

超音波アレイセンサによる視覚障がい者のための 障害物検知手法

Obstacle Detection with Ultrasonic Sensor Array for Visually Impaired People

高橋亮介* , 鄭聖熹** , 高橋隆行**

Ryosuke Takahashi* , Seong-Hee Jeong** , Takayuki Takahashi**

*東北大学, **福島大学

*Tohoku University, **Fukushima University,

キーワード : 電子移動補助機器 (electronic travel aid device), 超音波センサ (ultrasonic sensor), 位相シフト型アレイ (phased array), グレーティングローブ (grating lobe), 音響管 (acoustic tube)

連絡先 : 〒960-1296 福島市金谷川1番地 福島大学 理工学群 共生システム理工学類 高橋隆行 ,
Tel.: (024)548-8428 , Fax.: (024)548-8428 , E-mail: taka@sss.fukushima-u.ac.jp

1. はじめに

現在, 視覚障がい者のための様々な物体探査機器が開発されている^{1, 2, 3)}. しかし, これらの多くは空間的探査範囲が狭く, 使用者が手や頭などを振って走査をする必要があり, 障害物を探知できない状況が生じる場合がある.

そこで広い範囲をすばやく探査し, 音により障害物の存在する方位を提示する, 視覚障がい者のためのシステムの開発を行う. このシステムの使用環境としては, まず開発の第一段階としてより環境の変化の少ない屋内とする. このような障害物探査では, 一般的にレーザ, 赤外線, 超音波, カメラなどの非接触型センサが用いられているが, それぞれメリット, デメリットがあるために幾つかのセンサを組み合わせる必要がある.

一方, 生活する上で廊下や窓に面した部屋など

直射日光が差し込む場所やガラスの窓, 扉が存在する場所で行動する状況は数多く存在する. このような状況下では光学センサやカメラはその性能を大きく低下させてしまうため, 超音波を用いて探査することが必要となる. そこで, 本研究では超音波を用いて広範囲を探査するセンサシステムを開発し, 障害物を検知することを目的とする.

2. センサシステムの目標性能

本システムの目標性能をTable. 1に示す. 水平測定範囲は使用者の0.5[m]前方において1.5[m]の幅 (人間の平均的な肩幅⁴⁾の約3倍) を探知できるように, 正面方向を0°として±60°までとする. また, 物体が存在する方位は音による提示を想定しているので, 人間が判断できる定位方向の最小角度である5°を一つの目安とする. 測定周期については,

Table 1 目標性能

水平測定範囲	$\pm 60^\circ$
測定距離	0.2 ~ 4[m]
角度分解能	5°
測定周期	200[ms]

人間が約1[m/s]で歩行している場合にも対応できるように200[ms]以下とする。

本研究では音響管を用いたPhased Arrayを提案し、送信センサとして用いることで目標とする水平測定範囲、測定距離、角度分解能の実現を目指す。また、パターン信号を送信することで多方位同時測定を行い、200[ms]以下の周期での測定を実現する。

3. センサシステムの設計

3.1 Phased Array

Phased Array型超音波センサでは、各センサ素子から位相に差を付けた波を発生させることにより、位相が一致する方向でのみ強い超音波ビームが得られ、センサの指向性を鋭くできる。また位相差を制御することによりビームの方向を変えられるため、素早い走査が可能となる。

アレイを構成する全ての素子が同じ指向性 $G(\theta)$ を持つとすると、超音波ビームを θ_0 の方向に発生させた場合のアレイの指向性 $F(\theta)$ は

$$\begin{aligned} F(\theta) &= G(\theta) \sum_{n=0}^N a_n e^{jnkd(\sin\theta - \sin\theta_0)} \\ &= G(\theta)E(\theta) \end{aligned} \quad (1)$$

となる。ここで、

$$k = \frac{2\pi f}{v} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

- a_n : array-amplitude taper
- n : element number
- d : distance between sensors
- f : operating frequency
- v : velocity of sound
- λ : wavelength

式(1)において、 $E(\theta)$ はArray Factorと呼ばれ、素子の配置で決まる指向性である。

しかし、Phased Array方式では各素子からの超音波が数周期ずれて重なり合い、 θ_0 以外の方向にもGrating lobeと呼ばれるビームが発生する場合がある。Grating lobeが形成される方位 θ_i は $-90^\circ \leq \theta_0 \leq 90^\circ$, $-90^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$

$$\theta_i = \sin^{-1}(\sin\theta_0 \pm n\frac{\lambda}{d}) \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

であり、ここからGrating-lobeが発生しないための条件は

$$d < \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

となることがわかる。

Phased Arrayを探査に用いる場合、Grating lobeは誤検出の原因となるので、式(3)を満たすようにアレイを設計する必要がある。

3.2 音響管を用いたGrating lobe対策

空中で超音波探査を行う用途のセンサ素子で大きさが半波長以下のものは、共振周波数などの特性や入手性などの面で問題がある。そのため、物理的に式(3)を満たした配置ができない場合が多い。このような場合にも素子を不等間隔に配列し、Grating lobeを抑圧する方法⁵⁾が提案されている。しかし、この手法を用いるとアレイが大きくなってしまい、本研究のように人に携帯させる用途には適していない。

そこで、本研究では音響管を用いて式(3)を満足させるアレイを提案する。

3.2.1 音響管

音響管を用いた超音波送信ユニットをFig. 1に示す。音響管として内径10[mm]のチューブを用い、超音波送信素子は現在広く一般的に入手できる空中超音波センサの中で最も小さい部類に入る、周波数40[kHz]、直径10[mm]のものを使用する。このセンサ素子を用いた場合、発生する超音波の波長

は20[°C]で8.6[mm]となるため、チューブの開口部の幅は4[mm]となるように成形した。また、センサ素子はチューブの後端に取り付けた。

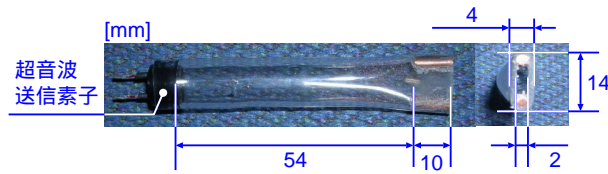


Fig. 1 音響管として使用するチューブの外形

このチューブおよび送信センサ素子の指向性を測定したものがFig. 2である。

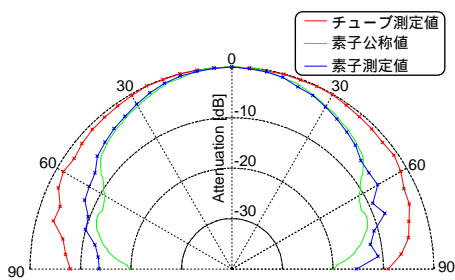


Fig. 2 チューブ、送信素子の指向性

3.2.2 音響管を用いたアレイセンサの指向性

まず、チューブを用いない場合の指向性を測定するためにFig. 3のように送信素子を1列に並べて1次元アレイを作成した。この場合、センサの中心間距離が10[mm]となり、式(3)を満たさない。ここで超音波ビームを35.6°に向けた時の指向性をFig. 4に示す。このグラフより、-16.1°の方向にGrating lobeが発生しているのが分かる。

次に音響管を用い6素子のアレイ(Fig. 5)を作成した。超音波ビームを34.3°に向けた時の指向性をFig. 6に示す。このグラフから、Grating lobeの発生を回避できていることが分かる。

また、このチューブアレイを用いて超音波ビームを大きく外側へ傾けた時の指向性とArray FactorをFig. 7に示す。このグラフを見ると、ビームの方向が90°に近づくほどArray Factor自体が歪んでしまい、角度分解能が極端に悪くなることが分かる。

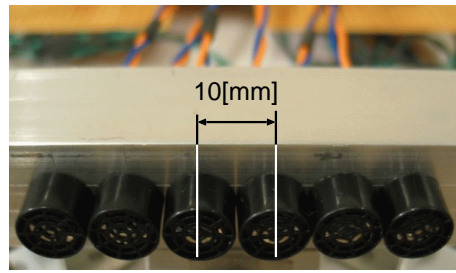


Fig. 3 素子アレイ

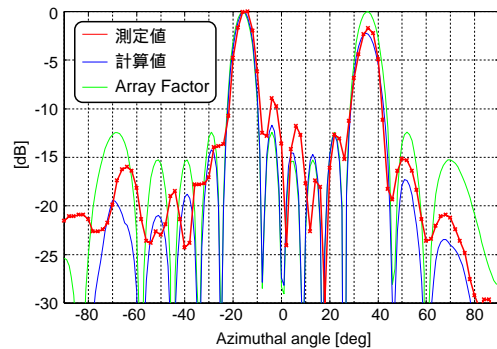


Fig. 4 超音波ビーム方向35.6°時の指向性

したがって、今回作成したチューブアレイでは測定範囲を±60°までとし、これは目標とする水平測定範囲の条件を満たしている。

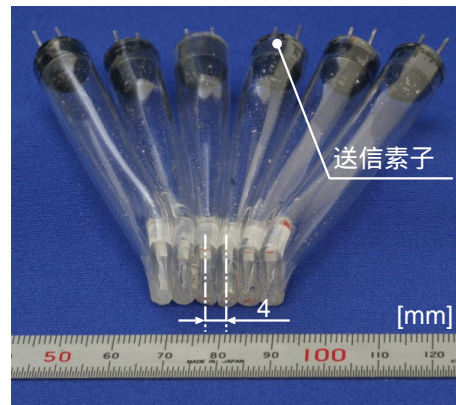


Fig. 5 チューブアレイ

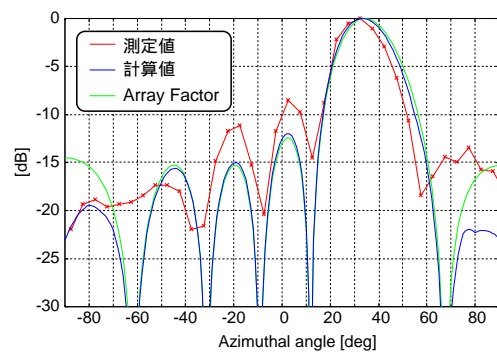


Fig. 6 超音波ビーム方向34.3°時の指向性

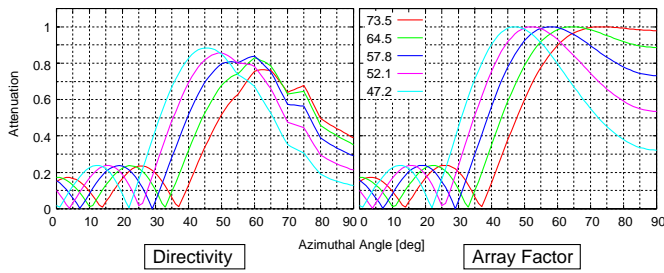


Fig. 7 各ビーム方向におけるビーム形状

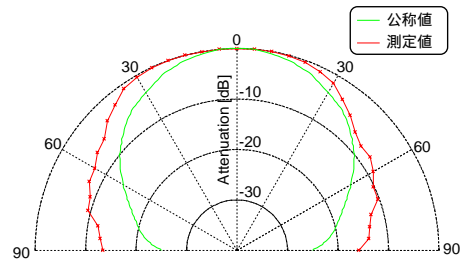


Fig. 8 受信素子の指向性

3.3 受信センサの配置

本システムでは超音波送信センサによって超音波を発生させ、障害物に当たり反射してきた波を受信センサで受けることにより障害物を検出する。そのためシステムとしての測定可能範囲は、送受信を合わせた指向性に依存する。

送信から受信までの間や物体での反射によって信号が減衰しないとすると、最終的に受信センサから得られる信号の強さ $R(\theta)$ は

$$R(\theta) = D_R(\theta) \cdot D_T(\theta) \cdot S \quad (4)$$

と表すことができる。このとき、

- S : 仮想的な無指向性送信信号の強さ
- $D_T(\theta)$: 送信素子単体の指向性
- $D_R(\theta)$: 受信素子単体の指向性

したがって、送受信をあわせたシステム全体の指向性は $D_R(\theta) \cdot D_T(\theta)$ を見ればよい。

チューブアレイ、受信素子それぞれの指向性(Fig. 2, 8)を見ると、送信側のチューブアレイに比べ受信素子の指向性の方が鋭いので、水平測定範囲の目標性能 $\pm 60^\circ$ をカバーするためには受信素子を複数設置する必要がある。そこで、Fig. 9のように正面および正面から $\pm 50^\circ$ の方向に向けて3つの受信センサを配置した。

ここで、作成した送受信部の合成指向性を計算する。まず、計算を簡単にするためにチューブアレイ、受信素子の指向性をそれぞれ式(5)、(6)で近似する。受信素子については、あまり外側の角度まで

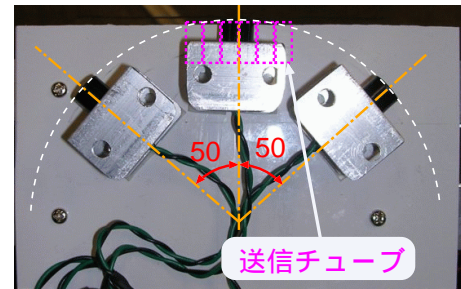


Fig. 9 受信素子の配置

は計算に使用しないので、 $-40^\circ \leq \theta \leq 40^\circ$ の範囲でのみ近似している。

$$t_{ap}(\theta) = 1 - (1.05 \times 10^{-8})\theta^4 \quad (5)$$

$$r_{ap}(\theta) = 1 - (1.35 \times 10^{-7})\theta^4 \quad (-40 \leq \theta \leq 40) \quad (6)$$

1[m]の距離にある物体からの反射波を受信する場合について、送受信合成指向性の計算値と測定値をプロットしたものがFig. 10である。このとき受信側は、 $\pm 30^\circ$ の角度で使用する受信センサを切り替えている。

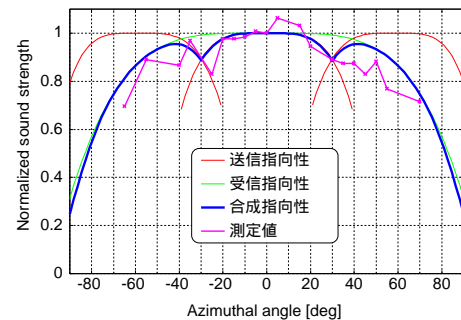


Fig. 10 送受信合成指向性

4. パターン信号を用いた多方位同時測定

4.1 走査に必要な時間についての考察

パルスエコー法を用いて各方位ごとに順次計測する場合を考える。目標とする最大測定距離4[m]を測定しようとした場合、往復8[m]を超音波が飛行する時間は20[°C]のとき23.3[ms]であり、 $\pm 60^\circ$ の範囲を 5° おきに測定すると全体では583[ms]必要となる。したがって、目標する測定周期である200[ms]以下を達成するためには、複数の方位について同時に測定を行わなければならないことが分かる。

複数の超音波センサを動作させる場合、送信波をあるパターン信号で変調し、対象物に反射して受信された信号との間で相互相関をとることにより距離を計測する手法が提案されている^{6, 7)}。この手法の特徴は各センサから別々のパターン信号を送信することで、他のセンサからの混信の影響を抑えられることにある。本研究ではこの手法をPhased Arrayに適用し複数方向を同時に測定する。

4.2 本システムへの適用

丹沢⁶⁾の提案した手法に用いられるパターン信号はFig. 11のように信号の1周期を L 等分し、各区間に0または1を与えて作成される。これを $T(i)$ ($i = 0, 1, \dots, L-1$)で表す。



Fig. 11 送信信号 $T(i)$

このパターン信号を用いた計測法を以下のようにして本アレイセンサに適用する。

まず送信側は、Fig. 12に示すように、それぞれ異なるパターン信号で変調した超音波ビームを測定したい方向へ発生させる。このとき全ての方向へ

同時にパターン信号を送信する。ここで、本アレイセンサでは同時に1つの方向へしかビームを発生させることができないので、全てのパターン信号においてある時刻に発生させるパルスは必ず1つでなければならない。つまり、ある方位 s に向けた送信信号を T_s とすると

$$\sum_{s=0}^S T_s(i) \leq 1 \quad (0 \leq i \leq L-1) \quad (7)$$

を満たした送信信号を作成する必要がある。

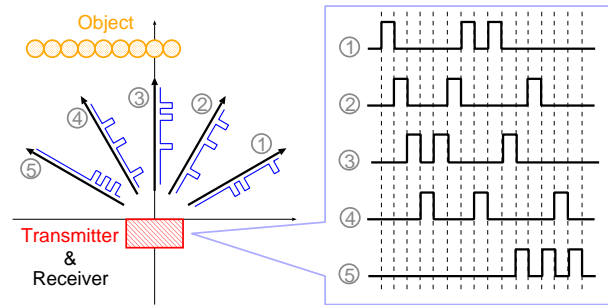


Fig. 12 パターン信号の送信

一方、受信側ではFig. 13のように複数のパターン信号が重畳した信号が得られるため、この受信信号 R から送信信号 T_s の飛行時間を検出するために、以下により相互相関を計算する。

$$C_{RT_s}(\tau) = \sum_{i=0}^{L-1} R(i) \cdot T_s(i + \tau) \quad (8)$$

R と T_s は τ がある値の時に完全に一致し、このとき $C_{RT_s}(\tau)$ は最大値として信号のパルス数 N をとる。 $C_{RT_s}(\tau)$ がある閾値を越えたときに反射波を検知できたとし、その時の τ に1パルス分の時間をかけたものを飛行時間とする。

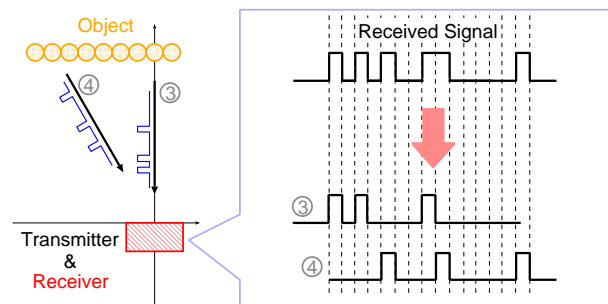


Fig. 13 パターン信号の受信

5. 複数物体検出実験

5.1 実験環境

検出実験を気温26[°C]の室内で行った。検出対象物として1辺30[mm]のアルミの角柱を使用し、Fig. 14に示すようにセンサから距離1[m]、角度-10°、45°の位置に配置した。測定は±60°を6°ごとに21方向に対して行った。

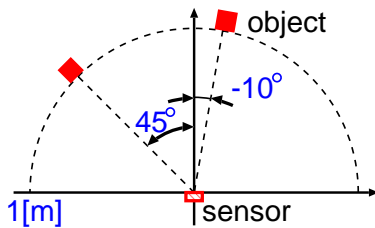


Fig. 14 測定物の配置

送信信号はパルス数を $N = 3$ 、信号の長さを $L = 220$ とし、1パルスの長さを $747[\mu\text{s}]$ 、全体 L では $164[\text{ms}]$ とした。このときの誤作動確率は石山らの研究⁷⁾から計算によって求めることができ、 $0.2[\%]$ となる。送信信号 $T(i)$ において、 $T(i) = 1$ となる位置 i を (i_1, i_2, \dots, i_n) と表し、本実験で使用した21組のパターンを Table. 2に示す。

Table 2 パターン信号

(0, 34, 100)	(7, 37, 101)	(14, 46, 104)
(1, 54, 90)	(8, 50, 89)	(15, 40, 108)
(2, 35, 106)	(9, 49, 93)	(16, 45, 96)
(3, 53, 91)	(10, 38, 87)	(17, 44, 109)
(4, 52, 95)	(11, 48, 94)	(18, 41, 88)
(5, 36, 103)	(12, 47, 99)	(19, 43, 97)
(6, 51, 92)	(13, 39, 98)	(20, 42, 102)

5.2 実験結果

20回測定したときの検出率をFig. 15に示す。2つの対象物体を分離して検出できていることが分かる。検出幅は10°程度となっており、現時点では目標性能を満たしていない。これは本実験で用いた素子数6のアレイではビームの幅が広いことが原因であり、アレイの素子数を増やすことで超音波ビームの指向性をより鋭くし、角度分解能を向上させることができると考えられる。

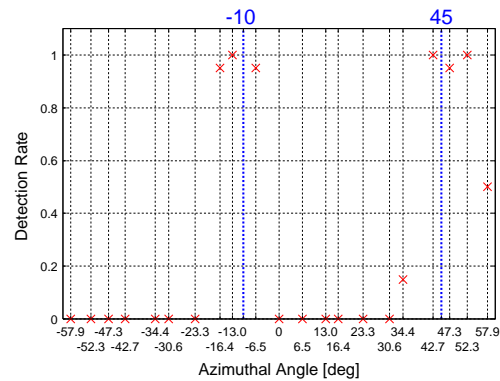


Fig. 15 検出率

6. おわりに

本研究では音響管を用いることでGrating lobeを回避する超音波アレイセンサを提案し、システム全体の指向性を考慮して超音波送受信部を製作した。パターン信号を送信することにより、同時に多方向の測定ができるシステムを構築した。以上のシステムを用い、複数物体の検出が可能なることを示した。

今後の予定として、センサシステムの改良をおこない、角度分解能を向上させる必要がある。また人間への提示インターフェースも統合したセンサシステムを製作し、視覚障がい者による実地試験をすることなどが挙げられる。

参考文献

- 1) UltraCane, Sound Foresight Ltd, <http://www.soundforesight.co.uk/>
- 2) BAT "K" Sonar Cane, The Bay Advanced Technologies Ltd, <http://www.batforblind.co.nz/>
- 3) LASERCANE, Nurion Raycal, <http://www.lasercane.com/>
- 4) 河内 まき子, 持丸 正明: AIST人体寸法データベース, 産業技術総合研究所H16PRO 287 (2005)
- 5) 溝上 収, 中澤 利之, 神力 正宣: グレーティングローブを抑圧する不等間隔アレーアンテナの素子間隔決定の一方法, 電子情報通信学会論文誌, J83-B-1, 141/143 (2000)
- 6) 丹沢 勉, 清弘 智昭, 森 英雄: 屋外移動ロボットのための雑音に強い超音波センサ, 日本ロボット学会誌, 15-4, 542/549 (1997)
- 7) 石山 敏規, 高橋 隆行, 中野 栄二: 複数の超音波センサの混信によって生じる誤動作の確率的考察, 日本ロボット学会誌, 17-4, 526/533 (1999)