

バケット一体型地中レーダシステムによる掘削面下の埋設物イメージング

群馬大学 正会員 ○三輪 空司
 群馬大学 非会員 鈴木 智洋
 群馬大学 非会員 高根沢彰兵

1. 目的

近年、パワーショベル等の地中建機による地下埋設ライフラインの破損事故が増加している。また、事前調査により埋設位置がわかっても作業員の不注意、操作ミスによって事故が発生する例も多く、本質的に事故を未然に防ぐためには、バケット部に探査装置を設け、掘削中に埋設物の探査を行うことが重要である。また、本技術は、i-Construction で求められる ICT 油圧ショベルの安全対策技術においても活用が期待されている。

本報告では Fig. 1 のようなバケット一体化アンテナによる地中レーダとバケット位置、姿勢推定システムを統合した『掘削面下の埋設物映像化システム』を開発し、塩ビ管のイメージングを行った結果について述べる。

2. バケット位置、姿勢の推定システム

イメージングレーダではレーダ波形に加えアンテナの正確な位置情報が必要である。通常、地中レーダの波長帯域は 10 cm 程度であるため、概ね 1 cm 以下のアンテナ位置推定精度が要求される。既存のバケットの位置、姿勢の測位手法としては主に、電磁波、超音波、磁気、加速度等の外界センサや、エンコーダ等の内界センサの利用が挙げられる。本研究では金属であるバケットへの取り付けと、迅速性の観点から送受信超音波センサアレイによる測位を検討することにした。

バケット底面に取り付けしたアンテナは掘削により土中に埋設されるため、直接アンテナ位置を推定できないものの、バケットとアンテナは固定されているため、バケットの位置、姿勢を推定できれば、相対的にアンテナ位置推定を行える。バケットの位置姿勢の推定には、送信超音波トランスデューサ (UST) を複数バケットに配置し、受信 UST を地面等に固定することで、バケットに設置された複数の送信位置を GPS の原理により受信 UST から独立に求めれば、バケットの三次元位置、姿勢推定が可能である (個別法)。また、バケットの動きにより固定された送信点の相対的な位置関係は変わらないため、相対的送信位置情報を取り入れたバケット位置、姿勢の同時推定アルゴリズムも検討した (同時法)。

使用した UST は MA40S4S,R (村田製作所) であり、中心周波数 40 kHz, 指向性は 80° である。4 つの送信点毎に 10 ms ずつの時間差を設けた時分割方式で超音波パルスを送信し、4 つの受信センサで同時に受信する。Fig. 2 に得られた受信波形の例を示す。不要反射波も見られるものの、概ね 20 dB 程度の SN 比で直達波を計測できた。計 16 パターンの到達時刻の情報から位置推定を行う。イメージングではアンテナの絶対位置よりも相対的な動きの方が重要であり、バケット側の送信アレイを 2 m から 1.5 m に動かしたときの相対位置の精度評価を行った結果を Table 1 に示す。個別法に比べ、同時法は 2.1 ~12.1 倍の精度向上が確認できた。特に、Z 方向の精度が大幅に向上し、空中での 2 m 付近での相対位置推定では 5 mm 以下の位置推定精度が期待できる。

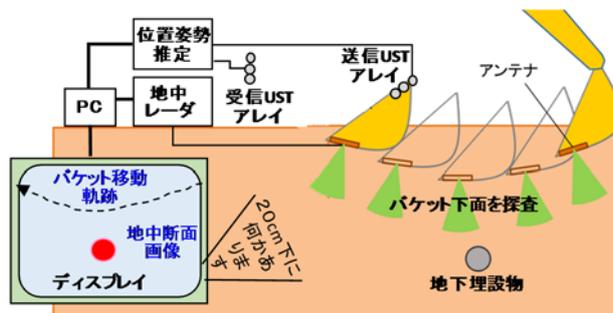


Fig. 1 掘削面下埋設物映像化システムの概要

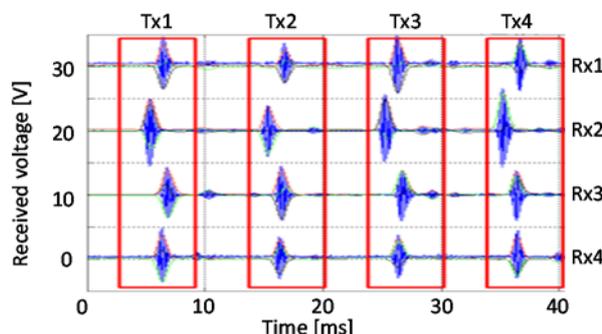


Fig. 2 超音波センサアレイの受信波形の例

Table 1 バケット相対位置推定誤差 [cm]

	X	Y	Z
個別法	1.01	1.00	5.09
同時法	0.18	0.47	0.42

キーワード 地中建機, 地中レーダ, イメージング, バケット測位, 情報化施工

連絡先 〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1 群馬大学大学院理工学府電子情報部門 TEL 0277-30-1779

3. バケッ一体型地中レーダシステム

本レーダシステムは市販のネットワークアナライザをベースとしたレーダシステムである。使用するアンテナは機械的強度や広帯域性、指向性特性を考慮し、Fig. 3のようなキャビティバック付スロットアンテナを採用した。アンテナは300×76×16 mmの中空金属筐体に長さ200 mm、幅4 mmのスロットを設け、その中央にマイクロ波を給電する構造である。尚、キャビティ内部はエポキシ樹脂を充填し、機械的強度を向上させた。

バケツは底面にアンテナ設置用の開口部を設け、スロット部がバケツ下面になるように設置する。レーダ用の高周波ケーブルはアームに沿わせ、バケツ側面に溶接した中空パイプを通じ、サイドカッター用の通し穴からバケツ内部に誘導し、アンテナと接続する。

Fig. 3にUST設置後のバケツ様子を示す。送信用USTは、掘削時の土砂が測位に影響を与えないよう、バケツの縁と平行なアルミ棒によりバケツから上方にオフセットを与えた位置に設置した。受信USTもアルミフレームを用いて固定し、運転席前方の地面に配置した。また、土台のフレームは水準器で平行を出しており、フレーム下面を深さ0 mとしている。尚、通常のバケツ動作においてアームが超音波の送受信に影響を与えないことを確認した。

本システムによりアンテナ位置データとレーダ波形を秒間5,6回で繰り返しPCに取り込める。その後、オフラインでイメージング処理を行うが、三次元の処理でも1分程度で終了する。

4. 掘削時イメージング実験

塩ビパイプは土砂をバケツで取り除いた後に設置し、バケツのアンテナ部をパイプ付近に移動させ、あ

らかじめその位置を空中で測定しておく。その後、バケツを用いて埋設深さが約1 mとなるまで土砂をかぶせた。その後、パイプから奥の適当な深さにバケツを配置し、掘削しながらレーダ計測を行った。中空塩ビパイプは直径11 cm、長さ1 mであり、アームと直交する方向に配置した。尚、実験時にはアンテナや超音波センサをバケツに取り付けた状態で、何度も土砂を埋め戻す作業を行ったがアンテナ等に異常は起きなかった。

Fig. 4にイメージング結果を示す。図中の白点線は、埋設時に測定した塩ビパイプの位置から推定できるパイプ位置を示している。また、白実線は超音波による測位により得られた送受信アンテナ給電点の移動軌跡を示している。軌跡は直線ではなく、アンテナ位置が不規則間隔になっており、レーダ波形のみから反射波を特定するのは困難であるが、埋設物位置でイメージング画像の強度が大きくなっており、直径11 cmの中空塩ビパイプの位置推定が可能であることがわかった。これは、バケツの掘削軌道に対して埋設物が直交しているため、イメージングにおける波形の重ね合わせが効果的に行えたためと考える。

5. まとめ

地中レーダとバケツの位置、姿勢推定システムを統合した『掘削面下の埋設物映像化システム』を開発し、重機を用いて実験的に有効性の検証を行った。その結果、バケツの掘削軌道下15 cmの中空塩ビパイプを明瞭にイメージングできた。本システムの可探深度は30 cm程度と考えられるが、対象物に近づきながら少しずつ掘削を繰り返すことにより、確実に埋設物を破損するリスクは低減できると考えられる。



Fig. 3 アンテナ、及び一体型バケツの概要

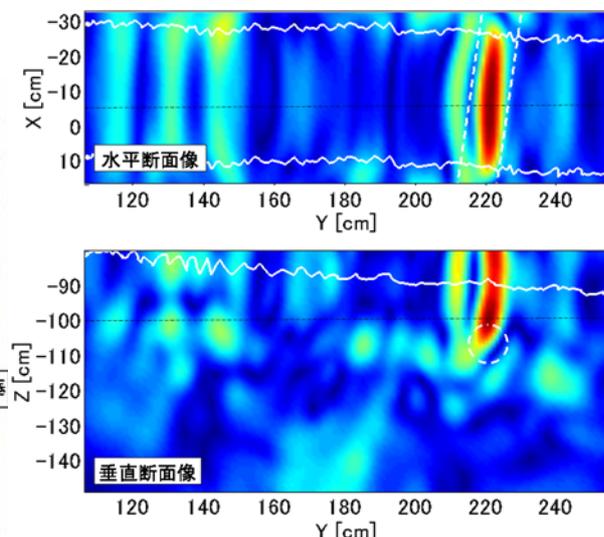


Fig. 4 掘削時の地中イメージング結果