

(12) 地面反射を利用した土中の音源位置推定

川岸 卓司¹・善甫 啓一²・水谷 孝一³・若槻 尚斗⁴・川村 洋平⁵

¹学生会員 筑波大学博士前期課程 大学院システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
E-mail: kawagishi@aclab.esys.tsukuba.ac.jp

²非会員 筑波大学博士研究員 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
E-mail: zempo@aclab.esys.tsukuba.ac.jp

³正会員 筑波大学教授 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
E-mail: mizutani@iit.tsukuba.ac.jp

⁴非会員 筑波大学准教授 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
E-mail: wakatuki@iit.tsukuba.ac.jp

⁵正会員 Curtin Univ., Lecturer WASM, Dept. Mining Eng. (Kalgoorlie, WA6433)
E-mail: Yohei.Kawamura@curtin.edu.au

本稿は土中で発生する音源の推定法に関するものである。提案手法では、直達音だけではなく、地面で起こる反射音も利用することで推定精度の向上を図っている。地面で起こる反射音を利用するために、軸方向に一对の素子を配置した杭状のジオフォンを用いている。杭状ジオフォンを2本(素子数:4)用いた実験の結果、従来手法と比べ高精度の音源位置推定が可能であることが示された。

Key Words : Sound Source Localization, Direction of Arrival, Geo-phone Array, Reflected Sound

1. 諸言

現在の日本のインフラ整備では水道管やガス管、電線の埋設や、建造物の支柱埋設においてドリルビットやボーリングを実施して土中への施工を行っている。この際、街中の管施工や建造物構築にあたり先端の正確な位置を管理することが重要であり、現在は誘導式水平ドリル工法などの、ドリル先端内部に電磁波発生器を設け、その電磁波の強度から位置直上を推定する手法が一般的である。また、直上に道路や構造物がある場合ではこの手法が適用できず、ドリル先端部で発生する破砕音に着目した音響的手法が提案されている。この手法では、地表面上に複数のジオフォンを設置し、音源から発せられた音波を収録することで、その音波の到来時間差から土中の音源位置を推定することができる¹⁾。しかし、複数のジオフォンの座標を正確に計測し広域に設置しなければ音源位置を推定することが難しいとされている²⁾。

そこで本研究では、ドリル先端部で発生する破砕音を、音源直上から離れた位置に設置した2本の杭状ジオフォンアレーを用いる少数ジオフォンによるドリル先

端位置の推定法を検討する。提案手法では、音源からジオフォンに直接受信される直達音だけではなく、地面で起こる反射音を考慮した計算を行うことにより推定精度の向上を図る。この反射音を測定するために、軸方向に一对の素子を配置した杭状のジオフォンアレーを用い、音源には加振器によるインパルス信号を使用する。なお、本論文では、ベクトルを一重下線、行列を二重下線として表記する。

2. 推定法の原理

音源の位置推定には、各素子までの到来時間差を用いる³⁾。筆者らは、少素子構成のマイクロフォンアレーによる直達音および反射音それぞれの到来時間差を推定する手法を開発してきた⁴⁾。図-1にジオフォンアレー及び音源の位置関係を示す。素子間距離を L_E のジオフォンアレーを2本(素子数:4個)用いて、アレー間隔を L_A 、近い方の素子から地面までの距離を L_0 とする。素子0直上を中心に座標を取り、欠損箇所(音源)の位置を $\underline{D} \equiv (d_x, d_y, d_z)$ とすると、以下の関係が成り立つ。

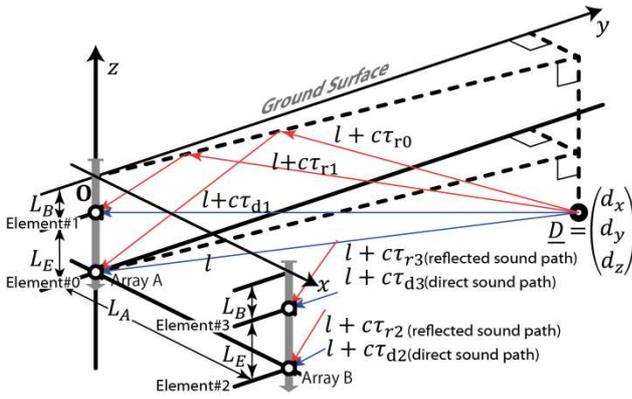


図-1 アレービットと地面、配管欠損箇所的位置関係
(素子2, 3への伝搬経路の図示は省略)

$$\underline{\tau} \cdot \begin{pmatrix} d_x \\ d_z \\ cl \\ c^2 \end{pmatrix} = \underline{l}, \quad (1)$$

$$\underline{\tau} = \begin{pmatrix} 0 & -2l_E & 2\tau_{d1} & \tau_{d1}^2 \\ 2l_A & 0 & 2\tau_{d2} & \tau_{d2}^2 \\ 2l_A & -2l_E & 2\tau_{d3} & \tau_{d3}^2 \\ 0 & 2l_B + 2l_E & 2\tau_{r0} & \tau_{r0}^2 \\ 0 & 2l_B + l_E & 2\tau_{r1} & \tau_{r1}^2 \\ 2l_A & 2l_B + 2l_E & 2\tau_{r2} & \tau_{r2}^2 \\ 2l_A & 2l_B + l_E & 2\tau_{r3} & \tau_{r3}^2 \end{pmatrix}, \quad \underline{l} = \begin{pmatrix} l_E^2 \\ l_A^2 \\ l_E^2 + l_A^2 \\ (2l_B + 2l_E)^2 \\ (2l_B + l_E)^2 \\ l_A^2 + (2l_B + 2l_E)^2 \\ l_A^2 + (2l_B + l_E)^2 \end{pmatrix}.$$

ただし、 $l = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2}$ であり、 c は土中の音速、 $\tau_{d1}, \tau_{d2}, \tau_{d3}, \tau_{r0}, \tau_{r1}, \tau_{r2}, \tau_{r3}$ はそれぞれ素子0に到来する直達音の到来時間を基準とした素子1, 2, 3に到来する直達音の到来時間差、素子0に到来する反射音の到来時間差、素子1, 2, 3に到来する反射音の到来時間差である。

式(1)に、 $\underline{\tau}$ の擬似逆行列 $\underline{\tau}^+$ を左からかけると、

$${}^t(d_x \quad d_z \quad cl \quad c^2) = \underline{\tau}^+ \cdot \underline{l}, \quad (2)$$

になり、欠損箇所の位置 \underline{D} を求めることが可能となる(d_y は $l = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2}$ より)。

3. 評価実験

提案手法の評価のために実験を行った。また、地面に素子を配置する従来の手法と比較した。音源の位置は $\underline{D} \equiv {}^t(0.20, 1.00, -0.70)$ mとし、音源位置で加振を行いインパルス信号を発生した。ジオフォンアレーは圧電式のジオフォンで構成された物を使用し、 $L_E = 0.20$ m、 $L_A = 0.25$ m、 $L_B = 0.15$ mとして地中に埋設した。収録は、サンプリング周波数96 kHzで、10 sの信号を合計5回ずつ実施した。比較対象である従来手法では、素子0を(0.00, 0.00, 0.00) mの位置を基準に、すべての

表-1 推定された音源位置

	d_x	d_y	d_z	Error
Proposed method	0.15	5.08	-0.11	4.12
Conventional method	2.45	0.41	1286	1286
True Value	0.20	1.00	-0.70	-

Unit: [m]

素子を地表面に $L_E = 0.20$ m、 $L_A = 0.25$ mの間隔で設置した。その際、音速は別個に測定し、 $c = 1,637$ m/sであった。本論文の計算では、この値を用いる。

表-1に、提案手法を用いた推定値、従来手法の推定値および真値からの誤差を示す。推定の結果、提案手法では z 軸方向、従来手法では x 軸方向の測定誤差が特に大きい。これは、それぞれの軸に対し素子すべてが平面を形成し、十分な到来時間差が得られないためである。これらを求めるには、素子の立体的な配置が必要である。しかしながら、提案手法による誤差は、従来手法に比べて小さいことが分かる。したがって、反射音も考慮した音源位置の推定法により、同素子数でも推定精度が向上することが示された。

4. まとめ

本論文では、地面反射を利用した土中の音源位置推定法について述べた。杭状のジオフォンアレーを用いることで、反射波の検出を可能とした。少数のジオフォンでは実質的には推定が不可能であった従来手法に比べ、提案手法は、高い推定精度を有することが確認された。今後は、検出可能範囲の分析および誤差の補正に関する検討を行う。

参考文献

- 1) 宮崎裕道, 近藤高弘, 蜂谷弘之: 土中音波による位置探査システムの開発, 土木学会第 64 回年次学術講演会, VI-145, pp.289-290, 2009.
- 2) Junpeo Tamura, Youhei Kawamura, Hidemi Mochiji, Naoto Sasaki, Koichi Mizurani, and Hirokazu Okawa: A Method for Estimating the Location of the Drill-Bit During Horizontal Directional Drilling Using a Giant-Magnetostrictive Vibrator, Jpn. J. Appl. Phys. 50, 07HC15, 2011
- 3) 吉永弘志, 水谷孝一, 若槻尚斗: "搜索活動の支援を目的とした高騒音環境での音源探査手法," 土木学会論文集 F6, Vol. 67, No. 2, pp. I-11-I-16, 2011.
- 4) Keiichi Zempo, Tadashi Ebihara and Koichi Mizutani: Direction of arrival Estimation Based on Delayed-Sum Method in Reverberation Environment, Jpn. J. Appl. Phys., 51, 07GB09, 2012.