

搬送車ナビゲーションシステムの基礎研究(第2報)

— 超音波センサアレイの改良と通信速度の把握 —

田畑 克彦 西田 佳史* 飯田 佳弘

Basic Research of Navigation System for Automatic Guided Vehicle (2nd Report)

- Improvement of an Ultrasonic Sensor Array and Estimation of Baud Rate -

Katsuhiko TABATA Yoshifumi NISHIDA* Yoshihiro IIDA

あらまし 昨年度から無人搬送車(AGV)への適用を想定し、屋内外によらず、容易に経路変更が可能な超音波センサを用いた新しいナビゲーションシステムの構築を目指し、システム構築に必要な要素技術の研究を行っている。このシステムの特徴は、超音波で課題となる信号対雑音比を改善するために、空気中では適用事例の少ないフェーズドアレイ技術を採用し、走行ルートの基準となるランドマーカを探索する。ランドマーカには、混信を避けるために特定のIDが割り振られており、該当するIDを受信した時のみ応答することを想定している。本報では、昨年度の超音波センサアレイ送信機を改良し、その評価を行った。また、ランドマーカのID認識の前段階として、どの程度の通信量が確保できるかを実験的に確認したので報告する。

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)、組込み技術

1. はじめに

現在、コストダウンや省力化のために製造現場内の搬送を目的とした無人搬送車(以下、AGV)が実用化され、商品化されている。現状のAGVは屋内の走行を目的としており、走行経路の設定は経路に沿って磁気テープや光反射テープを床面に貼るもの、あるいは床下に磁気誘導線を埋設し、それをAGV側のセンサがセンシングしながら走行する手法が代表的である。これらの方式は工場内の固定された経路を搬送する目的においては有用であるが、経路変更が頻繁に行われるケースへの適用は困難である。頻繁な経路変更に対応できる高精度なレーザーレンジセンサを使用したシステムも開発されているが、価格は高く、経路設定も専用ソフトウェアを用いるためある程度の専門的知識が必要である。

我々は上述の課題を解決するため、昨年度より、屋内外によらず、経路の設定が簡単で、しかも低価格な新しいナビゲーションシステムの開発に着手している。このシステムの特徴は図1に示すようにルート設定用の磁気テープなどのマーカの代わりとして、超音波センサを使

用している点である。超音波センサの特徴は、低価格でほぼメンテナンスフリーであり、コスト面や保守性の面で課題はないことが挙げられる。また、騒音などの外乱に弱いとされる課題に対しては、信号対雑音比(SN比)を向上させるフェーズドアレイ技術を採用することにより、解決を試みることにした。昨年度の研究^[1]では、1個数百円程度の超音波センサ素子であってもフェーズドアレイによるビーム照射方向の制御が可能であるという結果を得た。

しかしながら、選定した超音波センサ素子単体の指向性が高いことによりビーム照射範囲が狭かった問題と、波長に対してセンサ素子の寸法が倍以上あり、サイドローブが発生しやすい問題があった。発生するサイドローブ

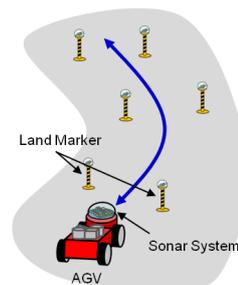


図1 超音波センサによるナビゲーションシステム

* 独立行政法人 産業技術総合研究所
デジタルヒューマン工学研究センター

ブが多いと、生成される超音波のエネルギーが各ローブに分散し、探知距離が短くなる等の問題がある。このため、本年度は使用するセンサ素子を見直しセンサアレイの改良を行った。また、本システムでは経路上のランドマーカを特定して相対位置を推定し、AGVの進路を制御する手法を想定しているため、マーカとAGVのセンサ間で通信する必要がある。このため、どの程度の通信速度を確保できるかについて実験的に確かめた。

補足であるが、昨年度はパワーアシストを目的とした人追従型台車のためのナビゲーションシステムの開発を目指していた。しかし、コストダウンの観点から人が介在しないシステムのニーズが強く、上述のAGV用ナビゲーションに変更した。研究開発としてはランドマーカの切り換えが必要となるため、よりチャレンジングな内容であるが、超音波通信による信号認識や位置推定などの基本的な技術的課題は同じである。

2. フェーズドアレイの概要

この技術は、電子制御により図2のような各センサ素子から放出される超音波の位相をずらすことで、各センサ素子の波の重ね合わせとなるビームの照射方向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ような指向性による死角の出現を防ぐことができ、各センサ素子の合成波であることからSN比も向上する。また、機械的な方向制御を必要としないこと、仮に一つのセンサ素子が故障しても他のセンサ素子である程度リカバーできることから、信頼性が高いことも特徴である。

同図は、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 θ_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 θ_0 におけるSp1とSp2、Sp2とSp3の行路差 ΔL は、次の式で表せる。

$$\Delta L = A \sin \theta_0 \quad (1)$$

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

$$\Delta L = c \Delta t \quad (2)$$

ここで c [m/s]はある気温 T [°C]における音速で、

$$c = 331.45 + 0.61T \quad (3)$$

で表せる。

よって、(2)式の Δt 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 θ_0 に超音波の波面(ビーム)を照射することができる。

3. 超音波センサアレイの改良

誤差のない理想化した1次元のセンサアレイについて考える。図2において、 N 個のセンサ素子からなる1次元アレイの指向性 $P(\theta)$ は以下の式で表すことができる。

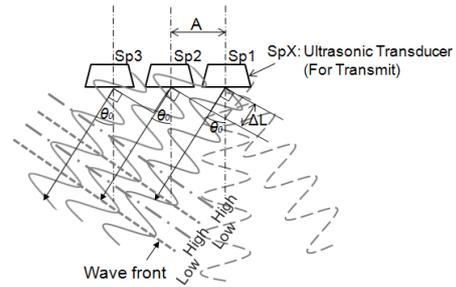


図2 フェーズドアレイ技術の原理

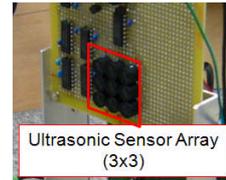
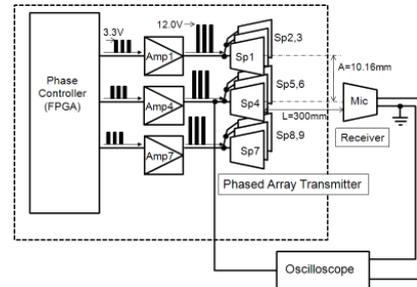
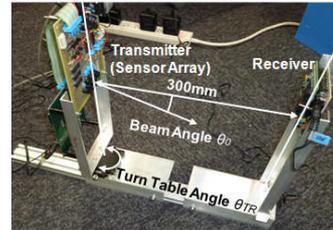


図3 作成した超音波センサアレイ



(a) ブロックによる実験構成



(b) 実際の実験構成

図4 指向性および通信速度把握実験

$$P(\theta) = p(\theta) \sum_{n=0}^{N-1} |e_n| \exp(jnkA(\sin \theta - \sin \theta_0)) \quad (4)$$

ここで、 $p(\theta)$ はセンサ素子の指向性、 $|e_n|$ は端子電圧振幅、 n はセンサ素子番号、 k は波数で $k=2\pi/\lambda$ で λ は波長である。

(4)式より、アレイ全体の指向性は、センサ素子単体の指向性により決まる。したがって、ビーム走査範囲(角)を広げるためには、できるだけ指向性のないものを選定することが望ましい。

また、1波長ずれることにより、生成されるグレーティングローブの出現角は以下の式で表すことができる。

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

ここで $m\lambda$ は $\sin \theta_0 \pm m\lambda / A$ が-1~1の間を取る整数であり、 $m=0$ がメインローブである。よって、 $\lambda / A > 1$ であれば1波長ずれによるグレーティングローブは発生しないため、

センサ素子間隔は波長よりも短いことが理想であるが、安価な市販品を使用することを前提としているため、 λ/A が可能な限り大きい値をとるものを選定する。

結果として、最も指向性が低く（半値半減角 $\pm 50^\circ$ ）、外径が小さい10mmのセンサ素子（日本セラミック(株)製、AT40-10）を選定し、3x3素子の送信用センサアレイを製作した(図3)。

4. 指向性および通信速度把握実験

4.1 フェーズドアレイ超音波ビームの指向性実験

図4は、実験の測定方法である。センサアレイの中心に位置する超音波センサSp5に正対させるように受信用超音波センサMicを配置する。受信用センサMicも、送信用の超音波センサ素子と同じ型番を使用する。

図4(b)は空間的な配置を示す。回転ステージの回転中心上に超音波センサSp5のスピーカ振動子の中心が一致するように製作し、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。 θ_0 方向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 θ_{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する。

図5は(1)式から(3)式により主ビーム指向角 θ_0 を $0 \sim 30^\circ$ まで 10° 間隔で変化させ、受信センサの観測角 θ_{TR} を最小 -60° ～最大 60° まで変化させて得たビーム指向性である。送信信号は、励振信号とその停止を10msec間隔で切り替える信号を送った。なお今回は、1軸のビーム制御を行うため、図4(a)のように(Sp1,Sp2,Sp3)、(Sp4,Sp5,Sp6)と(Sp7,Sp8,Sp9)の組は同相とし、Sp1, Sp4, Sp7の列の間の位相をコントロールした。

なお、本図の縦軸の利得 G_{1sp} [dB]は、1つの送信素子と受信器と正対させた場合（主ビーム角 $\theta_0=0^\circ$ および観測角 $\theta_{TR}=0^\circ$ ）における受信波の最大電圧振幅 $V_{1sp}(\theta_0=0, \theta_{TR}=0)$ [V]に対して、9つの送信素子からなるフェーズドアレイ送信器を用いた時の θ_0 および θ_{TR} における受信波の最大電圧振幅 $V_{9sp}(\theta_0, \theta_{TR})$ [V]の利得であり、次の式で定義する。

$$G_{1sp} = 20 \log_{10} (V_{9sp}(\theta_0, \theta_{TR}) / V_{1sp}(\theta_0=0, \theta_{TR}=0)) \text{ [dB]} \quad (6)$$

図より、ほぼ意図した方向にビームを照射できていることがわかり、得られる音圧は単一素子の16dB(6倍)以上で、ビーム幅は半値半減角で $\pm 10^\circ$ 程度であることがわかる。また、主ビーム角 θ_0 以外にもピークが生じているが、これは1波長ずれによる ± 1 次のグレーティングローブ出現角 θ_{g1} であり、以下の式で表される。

$$\theta_{g1} = \sin^{-1} (\sin \theta_0 \pm \lambda/A) \quad (7)$$

主ビーム角を $0 \sim 30^\circ$ に設定した時のそれぞれのサイドローブの出現角の理論値を表1に示す。これらの数値と図5の指向性を比較すると、ほぼ期待通りの角度に出現していることが確認できる。なお、それ以外の角度においてもサイドローブが発生している。これは、(Sp1, Sp2,

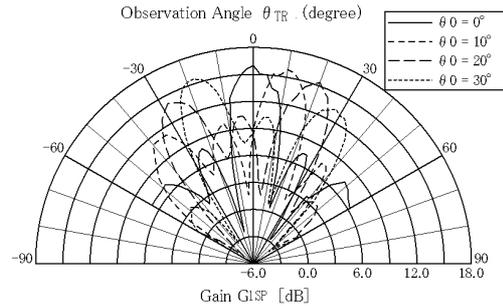
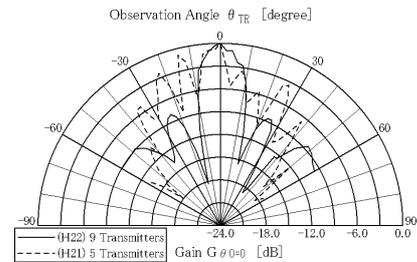


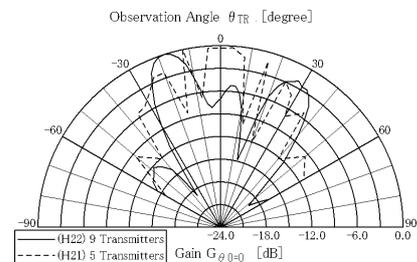
図5 フェーズドアレイ超音波ビームの指向性結果

表1 メインローブとサイドローブ出現角(理論値)

Main Lobe Angle [degree]	Side Lobes Angle [degree]			
	Grating Lobes θ_g		Grating Lobes θ_{sp1-7} & Quantization Lobes	
	$n=-1$	$n=1$	$n=-1$	$n=1$
0.0	-57.7	57.7	-25.0	25.0
5.0	-49.3	68.8	-19.6	30.7
10.0	-42.2	-	-14.4	36.6
20.0	-30.2	-	-4.6	49.9
30.0	-20.2	-	4.4	67.3



(a) 主ビーム角 $\theta_0=0^\circ$



(b) 主ビーム角 $\theta_0=30^\circ$

図6 昨年度との指向性の比較

Sp3)と(Sp7,Sp8,Sp9)の送信タイミングが1波長ずれることによって発生するサイドローブと、量子化ローブ^[2]であり、その出現角 θ_{sp1-7} は同じで、 ± 1 次の出現角は以下の式で表せる。

$$\theta_{sp1-7} = \sin^{-1} (\sin \theta_0 \pm \lambda/(2A)) \quad (8)$$

参考のため、上式の結果も合わせて表1に示す。

図6は、主ビーム角 $\theta_0=0^\circ, 30^\circ$ において、今年度と昨年度取得したビーム指向性を比較したグラフである。異なるセンサ素子の比較を行うことから、縦軸の利得 $G_{\theta_0=0}$ は、それぞれのセンサ素子における $\theta_0=0^\circ, \theta_{TR}=0^\circ$ の時の受信電圧を基準にした数値である。本図より、昨年度よりもサイドローブ数が減少し、意図した主ビーム角 θ_0

にメインローブが出現していることが確認できた。

4. 2 通信可能速度の把握

Duty比を50%一定とし、通信速度を変化させた時の、図4(a)におけるオシロスコープの波形の一例を図7に示す。横軸が時間で、左の縦軸が送信センサ素子の駆動電圧値、右の縦軸が受信センサ素子の受信電圧値である。また、色の薄い線が送信側センサ素子の駆動電圧、濃い線が受信センサ素子の受信電圧である。

本図より、通信速度が上昇するにしたがって、送信時の受信電圧の低下と送信停止時の受信電圧の増加により電圧比が低下し、ついには判別が付かなくなっている。これは、受信センサ素子の振動子が音圧の変化に追従できなくなっていると考えられ、この追従性能は受信する音圧の大きさに依存すると考えられる。

そこで、指向性実験時（図5）に得られたデータから、実際に信号が到達してから振動するまでの時間差 δt を求め、最大受信電圧 V_p との関係から、通信速度を設定した。

励振までの時間差 δt は以下の式で表される。

$$c(t - \delta t) = L \quad (9)$$

$$\delta t = t - L/c \quad (10)$$

ここで、 t はオシロスコープにより確認した送信から受信までの時間差、 L は送受信機間の距離(0.3m一定)である。なお、送受信の時間差は、最大受信電圧 V_p の半値を閾値として、算出している。

この結果を図8に示す。最大受信電圧 V_p が0.4V以上となる電圧(音圧)が高い状態においては、励振時間遅れ δt は0.23msec付近に集中しており安定しているが、受信電圧(音圧)の低下に伴い、 δt の値が様々な値となり、不安定になっていることが分かる。

このため、これらのバラツキを考慮した時間遅れから、およそ0.4msec未満であれば、ほぼ励振できると考え、パルス幅を0.4msecに設定する。

次にデューティー比の設定であるが、パルス幅0.4msecでDuty比50%とすると、図7(b)と(c)の中間の波形となる。したがって、デューティー比50%では後段の電子回路(増幅器の増幅率)によっては、パルス波形を分離できない可能性があるため、余裕を見て25%に設定する。

最終的に、通信速度 B_o は、625 bps ($=1/0.0004 \times 0.25$)であればパルスを分離できると判断する。図9が $B_o=625$ bps, Duty比25%において、パルス列”1100101”を送受信した波形である。図より十分にパルスが分離されていることを確認できた。

6. まとめ

本年度は超音波センサアレイの送信器のセンサ素子を見直すことで、サイドローブ数を減少させ、ビーム走査角が大きい場合においても、角度精度を向上させることが確認できた。また、受信音圧値とセンサ素子の反応遅れ時間の関係から、通信速度を検討し、通信速度

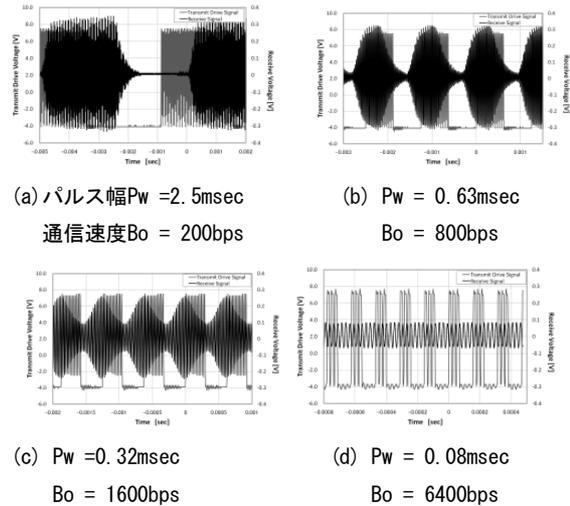


図7 通信速度に伴う波形の変化

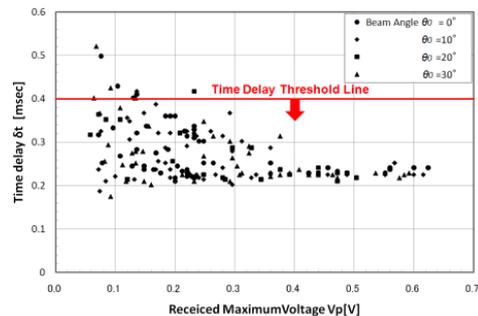


図8 受信電圧と励振時間遅れの関係

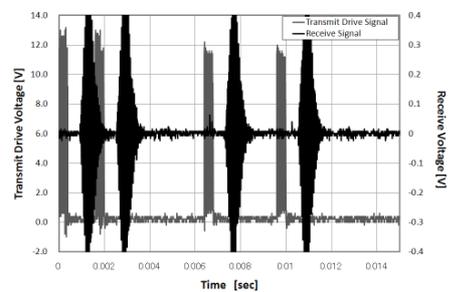


図9 パルス列”1100101”送受信波形
($B_o=625$ bps, duty比25%)

$B_o=625$ bps, Duty比25%において十分に分離したパルス信号を受信できることを実験により確かめた。

今後は、超音波によるナビゲーションシステムの構築に必要な部分的な検討をさらに進める。具体的には、特定のランドマーカとのデータ通信手法と、データ通信時の位置推定手法について検討を行う予定である。

文献

[1] 田畑 克彦, 横山 哲也, “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-”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.11, pp.35-39, 2010.
[2] 吉田孝監修, “改訂 レーダ技術”, 電子情報通信学会, 1996.