.
- 2) The piping direction distinction: Distinguishes the constructed direction of crossing pipe or parallel one.
- 3) Azimuth presumption: Presumes the azimuth of pipe against the moving axis.

As a result of experiments, it turned out that this algorithm was effective for the radar system of horizontal boring machine.

Key words: Other utilities detection, Radar, Penetrating distance, Pulse wave

1. はじめに

近年、環境保全などの観点から上下水道管、ガス管、電力・通信ケーブル等の敷設の際に、道路面の掘削をほとんど行わない水平ボーリング手法を用いることが多く

なっている。特に都市部においては、地下埋設物が輻輳しており、それらの破損を防止することが重要である。

地下埋設物の管路は埋設図面と必ずしも一致しているとは限らないため、掘削による露出確認を原則としてい

2004年8月11日原稿受付；2005年9月26日受理
物理探査学会第104, 106回(平成13年度春季, 平成14年度春季)
学術講演会にて(一部を)発表

* 社団法人 日本ガス協会(現:大阪ガス株式会社)
〒105-0001 東京都港区虎ノ門1-15-12

** 株式会社 光電製作所
〒409-0112 山梨県北都留郡上野原町上野原5278

*³ 電気通信大学
〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1

Manuscript received August 11, 2004; Accepted September 26, 2005

A part of this paper was presented at the 104th and 106th SEGJ conference, 2001 and 2002

* The Japan Gas Association. (Now, Osaka Gas Co., Ltd.),
15-12, Toranomon 1-chome Minato-ku, Tokyo, 105-0001, Japan

** Kodens Electronics Co., Ltd.
5278, Uenohara-cho Kitatsuru-gun, Yamanashi 409-0112, Japan

*³ The University of Electro-Communication
5-1, Chofugaoka 1-chome Chofu-shi, Tokyo, 182-8585

るところが少なくない。それらにかかる費用と時間を削減するために、掘削を必要としない電磁誘導、音波、地中レーダによる地上からの埋設物確認方法がとられているものの、舗装状況などにより探査できないケースも少なくない。

他方、直径数メートル以上のトンネルを掘削する大型のシールドマシンでは、マシンの先端に圧電素子から構成される音波送受信機を搭載し、停止時に埋設物から反射する音波を受信することによりマシン前方の障害物を検知する方法（いわゆる音波探査法）が採用されている（笠ほか，1991）。しかし、例えばガス用ポリエチレン管（以下 PE 管と呼ぶ）敷設用の水平ボーリング手法のボーリングヘッド（以下、ヘッドと呼ぶ）は口径が 70 mm 前後と小さいこともあり、音波送受信機を搭載することは困難である。また音波の場合はボーリングの最中において、掘削の振動が影響する他、送受信部と土壌との密着性が変化することに起因する不要な反射信号が強く、埋設物からの反射信号との識別が難しいといった問題もある。このような背景から、著者らは探査距離及び分解能において実現の可能性が高く、かつボーリング装置先端に搭載するための小型化が可能な技術として『地中レーダ方式（GPR）』に着目し、基礎研究を進めてきた。

本報告では、ヘッド先端に搭載した地中レーダシステムを利用して得られたデータをリアルタイムに解析し、ヘッド先端が移動する過程において検知する障害物の存在する直線距離、方向の精度について検討した結果を紹介する。

2. 地中レーダシステムの概要

中内ほか（2000, 2001, 2002）は、Fig. 1 に示すように地中の計画ルートを自動的に水平ボーリングし、ガス管などを敷設する『インテリジェント非開削工法』（IHDD: Intelligent Horizontal Directional Drilling）の研究を進めており、搭載した地中レーダを用いて推進中に

前方を監視するシステムの試作機製作を進めてきた。基礎的な検討における目標として、

検知距離：ヘッド先端部から前方向半径 30 cm 程度（ただし導電率 $\sigma=0.02$ S/m，比誘電率 30 程度の関東ローム層において口径 150 mm の金属管を検知する場合。）

とした。ヘッドは通常、回転しながら押し込まれることにより水平に直進する。この時、先端の傾斜部に取り付けられた地中レーダの送受信アンテナ面から放射される電磁波は螺旋状となる。電磁波の中心周波数は約 1 GHz である。

その他、ヘッドの深さ・水平位置を精度良く検知するための位置検知システムが搭載されている。また、同時に土中をヘッド位置データと地中レーダのデータを通信するための無線通信システムも搭載されている。

地上の水平ボーリングマシン付近に置かれた制御機には、敷設する管の計画ルートを事前にインプットしておき、ヘッドの推進に伴い、次の推進方法を指示する「推進オペレーション支援」ソフトが入っており、水平ボーリングマシンに直接コマンドを送り込むことができる。コマンドに応じて推進方向を変更するために、ヘッドには「方向修正機構」が搭載されている。

本論文では、特に地中レーダシステムの画像処理に関する検討内容と基礎的な精度検証実験結果について報告する。

地中レーダシステムから埋設管までの距離を精度よく算出するためには、例えば Hayakawa et al. (1998) の F-K（周波数-波数）領域でのマイグレーション処理があるが、データを取得してからオフラインにて処理を行う必要があるため、ヘッドの移動中にリアルタイムで検知するのは困難である。その点を克服するため、ここでは時間領域での画像処理を検討することとした。

3. 画像処理の手法について

本研究で採用している地中レーダシステムは、ヘッド

Fig. 1 Schematics of Intelligent Horizontal Boring System. The gas pipe is pulled back after the head reaches the end pit.

が螺旋を描きながらレーダの測定を行うので、便宜上、HRP (Helical Radar Profiling) と呼ぶことにする。HRP ではヘッドの先端傾斜部にレーダ用微小アンテナを取り付ける。簡単のためアンテナの指向性を無視して2次元で考える。ヘッドの推進速度に対して電磁波の伝搬速度は十分に速いので、Fig. 2 に示すように送信点と受信点が同じ位置にあると考えてよく、反射点は微小アンテナを中心にした円上のどこかにある。ヘッドの推進に伴い、正しい電磁波伝搬速度を用いて円を多数重ね合わせると、円の共通点として反射点を示す画像のごとくイメージすることができる。

参考までに比誘電率 $\epsilon_r=20$ の場合を想定したシミュレーションによる探査データを処理した例について述べる。伝搬速度ごとに反射点の信号が加算されているスナップショット例を Fig. 3(a)～(d) に示す。(a) の A000-1 は処理画像の名称であり、処理の際には、想定する伝搬速度ごとに A000-0～A000-21 まで合計22個の処理画像を作成することができるようになっている。カッコ内には計算の際に用いられる比誘電率の値が示されている。各スナップショット中の黒丸は、実際の埋設

Fig. 2 Helical Radar Profiling method

Fig. 3 Snapshot example of image processing

物の位置を示している。

Fig. 3(a)～(c)は後に述べる交差管（ヘッドの移動する軸に対して交差する管）までの直線距離を判定する画像処理例であり、Fig. 3(d)は平行管（ヘッドの移動する軸に対して平行に敷設されている管）の離隔距離を判定するものである。この例では、Fig. 3(b)の埋設物からの反射信号の加算振幅値が大きい値を示しており（画像上ではコントラスト差が大きくなり）、正確な伝搬速度が推定されていることになる。また、埋設管の位置に反射信号の加算振幅値が重なっている様子が伺える。この時の伝搬速度が埋設物までの距離計算に使用されることになる。

HRP は通常、所定範囲の速度で回転しながら推進するので、レーダの照射方向は Fig. 4 に示すように螺旋のようになる。この測定方法により、Fig. 5 に示すように1回の測定でヘッド周辺における3次元（実質的には45°毎の2次元）的な探査を行うことになる。

ヘッドの回転を止め、推進のみを行いながら、ターゲットの領域を絞った探査を行うことも可能である。

3.1 画像処理システムの機能

ハード側でリアルタイムに探査データを取り込み、ソフトの部分で既存埋設物検知のためのデータ処理を施す。

HRP に用いる主たる機能は、

- (1) 「直線距離推定」：微小アンテナと配管までの直線距離を推定する機能である。
- (2) 「敷設方向判別」：配管の敷設方向を交差管と平行管に判別する機能である。
- (3) 「方位推定」：配管が推進軸に対してどの方位にあるかを推定する機能である。

この画像処理システムでは、A スコープデータの取り込みに応じて逐次リアルタイムに処理を行う。交差管

Fig. 4 Profiling image

Fig. 5 Images of each angle

Fig. 6 Processing image

の検知の場合、推進に伴って変化する反射時間の变化を利用して電磁波伝搬速度を推定する。しかし、平行管のように微小アンテナと配管との距離があまり変化しない場合は電磁波伝搬速度を正確に推定することはできない。従ってこの場合は、安全面を考慮して、想定できる一番遅い電磁波伝搬速度 $V_{\min}$ を適用して距離を算出することにした。通常は電磁波伝搬速度 $V_{\min} = 0.50 \times 10^8$ m/s (比誘電率 $\epsilon_r = 36$ 相当) を設定するが、送受信アンテナが移動する深さあたりまで地下水位面があると分かっている場所においては、電磁波伝搬速度 $V_{\min} = 0.33 \times 10^8$ m/s ($\epsilon_r = 81$ 相当) を設定する。

3.2 画像の種類

画像処理の中で作成しているのは、Table 1 の『角度

画像』に示すようにヘッド前方の2次元平面画像の集まりである。Fig. 5, 6に2次元平面画像の描画領域を示した。ヘッドから推進方向にXMINからXMAX、離隔方向にYMINからYMAXの範囲で2次元画像を作成している。ただし、XMIN, XMAX, YMIN, YMAXは、描画領域を決定する解析パラメータであり、それぞれ、探索する範囲の送受信アンテナ移動方向の最小値、探索する範囲の推進方向の最大値、探索する範囲の離隔方向の最小値、探索する範囲の送受信アンテナ移動方向に対して垂直方向の最大値である。

また、Table 2に示すように画像は「全方位画像」と「角度画像」の2種類を作成している。全方位画像(A000)は、測定した全てのAスコープ(1ライン)データを加算する画像である。この画像は交差管の【直線

Table 1 Image name and rotation angle area

画像名	加算処理を行う回転角度（度）	
全方位画像	0.0	～360.0（すべてのデータ）
角度画像（0）	337.5（-22.5）	～ 22.5
角度画像（45）	22.5	～ 67.5
...	...	...
角度画像（315）	292.5	～337.5

Table 2 The kinds of the images created in the processing

		全方位 画像	角度画像 (0)	角度画像 (45)	...	角度画像 (315)
交 差 管 用	伝搬速度 1	A000-1	R000-1	R045-1	...	R315-1
	伝搬速度 2	A000-2	R000-2	R045-2	...	R315-2
	...	...	...	...	...	...
	伝搬速度 NE	A000- NE	R000- NE	R045- NE	...	R315- NE
平行管用		A000-0	R000-0	R000-0	...	R315-0

注：NE は推定する電磁波伝搬速度の数

距離推定】に用いる。また、「角度画像」（R000～R315）はある回転角度における A スコープデータを加算する画像である。この画像は平行管の【直線距離推定】に用いる。さらに、交差管・平行管の【方位推定】に用いる。

推定方位の目標探査精度が±45度であることから、「角度画像」を45度刻みで8枚作成することにした。それぞれの回転角度について交差管用と平行管用の2種類画像を作成している。交差管用画像については、さらに電磁波速度毎に画像を作成している。

3.3 画像処理アルゴリズムのフロー

ここでは実際の処理の手順を具体的に説明する。Fig. 7 に画像処理の処理フローを示す。以下この処理フローにそって説明することにする。

① A スコープデータ・推進距離・回転角度の取得

信号調整機から送られてくるトリガーに同期して、A/D ボードから A スコープデータ $r_w(t)$ 、I/O ボードから推進距離 x と回転角度 r を取得する。ここで $r_w(t)$ は時間 t における振幅データである。

② 画像領域の移動

ヘッドの推進に伴い、画像領域を移動させる。なお、画像領域の移動は、前回の移動からヘッドが x 方向に1ピクセル (dx) 分移動した時のみ行われる。Fig. 8 に画像領域の移動の概略を示しておく。

③ A スコープデータの加算

A スコープデータ $r_w(t)$ を画像に加算する。

交差管用画像では、次式を用いて画像に加算する A スコープデータの反射時間 t_r を計算する。

$$t_r = \frac{2\sqrt{x^2 + y^2}}{V(\epsilon_r)} \quad \text{Eq.1}$$

ここで、 x は画像領域の推進方向の距離、 y は離隔方向の距離である。また、 $V(\epsilon_r)$ は比誘電率 ϵ_r から次式を用いて求められる電磁波伝搬速度である。

$$V(\epsilon_r) = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{Eq.2}$$

ここで、 C_0 は光速である。交差管用画像は、複数の比誘電率 ϵ_r を用いて複数の画像を作成している。

平行管用画像では、次式を用いて画像に加算する A スコープデータの反射時間 t_r を計算する。

$$t_r = \frac{2y}{V(\epsilon_{r\max})} \quad \text{Eq.3}$$

ここで $\epsilon_{r\max}$ は、想定している比誘電率の最大値であり、この値を基に3.1節に記載した $V_{\min}$ が決定されることになる。これにより、平行管はもっともアンテナに近い場合の直線距離を推定することができ、安全側に判断することになる。

実際には、交差管・平行管の両方の場合において次式に示すように振幅値の加算値 $S(x, y, \epsilon_r)$ を計算して画像を構築している。ここで $S(x, y, \epsilon_r)$ は、処理画像の座標 (x, y) において比誘電率 ϵ_r の場合の N ステップ ($N \cdot dx$ 分) 加算された振幅値を示す。

$$\begin{aligned} S(x, y, \epsilon_r) = & S(x - dx, y, \epsilon_r) + r_w(t_r + \text{PEAK1}) \\ & - r_w(t_r + \text{PEAK2}) + r_w(t_r + \text{PEAK3}) \\ & - S(x - Ndx, y, \epsilon_r) \end{aligned} \quad \text{Eq.4}$$

ここで、PEAK1, PEAK2, PEAK3 は、反射波の第1ピーク、第2ピーク、第3ピークの時間（ピクセル数）を想定しており、本研究では $\text{PEAK1} = 0$, $\text{PEAK2} = 1/2T$, $\text{PEAK3} = 1/T$ とした。この操作はデコンボリューションフィルタに相当するものである。

ただし、ここで T は反射波の周期である。また、加算を行う画像は、すべての回転角度の A スコープデータを加算する全方位画像の集まりと、ある1部の回転角度の A スコープデータを加算する方位画像の集まりである。

④ 最大値の探索と比誘電率の推定

まず、Eq.4 により得られる複数の交差管用検知画像（全方位画像）の加算振幅値 $S(x, y, \epsilon_r)$ の中から最大値 $S_{\max}$ をとる伝搬速度を探索し、その際の比誘電率 $\epsilon_{r\max}$ を決定する。また、平行管用検知画像（角度画像）の加算振幅値 $S(x, y, \epsilon_{r\max})$ の中から最大値 $P_{\max}$ を探索する。

⑤ 交差管と平行管の判別

$S_{\max}$ と $P_{\max}/\text{THP}$ を比較し、交差管と平行管の判別を行う。 $S_{\max}$ の方が大きければ交差管、 $P_{\max}/\text{THP}$ の方が大きければ平行管と判別することとした。ここで、

Fig. 7 Processing flow chart

Fig. 8 Movement of the analyze region

THPは横編のノイズ影響を少なくする解析パラメータであり, ここでは経験的に $THP=2.5$ とした。

⑥ 推定直線距離の計算

- 交差管と判断している場合

交差管検知用画像(全方位画像)の最大値の位置 (x, y) から次式を用いて推定直線距離 d_{est} を求める。

$$d_{est} = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \text{Eq.5}$$

- 平行管と判断している場合

平行管検知用画像(方位画像)の最大値の位置 (x, y) から次式を用いて推定直線距離 d_{est} を求める。

$$d_{est} = y \quad \text{Eq.6}$$

⑦ 方位の推定

- 交差管と判断している場合

交差管検知用画像（全方位画像）の最大値の位置（ x, y ）と同じ位置の、角度画像の値を求め、その最大値を $R_{\max}$ 、その方位の反対側（180度）の、角度画像の値を $R_{\min}$ として係数 f を次式で求める。

$$f = \frac{R_{\min}}{R_{\max}} \quad \text{Eq.7}$$

この係数 f は、配管が前方にある場合は 1 に近い値になり、アンテナ移動軸（ x 軸）との離隔が大きき場合は 0 に近い値になる。ある閾値（本検討では経験的に $f=0.4$ とした）を超えた場合は、前方と判断し、閾値以下の場合は、最大値の方位を推定方位として出力する。

- 平行管と判断している場合

平行管用検知画像（方位画像）の最大値の方位を推定方位として出力する。

⑧ ①から⑦を繰り返す。

4. 開発したシステムの性能検証実験

前章に示したアルゴリズムに基づき、土槽実験を行って開発したシステムの性能を検証した。

4.1 実験方法

土槽実験の模式図を Fig. 9 に示す。また Fig. 9(a), (b) に示す通り、アンテナ移動軸に対する埋設管の設定角度は 180° とした。

ここでは、試作回路を用いて実験データを取得し、画像処理アルゴリズムを評価した結果について述べる。ただし、基礎的な実験では媒質として水と関東ローム土を混合した土槽を用いた。

先端傾斜部の形状の関係で、アンテナの傾きはアンテナ移動軸に対して 30° に設定している。データ取得条件としては、アンテナ移動速度が 4.72 cm/回転 の場合

について検討を行った。

(1) 交差管

探査の対象についてはそれぞれ鋼管（口径 50 mm）及びポリエチレン管（口径 50 mm）を用いて、アンテナ移動軸と管との離隔 L を変化させた場合の検討を行った。その結果得られたレーダ画像について Fig. 10（離隔 $L=4, 10, 20 \text{ cm}$ ）、Fig. 11（離隔 $L=4, 10 \text{ cm}$ ）に示した。

いずれの画像においても、アンテナ移動に伴って埋設管からの反射時間が小さくなって来ていることがわかる。アンテナが回転しているため、埋設管からの反射信号は破線状画像（Fig. 10(b)(c)の破線矢印部）となっている。それらの画像のうち、アンテナ移動距離が $400 \sim 500 \text{ mm}$ まで到達しているものについては 20 nsec 周辺に土槽の底面と思われる反射信号（Fig. 10(b)(c)の実線矢印部）が現れており、アンテナ移動に伴って底面からの反射時間が小さくなって来ていることがわかる。埋設管に比べはるかに大きな面積を持っているため、反射信号は実線状画像となっている。

Fig. 10（鋼管）、Fig. 11（ポリエチレン管）を比較すると、各々の埋設管からの反射信号の極性が反転していることが分かる。これは、埋設管の材質により反射係数の正負が逆転したためと考えられる。

(2) 平行管

交差管の場合と同様に、探査の対象については鋼管（口径 50 mm）及びポリエチレン管（口径 50 mm）を用いた。離隔 $L=20 \text{ cm}, 30 \text{ cm}$ の2種類について検討を行った。その結果得られた画像を Fig. 12, 13 に示した。いずれの画像においても交差管の場合とは異なり、アンテナ移動に伴って埋設管からの反射時間が小さくなっていないことがわかる。アンテナが回転しているため、埋設管からの反射信号は破線状の画像となっており、定常波とは区別されて残っていると思われる。

交差管の場合（Fig. 10, 11）と同様、Fig. 12, 13 を

Fig. 9 Schematics of test soil container

Fig. 10(a) Crossing pipe (steel, $L=4$ (cm), $\theta=180^\circ$) Fig. 10(b) Crossing pipe (steel, $L=10$ (cm), $\theta=180^\circ$) Fig. 10(c) Crossing pipe (steel, $L=20$ (cm), $\theta=180^\circ$) Fig. 11(a) Crossing pipe (polyethylene, $L=4$ (cm), $\theta=180^\circ$)

Fig. 11(b) Crossing pipe (polyethylene, $L=10$ (cm), $\theta=180^\circ$) Fig. 12(a) Parallel pipe (steel, $L=20$ (cm), $\theta=180^\circ$) Fig. 12(b) Parallel pipe (steel, $L=30$ (cm), $\theta=180^\circ$) Fig. 13(a) Parallel pipe (polyethylene, $L=20$ (cm), $\theta=180^\circ$)

Fig. 13(b) Parallel pipe (polyethylene, $L=30$ (cm), $\theta=180^\circ$)

比較すると、各々の埋設管からの反射信号の極性が反転していることが分かる。これも、埋設管の材質の違いにより反射係数の正負が逆転したためと考えられる。

4.2 画像処理アルゴリズムによる解析結果

3章で示した画像処理アルゴリズムにより解析した交差管の場合の結果を、Fig. 14~18に示した。また、平行管の解析結果を、Fig. 19~22に示した。

まず、グラフの見方を説明する。なお、グラフの横軸はアンテナ移動距離であり、左から右にヘッドが移動している。

直線距離の推定結果は、Fig. 7のフロー⑥（推定直線距離の計算）で算出され、Fig. 14~22の(a)に推定直線距離（×マーク）として示している。また、真の直線距離（実線）も合わせて示してある。

交差管と平行管については、Fig. 7のフロー⑤（交差管と平行管の判別）で判別される。交差管であると判別されれば、オペレータ側のモニターに表示するようにした。Fig. 14~22の(b)には推定に用いられた比誘電率の推移を示す。

方位の推定はFig. 14~22のグラフ(c)の●印に注目する。まず f 値に注目し、この値が閾値 THF（本研究では経験的に0.4とした）を超えている場合は正面と判断し、それ以下の場合は離隔があると判断している。離隔がある場合は推定方位（×マーク）を示している。

(1) 交差管

・鋼管の場合

Fig. 14~16の(a)を参照すると、推定直線距離（×マーク）と真の直線距離（実線）を比較することにより、埋設管までの距離が精度良く算出されていることがわかる。方位については(c)を参照すると、埋設管設定角度（ 180° ）が正しく算出されていることが分かる。関東ローム土に水を混合しているため、一般的な関東ロームの比誘電率 $\epsilon_r=36$ より大きくなっていると考えられ、精度良く算出されていると思われる。いずれの場合も moving distance が 200 mm 以下の時には、距離も角度

(a) True distance and calculation result of estimated distance

(b) Calculation result of estimated dielectric constant

(c) Calculation result of number f and estimated angle

Fig. 14 Image processing result
Crossing pipe (steel, $L=4$ (cm), $\theta=180^\circ$)

(a) True distance and calculation result of estimated distance

(a) True distance and calculation result of estimated distance

(b) Calculation result of estimated dielectric constant

(b) Calculation result of estimated dielectric constant

(c) Calculation result of number f and estimated angle

(c) Calculation result of number f and estimated angle

Fig. 15 Image processing result
Crossing pipe (steel, $L=10$ (cm), $\theta=180^\circ$)

Fig. 16 Image processing result
Crossing pipe (steel, $L=20$ (cm), $\theta=180^\circ$)

も精度良く推定できていない。それは用いた地中レーダの探査可能距離の仕様が300 mm程度であるため、埋設管からの直線距離が300 mm以上の時に、十分なS/Nを持った反射信号が得られないためと考えられる。

探査可能距離が300 mm程度であれば、ドリルのレスポンスを考慮して制動が可能であるので、実用上の問題はない。

・ポリエチレン管の場合

Fig. 17～18の(a)を参照して推定直線距離(×マーク)と真の直線距離(実線)を比較すると、実際の埋設管までの距離に対して精度100 mm以内で算出されていることがわかる。鋼管の場合と同様に、アルゴリズムでは前述の閾値を用いている。

一般的に土中においては、ポリエチレン管からの反射

振幅値は鋼管の場合と比較して小さくなることから、S/Nが悪くなる。そのため鋼管の場合に比べ比誘電率は小さく算出されていたと思われる。

(2) 平行管

・鋼管の場合

Fig. 19, 20の(a)を参照すると、推定直線距離(×マーク)と真の直線距離(実線)を比較するといずれの場合も推定直線距離の方が若干小さい値となっていることがわかる。これは、アルゴリズムにより平行管であると判定された際に、アンテナが移動する土質の比誘電率のうち、考えられる範囲内で大きい方の値が代入されるように設定しているため、推定される距離が小さくなった。これは推進工事の際には、安全サイドに距離を推定するような設計にしているためである。Fig. 19(a)の

(a) True distance and calculation result of estimated distance

(b) Calculation result of estimated dielectric constant

(c) Calculation result of number f and estimated angle

Fig. 17 Image processing result
Crossing pipe (polyethylene, $L=4$ (cm), $\theta=180^\circ$)

moving distance 350 mm の位置及び Fig. 20(a) の moving distance 300 mm の位置以遠になると、うまく距離が算出できなくなるのは、土槽の底面からの反射信号の影響を受けて、底面の信号から直線距離を推定しているためと思われる。

(c) を参照すると方位については、ともに埋設管設定角度が正しく算出されていることが分かる。

・ポリエチレン管の場合

Fig. 21, 22 の (a) も銅管の場合同様、推定直線距離 (×マーク) と真の直線距離 (実線) を比較するといずれの場合も推定直線距離の方が若干小さい値となっていることがわかる。これも、アルゴリズムにより平行管であると判定された際に、アンテナが移動する土質の比誘

(a) True distance and calculation result of estimated distance

(b) Calculation result of estimated dielectric constant

(c) Calculation result of number f and estimated angle

Fig. 18 Image processing result
Crossing pipe (polyethylene, $L=10$ (cm) $\theta=180^\circ$)

電率のうち、考えられる範囲内で大きい方の値が代入されるように設定しているためと思われる。

(c) を参照すると方位についてもともに埋設管設定角度が正しく算出されていることが分かる。

銅管の場合に比べて算出距離が小さく見積もられているのは、交差管の場合と同じく、取得データの反射信号の S/N が起因しているものと考えられる。

5. 統合システムによる実地盤における検証

IHDD マシンの統合システム外観を Fig. 23 に示す。アンテナ移動軸 (x 軸) の $x=2000$ mm の位置に口径 150 mm の鉄パイプを設置している。方位はアンテナ移動軸に対して 180° とした。

(a) True distance and calculation result of estimated distance

(a) True distance and calculation result of estimated distance

(b) Calculation result of estimated dielectric constant

(b) Calculation result of estimated dielectric constant

(c) Calculation result of number f and estimated angle

(c) Calculation result of number f and estimated angle

Fig. 19 Image processing result
Parallel pipe (steel, $L=20$ (cm), $\theta=180^\circ$)

Fig. 20 Image processing result
Parallel pipe (steel, $L=30$ (cm), $\theta=180^\circ$)

Fig. 24 に取得したデータを示す。アンテナ移動軸と鉄パイプの離隔は 10 cm であった。離隔が 0 cm でないため、反射信号は破線状になったと思われる。その破線状反射信号は $X=1400\sim 2000$ mm の位置に確認できる。 $X=2000$ mm のあたりを参照し、 $t=10$ nsec と 25 nsec の両方の部分で右上がりの反射信号が確認できる。これは、地中レーダを総合システムに組み込む際に、耐水圧性能を確保するためにアンテナとレーダ回路間のケーブルのコネクタ部でのインピーダンス不整合により、一部の電磁波信号が透過せずに反射し、結果として回路中で多重反射が起きたためと考えられる。

Fig. 25(a)を参照すると、推定直線距離 (×マーク) と真の直線距離 (実線) を比較することにより、埋設管までの距離が精度良く算出されていることがわかる。方位については Fig. 25(c)を参照すると、埋設管設定角度 180° が正しく算出されていることが分かる。

結 論

本論文では、提案した画像処理アルゴリズムについて実験を通して既存埋設物検知について検証し、その有効性について述べた。画像処理アルゴリズムの中では、「直線距離推定」「敷設方向判別」「方位推定」を提案しており、既存埋設物検知システムとして有効に機能することがわかった。また、金属非金属の埋設物について検討を行い、記述の実験環境においては、どちらの場合も検知できることがわかった。

また、従来の f - k 領域でのマイグレーションはオフライン処理であったが、本研究では時間領域での処理によりリアルタイムでの画像処理が可能になった。そのため、ボーリング中にリアルタイムでの埋設物検知が可能になると考える。

(a) True distance and calculation result of estimated distance

(b) Calculation result of estimated dielectric constant

(c) Calculation result of number f and estimated angle

Fig. 21 Image processing result
Parallel pipe (polyethylene, $L=20$ (cm), $\theta=180^\circ$)

(a) True distance and calculation result of estimated distance

(b) Calculation result of estimated dielectric constant

(c) Calculation result of number f and estimated angle

Fig. 22 Image processing result
Parallel pipe (polyethylene, $L=30$ (cm), $\theta=180^\circ$)

謝 辞

本研究は、1998年度から2003年度にかけて社団法人日本ガス協会が経済産業省より受託した『ガス導管漏えい対策技術開発事業』の中で検討されたものである。

また、日本ガス協会のワーキングメンバーとして参加しておられた、東京ガス(株)南智之氏、猪股渉氏、大阪ガス(株)森崎弘康氏、東邦ガス(株)深津彰省氏、西部ガス(株)泉泰則氏には有益な助言を頂いた。

匿名の査読者には、本論文を作成するにあたり有益な助言を頂いた。

ここに謝意を示す。

参 考 文 献

- Hideki Hayakawa, Akira Kawanaka (1998) : Radar imaging of underground pipes by automated estimation of velocity distribution versus depth, *Journal of Applied Geophysics*, 40, pp37-48.
- 笠 博義・黒台昌弘・巽 治 (1991) : 地中前方探査技術の開発 (その1) 音波・レーザ波を用いたシールド機の前方探査に関する実験的研究, 間組研究年報, Vol. 1991, 131-141.
- 中内啓雅, 林 光俊, 長谷川良一, 太田和幸 (2000) : インテリジェント非開削工法の開発, 物理探査学会第103回学術講演会講演論文集, pp181-184.
- 中内啓雅, 林 光俊, 長谷川良一, 太田和幸, 野津俊光 (2001) : インテリジェント非開削工法の開発—他埋設物検知システム: レーダ画像処理アルゴリズムの開発—, 物理探査学会第104回学術講演会講演論文集, pp213-219.
- 中内啓雅, 林 光俊, 飯塚健二, 野津俊光, 上坂進一

Fig. 23 Top : Boring machine. Right : GPR antenna.

Fig. 24 Crossing pipe (steel 150mm in diameter, $L=10$ (cm), $\theta=180^\circ$)

(2002)：インテリジェント非開削工法の開発—他埋設物
検知システム：レーダ画像処理アルゴリズムの開発その2
—，物理探査学会第106回学術講演会講演論文集，pp21-
24.

(a) True distance and calculation result of estimated distance

(b) Calculation result of estimated dielectric constant

(c) Calculation result of number f and estimated angle

Fig. 25 Image processing result of the field data in the case of crossing pipe (steel 150 mm in dia, $L=10$ (cm), $\theta=180^\circ$)