

# 高分解能到来方向推定法を用いた超音波位置計測

## *Ultrasonic Wave Echolocation Using High Resolution Direction of Arrival Estimation*

金岡 祐介\* 北川 貴弘\*  
Yusuke Kanaoka Takahiro Kitagawa

(2014年7月31日 受理)

キーワード：超音波センサ, センサアレイ, 信号処理

### 1. はじめに

超音波を用いた物体検知や距離計測は、安価な部品で構成が可能であることや、比較的少ない演算量で物体位置が検出可能であることから幅広く利用されている。例として、自動ドアの人体検知やロボットの障害物検知等があげられる。従来用途以外にも、高齢化社会を背景にプライバシーを侵さずに人の有無や見守りができる高度なセンシング技術に対する要望があり、超音波を用いた可視化技術が貢献できる可能性がある。

当研究所においても、超音波センサアレイの特性を活かした人体追尾ロボット<sup>1)</sup>や三次元での物体位置を検出する超音波画像表示<sup>2)</sup>等に応用してきた。しかしながら、これらで利用している位置検出手法は角度分解能や検出精度が十分ではなく、より広い応用範囲にこの計測システムを適用するために、高分解能で高い検出精度を有するシステムへの改良が期待されている。高分解能な到来角推定法としてアレーアンテナ等の電波の分野で広く用いられているCapon法や線形予測法等があるが、従来使用しているビームフォーマ法と比べて演算量が多く、複雑で、超音波技術の利点である安価な部品を使った実装は困難であった。一方で、ICの高集積化の恩恵を受け、演算や通信量に対するコストは低下しており、複雑な演算や大量のデータを扱いやすい状況になっている。ここでは、超音波

による位置計測を精度よく行うために高分解能な到来方向推定法であるCapon法と線形予測法を適用した到来角推定のシミュレーション結果と実際にセンサアレイと超音波振動子を搭載する回路を作製し、実環境下において位置計測を行った場合の各手法の到来方向推定結果について報告する。

### 2. センサアレイとビームフォーマ法

超音波を用いた位置検出の基本原理は、超音波振動子から出た超音波が測定対象物で反射し、センサでその反射波を検出することにある。距離は超音波の送信から受信までの時間から計算し、角度の推定は複数のセンサを用いたセンサアレイの各センサに反射波が到達する時間差を利用する。入射波を平面波と仮定すると、リニアアレイセンサに対する反射波の入射角度は、図1のように表すことができ、各センサに反射波が到来する時間差 $\tau$ は $\tau = d \sin(\theta) / v$ である。ここで $d$ はセンサ間の距離、 $\theta$ は超音波の入射角、 $v$ は音速を示す。各センサ出力の和が最大になるのは、入射超音波が同位相の場合であるので、各センサ出力を同位相にするための重み関数 $W$ は

$$W = \left[ \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} d_1 \sin \theta\right), \dots, \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} d_K \sin \theta\right) \right]^T$$

$$\equiv a(\theta) \quad (1)$$

のように表すことができる。ここで $j$ は虚数単位、 $\lambda$ は超音波の波長、上添字 $T$ は転置、下添字 $K$ はセンサ数を示す。 $W$ は波長とセンサ間距離が決まれば角

\* 制御・電子材料科

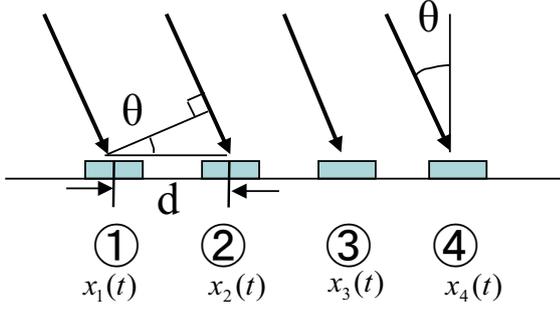


図1 センサアレイと入射角

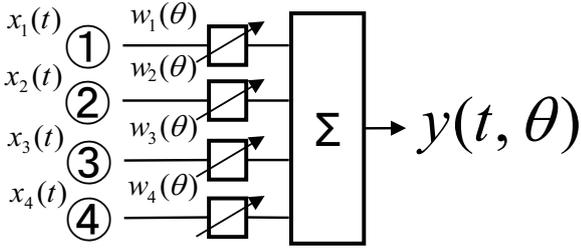


図2 基本的なセンサアレイに対する信号処理系

度毎に一意に定まる。センサの出力は時間信号であるので、直接重みをかけることはできないが、90°ハイブリッド<sup>3)</sup>と呼ばれる手法で複素領域へ拡張することができる。同相に揃えるための処理はサンプリングされた各センサの時間信号に遅延を与えることでも可能で、遅延加算<sup>4)</sup>と呼ぶ演算をハードウェアに実装することも比較的容易である。

$\mathbf{W}$  を乗じた各センサ出力の和は

$$y(t, \theta) = \mathbf{W}^H \mathbf{X}(t) \quad (2)$$

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_K(t)]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_K] \quad (4)$$

と表され、そのパワーは

$$P_{BF}(\theta) = \frac{1}{2} E[|y(t, \theta)|^2] = \frac{1}{2} \mathbf{a}(\theta)^H R_{xx} \mathbf{a}(\theta) \quad (5)$$

$$R_{xx} = E[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)] \quad (6)$$

である。上添字  $H$  は複素共役転置を示す。  $R_{xx}$  はセンサの相関行列である。  $E[\cdot]$  は平均操作を示す。この系をブロック図で示したものが図2である。入射角は未知であるので、スキャンしたい角度範囲で  $\theta$  を変化させて各角度の入射波の強度を得る。このように入射波の位相を全方向にわたって走査し、出力が大きくなる方向を探す方法をビームフォーマ法と呼ぶ。図3にビームフォーマ法の推定例を示す。シミュレーション条件は、センサ数が6個、センサ間距離が  $\lambda/2$ 、40 kHzの入射超音波がそれぞれ  $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $60^\circ$ の角度から到来し、それぞれの振幅は1, 1, 0.5としている。サンプリング周波数は512 kHzで、データ点数は128

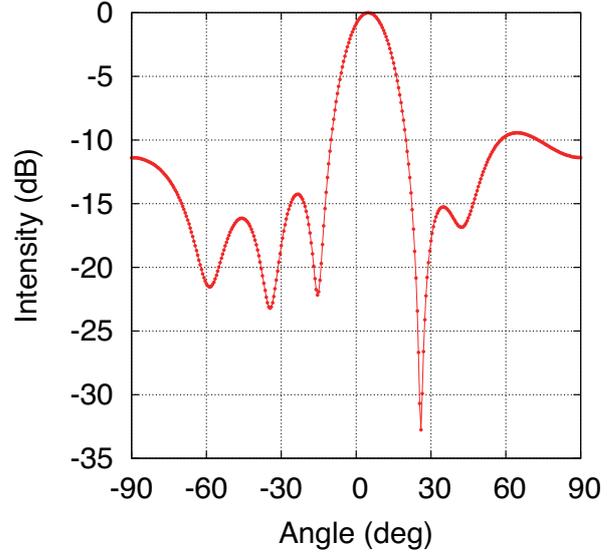


図3 ビームフォーマ法による推定結果例

点である。  $0^\circ$  と  $10^\circ$  の間に大きなピークがあるが分離はできておらず、  $60^\circ$  のピークは  $-90^\circ$  のサブピークと比べて十分な強度がない。このように、ビームフォーマ法は、複数の反射波が到来する場合には低い角度分解能とサイドローブのために精度の高い検出が困難であることが分かる。

### 3. Capon 法と線形予測法

#### 3.1 Capon 法

ビームフォーマ法は  $\mathbf{W}$  が入射波によらず簡便な手法であるが、ある波の方向にメインローブを向けたときのサイドローブが別の方向の波のメインローブやサイドローブとの重ね合わせになる。そのため、本来存在しない方向に大きなピークが発生し、誤検知の原因となる。このようなサイドローブによる問題を改善したのが、Capon 法である。Capon 法はある方向にメインローブを向けると同時に、他の方向からの出力への影響を最小化するものであり、  $\mathbf{W}$  を導出するための評価関数と拘束条件は以下ようになる。

$$\min_{\mathbf{W}} \left( P = \frac{1}{2} \mathbf{W}^H R_{xx} \mathbf{W} \right)$$

$$\text{subject to } \mathbf{W}^H \mathbf{a}(\theta) = 1 \quad (7)$$

式(7)は、強度を求めたい角度  $\theta$  において、  $P$  が最小化しないための条件である。この拘束条件がなければ、全ての角度範囲で出力が抑制される。この条件下で、  $\mathbf{W}$  について解くと、

$$\mathbf{W}_{CP}(\theta) = \frac{R_{xx}^{-1} \mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta) R_{xx}^{-1} \mathbf{a}(\theta)} \quad (8)$$

となる<sup>3)</sup>。出力パワーは

$$\begin{aligned}
 P_{CP}(\theta) &= \frac{1}{2} \mathbf{W}_{CP}^H R_{xx} \mathbf{W}_{CP} \\
 &= \frac{1}{2 \mathbf{a}^H(\theta) R_{xx}^{-1} \mathbf{a}(\theta)} \quad (9)
 \end{aligned}$$

で表される。ビームフォーマ法と同様に相関行列  $R_{xx}$  と  $\mathbf{a}(\theta)$  から計算が可能である。

上述のシミュレーション条件における Capon 法の到来角推定結果を図 4 に示す。0° と 10° を分けるピークが存在するが、強度比が小さく分離の判断は難しい。ビームフォーマ法でみられたサブピークは低いレベルに抑えられていることが分かる。

### 3.2 線形予測法

ビームフォーマ法と Capon 法はセンサアレイのメインローブを到来波方向に向けて受信し、そのパワーの大きさから到来方向を推定する方法であったが、線形予測法は図 2 における出力を最小にするように  $\mathbf{W}$  を適応的に求める方法である。前者の角度分解能はセンサ数に依るが、後者であれば少ないセンサ数で分解能の向上が期待できる。

線形予測法の基本的な考え方は以下のような数式で示すことができる。

$$\hat{x}_1(t) = - \sum_{k=2}^K w_k^* x_k(t) \quad (10)$$

式 (10) はセンサ 2~K までの出力と重みの線形結合で予測値  $\hat{x}_1(t)$  が作られている。このときの予測誤差  $\varepsilon(t)$  は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 \varepsilon(t) &= x_1(t) - \hat{x}_1(t) \\
 &= \sum_{k=1}^K w_k^* x_k(t) \\
 &= \mathbf{W}^H \mathbf{X}(t) \quad (w_1 = 1) \quad (11)
 \end{aligned}$$

$\mathbf{W}_{LP}$  の導出には、以下のような  $\mathbf{W}$  に関する評価関数と拘束条件を用いる。

$$\begin{aligned}
 \min_{\mathbf{W}} \left( P = \frac{1}{2} \mathbf{W}^H R_{xx} \mathbf{W} \right) \\
 \text{subject to } \mathbf{T}^T \mathbf{W}^* = 1 \quad (12)
 \end{aligned}$$

ただし  $\mathbf{T}$  は次式で定義される K 次元のベクトルである。上添字 \* は複素共役を示す。

$$\mathbf{T} = [1, 0, \dots, 0]^T \quad (13)$$

解は以下のように導かれ

$$\mathbf{W}_{LP} = \frac{R_{xx}^{-1} \mathbf{T}}{\mathbf{T}^H R_{xx}^{-1} \mathbf{T}} \quad (14)$$

出力のパワーはこの重みによる指向性パターンの逆数を取り、次式で表される。

$$P_{LP}(\theta) = \frac{1}{|\mathbf{W}_{LP}^H \mathbf{a}(\theta)|^2} \quad (15)$$

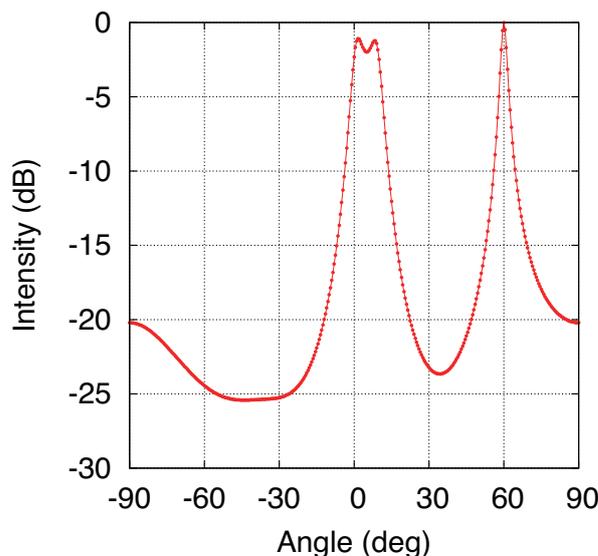


図 4 Capon 法による推定結果例

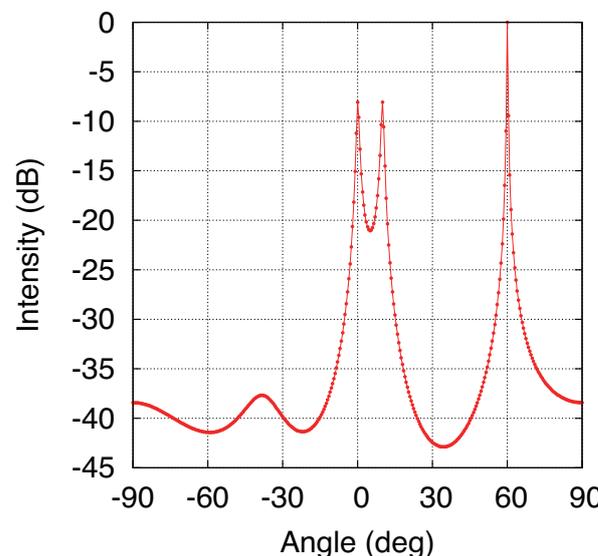


図 5 線形予測法による推定結果例

先ほどと同様の条件による線形予測法の推定結果を図 5 に示す。0° と 10° に鋭いピークがあり、分離に十分な強度比が得られている。入射超音波の振幅が強度に反映されていないが、物体の有無の検出には有効であると考えられる。

Capon 法と線形予測法は、その重みに相関行列の逆行列を必要とするが、各センサで観測される信号は相関が強いため、行列のランク回復を目的とした前処理として空間平均法<sup>3)</sup>を用いている。

## 4. 実環境下での計測

上記の三種類の到来方向推定法を比較するために 5 個の超音波センサのリニアアレイを用いて 2 個の反射

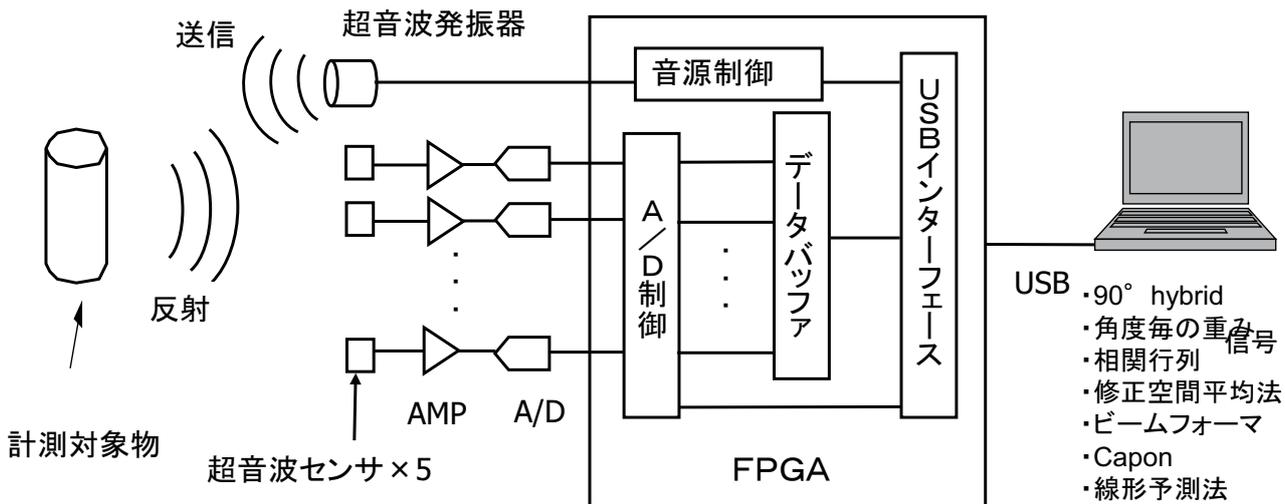


図6 超音波送受信システムのブロック図

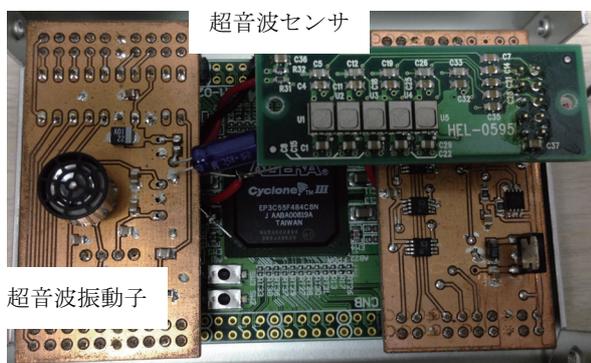


図7 超音波送受信回路

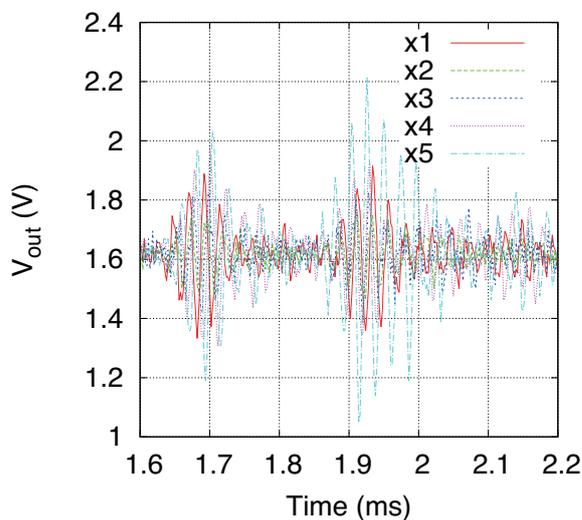


図9 各センサの時間波形

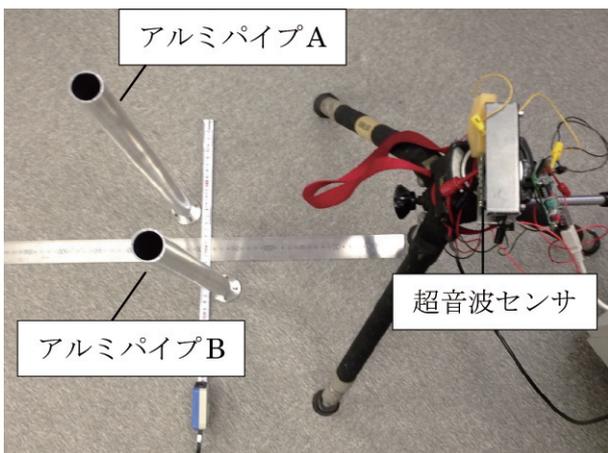


図8 計測実験機器の構成

対象物からの反射波の到来方向推定を行った。超音波を送受信するシステムのブロック図を図6に、写真を図7に示す。音源は圧電型(共振周波数40 kHz)の超音波発振子で、受信器はMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)超音波センサを使用している。音

源から超音波パルスを送信し、その反射波をセンサで受信後、アンプで増幅し、AD変換器で12 bit, 500 kSa/sのデジタル信号へ変換する。デジタルデータはUSBを通してPCへ転送している。これらハードウェアの制御は全てFPGA(Field Programmable Gate Array)が担当し、必要な信号処理は全てPC側で行っている。

実験の概観を示した写真が図8である。超音波送受信器の前方に計測対象物であるアルミパイプAとアルミパイプBを配置している。超音波センサ位置を原点とすると、それぞれ計測対象物A, Bのxy座標はおよそ(50 mm, 310 mm), (-55 mm, 255 mm)である。各センサの受信波形を図9に示す。1.7 msと1.9 msに大きな反射波形があり、それぞれパイプBとパイプAの反射である。この受信波形から各手法で到来角を推定した結果が図10である。A, Bの角度は

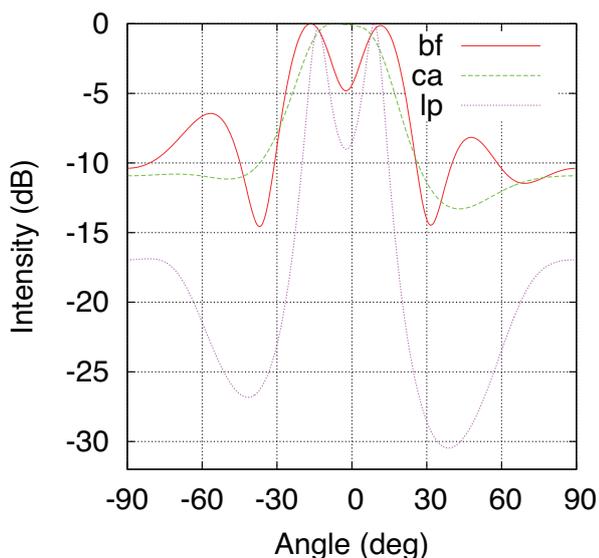


図 10 実環境下における各推定法の推定結果

それぞれおよそ  $9^\circ$  と  $-12^\circ$  であるので、各推定結果のピーク位置とほぼ同じである。ビームフォーマではその対象物の反射による二つのピークと、その他に二つのピークがあるがそれらに該当する物体は存在しないので、サイドローブと考えられる。Capon 法では、対象物の反射を分離することができず、一つの大きなピークがあるが、その他の角度における強度は比較的变化が少ない。線形予測法では、対象物の反射による大きな二つのピークとその他の角度域との強度比は最も大きい。物体検知の観点から物体の有無の閾値を考えると、ビームフォーマ法はおよそ  $-5$  dB が閾値になるが、そこまで下げると二つのピークの分離が困難になる。Capon 法は、異なる角度からの入射波を分離できていないが、サイドローブの影響はほとんどみられない。線形予測法は反射波の有無において最も

強度比があり、メインローブの幅も狭く分解能に優れていることが分かる。

## 5. おわりに

超音波の位置計測手法に対して、高分解能到来方向推定法を適用し、実環境下で物体位置の推定を行った。従来利用していたビームフォーマ法に対して角度分解能や検出精度の点で優位な結果を得ることができた。これらの結果から、以前に開発した超音波位置計測システムに搭載することで、分解能が高く検出精度の良いシステムへの改良が期待できる。一方、演算の複雑さ等の増加によるシステム開発のハードルはより高くなっているように感じられる<sup>5)</sup>。情報通信の技術の進歩により技術者に必要とされる知識やシステム開発のノウハウはより広範なものになっている。当研究所では、共同研究、受託研究および技術研修等の制度で電子システムの開発のサポートをしている。効率的な開発を実現するためにご利用頂ければ幸いである。

## 参考文献

- 1) 井上幸二, 田中恒久, 村上修一, 宇野真由美: 大阪府立産業技術総合研究所報告, No.20 (2006) 35.
- 2) 金岡祐介: 大阪府立産業技術総合研究所報告, No.25 (2011) 23.
- 3) 菊間信良: アダプティブアンテナ技術, (2003) オーム社.
- 4) 大阪府先導的研究事業 スーパーアイ. イメージセンサ研究プロジェクト 研究報告書, (財)大阪府研究開発型企業振興財団 (2001) 2.
- 5) Minseok Kim: 到来方向推定システムの基礎と実装, Design Wave Magazine, **12** (2007) 11 Lett., **70** (1997) 2741.