

小型空中超音波フェーズドアレイ装置の開発 ～ビームの指向性とその利用法についての検討～

Development of small-sized airborne ultrasonic phased array device

～Study of ultrasonic beam directivity and its usage～

○杉本潤彌^{*1}, カニエテ ルイス^{*2}, 高橋隆行^{*1}

○Junya Sugimoto^{*1}, Luis CANETE^{*2}, Takayuki Takahashi^{*1}

福島大学^{*1}, サン・カルロス大学^{*2}

Fukushima University^{*1}, University of San Carlos^{*2}

キーワード : 超音波センサ (ultrasonic sensor), フェーズドアレイ (phased array),
グレーティングローブ (grating lobe), 指向性 (directivity)

連絡先 : 〒 960-1296 福島県福島市金谷川 1 番地 福島大学 理工学群 共生システム理工学類 高橋研究室
杉本潤彌, Tel.: (024)548-5259, Fax.: (024)548-5259, E-mail: junya@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

1. 緒言

近年, 人間の生活を支援することを目的としたロボットの研究が盛んに行われている. 本研究室でも Fig. 1 に示す人間支援ロボット I-PENTAR¹⁾の開発を行っており, 屋内での荷物運搬などの作業を想定して研究が進められている. 想定した仕事を行うためには, 荷物や障害物といった物体の検知や周囲の環境を認識することが必要となる.

一般的に移動ロボットの物体の検知には, 非接触型センサが用いられており, 主に光学式のものや超音波式のものが採用されている. 光学式センサは応答が高速, かつ高分解能といった利点があるが, 鏡面や透明な物体の検知は難しく, さらに外乱光による影響を受けてしまうと

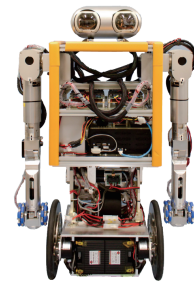


Fig. 1 I-PENTAR

いう特徴がある. 一方で, 超音波式センサは応答速度が光学式のものと比べて遅く, 温度や風の影響を受けてしまうが, 鏡面や透明な物体の検知も行えるという特徴がある.

これらの特徴から, ロボットの環境認識の際には, 光学式と超音波式の2つのセンサを同時

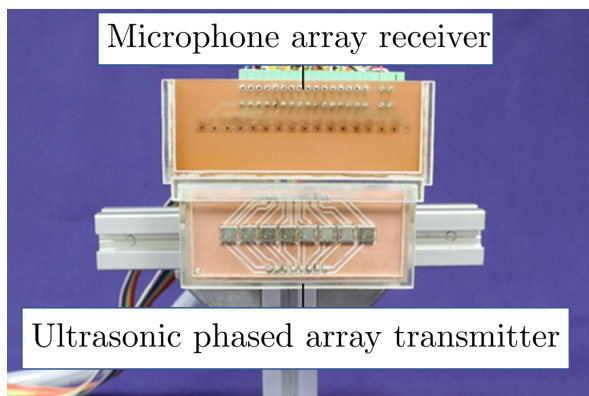


Fig. 2 Ultrasonic phased array transmitter and microphone array receiver

に用いることで各々の欠点を補い、より精度の高い環境認識が行えると考えられる。本研究では超音波式センサを用いた手法に着目する。高橋らは指向性を高めることができ、かつ電子的な操作によって複数の超音波ビームを発生させ、その向きを変えることが可能なフェーズドアレイと呼ばれる手法で物体の探査を行うことを提案した²⁾。

上原らの先行研究³⁾で提案されたセンサシステムの外観を Fig. 2 に示し、その送信機アレイを Fig. 3 に示す。この超音波センサシステムでは、フェーズドアレイ送信機から超音波を照射し、マイクロホンアレイ受信機を用いて物体から反射した超音波を受信する。その受信信号を MUSIC (multiplue signal classification) 法⁴⁾で処理することで、高分解能な物体位置推定を実現している。

先行研究³⁾で提案されたセンサシステムでは、発生させる超音波ビームが2本の時、MUSIC法を用いて物体の位置推定が行えることが確認された。しかし、ビーム数が2本で広範囲を推定するためには何度もビームを照射する必要があり、推定に時間がかかってしまう。そのため、1度に照射するビーム数を増やすことで短時間での位置推定が可能であると考えた。本研究では、1度の照射で発生させるビーム数を増やした際のビームの指向性についての検討を行う。

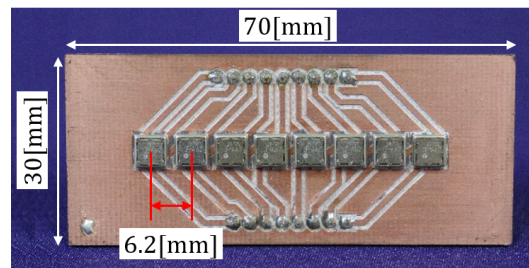


Fig. 3 Ultrasonic phased array transmitter

2. センサシステム

本章では先行研究³⁾で提案された超音波センサシステムについて述べる。

2.1 MUSIC 法

MUSIC 法は、マイクロホンアレイ受信機を用いて受信した信号の相関行列の主成分分析を行うことで、受信波の到来方向を高分解能で推定可能なアルゴリズム⁴⁾である。先行研究では、単一のフェーズドアレイ送信機から送信された超音波が物体から反射されることになる。したがって、マイクロホンアレイ受信機で観測される反射波は、同一の送信源に由来するものであるため、受信波どうしがとても強い相関を持つ。

そこで、MUSIC 法の前処理として空間移動平均法⁵⁾ (Spatial Smoothing Processing, 以下、SSP)を導入し、相関のある反射波の到来方向を推定する。空間移動平均法を適用した場合、マイクロホンアレイ受信機を構成する受信機の数 M に対して、反射波は最大 $M/2$ 個しか推定できない。

Fig. 2 に示したセンサシステムにおいては、マイクロホンアレイ受信機を構成する受信機の数 が 16 個であるため、推定可能な反射波数は最大 8 個である。

照射角度及び素子の配置によって決まる指向性である。

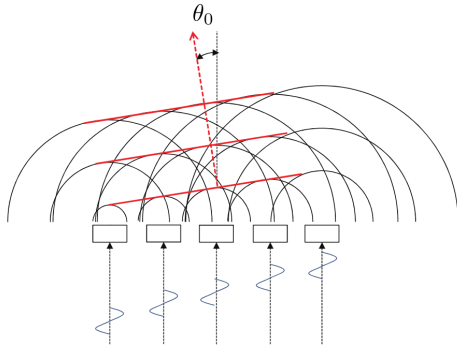


Fig. 4 Principle of phased array transmitter

2.2 フェーズドアレイ送信機

フェーズドアレイ送信機とは、Fig. 4のようにセンサ素子を平面状に並べて配置し、各素子への入力信号に位相差を与えることで、超音波ビームの照射方向を制御する方法である。位相が一致し強め合う角度方向では、強い超音波ビームが発生するため、角度をある程度限定することが可能である。また、各素子への入力信号の位相差を制御することで超音波ビームの方向を容易に制御することができるため、周囲環境のスキャン時に装置の向きを変えるような機械的な動作の必要がなく、短時間でのスキャンが可能となる。

照射センサ素子を配置したアレイを作成し、構成する全ての素子が同じ指向性 $G(\theta)$ を持つと仮定すると、 θ_0 の方向に超音波ビームを発生させる場合のアレイ全体の指向性 $F(\theta)$ は以下のように得られる。

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

ここで、 k は

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

である。各パラメータを Table 1 に示す。式 (1) において、 $E(\theta)$ はアレイファクターと呼ばれ、

Table 1 Symbols

Symbol	Description
a_n	Array-amplitude taper
n	Element number
i	Grating lobe number
d	Distance between sensors
θ_0	Target direction
f	Operating frequency
v	Velocity of sound
λ	Wavelength

2.3 グレーティングローブ

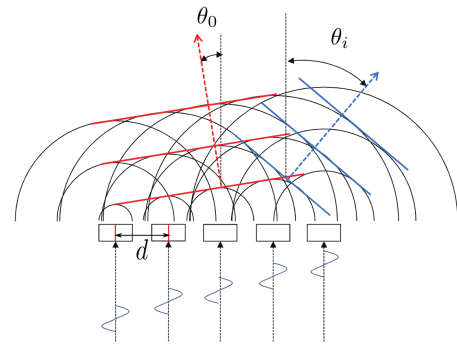


Fig. 5 Grating lobe

フェーズドアレイ送信機では素子の配置によっては超音波が数周期ずれて重なり合ってしまう角度ができる。それによって Fig. 5 に示すような、照射したい角度 θ_0 の超音波ビーム（メインローブ）とは別の角度 θ_i にグレーティングローブと呼ばれる強い超音波ビームが発生する場合がある。グレーティングローブが発生する角度 θ_i は以下のように得られる。

$$\theta_i = \sin^{-1} \left(\sin \theta_0 + i \frac{\lambda}{d} \right) \quad (3)$$

$$i = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

$$-90^\circ \leq \theta_0 \leq 90^\circ, -90^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$$

式 (3) よりグレーティングローブが発生する条

件として、以下の式が得られる。

$$\left| \sin \theta_0 + i \frac{\lambda}{d} \right| \leq 1 \quad (4)$$

$$i = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

式(4)の持つ解の数は、グレーティングローブの発生する本数と等しい。よって、式(3)と式(4)は、メインローブ方向 θ_0 と隣り合う素子の中心間隔(以降、素子間距離)によってグレーティングローブの発生する角度 θ_i と本数が決定することを示している。

3. 超音波ビームの指向性

本章では、式(1)を用いて1度の照射で発生させるビーム数を増やした際のビームの指向性について、シミュレーションによる検討を行う。

3.1 検討方法

Fig.3に示したフェーズドアレイ送信機では、素子間距離 $d=6.2[\text{mm}]$ 、使用する素子数 $N=8$ 個である。このとき、発生させることができる最大のビーム数はメインローブとグレーティングローブ各1本である。ここでは、最大ビーム数を増やすため、 $d=18.6[\text{mm}]$ としてシミュレーションを行う。この条件では、発生させることができる最大のビーム数はメインローブが1本、グレーティングローブが4本である。そして、使用する素子数 N を2個、4個、8個と変化させた場合のビームの指向性を比較する。その他の条件として、音速 v は気温 $15[^\circ\text{C}]$ 時のものを用いることとし $340.65[\text{m/s}]$ とする。また、超音波の周波数 f は $40[\text{kHz}]$ 、波長 λ を $8.52[\text{mm}]$ 、照射角度 θ_0 は $0[\text{deg}]$ とする。

3.2 検討結果と考察

使用する素子数 N を2個、4個、8個とした場合の結果をそれぞれFig.6, 7, 8に示す。また、それらを重ねて比較した結果をFig.9に示

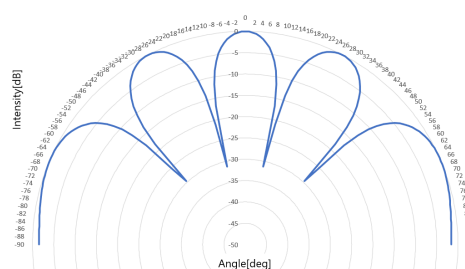


Fig. 6 Directivity of 2 element phased array transmitter

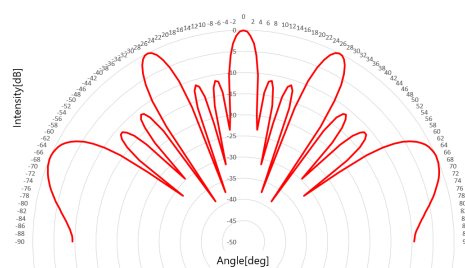


Fig. 7 Directivity of 4 element phased array transmitter

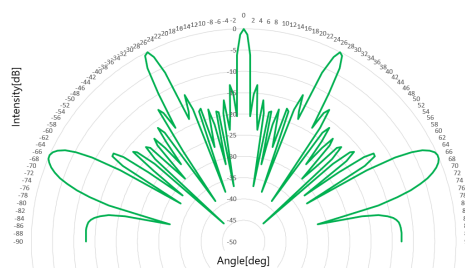


Fig. 8 Directivity of 8 element phased array transmitter

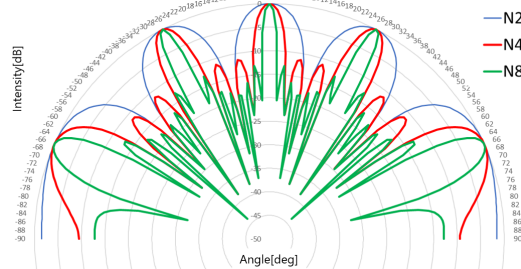


Fig. 9 Comparison of the directivity in difference of N

す。これらの図は、縦軸を各メインローブの最大値で正規化した音の強度 [dB] で表し、音波の照射される角度を $\pm 90[\text{deg}]$ の範囲で示している。

Fig. 9を見ると、メインローブとグレーティングローブの照射角度は N によらず同一となっているが、使用する素子が多くなるほど、ビームの幅が細くなる。このことから、使用する素子数を変更することで、ビームの幅を使い分けられることがわかった。

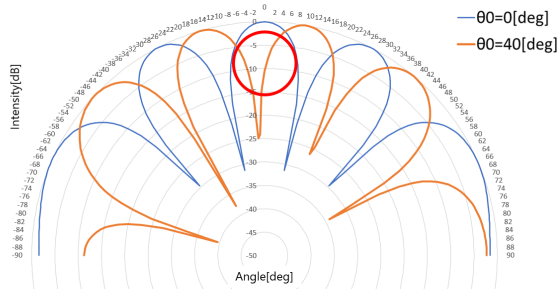


Fig. 10 Irradiation with wide directivity beams

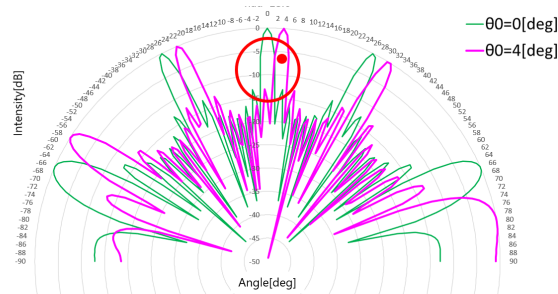


Fig. 11 Irradiation with narrow directivity beams

3.3 超音波の照射手順

検討結果から、位置推定の際の超音波の照射手順について Fig. 10 と Fig. 11 を用いて説明する。まず、Fig. 10 のように使用素子数が少なく幅の広いビームを異なる角度に照射することで、物体の有無及びその大まかな方向を推定する。その後、Fig. 11 のような使用素子数が多く幅の細かいビームを複数回照射することで正確な位置推定を行う。この方法を用いることで、短時間かつ正確で効率のよい位置推定ができると考える。

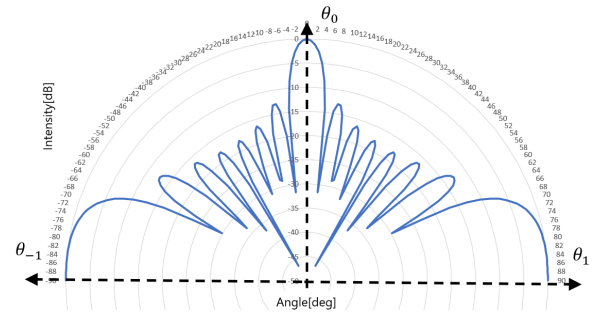


Fig. 12 Directivity with $d=\lambda$ [mm]

4. 発生するビーム数

3章では、1度の照射で発生させるビーム数を増やすために素子間距離 $d=18.6$ [mm] とした場合でシミュレーションを行った。本章では、素子間距離 d を変化させた場合のビームの本数について検討を行う。

4.1 グレーティングローブの発生式

グレーティングローブの発生条件である、式 (4) は、照射角度 θ_0 が 0 [deg] の場合、

$$\left| +i \frac{\lambda}{d} \right| \leq 1 \quad (5)$$

$$i = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

と表される。式 (5) の左辺がちょうど 1 となるような i が存在するとき、解の成立する i が最も多くなるため、その素子間距離 d においては照射角度 $\theta_0=0$ [deg] の場合に発生するビーム数が最大となる。このことから、照射角度 θ_0 が 0 [deg] の場合に発生するビーム数が最大となるような素子間距離 d は以下のように求められる。

$$\left| +i \frac{\lambda}{d} \right| = 1$$

$$\therefore d = |i\lambda| \quad (6)$$

$$i = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

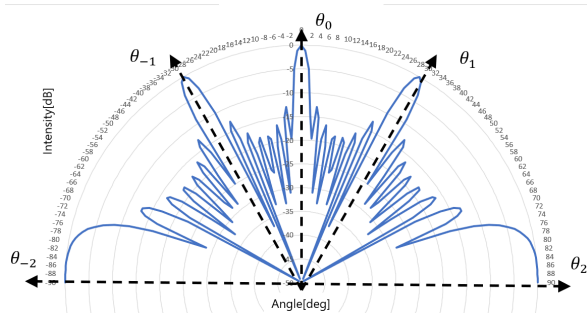


Fig. 13 Directivity with $d=2\lambda$ [mm]

4.2 ビーム数の検討

音速および超音波の周波数を3章で行ったシミュレーションの条件と同一にすると波長 λ は 8.52[mm] である。このとき、素子間距離 d を式 (6) より λ [mm], 2λ [mm] とした場合の指向性はそれぞれ Fig. 12, 13 に示すようになる。このとき、 θ_i は、照射角度 θ_0 から、正の角度側に大きくなる程に、 $\theta_1, \theta_2 \dots$ とし、負の角度側に大きくなる程に、 $\theta_{-1}, \theta_{-2} \dots$ としている。

この結果から、素子間距離 $d=\lambda$ [mm] とした場合は、式 (6) の解が成立するのは $i=\pm 1$ であるため、Fig. 12 で示すように、 $\theta_0, \theta_1, \theta_{-1}$ でビームが発生し、ビームの最大数は3本となる。

素子間距離 $d=2\lambda$ [mm] とした場合は、式 (6) の解が成立するのは $i=\pm 1, \pm 2$ であるため、Fig. 13 で示すように、 $\theta_0, \theta_1, \theta_{-1}, \theta_2, \theta_{-2}$ でビームが発生し、最大ビーム数が5本となることがわかる。

既述したように先行研究³⁾で提案されたセンサシステムでは、推定可能な反射波の最大数は8であった。したがって、1本のビームに対して反射波が2個だと想定すると、一度の照射で発生させるビーム数は4本以下となる。一方で、物体位置推定のためのビームの照射回数を抑えるためにはビーム数が多いことが望ましい。そのため、一度の照射で発生させるビーム数を3本以上、4本以下とする。この時、素子間距離 d は以下のように得られる。

$$\lambda \leq d < 2\lambda \quad (7)$$

本研究で行う検討では波長 λ は 8.52[mm] であるため、式 (7) は以下ようになる。

$$8.52 \leq d < 17.04 \quad (8)$$

5. 照射するビームの角度

短時間で広範囲な位置推定を行うためには、少ない回数のビーム照射で位置推定を行う必要がある。筆者らは、Fig. 11 に示すように複数のビームを照射する際、そのビームをできる限り等間隔に照射することで効率的に高分解能な位置推定が実現可能であると考えた。そのため、ビームの照射角度を変更し、ビームの角度間隔をできる限り均一に近づけるための手法を検討する。

5.1 適切なビームの照射角度

ビームの角度間隔をできる限り均一に近づけるにあたって、いろいろな条件で計算した結果、以下の4種類のパターンの照射角度で合計4回照射することで目的に近い照射が行えることがわかった。

パターン1, 2, 3, 4をそれぞれFig. 14, 15, 16, 17に示す。また、それらを重ねた図をFig. 18に示す。

パターン1はFig. 14のように $\theta_0 = 0$ [deg] の照射パターンである。これは θ_1 と θ_{-1} が 0 [deg] を基準に線対称となる。

パターン2は、 θ_0 と θ_{-1} または、 θ_0 と θ_{-3} が、 0 [deg] を基準にほぼ対称となるようなものである。Fig. 15では $\theta_0=53$ [deg] の場合のビームの指向性を示している。このとき、 θ_{-3} が -53.9 [deg] となり、 0 [deg] を基準にほぼ対称となっている。また、 θ_{-1} が 15.2 [deg], θ_{-2} が -15.8 [deg] となり、これらも 0 [deg] を基準に対称的となる。

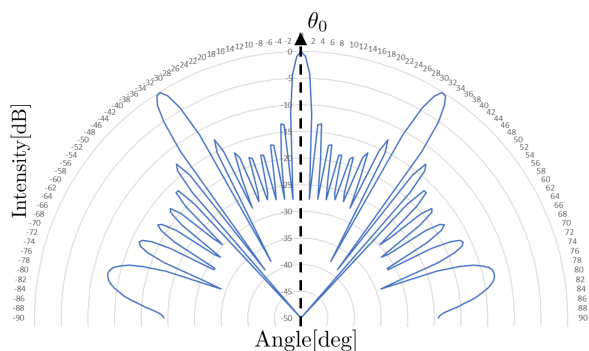


Fig. 14 Irradiation pattern 1

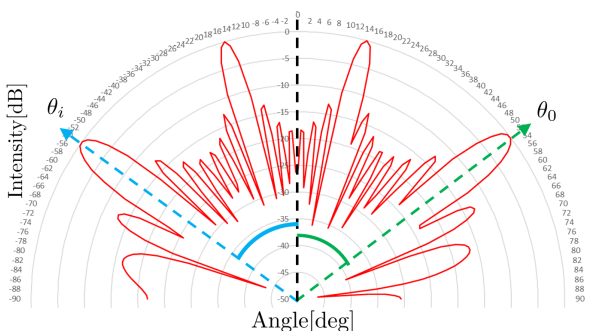


Fig. 15 Irradiation pattern 2

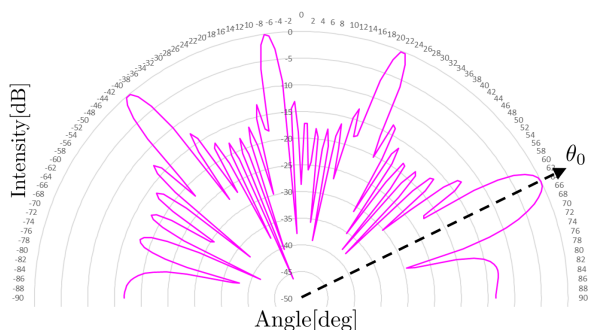


Fig. 16 Irradiation pattern 3

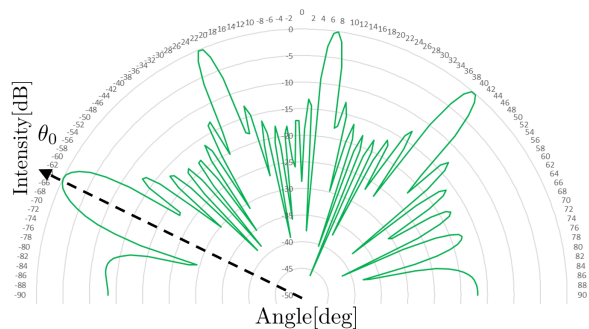


Fig. 17 Irradiation pattern 4

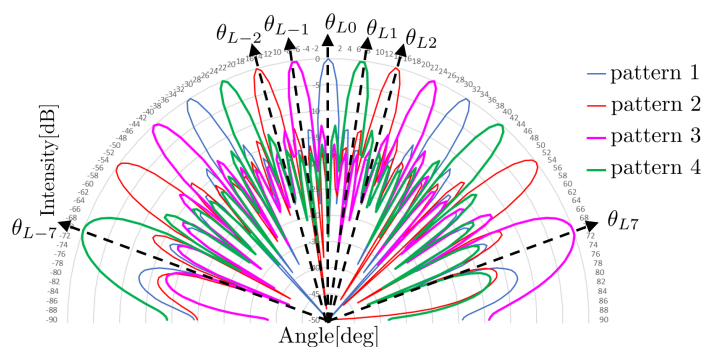


Fig. 18 Directivity when layering pattern 1 to 4

パターン3は、Fig. 16に示すような、パターン1, 2で補間できなかった角度にビームを発生させるものである。

パターン4は、Fig. 17のようにパターン3の照射角度を0[deg]を基準に対称としたものである。

Fig. 18は、パターン1~4を全て重ねたものである。各ビームには0[deg]方向のビームを θ_{L0} として、正の角度側を $\theta_{L1}, \theta_{L2}, \dots$, 負の角度側を $\theta_{L-1}, \theta_{L-2}, \dots$ のように番号を付ける。この θ_{L0} と θ_{L1} のように隣り合う角度の間隔について、素子間距離 d を変化させて確認した。用いる素子間距離 d は、式(8)から、無作為に15.9[mm], 16.5[mm]とする。

それぞれの指向性の計算結果をFig. 19, 20に示す。また、隣り合うビームの角度の間隔をFig. 21に示す。Fig. 21では、縦軸が角度差[deg]を表し、横軸が隣り合うビーム方向 $\theta_{Ln} - \theta_{Ln-1}$ を表している。

Fig. 21より、素子間距離 $d=16.5$ [mm]の方がより均等にビームが発生していると言える。しかし、Fig. 19, Fig. 20から、ビームを照射する最大角度は素子間距離 $d=15.9$ [mm]の方が広いことが分かる。物体位置推定に最適な素子間距離 d については、今後検討していく。

6. まとめと今後の予定

本研究では、超音波アレイ送信機において、1度の照射で発生させるビーム数について検討を

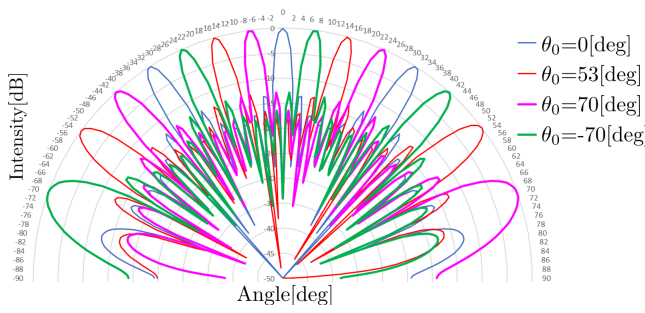


Fig. 19 Directivity with $d=15.9[\text{mm}]$

また、短時間で広範囲な位置推定を行うための照射方法についても検討を行い、4回の照射で約±70[deg]の範囲をカバーできることがわかった。今後は、照射されるビームの角度やビームの角度間隔などを考慮しつつ、位置推定を行う際により最適な素子間隔 d の照射パターンなどについて検討していく。

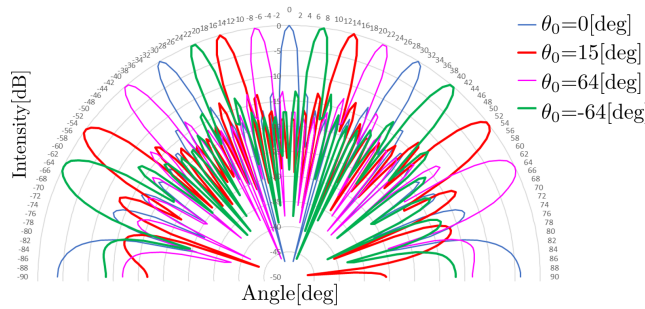


Fig. 20 Directivity with $d=16.5[\text{mm}]$

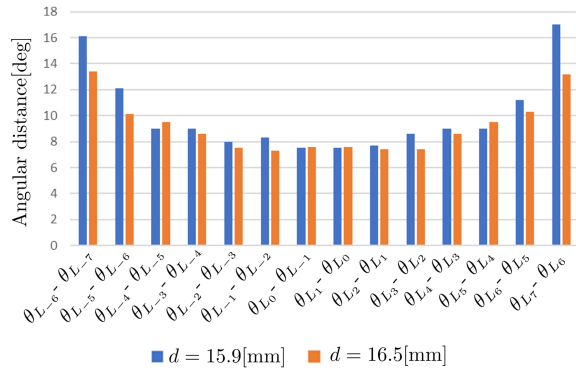


Fig. 21 Angular distance with $d=15.9$ and $16.5[\text{mm}]$

行った。発生させるビームの本数は波長 λ と素子間距離 d との関係で決まることを示した。この際、使用する素子数を変化させても照射されるビームの角度は変わらないが、そのビームの幅が変化することを示した。このことから、異なるビーム幅を切り替えることで位置推定を行うセンサの使い方を提案した。

参考文献

- 1) 近藤修平, Luis CANETE, 高橋隆行: マニピュレータを搭載した車輪型倒立振り子ロボットの制御—拡張状態オブザーバを用いたマニピュレータによる物体受け渡し制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 1P2-G03(2015).
- 2) 高橋隆行, 高橋亮介, 鄭聖熹: 超音波アレイセンサによる屋内環境障害物検知システム, 第24回日本ロボット学会学術講演会, 1E36(2006).
- 3) 上原聡希, 情野瑛, 高橋隆行: 高分解能環境認識のためのフェーズドアレイ送信機と MUSIC 法を組み合わせた空中超音波センサシステム, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2021, 1P2-G04(2021).
- 4) R.O.Schmidt: Multiple emitter location and signal parameter estimation, IEEE Trans. Antennas and Propagat, vol. AP-34, no.3, pp.276-280(1986).
- 5) Tie-Jun Shan, M. Wax and T. Kailath, “On spatial smoothing for direction-of-arrival estimation of coherent signals,” in IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol.33, no. 4, pp. 806-811,(August 1985).
- 6) 加藤正稔: 超音波センサによるフェーズドアレイのための20素子用音響管の基本特性, 福島大学卒業論文 (2012).
- 7) 陳華駿, 高橋隆行: 音響管を用いた超音波 Phased Array 装置の特性と改良, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 3P2-W05(2014).
- 8) 古宮佐希子, カニエテ ルイス, 高橋隆行: 超音波フェーズドアレイ装置のための音響管形状の改良-角度分解能向上のための検討-, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, A2A - M09(2017).
- 9) 高橋洋一郎, CANETE Luis, 高橋隆行: 小型空中超音波フェーズドアレイ装置の開発～送信器の小型化と分解能の向上～, 計測自動制御学会東北支部第314回研究集会, 資料番号314-2, (2018).
- 10) 高橋洋一郎, CANETE Luis, 高橋隆行: 小型空中超音波フェーズドアレイ装置の開発～縦方向の特性改善の手法～, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018, 1P2-M13(2018).
- 11) 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, Vol.J83-B No.1, 141/143 (2000).