

I-147

一般化 H o u g h 変換を用いたレーダ法による鉄筋位置の検出

東京大学大学院 学生員 朴 錫 均
 東京大学生産技術研究所 正会員 魚本 健人

1. まえがき

レーダ法によるコンクリート内の鉄筋調査の場合に、一番重要な問題になるのは測定された画像データから正確な鉄筋の位置を解析することである。しかし、鉄筋が存在する対象媒質の電気的性質が分からない限り、正確な深さ等の解析は困難であった。本研究は、このような問題を解決するため、今まで地中レーダ探査で埋設管の位置を同定するのに有効な方法として知られている一般化 H o u g h 変換技法を用いて、任意媒質内の誘電率算定および鉄筋位置の検出可能性について検討した。さらに、3次元解析により、多くの計算量が要求される本方法の欠点を解決するため、新しい計算方法を提案した。

2. レーダ画像と一般化 H o u g h 変換

鉄筋を目標物とし、測定対象の表面からレーダのアンテナ走査を実施すると、図1のようにアンテナの各発受信位置 (x_n) から鉄筋までのレーダ反射信号（距離上で d_n ）はアンテナの進行とともに放物線の形状を持つことになる。これを距離上の式で表現すると図1内の式のようになる。なお、この式を目標物までの波の往復時間 $t(x_n)$ の項として表すと、次式(1)のようになる。

$$t(x_n) = 2\sqrt{(x_n - x_0)^2 + d_0^2} / v, \quad v = c/\sqrt{\epsilon}$$
 （ここで、 v ：媒質内の伝播速度、 c ：光の速度、 ϵ ：誘電率、 x_0 と d_0 ：鉄筋の位置）(1)

上式を再び次式(2)のように展開すると、 $t(x_n)$ 、 x_n 、 ϵ の三つの変数軸を持つ三次元 H o u g h 変換空間に関する式になる。

$$a\epsilon(x_n - x_0)^2 - t(x_n)^2 = -t_0^2 \quad (\text{ここで、} a = 4/c^2 \text{ として常数}) \quad (2)$$

一般化 H o u g h 変換により、上式(2)を解くためには、まず各変数に対する解の範囲を定め、一定領域（空間）で $n_t \times n_x \times n_\epsilon$ 個の要素に分割した後、各要素毎に測定画像の曲線部座標（エッジ抽出データ）とを一緒に式に代入しながらその空間上で解を満足する各要素を集計し、一番多く集計された要素を選べばその値（空間要素）が式(2)の解になる。各変数別の解の範囲の選定は $t(x_n)$ ではコンクリートの場合 30 cm 以内が普通であり、 x_n は測定画像で曲線部のピークと見当たられる区間、 ϵ は対象媒質の誘電率範囲を選択すればいい。しかし、このような限定された解の境界条件を活用しても、三次元空間での計算量は大変である。そこで、微分により変数を減らして計算する方法がよく利用されている^{1) 2)}。この方法によると $n_t \times n_x \times n_\epsilon$ 個数の計算量を $n_t \times n$ (微分空間での一次要素数) + $n_x \times n_\epsilon$ に減らすことができる²⁾。もっと簡単な計算方法として、式(2)を次式(3)のように整理し、式(3)を満足させる基本解はまず、 $x_n = x_0$ と $t(x_n) = t_0$ が同時に成立する時に得られることが分かる。

$$a\epsilon(x_n - x_0)^2 = t(x_n)^2 - t_0^2 \quad (3)$$

この場合の解は ϵ の値には関係なく得られ、 x_n 、 $t(x_n)$ の二次空間上で計算が可能になる。このように求められた x_0 と t_0 から誘電率 ϵ も計算できる。ただし、波形のくずれなどにより x_0 と t_0 値が二つ以上得られた場合は各解の範囲を満足する上で ϵ の収束性により判断することになるが、そのような現象を防ぐためには予め画像上の曲線部ピーク区間をなるべく狭く設定す

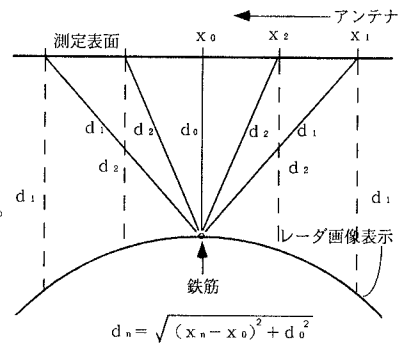


図1 鉄筋からのレーダ画像表示

表1 各媒質での鉄筋位置の検出結果()内はx座標

媒質	区分	ピッチ(cm)		相対誤差(cm)	深さ(cm)		相対誤差(平均)(cm)	誘電率
		原位置	計算結果		原位置	計算結果		
発泡スチロール	10(50,60)		0(54)	-10		21	+1	1.2
	20(50,70)		40(38,78)	-20		18,20	-1	1.5,1.3
	30(43,73)		35(40,75)	+5		19,16	-2.5	1.0,1.3
	40(35,75)		42(33,75)	+2		17,23	0	1.8,1.0
コンクリート	30(47,77)		33(46,79)	+3	12	12,11	-0.5	8.7,9.1



(a) 発泡ーピッチ 20 (b) 発泡ーピッチ 30 (c) 発泡ーピッチ 40 (d) コンーピッチ 30
図2 レーダ原画像(発泡:発泡スチロール、コン:コンクリート(各単位-cm))
るのが望ましい。

この新しい方法は解の収斂過程に多少の問題点(解の重複)が認められるが、計算量は $n_t \times n_x + n_e$ で従来の方法に比べ著しく減り、非常に速く解を求めることができる。

3. 実験結果

実験は二種類の媒質を対象にした。先に、発泡スチロールを媒質にした場合では、その中にD22の鉄筋を深さ20cmに固定し、ピッチを10cm、20cm、30cm、40cmの位置に置き、その上をレーダで測定した。コンクリートを媒質にした条件では、D10の鉄筋の深さを12cm、ピッチを30cmにして測定した。これらの測定結果の原画像の代表的な例が図2に示されており、図3はおのおのの原画像から曲線部エッジを抽出(前処理)した結果である。なお、エッジ部は半波長による反射信号(一番目)も一緒に表した。

これらのデータを用いて上記方法で計算した結果を表1に表した。一方、解析は二番目の信号のエッジ部データを基準にしたが、画像にくずれ等がある場合は半波長による反射信号からのデータを利用した(この場合は往復時間を二倍にして計算する)。これらの結果を見ると、発泡スチロールを媒質にした場合では、鉄筋のピッチが20cm以上から両鉄筋の存在が確認され始めたが比較的精度よく検出されたのは30cm以上からであった。これは、画像上の稿の形が明になるほど検出精度は良くなることを示しているが、図2のように信号が重なって存在する場合でも複数の鉄筋の存在が予測できることが分かる。しかし、媒質の誘電率が大きいコンクリートの場合では、水平分解能が発泡スチロールの場合に比較して良くなるため(同じピッチの図3の(c)と(e)を比較)、検出ピッチもより向上される。事実、コンクリート媒質での検出精度は良く、稿の形も明瞭であることが分かる。

4. まとめ

新しい計算方法を利用した一般化Hough変換によると、従来の方法より著しく速い速度で計算でき、媒質の種類に関係なく(誘電率の計算が可能)30cm間隔以上の配筋条件でその位置を比較的正確に検出できた。したがって、本方法は媒質の電気的性質が明らかでない場合の鉄筋の検出にも適用が可能であることが明らかとなった。

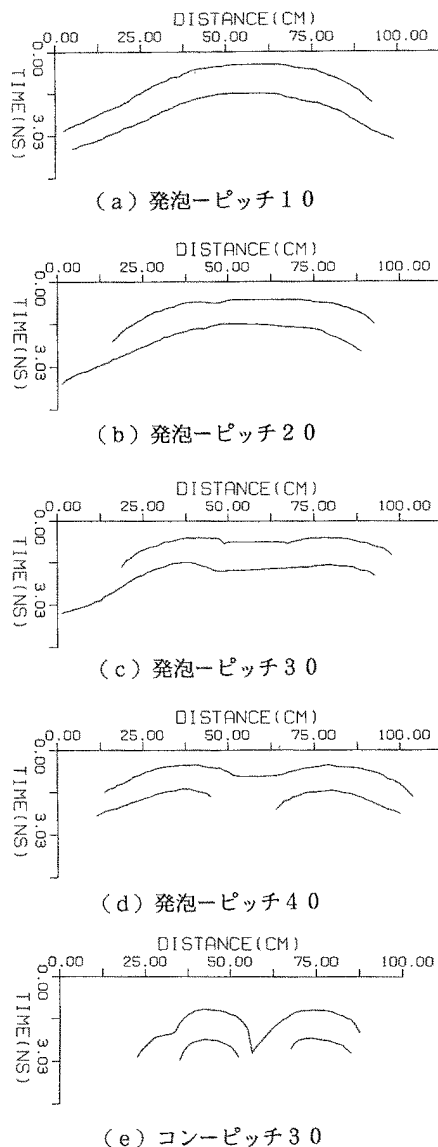


図3 レーダ画像の曲線部エッジ抽出結果

参考文献

- 1) Toru KANEKO: Radar Image Processing for Locating Underground Linear Objects, IEICE TRANSACTIONS, VOL. E 74, NO. 10 OCTOBER 1991
- 2) 山口・岡田・森下: 一般化Hough変換による地中探査画像の解析, 計測自動制御学会論文集, Vol. 25, No. 7, 1989
- 3) D. Ballard: Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes, Pattern Recognition, 13-2, 1981