

超音波通信を用いたフェーズドアレイ測位システムの開発(第1報)

田畑 克彦 久富 茂樹 遠藤 善道

A Phased-Array Positioning System using Ultrasonic Communication (1st Report)

Katsuhiko TABATA Shigeki KUDOMI Yoshimichi ENDO

あらまし 我々は無人搬送車または移動ロボットなど、自律移動装置の経路移動をナビゲーションするための超音波式測位システムを開発している。本測位システムは、自律移動装置上の超音波測位モジュールが、経路上にあるランドマーカの役割をする超音波トランスポンダーと超音波通信を行うことで、相対位置を計測することができる。測位距離を5mから10mまで拡張するために、測位モジュールに対するランドマーカまでの距離に応じた受信利得を制御する機能を付加し、ランドマーカに対する送信素子数の増加による送信信号の出力向上を行った。さらに、ランドマーカについては、床または天井などの強い反射信号による測位精度の劣化を防ぐための送信ビーム形状について検討した。

キーワード 測位システム, 超音波センサー, フェーズドアレイ, 無人搬送車, 移動ロボット

1. はじめに

無人搬送車や移動ロボットの経路誘導を行うことを目的として、経路変更の自由度が高く、低価格な新しいナビゲーションシステムの実現を目指し、それに供するための超音波フェーズドアレイ測位システム(以降“フェーズドアレイ”を“PA”と記す)を開発している^[1~5]。

超音波PA測位システムは、ルート設定用のランドマーカ(以降“マーカ”と記す)として、磁気テープなどの代わりに超音波センサーを使用する。想定している誘導方法は、AGVに搭載する超音波PA測位システム(以降“ソナーシステム”と記す)が、特定のマーカと超音波によるID通信を行って順次マーカを識別し、マーカとの相対位置(距離と方位角)を計測しながら走行する。位置が不明なマーカも確実に応答させることができるように、ソナーシステムには、SN比の高い先鋭化した超音波ビームを走査するPA技術を採用している^[1~5]。

これまでの研究により、2つのマーカを測位することにより距離4m、方位角±45deg以内の領域において、誤差50mm程度の測位が可能となった^[3~5]。

本システムの計測可能距離は0.5mから5mである。しかしながら、屋外での運用も考慮すると、計測距離を拡張することが望ましい。このため、本年度は企業ニーズなどをもとに目標計測距離を10mに拡張し、そのための改良を行った。

2. 超音波PA測位システムの改良

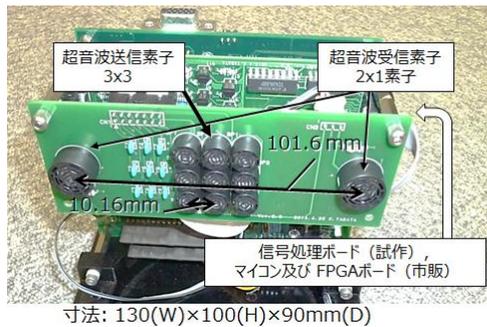
本章では、計測距離10mを達成するためのソナーシステムとマーカの改良内容について記述する。図1は今年度

改良試作したソナーシステムとマーカである。マーカ測位の計算処理はマイコンボード(プロセッサ, STM32F103ZE)及びFPGAボード(FPGA, XC3S1200E)に実装した。表1は使用した超音波センサー素子の主な仕様である。ソナーシステムとマーカとの相互通信の仕様は、ID信号長を7bit、通信速度を625bpsとした^[1]。マーカ測位は、マイコンの処理負荷を軽減し、高速なハードウェア処理が可能なFPGAで処理させるため、比較的単純な送受信パルスの到来タイミングから計測する方法としている^[1~5]。

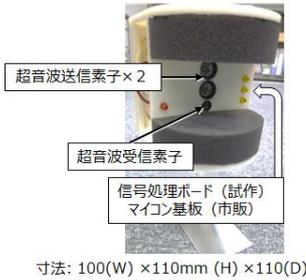
2. 1 ソナーシステム

これまでの研究により、5m程度まで計測できるように受信信号利得を設定すると、0.5m程度の近傍計測時には信号利得が高すぎるためにパルスが飽和し、ID信号の認識ができないことがわかっており、0.5mから10mまでの計測を可能するためには、ダイナミックレンジを拡張する工夫が必要となる。そこで、マーカまでの距離に応じ、信号利得を制御する機能を付加することとした。

図2は本年度試作したソナーシステムの機能ブロック図である。システム動作としては、送信強度が大きい場合には遠方のマーカを測位しているので、小さな信号を捕えるために初段のPGAの受信信号を5倍に増幅する。逆に、送信強度が小さい場合には近傍のマーカを測位しているので増幅率を1倍として、マーカからの応答信号を適切な強度で受信する。すでに送信系統については、マーカ距離に応じて、駆動する送信素子数を変更することで信号強度を制御する機能がある^[3]。よって、受信系統に対しても図2のように利得変更機能付きアンプであるPGA(Programmable Gain Amplifier, エヌエフ回路設計ブロック製 CA-206L2)を挿入し、受信信号の利得制御を行



(a)ソナーシステム



(b)ランドマーカー

図1 超音波フェーズドアレイ測位システム

表1 超音波センサー素子の仕様

	ソナーシステム 送信素子 ランドマーカー 受信素子	ランドマーカー 送信素子	ソナーシステム 受信素子
製造者	日本セラミック株式会社		
型番	AT40-10PB3	T3216A1	R3216A1
中心周波数	40kHz±1.0kHz	32.7kHz±1.0kHz	
送信音圧 レベル	116 dB* Min. at 40.0kHz**	113 dB* Min. at 32.7kHz**	-
受信感度	-66.5 dB*** Min.	-	-69 dB** Min.
指向性 (-6dB 全角)	±50°		±35°

*0dB = 10V/Pa, **入力電圧 = 10Vrms, ***実測値

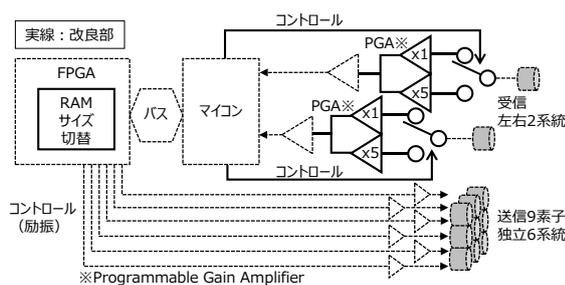
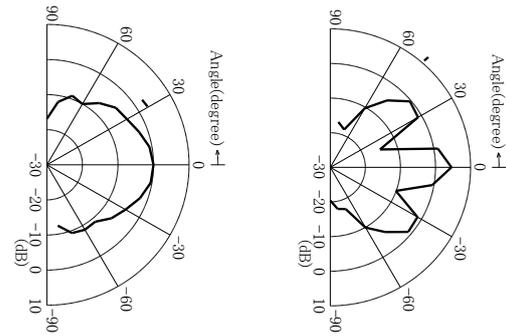


図2 ソナーシステムの機能ブロック図

った。信号利得の変更は、PGAの制御ピンに、マイコンからのデジタル制御信号を入力することで行える。さらに、受信信号はマイコンによってAD変換されて、FPGA内のメモリに一度格納されたのち、測位計算が行われる。遠距離測位と近距離測位時では計測距離が異なるため、計測に要する時間と格納データ数は異なる。このため、計測距離に応じてFPGAの内部メモリへの格納データ数を最小限にすることで、1秒間に測位可能な計測頻度を向上させた。



(a)素子単体

(b)2個垂直に並べた素子

図3 送信素子数による指向性変化

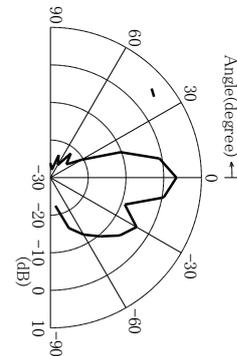


図4 改良マーカーの指向性

2. 2 ランドマーカー

ランドマーカーは、これまでは簡易なモジュールとするため、送受信素子1個の構成で開発を進めていた。しかしながら、計測可能距離を倍に拡大するには、送信素子1個ではマーカーからの応答信号が弱く、ソナーシステムまで十分な強度で到達できない可能性があり、強度を増大させる必要がある。また、マーカーからソナーシステムに伝送信号を送信する際、床面あるいは天井面で一度反射した超音波がゴースト信号となり、応答信号をソナーシステムが正しく認識しない現象が現れた。これは、反射波は直接波に比べて経路長が長くなる分、遅れてソナーに到達するため、直接波と干渉すること、またはゴースト信号となって出現することに起因している。

以上の2つの課題に対し、マーカーの送信素子を2個垂直に並べることにより、送信強度の増大と正面方向への指向性を高めることを検討した。

はじめに、マーカーに使用する送信素子単体の指向性を求めた。送受信素子を0.3m離して対向させ、送信素子に、±10V、32.7kHz、の矩形波を0.4ms間印加した時の受信波形を測定した。送信素子と受信素子が正対している時の受信波形の最大振幅 V_{0p-p} を基準として、送信素子を10degずつ回転させた時の受信波形の最大振幅の比をデシベル値で表し利得を求めた。図3(a)は指向性の測定結果である。角度は仰俯角方向である。水平方向(0 deg)に対して、±30degで-5dB、±60degで-10dB程度しか減

衰しておらず、床面、天井方向に対しても比較的強い超音波が放射されることを確認した。

次に、同じ送信素子2個を、中心間を16.4mm離して垂直に並べた場合の指向性を素子単体の場合と同様に求めた。2素子には同じ電圧波形を同位相で印加した。図3(b)に指向性の測定結果を示す。利得の算出は、素子単体の V_{0p-p} を基準にした。2素子の超音波が合成されることで水平方向 (0deg) の利得が増し、素子単体の時に比べて、4.5dB増加した。しかし、同時に±30~40deg方向に強いサイドビームも形成されてしまい、その利得は素子単体の水平方向と同程度であった。

このサイドビームを消去するために、半径50mm、厚さ25mmの半円柱のスポンジを素子の上下に取り付け、サイドビームを吸収、拡散させる構造を考案し、図1(b)のスポンジガード付きマーカーを試作した。この試作マーカーの指向性測定結果を図4に示す。水平方向の利得は、3.4 dBで、スポンジガードがない場合と比較して若干弱くなっているが、+30~+40deg方向にできたサイドビームを抑えることが可能となり、仰俯角方向の指向性が高いビームを形成することができた。-30~-40deg方向に対しては、若干サイドビームが残存している。これは、図1(b)のように受信素子も送信素子に対して垂直に実装したため、この受信素子の大きさの分だけ、サイドビームがスポンジガードから漏れ出たものと考えられる。今後は受信素子を送信素子の水平隣に配置し、送信素子の上下の空間を空けずにスポンジガードで埋めることで、さらにサイドビームを抑制する計画である。

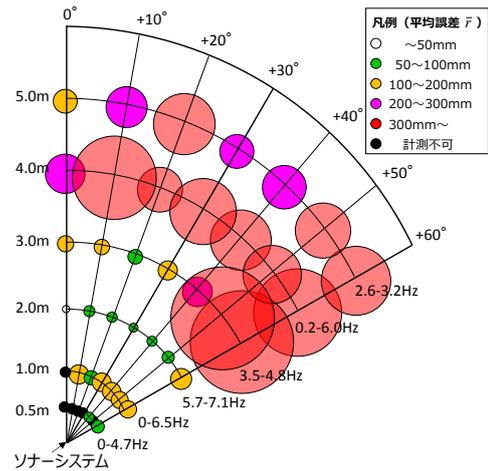
3. 測位実験

図1の改良したソナーシステムとマーカーの動作を検証するために、マーカーの相対位置を計測する測位実験を行った。最初に、ソナーシステムの受信利得制御の動作を確認するために屋内で行った測位実験の結果について述べる。次に10mまでの測位を確認するために屋外で行った測位実験の結果について述べる。

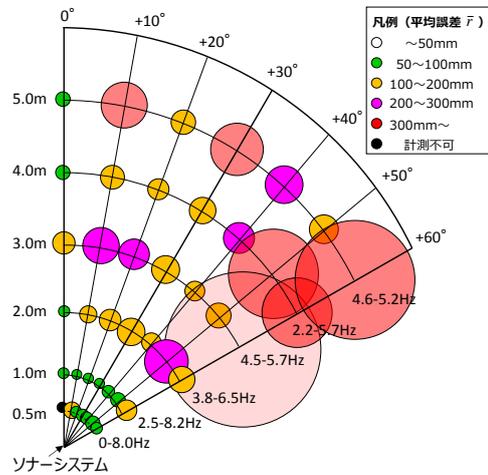
3. 1 屋内測位実験

受信利得制御の有効性を確認するため、屋内にてランドマーカーの設置位置を、距離0.5mと1m~5mまで1mステップで変更し、さらに方位角を0~60degまで10degステップで変更し、それぞれのマーカー位置に対して200回の測位を行った。

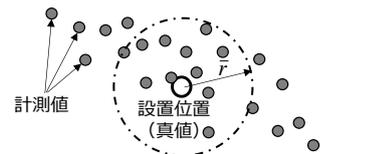
図6(a)と(b)は、それぞれ受信利得制御がない場合とある場合の測位結果である。扇の要の位置にソナーシステムが存在しており、マーカーの測位誤差は、円の大きさで表している。ここで測位誤差は、図6(c)のように計測値の平均位置を計算し、真値からのずれとして定義した。なお、実際の計測値の分布は真値を中心に均等に分布するのではなく、方位方向に広がりをもった円弧形状に分布する^[3,4]。また、図の横にある数値[Hz]は1秒間に測位



(a) 受信利得制御なし(設置高さ0.1m)



(b) 受信利得制御あり(設置高さ0.15m)



(c) 測位誤差の定義と計測値の分布形状

図6 屋内測位結果

する回数、すなわち計測頻度である。

図6(a)および(b)より距離3.0m以上で設置方位角が50deg以上になると、測位誤差は300mmを超える。これは表1における送受信機の指向性による感度の限界によるものと考えられる。送信素子の数量を増すなどして送信強度を向上させることで改善が見込まれる。図6(a)では0.5mの位置に存在するマーカーはほとんど計測できていないが、図6(b)ではおおむね計測できている。また、計測頻度についても、ほとんどの距離において受信利得制御がある場合の方が向上している。これらの結果は距離に応じて適した信号増幅率でIDパルスが認識されていることを示している。

次に、図6(a)と(b)の円の大きさで表した測位誤差に注

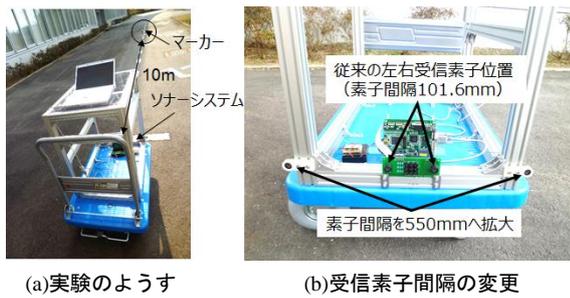


図7 屋外測位実験

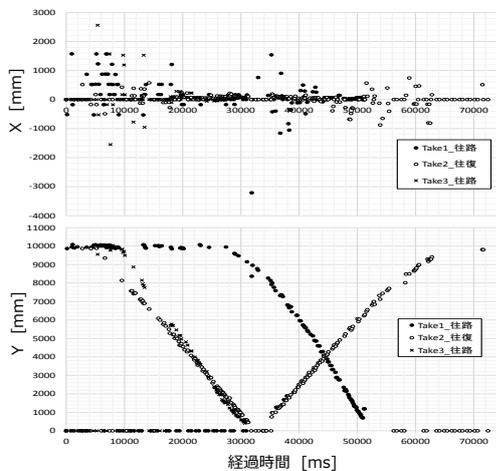
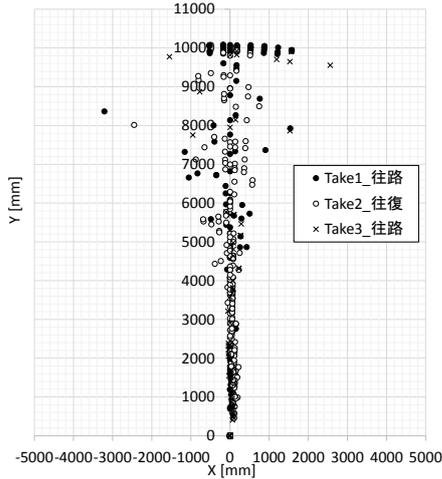


図8 受信素子間隔101.6mmの測位結果

目し、利得制御がある場合とない場合を比較する。マーカー位置による優劣は判断しがたいが、これは設置高さが0.1mと0.15mと異なるため、床反射が影響する位置が異なってくることに起因しているものと考えられる。実際に設置高さを高くすると、床反射強度が低下し、測位誤差も低下する傾向があることを確認している。今後、どの程度の高さにすると誤差の影響が小さくなるかを把握する必要がある。

3. 2 屋外測位実験

改良システムの計測可能距離が0.5mから10.0mに拡張

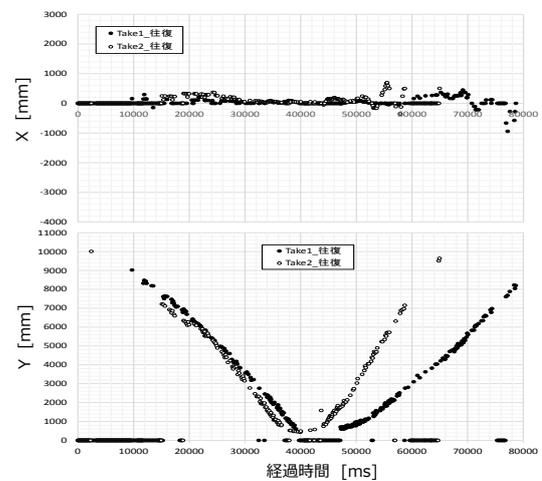
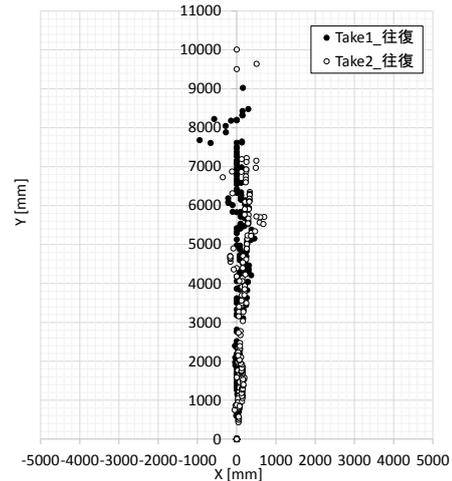


図9 受信素子間隔550mmの測位結果

できたことを確認するため、図7(a)に示すように、10m離れた場所にマーカーを設置し、手押し台車に搭載したソナーシステムが常にマーカーと正対するように直進移動させて、測位実験を行った。これまでの左右の受信素子の間隔は図7(b)における101.6mmの配置であった。これは移動ロボットへの実装を考慮し、できるだけコンパクトにするためである。しかし、素子間隔を広くできれば各受信素子に到達する時間差が拡大できるので、方位角分解能を向上させ、方位角の精度を高めることができる^[6]。無人搬送車への適用を想定した場合には、左右受信素子の間隔は拡張できるため、素子間隔を小型無人搬送車で設置可能な幅550mmに広げて測位を行った。

図8は従来の受信素子間隔が101.6mmの場合における測位結果である。台車をマーカーまで近づけて終了する往路走行を2回、マーカー手前0.5m付近まで近づけたのち10m地点まで戻って終了する往復走行を1回測位している。同図(a)は座標原点にマーカーが存在するとして、測位したX,Y座標の位置をプロットした結果である。また、同図(b)は時間経過に伴うX,Y値の変化である。なお、距離が0となっているデータは、測位を失敗したデータで

ある。本結果から、ソナーシステムの改良によって0.5mから10mまでの範囲で測位可能であることを確認した。距離情報が支配的なY値については、時間に伴って滑らかに増減している。しかしながら、方位角情報が支配的なX値については、Y値が7m以上の遠距離となると最大3mを超える誤差が生じ、測位値のバラつきが大きいことがわかる。これは、すでに明らかになっているSN比の劣化に伴う方位角誤差のバラつきによるものである。

図9は受信素子間隔を550mmに拡大した場合の図8と同様の測位結果である。測位条件は往復走行で2回測位している。図9(b)のX値の時間変化は安定しており、最大誤差も1.0m程度に改善されていることがわかる。したがって、実装対象の寸法に合わせて可能な限り受信素子間隔を拡張することが有効である。しかしながら、現状ではY値が8mを超えたあたりで著しく計測頻度が低下しており、処理プログラムなどに不具合がある可能性が高いため、この原因について調査する必要がある。

4. まとめ

超音波通信を用いた超音波フェーズドアレイ測位システムに対して、ソナーシステムならびにマーカーの改良を行った。ソナーシステムに対しては、2段階の受信利得制御機能を付加することで0.5mから10mまでの測位を実現した。また、マーカーに対しては送信素子を2個垂直に並べ位相合成による信号強度の向上を図ると同時に、スポンジガードにより上下方向へのサイドビームを抑制し、天井または床反射の影響を軽減できることを確認した。さらに、改良システムの全体動作を検証するために屋内外で測位実験を行って確認した。

今後は、マーカーに対しては送受信素子とスポンジガードの配置に改良を加え、ソナーシステムの修正を行い、再検証を行う。また、移動ロボットや無人搬送車への実装を考慮したシステムの検討を行う予定である。

文 献

- [1] 田畑克彦, 西田佳史, 飯田佳弘, 岩井俊昭, “超音波センサアレイを用いた新しいナビゲーションシステム”, 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.1, pp.11-19, 2012.
- [2] 田畑克彦, 岩井俊昭, 久富茂樹, 遠藤善道, 西田佳史, “長遅延応答型超音波トランスポンダー”, 計測自動制御学会論文集, Vol.49, No.12, pp.1086-1091, 2013.
- [3] 田畑克彦, 久富茂樹, 岩井俊昭, 遠藤善道, 西田佳史, 組込技術を用いた高機能ワイヤレスセンサシステムの研究開発(第3報)ー超音波フェーズドアレイ測位システムー, 岐阜県情報技術研究所研究報告書, No.15, pp.15-20, 2014.
- [4] Katsuhiko Tabata, Toshiaki Iwai, Shigeki Kudomi, Yoshimichi Endo and Yoshifumi Nishida, “Precision Improvement of Position Measurement Using Two Ultrasonic Land Markers”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.2, pp.245-252, 2014.
- [5] 田畑克彦, “空中超音波フェーズドアレイ測位システム=無人搬送車誘導用途としての開発=”, 超音波テクノ, 日本工業出版, Vol.26, No.6, pp.76-82, 2014.
- [6] 西谷哲史, 西田佳史, 溝口博, “全方位超音波位置センサ”, 第22回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1A22(1) - (2), 2004.