

# 搬送車インタフェース(ナビゲーション)システムの基礎研究

## － 超音波フェーズドアレイによるビーム形成 －

田畑 克彦 横山 哲也

### Basic Research of Navigation System for Automatic Guided Vehicle

#### - Beam Forming by Ultrasonic Sensor Array -

Katsuhiko TABATA Tetsuya YOKOYAMA

**あらまし** 少子高齢化が進む中で労働人口が減少し、人材の確保がますます困難になってきている。このような状況の中で、シルバー人材や子育てを終えた女性等の復帰により労働力を確保することが期待されており、これらの新たな人材が復帰しやすい環境を整える必要がある。このため、労働の基本でありながら、重労働である搬送作業に着目し、一種のパワーアシストを目的とした、人に追従しながら自由な走行ルートを移動する無人搬送車の研究開発が様々な研究組織で行われている。本研究では超音波センサのみを用いた安価で簡便な無人搬送システムの開発を目指し、現状の超音波センサシステムの課題とこれらを解決するための超音波フェーズドアレイ技術を適用することを提案し、その1次元センサアレイ送信機の試作および基礎評価実験を行なった。その結果、指向性についてはセンサ単体の半減角程度までは超音波ビームを任意の方向に照射可能であること、利得については $\pm 40^\circ$ 程度まではセンサ単体における最大音圧に対して1.8倍程度の利得が得られることを確認した。

**キーワード** 超音波センサ, フェーズドアレイ, 無人搬送車(AGV)

## 1. はじめに

### 1. 1 背景

少子高齢化が進む中で労働人口が減少し、人材の確保がますます困難になってきている。厚生労働省の報道資料<sup>[1]</sup>によれば、2004年から2015年における労働力人口の減少は400万人を超え、2030年には1000万人減少し、深刻な労働力不足に陥ることが報告されている。このような状況から、シルバー人材や子育てを終えた女性等の復帰により労働力を確保することが期待されているが、そのためには、これらの人材が復帰しやすい労働環境を整える必要がある。このため、労働の基本でありながら、重労働である搬送作業に着目し、一種のパワーアシストを目的とした搬送車の研究が行われている。このような搬送車は、台車のように人が押すタイプと人に追従するタイプが考えられるが、追従するタイプは将来的に無人搬送車を連結できるメリットがあるため、こちらのタイプの無人搬送車の研究開発の事例<sup>[例えば, 2~5]</sup>が多い。

現状における追従するタイプの無人搬送車は、紐・鎖などによる牽引や、超音波、赤外線、カメラ画像およびレーザーレンジファインダ、あるいは、これらを複合したセンサの計測などで人の追従を行っている。しかしながら、紐や鎖による牽引はシンプルで確実ではあるが、機構部を備えることから長時間使用における耐久性等で

課題となる。また、赤外光、レーザーや画像を使用するには光環境の変化(検出部の汚れ等も含む)への対応や普及を想定した場合にコスト的な課題がある。一方、超音波センサは、低価格でほぼメンテナンスフリーであるため、コスト面や保守性の面で課題はないが、騒音などの外乱に弱いとされている。この課題に対しては、信号に特徴を持たせることで検出精度を向上させる手法<sup>[5~7]</sup>や、スペクトラム拡散を利用して特定信号の抽出を行う信号処理手法<sup>[8]</sup>が考案されている。そこで本研究では、用途に応じて適切な手法を検討・開発することで克服可能であると考え、超音波センサシステムを用いた追従(ナビゲーション)を目指す。

### 1. 2 空気中超音波センサの課題と解決手法

超音波センサは、海中ソナー、魚群探知機、臓器や胎児の診断、金属や新素材(CFRP)の非破壊探傷検査、ならびにキャビテーション等の性質を利用した超音波洗浄等の多くの分野<sup>[9, 10]</sup>で活躍している。

また、これまでの空気中における超音波センサの活用については、ドップラ効果を利用した風速計、超音波の反射による障害物の検出や音波の到来時間遅れを利用した距離計(最近では測位機能も付加)などが挙げられるが、無人搬送車等のロボットへの適用例としては障害物検知程度の機能しかなかった(図1(a)参照)。

しかしながら、現在はMEMS技術の発展、マイコンや

FPGAなどの組込デバイスの高機能化・高性能化に伴い、超音波による3Dイメージングや特定の人物に近接追従するロボットなどの開発事例も多くなっており、空気中においても、小型で高度な超音波センサシステムの開発が可能になってきている。

ここで、人に追従する無人搬送車に超音波センサを適用することを想定した場合、以下の課題が挙げられる。

課題1：死角がないこと

従来は、図1(a)に示すように、円筒形のロボット筐体の円周方向に対して超音波センサを配置し、センサ単体で超音波を送信、その反射波を受信している。このため、センサ単体の指向性により、角度や距離によっては死角が生じる。

課題2：雑音に強いこと

課題1のように、センサ単体で発する音圧でSN比が決定されるため、根本的にはセンサ出力を大きくする必要がある。これを補完するため、送信する超音波信号に特徴を持たせることで、特定の信号を抽出する手法がある<sup>[5~8]</sup>。

課題3：追従する対象を分別できること

従来のように反射波を検出する場合には、常に対象物を捕捉している必要があるが、音波の空気中における伝搬速度は遅く、十分な時間分解能が得られず現実的ではない。このため、近年では特定のIDを含む変調信号を送信することで、発信源（対象）を特定する手法<sup>[5, 8]</sup>が取られている。

そこで、特に課題1および課題2を解決するために、図1(b)のように無人搬送車側に超音波センサを複数並べた超音波アレイを有する送信機を装備し、フェーズドアレイコントロールにより、瞬時に任意の方向に超音波ビームを形成し、照射する手法を提案する。

本稿では、実際に1次元の超音波センサアレイ送信機を試作し、本研究のキー技術となる空気中の超音波フェーズドアレイにおける送信信号を受信し、課題1を解決するためのビーム指向性測定と、課題2を解決するためのセンサ単体に対するビーム利得測定を行い、それらの測定試験結果について評価したので報告する。

## 2. 提案手法

フェーズドアレイ自体は、電波ではレーダ技術<sup>[11]</sup>、超音波では金属配管の非破壊探傷検査等に使用されている波の性質を応用した一般に知られている技術であるが、空気を媒介とした超音波への適用例はほとんどない。

この技術は、図2のように各センサ素子から放出される超音波の位相をずらし、波の重ね合わせにより、ビーム照射方向を制御するので、ビームを任意の方向に照射できる。そのため、従来のセンサ単体の指向性による死角の出現を防ぐことができ、前述の課題1を解決できる。

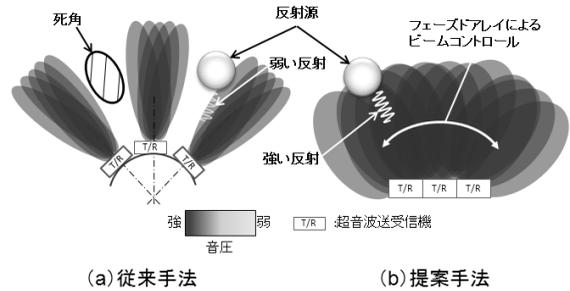


図1 超音波検出方式の概念図

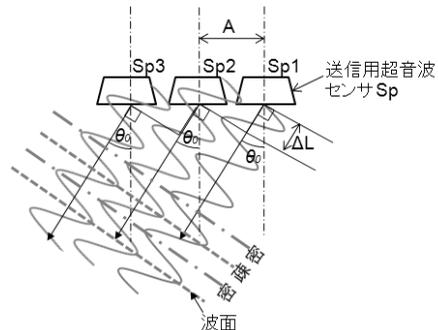


図2 フェーズドアレイの原理

また、生成される信号は、各センサ素子から送信される音波の重ね合わせとなるため、その利得によりSN比が向上し、課題2を改善することができる可能性がある。

課題3については、近年の手法と同様に、先導側に小型の超音波トランスポンダを装備し、これが無人搬送車側から送信される特定の超音波ID信号を感知した時のみ応答するようにし、追従すべきトランスポンダを見分けることを想定する<sup>[5]</sup>。

## 3. フェーズドアレイによるビーム形成方法

本章では、超音波センサアレイによるビーム形成方法について説明した後、試作した超音波フェーズドアレイ送信機の構成等について述べる。

### 3.1 フェーズドアレイの原理

図2は、3つの1次元の超音波センサアレイの例である。超音波ビームを $\theta_0$ 方向に送信したい場合、この方向に対して超音波センサSp1~Sp3の波形の位相差をなくし、波面を形成することでビームの指向性をコントロールする。

このため、ある $\theta_0$ におけるSp1とSp2、Sp2とSp3の行路差 $\Delta L$ は、次の式で表せる。

$$\Delta L = A \sin \theta_0 \tag{1}$$

ここで、Aはアレイの間隔[m]である。また、 $\Delta L$ だけ進む時間差を $\Delta t$ とすると、次の式で表せる。

$$\Delta t = \Delta L / c \tag{2}$$

ここでc [m/s]はある気温T[°C]における音速で、

$$c = 331.45 + 0.61T \tag{3}$$

で表せる。

よって、(2)式の $\Delta t$ だけSp1(Sp2)とSp2(Sp3)の送信タイミングを遅らせることにより、任意の方向 $\theta_0$ に超音波の波面(ビーム)を照射することができる。

### 3. 2 フェーズドアレイ送信機の試作

図3に本研究で試作した超音波フェーズドアレイ送信機のブロック図を示す。図中の点線内が該当部で、5つの超音波センサを一次元に整列させており、その間隔Aは、外径16mmのセンサをユニバーサル基板に実装する都合上、17.78mmとした。また、FPGAボードでそれぞれのセンサ素子の励振タイミングを制御し、位相コントロールを行った。超音波センサへの励振信号は図のように3.3Vの矩形波とし、増幅器により12.0Vに増幅した。なお、FPGA内のクロックは50MHzで動作しているため、20nsecの分解能で位相コントロールが可能であり、その量子化位相誤差は、 $\pm 0.144^\circ$  ( $=\pm 180/1250$ 分割( $\approx 11$ bit))となる。

ここで、送信機の試作で使用した送信用超音波センサは、日本セラミック株式会社のT40-16で、共振周波数が40KHz、指向性が半減(-6dB)半角で $\pm 27.5^\circ$ であり、圧電素子を用いたユニモルフ構造のスピーカである。

また、FPGAボードは(株)イーエスピー企画のCQBB-IMG(FPGAはXilinx社のXC3S1200E)を用いた。このボードは各種マイコンを増設可能であるため、将来的に測位等を行う受信システムを組み込むことを想定している。

## 4. 超音波ビーム計測実験

本章では、第3章で試作した超音波フェーズドアレイ送信機の指向性および単体センサに対する利得を測定したので、実験構成とその結果を示す。

### 4. 1 実験方法

実験の測定方法を図3に示す。センサアレイ中心に位置する超音波センサSp3に正対させるように受信用超音波センサMicを配置する。受信センサMic(日本セラミック(株)R40-16)も送信用超音波センサと同じ仕様である。空間的な配置は図4および図5のように、回転ステージの回転中心上に超音波センサSp3のスピーカ振動子の中心が位置するように製作し、送受信センサ間の距離は超音波センサメーカーの測定試験と同じ300mm一定とした。

これにより、ある方向 $\theta_0$ に超音波ビームを形成し、回転ステージにより送受信センサ間の相対角度 $\theta_{TR}$ を変化させながら、受信センサの電圧を計測することで指向性を把握できる。

以降に、1章で述べた課題1を解決する死角がないビーム指向性の測定結果と、課題2を改善する単一センサに対する信号利得の結果を示す。

### 4. 2 ビーム指向性の実験結果

ビーム指向角 $\theta_0$ を $0\sim 40^\circ$ まで、 $5^\circ\sim 10^\circ$ 間隔で変化させ、送受信センサ相対角 $\theta_{TR}$ を最小 $-60^\circ\sim$ 最大 $60^\circ$ まで変化させて得られたビーム指向性を図6に示す。

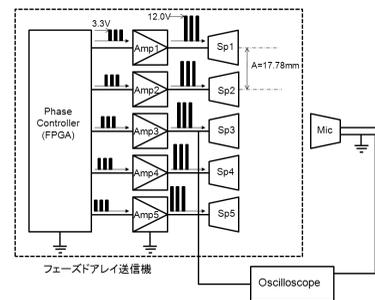


図3 超音波フェーズドアレイ送信機構成と測定方法

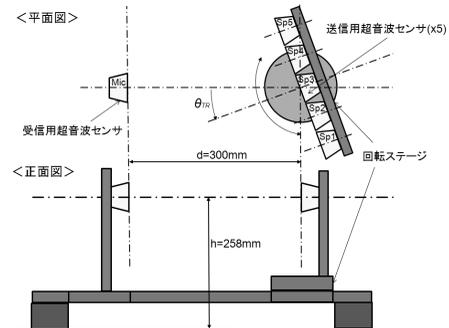


図4 実験構成(空間配置)

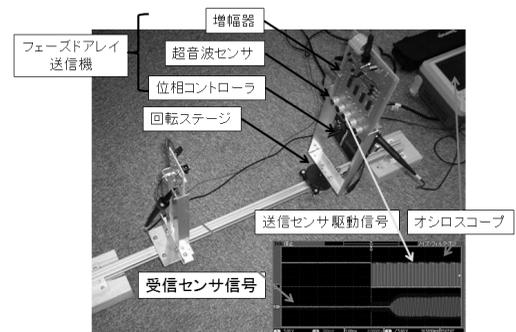


図5 実験系の写真

なお、本図の縦軸の利得 $G_{Sp}[\text{dB}]$ は、フェーズドアレイ送信機を用いた時のビーム指向角 $\theta_0=0^\circ$ および相対角 $\theta_{TR}=0^\circ$ における受信波最大電圧振幅 $V_{5sp}(\theta_0=0, \theta_{TR}=0)[\text{V}]$ に対する各測定時の $\theta_0$ および $\theta_{TR}$ における受信波の最大電圧振幅 $V_{5sp}(\theta_0, \theta_{TR})[\text{V}]$ の利得であり、次の式で定義する。

$$G_{Sp} = 20 \log_{10} (V_{5sp}(\theta_0, \theta_{TR}) / V_{5sp}(\theta_0=0, \theta_{TR}=0)) [\text{dB}] \quad (4)$$

図6では、ビーム角 $\theta_0$ 以外の角度においても、利得の極大値が発生していることがわかる。これらは、グレーティングローブや量子化ローブと呼ばれるサイドローブである。

グレーティングローブは、一波長の位相ずれが発生すると位相が揃い、波面が形成されるために発生するもので、その発生角 $\theta_{gn}$ は、(1)式において波長ずれを考慮すると次の式となる。

$$\Delta L \pm n\lambda = A \sin \theta_{gn} \\ \theta_{gn} = \sin^{-1} (\sin \theta_0 \pm n\lambda/A) \quad (n=0, 1, \dots) \quad (5)$$

ここで、 $\lambda[\text{m}]$ は超音波の波長であり、 $n$ は(5)内の計算式が

-1から1で取りうる整数であり、 $n=0$ がメインローブを示す。

また、量子化ローブは3.2節で示した量子化位相誤差によって発生するサイドローブとして知られており<sup>[11]</sup>、比較的大きな1次の量子化ローブが発生する角度 $\theta_q$ は次式で表される。

$$\theta_q = \sin^{-1}(\sin \theta_0 \pm \lambda/(2A)) \quad (6)$$

上述の2つの1次サイドローブの発生角度を図6のグラフの上部および縦線を用いて図示する。

図よりビーム指向角 $\theta_0 = 20^\circ$ までは、ほぼ意図した方向にビームのメインローブが発生しているが、 $\theta_0 = 30^\circ$ を超えると、意図した方向にはメインローブが発生していないことがわかる。

また、サイドローブの発生角度についても、送受信機超音波センサの相対角 $\theta_{TR}$ が大きくなるにつれ、理論値からのずれが大きくなる傾向がある。さらに、その利得も、相対角 $\theta_{TR}$ が小さい位置に発生するサイドローブはメインローブより大きくなる傾向が見られた。

これらの現象が発生する要因の一つとして、超音波センサ単体の指向性が半減半角で $\pm 27.5^\circ$ であるが、指向角が大きくなると十分な音圧が出力されずに計算式通りの方向制御が困難になっていると考えられる。

したがって、このフェーズドアレイ送信機の実験結果では、 $\pm 20^\circ$ 程度までのビーム走査が限界であるが、指向性の低いセンサ素子を使用することで、走査角を広げることができる考える。

#### 4. 3 単体センサに対するビーム利得の実験結果

本実験で得られた5個の超音波センサアレイの受信波最大電圧振幅に対し、1個の超音波センサに対する利得 $G_{1sp}$ を求めた。ここで、利得 $G_{1sp}$ は次の式で表される。

$$G_{1sp} = 20 \log_{10} (V_{5sp}(\theta_0, \theta_{TR}) / V_{1sp}(\theta_{TR}=0)) \quad [dB] \quad (7)$$

ここで、 $V_{1sp}(\theta_{TR}=0)$ は、図4においてセンサアレイの中心にある1個の超音波センサ $Sp3$ のみを、 $\theta_{TR}=0$ の条件で励振させた場合における受信センサの最大電圧振幅である。

この結果を図7に示す。ここで、ビームの指向角は、4.2節の結果により制御可能と考えられる $\theta_0=0, 5, 10, 20^\circ$ の4方向に走査した場合の結果をプロットしている。本図より、メインローブに関しては概ね5[dB](1.8倍)以上の利得が得られていることがわかる。

また、グレーティングローブや量子化ローブなどのサイドローブによる走査も有効であるとする、この4方向に対するビーム走査で送受信センサ間の相対角が $\theta_{TR}=40^\circ$ 程度までは0[dB]を超えていることがわかる。このことは、単一センサの半減指向角が $27.5^\circ$ であるが、フェーズドアレイで4方向にビームを振ることで、 $40^\circ$ までは単一の送受信センサが正対しているときと同等の音圧が得られていることを意味する。

これらのサイドローブは、通常の反射波を用いた計測においては、ゴーストとして雑音や誤差の原因となるので排除する必要があり、波長がアレイ間隔に対して長い

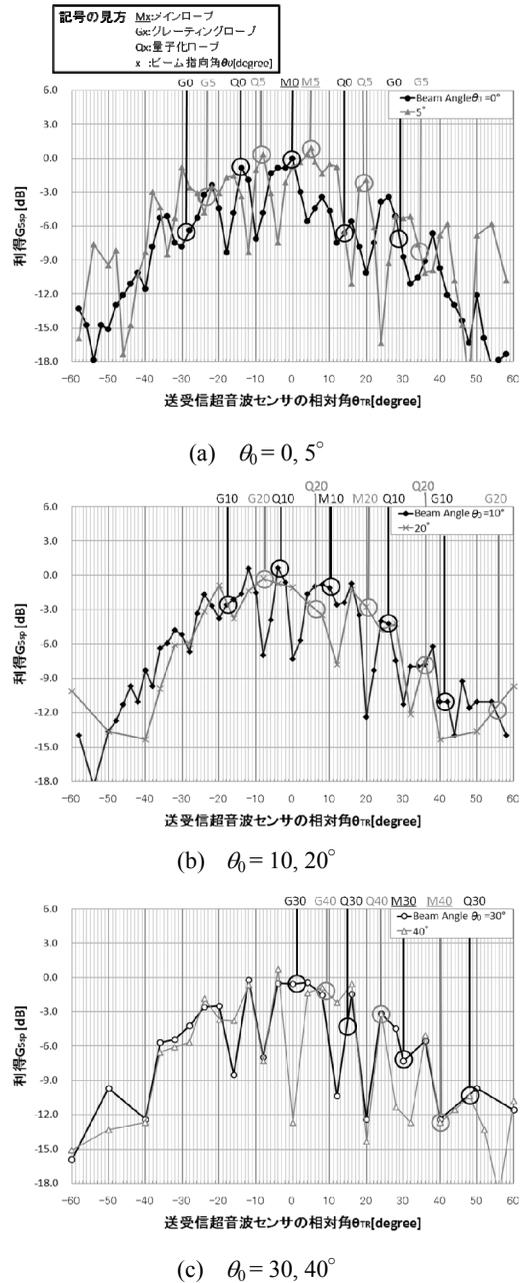


図6 フェーズドアレイのビーム指向性 (実験結果)



図7 超音波センサアレイの利得(実験結果)

(グレーティングローブが発生しない), 金属や液体中の計測で使用してきた経緯がある。

しかしながら, トランスポンダ式の場合は, 受信機まで十分な音圧で届くことが目的であるので, 課題3の超音波ID信号が正常に生成できれば, これらのサイドローブを利用できる可能性がある。

## 5. まとめ

本報告では, 人間に追従する搬送車の追従センサとして, 安価でメンテナンスフリーな超音波センサシステムを提案し, このセンサシステムを使用する際に課題となる指向性による死角生成と外乱対策の問題を, フェーズドアレイによる任意方向へのビーム走査とSN比の向上で解決する提案を行った。

また, その第一段階として, 実際に5個の1次元超音波アレイを実装したフェーズドアレイ送信機を試作し, 実験によってビーム走査時の指向性と利得を測定した。この結果, センサ単体の半減角程度であればビームを任意の方向に制御できること, メインローブではセンサ単体の1.8倍程度の利得が得られることを確認し, 死角の解消および信号レベルの向上により雑音に強いシステム構築が可能なことを示した。加えて, サイドローブを利用することで, より少ない走査で広い指向性を確保できる可能性があることを示した。

今後は, 送信機の改良と受信センサ部の製作を行い, 追従固体の認証のためのデータ送受信手法について研究を行う予定である。

## 文 献

- [1] 厚生労働省 雇用政策研究会, “人口減少下における雇用・労働政策の課題～すべての人が自律的に働くことができ, 安心して生活できる社会を目指して～” 2005年7月。
- [2] 南雲陽介, 大矢晃久, “発光器をガイドとした自律移動ロボットの人間追従”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演論文集 2P1-H6, 2001。
- [3] 山田貴則, 大矢晃久, 油田信一, “人間の紐操作による移動ロボットの誘導”, 日本ロボット学会 第21回学術講演会, 3H23, 2003。
- [4] 越智友亮, 岩野優樹, 大須賀公一, 天野久徳 “FRIGOを用いた人間追従システムの開発”, 第8回システムインテグレーション部門講演会(SI2007), 2D2-4, 2007。
- [5] 高畑志生, 大矢晃久, “超音波トランスポンダによる特定目標物の位置検出”, 第7回ロボティクス・シンポジウム予稿集, 22A2, pp.275-278, 2002。
- [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 Vol.15 No.4, pp.542-549, 1997。

- [7] 丹沢勉, 塩澤奨, 渡辺寛望, 清弘智昭, “屋外移動ロボットのためのワイドレンジ超音波距離センサ”, 日本ロボット学会誌Vol.27 No.5, pp.583-589, 2009。
- [8] パナソニック株式会社, “超音波測定装置および超音波測定方法”, 特許第4164539号, 2008。
- [9] 谷村康行著, “超音波技術 基礎のきそ”, 日刊工業新聞, 2007。
- [10] 寺本顕武 他, “特集 先進超音波計測”, (社)計測自動制御学会 計測と制御vol.41 No.1, pp.2-65, 2010。
- [11] 吉田孝監修, “改訂 レーダ技術”, 電子情報通信学会, 1996。