

複数の超音波トランスミッタを利用した指向性の向上

A Study on Sharpening Directivity by Ultrasonic Transmitters Array

○ 桧山 昌之*, 江村 超*, 三神 蘭**

○ Masayuki Hiyama*, Takashi Emura* and Ran Mikami**

* 東北大学 工学部, ** 東北パイオニア株式会社

* Faculty of Engineering, Tohoku Univ., ** Tohoku Pioneer Ltd.

キーワード: 超音波トランスミッタ (Ultrasonic Transmitter), 指向性 (Directivity), 指向性係数 (Directivity Index), サイドローブ (Side Lobe)

連絡先: 〒 980 - 77 東北大学工学部 機械電子工学科 メカトロニクス設計学
桧山昌之, Tel. : (022) 217-6969, Fax. : (022) 217-7027,
E-mail : hiyama@emura.mech.tohoku.ac.jp

1. はじめに

超音波は, ロボットや医療など様々な分野で利用されている. ロボットには距離センサとして比較的低い周波数の超音波が用いられ, 壁面の法線方向検出¹⁾や, 複数物体の同時計測^{2, 3)}などの研究がなされている. 一方, 医療分野では診断装置として比較的高い周波数の超音波が用いられ, トランスミッタを波長の半分以下の間隔で周期的に並べ, サイドローブを抑制している⁴⁾. しかしこの手法では, 多くのトランスミッタが必要となるので, 必要となる送受信器を削減する研究がなされている^{4, 5, 6)}.

移動ロボットの移動速度増加に伴い遠距離に存在する障害物の検出が必要となり, 超音波出力の増加と鋭い指向性が要求される. ここで, 音波は小さい伝搬減衰率と鋭い指向性の両立は不可能であるので, 従来の超音波セ

ンサをただ単に用いるだけでは遠距離測定には適さない. そこで今回, 入手が容易で安価な周波数 40kHz の超音波トランスミッタを複数用いて, 2次元平面において鋭い指向性を有する距離センサを構築した. 本論文では二つの設計手法を提案し, シミュレーションならびに実測データからその有効性を検証する.

2. 指向性係数

球面波の波動方程式より, 点音源が角周波数 ω の正弦振動をする場合, Q, k をそれぞれ体積速度, 波数とすると, 速度ポテンシャル複素実効値 Φ は次式で表現される⁷⁾.

$$\Phi = \frac{Q}{4\pi r} \exp[-jkt] \quad (1)$$

指向性係数 D は, 配置された点音源の速度ポテンシャル複素実効値 Φ_i の和と, 全音源

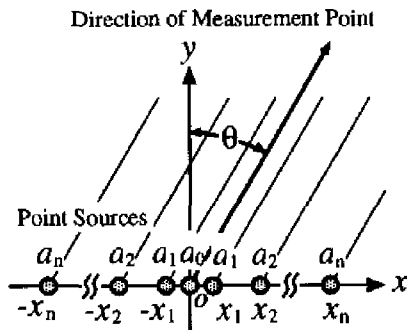


Fig. 1 Arrangement of point sources

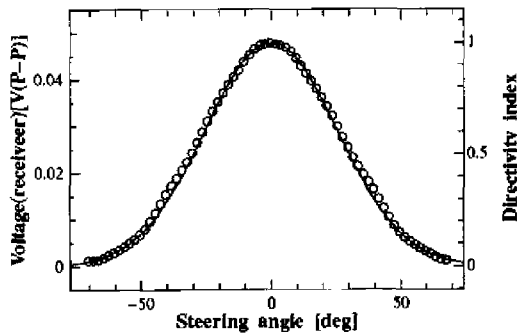


Fig. 2 Directivity of a single transmitter

を原点に置いた場合の速度ポテンシャル複素実効値 Φ_0 の和の比で次式が成立する⁷⁾。

$$D = \frac{\sum \Phi_s}{\sum \Phi_0} \quad (2)$$

2.1 点音源群の指向性

Fig. 1 に示される y 軸に対称配置された $2n+1$ (n : 自然数) 個の点音源を考える。ここで、 n 番目の点音源と原点との距離を x_n 、体積速度を $Q_n \equiv a_n Q_0$ 、 θ を原点と観測点とのなす角とする。また、原点から観測点までの距離 r が x_n に比べて非常に大きいと仮定すると点音源群の指向性係数は、

$$D = \frac{1}{1 + 2 \sum a_n} \times \left[1 + 2 \sum_{l=1}^n a_l \cos(kx_l \sin \theta) \right] \quad (3)$$

と近似される。上式より点音源群の指向性は、重み付け係数 a_n と配置 x_n により決定される。

3. 設計手法

重み付け係数 a_n 、配置 x_n の組み合わせは無数個存在するので、望ましい特性を有する組を発見するのは容易なことではない。そこ

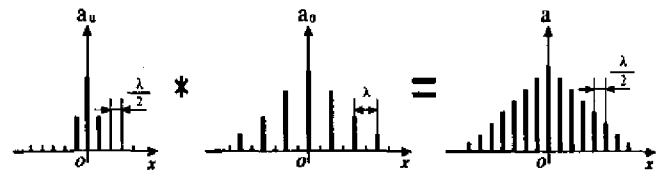


Fig. 3 Set of weighing pattern

で、簡単化のため周期的な配置を取ることとし、体積速度の重み付けのみを考えるものとする。ここで体積速度はトランスミッタに加える電圧に比例する。

3.1 重みと放射パターンとの関係の利用

指向性係数 D と重み付け a_n との関係式 (3) は、次式のフーリエ変換式に変形できる。

$$D = F[a(x/\lambda)] \quad (4)$$

$$a(x/\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} a_n \delta(X - x_n) dX$$

Fig. 2 に、次章で述べる実験装置を用いて測定された 1 個のトランスミッタの指向性を示す。図中の丸印がレシーバ側における測定電圧で、実線がその近似曲線である。なお、測定電圧は測定を 3 回行いその平均値を用いた。これより超音波トランスミッタは、Fig. 2 に示される指向性係数 D_u を持つ点音源と考えることができる。

また、超音波トランスミッタ配列の指向性係数 D は、同じ配置に並べた点音源の指向性係数を D_0 とするとブリッジの法則より、

$$D = D_u \cdot D_0 \quad (5)$$

となるので、式 (4)、(5) より次式が成立する。

$$D = F[a_u(x/\lambda) * a_0(x/\lambda)] \quad (6)$$

ここで、 a_u, a_0 はそれぞれ超音波トランスミッタ自身、点音源群の重み付け係数である。

D_u を Fig. 2 の近似曲線で近似すると、1 個の超音波トランスミッタは、Fig. 3 の左側に示されるような重み付け・配置を行った点音

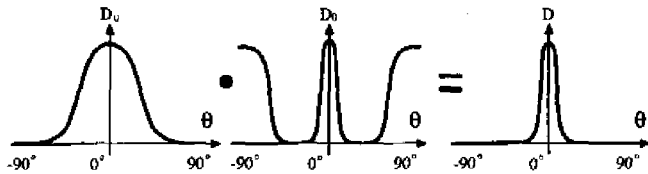


Fig. 4 Design of directivity index

源群と考えることができる。ここで、太線の位置に点音源があり、その長さが重みを表している。この a_u の形状より式 (6) を用いて、ある超音波トランスミッタ配列の指向性係数 D を容易に想像することができる。故に指向性が鋭くサイドローブが抑制されるような a_0 が図式的に決定できる。Fig. 3 の a_0 はその一例であり、配置は 1 波長間隔で、重み付けは原点からの距離に反比例したものとなっている。

3.2 指向性係数の利用

指向性係数 D は式 (5) より D_u と D_0 の積で表され、 D_u は Fig. 2 よりサイドローブの存在しない滑らかな指向性を持つ。これより Fig. 4 に示すように、 D_0 の形状がステアリング角度 $\pm 90^\circ$ 付近で大きな値を持って、ある角度範囲で極値を持たなければよい。故に、 D_0 を解析的に解釈し重み付け ($a_1 \sim a_n$) が決定される。一方、 a_0 は D_0 の極値を持たない平坦な部分の指向性係数が 0 になるよう決定される。一例として、トランスミッタを 7 個、間隔を半波長で配置した場合の重み付けを考える。指向性係数は式 (3) より次式で表される。

$$D = \frac{1}{1 + 2 \sum a_n} \times \left[1 + 2 \sum_{l=1}^3 a_n \cos(\pi \sin \theta) \right] \quad (7)$$

これより、上式の一階微分が $|\theta| < 90^\circ$ の範囲で $\theta = 0^\circ$ 以外の解を持たないような a_n の組合せを考えれば良い。ここで簡単のため、 $\theta = 90^\circ$ を解に持つ場合を考える。条件式は $9a_3 - 4a_2 + a_1 = 0$ となり、次式がこれを満足

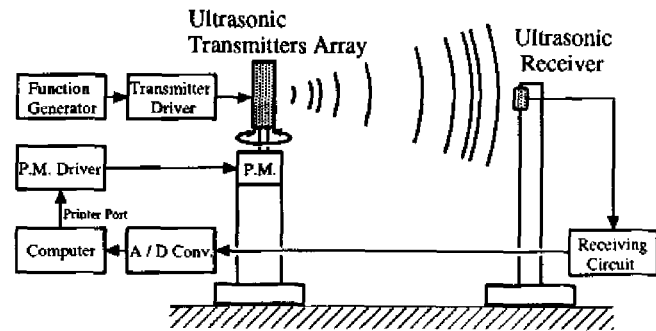


Fig. 5 Outline of Measurement system

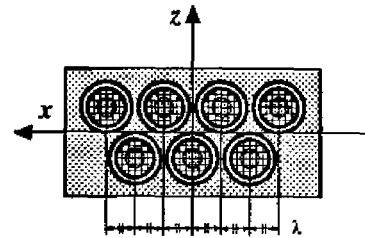


Fig. 6 Array of ultrasonic transmitters

する一例である。

$$a_0 = 1.23, a_1 = 1.00, a_2 = 1/2, a_3 = 1/9 \quad (8)$$

4. 実験結果

4.1 実験装置

Fig. 5 に、実験装置の概略図を示す。トランスミッタアレイと 1 個のレシーバとを対面させ、送信側をパルスモータで回転させ、回転角に対応する受信電圧値から指向性を測定する。なお、測定は約 7.8×5.4 m の室内で行った。

4.2 シミュレーション結果

7 個の超音波トランスミッタを用いた場合の指向性シミュレーションを行った。Fig. 6 にトランスミッタの配置図を示す。重み付けが Fig. 3、式 (8) の時のシミュレーション結果を Fig. 7、Fig. 8 にそれぞれ示す。なお、送受信間距離は 2 m とした。ピッチ角度が 0° の時のヨー角の指向性は、設計された特性を満足しており、サイドローブが完全に抑制されている。しかし、Fig. 6 の配置は xy 平面における指向性しか考慮していないので、ピッチ角が 0° 以外のヨー角の指向性にはメインローブの 20% 程度のサイドローブが生じている。

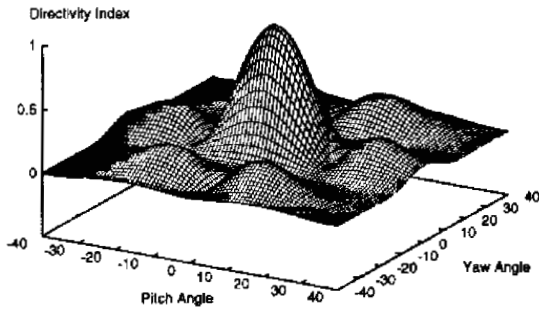


Fig. 7 Directivity simulation (1)

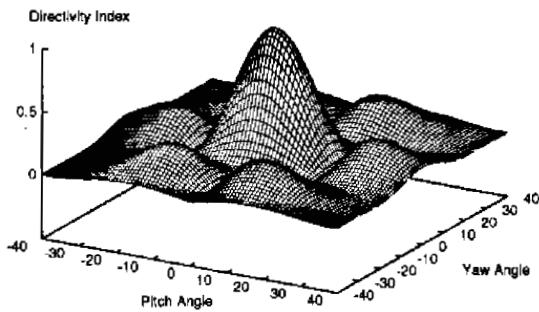


Fig. 8 Directivity simulation (2)

4.3 測定結果

シミュレーションと同様の重み付けを行い、トランスミッタ配列の原点とレシーバの原点との高さを変化させ測定を行った。なお、送受信間距離もシミュレーションと同様に 2m とした。Fig. 9, 10 にそれぞれの重み付けの測定結果を示す。ここで図中の Δz が高さの差である。メインローブの指向角はよく一致しているが、 $\theta = 0^\circ$ に対して対称でなく、サイドローブが大きく生じているのは、トランスミッタ・レシーバの配置誤差や実験室の壁の影響などと考えられる。

5. 結 言

より遠距離の障害物検知に必要となる鋭い指向性の実現に着目し、異なる電圧を加えた複数のトランスミッタを用いて指向性を向上させる設計手法を提案した。さらに、シミュレーションならびに簡単な測定を行い、2次元平面における指向性の向上を示した。

今後は、屋外における指向性特性の測定、指向性の向上を3次元に拡張したスポット状の指向性の実現、さらにトランスミッタに加える

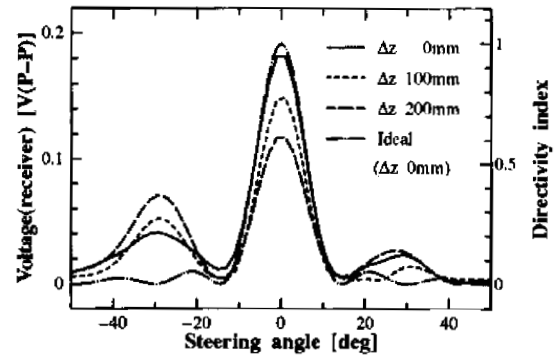


Fig. 9 Measuremental results (1)

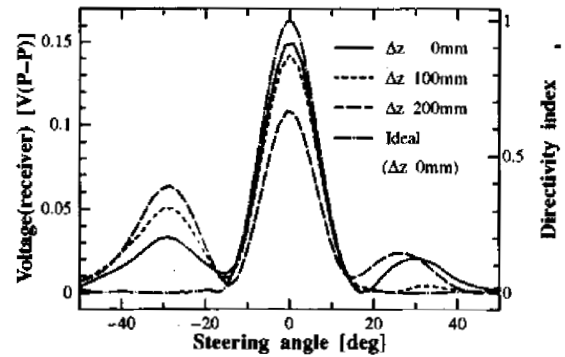


Fig. 10 Measuremental results (2)

電圧を増加させた遠距離に存在する障害物検出の実現を考えている。

参考文献

- 1) 大矢, 永島, 油田: 超音波による壁面の法線方向の高速測定, 日本ロボット学会誌, **13**-5, 118/121 (1995)
- 2) 矢田, 大矢, 油田: 複数の受信器を用いた超音波センサによる複数物体位置の同時計測, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 967/968 (1995)
- 3) M. Yang, S.L. Hill, J.O. Gray: Design of Ultrasonic Linear Array System for Multi-Object Identification, Proc. 1992 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelli., Robots, Sys., 1625/1632
- 4) G.R. Lockwood, Pai-Chi Li, Matthew O'Donnell and F.S. Forster: Optimizing the Radiation Pattern of Sparse Periodic Linear Arrays, IEEE Trans. Ultrason., Freq. and Contr., **43**-1, 7/14 (1996)
- 5) D.H. Turnbull and F.S. Foster: Beam Steering with Pulsed Two-Dimensional Transducer Arrays, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. and Contr., **38**-4, 320/323 (1991)
- 6) S.W. Smith, H.G. Pavy, O.T. von Ramm: High-Speed Ultrasound Volumetric Imaging System-Part I: Transducer Design and Beam Steering, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. and Contr., **38**-2, 100/108 (1991)
- 7) 城戸: 音響工学, 64/71, コロナ社 (1982)