

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1報)

— 超音波センサアレイによるナビゲーションシステムへの適用 —

田畑 克彦 岩井 俊昭* 西田 佳史**

久富 茂樹 遠藤 善道 水野 渚 横山 哲也

Development of a New Wireless Sensor System using Embedded Technology (1st Report)

- Application to Navigation System using an Ultrasonic Transducer Array -

Katsuhiko TABATA Toshiaki IWAI* Yoshifumi NISHIDA**

Shigeki KUDOMI Yoshimichi ENDO Nagisa MIZUNO Tetsuya YOKOYAMA

あらまし 本研究では、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新しいナビゲーションシステムの構築を目指してセンサシステムの開発を行っている。本センサシステムは、超音波センサのみを用いて構成し、超音波利用時に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用いていることを特徴とする。超音波ソナーシステムをAGVに搭載し、走行ルート上に設置された超音波ランドマーカと通信すると同時に相対位置を計測しながら設定したルートを走行する。本報では、これまでの基礎研究の結果をもとにセンサシステムのベースモデルを試作し、その動作確認のため、近距離にある超音波ランドマーカの位置推定を行った結果を報告する。

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。

上述の課題を解決するため、我々は屋内外によらず、

* 国立大学法人 東京農工大学大学院 生物システム
応用科学府

** 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

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実現を目指し、それに供するためのセンサシステムの研究開発^[1~3]を行っている。このセンサシステムの特徴は図1に示すようにルート設定用のマーカとして、磁気テープなどの代わりに超音波センサを使用している点である。超音波センサは、低価格で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が少ないことが挙げられるが、騒音などの外乱に弱いとされる。そのため、信号対雑音比(SN比)を向上させるフ

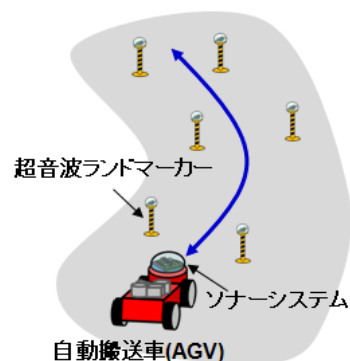


図1 超音波センサシステムによるAGVのナビゲーション

フェーズドアレイ技術を採用する。さらにルート上に配置したランドマーカー（以降“マーカー”と記す）に固有のIDを割り振る。このマーカーは割り当てられたIDを受信した時のみ応答するので、他のマーカーからの信号送信による混信を防ぐことができる。そして、AGV側の超音波アレイセンサシステム（以降“ソナーシステム”と記す）は、特定のマーカーを順次識別し、マーカーとの相対位置を計測しながら、設定した経路を走行する。

これまでの研究では、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ことを確認した。また、本システムでは経路上の特定のマーカーと通信して相対位置を推定する手法をとるため、選定した超音波センサ素子のセンサ感度等を実験で把握し、通信速度を確認した^[1~3]。そして、1組のセンサシステムの原理モデルを試作し、オフラインによる基本仕様の設計と検証を行った^[3]。しかしながら、ナビゲーションシステムとして使用する場合には、連続した位置推定が必要となる。

本稿では、本年度に設計開発したセンサシステムの概要について述べるとともに、連続した位置推定が可能なセンサシステムに発展させ、その動作確認のために、近距離における連続位置推定を行ったので報告する。

2. 超音波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、各センサ素子の合成波であることからSN比が向上するので、従来のセンサ単体の出力や指向性ではSN比が小さくて検知できない領域を縮小できる。また、機械的な方向制御を必要としないことや、仮に一つのセンサ素子が故障しても他のセンサ素子でリカバーできることから、信頼性を高くすることができることも特長である。

図2は、3つの超音波素子を用いた1次元の超音波フェーズドアレイの例である。超音波ビームを θ_0 方向に送信する場合、この方向に対して超音波センサSp1~Sp3の波形の位相差を制御し、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。

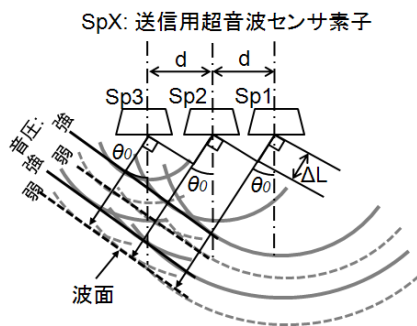


図2 フェーズドアレイ技術の原理

ここで、ある θ_0 におけるSp1とSp2、Sp2とSp3の行路差 ΔL は、次の式で表すことができる。

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

ここで、 d 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、次の式で表すことができる。

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

ここで c [m/s]はある気温 T [°C]における音速で、

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

で表すことができる。

よって、Sp1(Sp2)とSp2(Sp3)の送信タイミング差である(2)式の Δt を制御することにより、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. センサシステムの概要

3. 1 ナビゲーション手法

図1に示すように、AGVに搭載されたソナーシステムが、マーカーの位置を計測しながら、設定した経路を走行する手順を以下に示す。

(1)目標とするマーカーの探索

ソナーシステムは、探索対象のマーカーIDを送信しながら、フェーズドアレイによるビーム走査を行い、対象マーカーを探索する。

(2)探索対象のマーカーの応答

マーカーは、ソナーシステムから割り当てられたIDと同じ信号を受信した場合、規定された信号を送信して応答する。

(3)マーカーの位置計測

ソナーシステムはマーカーからの応答時間をもとに探索対象のマーカーとソナーシステムの相対位置を計測する。

(4)ロボット位置の変更（設定ルートの走行）

マーカーを基準としてロボット位置をコントロールする。

上述のシーケンスについて、超音波通信によるマーカーのロケーションシステムとして考えると、特定マーカーを探索するために走査する(1)、特定マーカーの位置を推定する(2)、そして特定マーカーの方向に超音波信号を送信して、短時間間隔でマーカー位置を更新し、追尾していく(3)により構成される。もし追尾中のマーカーを見失った場合には、(1)のマーカー探索に戻ってシーケンスを繰り返す。

3. 2 超音波データ通信形式

ソナーシステムとマーカーとの間で交信される信号の変調方式は、2値ASK (Amplitude-Shift Keying) を用いる。

図3は本データ通信の1パケットの内容である。本データ通信は後述するマーカーの位置（距離と方位）推定も兼ねるため、パルス伝搬時間や左右受信センサの時間差を測定し易いように、スタートビットとして常に先頭に1bitのパルスを送る。

次に複数の経路を走行することを想定し、グループビ

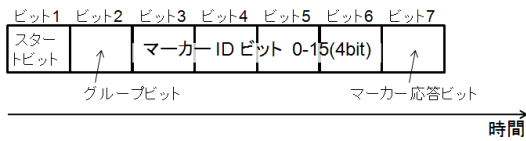


図3 超音波通信データフォーマット

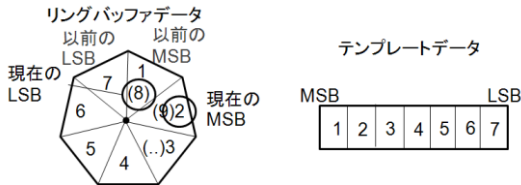


図4 通信データの識別

ット1bitが続き、そのあとにマーカーの固有IDである4bitのIDを割り当てる。そして、最後にソナーシステムからのマーカー探索信号であるか、マーカーからの応答信号であるかを区別するために、応答ビット1bitを用意する。応答ビットは、ソナーシステムからのマーカー探索信号の場合は“パルスなし”，マーカーからの応答信号の場合は“パルスあり”とする。

また、超音波データ通信速度は、これまでの研究^[1~3]における超音波センサ素子(日本セラミックス株式会社 AT40-10)の性能評価から625bpsに設定している。

3. 3 通信データの識別

マーカーとソナーシステムともに、受信した超音波信号を解析し、マーカーであれば応答すべき信号なのか、ソナーシステムであれば位置推定すべき信号なのかを解析し、識別する必要がある。マーカー側における解析信号の特徴は、その信号の到来タイミングが未知であるということである。このため、図4に示すように図3の通信パケットと同サイズのリングバッファを用いて随時パターンマッチングを行い、応答すべき信号が到来したかを判定する。ソナーシステム側は、超音波信号が10m往復する時間分のサンプリングデータをシステムのメモリに蓄積し、同様の手法でマッチングを行う。

なお、パルスの“あり”と“なし”の判断は、受信信号の電圧振幅に閾値を設定しており、その値は最大受信振幅の50%としている。

3. 4 マーカー探索のための超音波ビーム走査

ソナーシステムは3.1(1)で述べたように、対象マーカーを探索するため、フェーズドアレイによるビーム走査を行う。本節では、このための手法について検討する。図5に試作したソナーシステムを示す。図5の3x3素子からなる試作した超音波センサアレイにおいて、主ビーム指向角 θ_0 を0と20°として超音波素子の送信タイミングを制御し、観測角 θ_{TR} を最小-60°~最大60°まで変化させた時のビームパターンを図6に示す。なお、主ビーム指向角 θ_0 は、センサアレイの正面方向を0°とし、アジマス方向

へ超音波ビームを走査している。送信信号は、40KHzの搬送波送信と送信停止を10msec間隔で切り替える信号を送った。

図6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。

$$G_{1sp} = 20 \log_{10} (V_{9sp}(\theta_0, \theta_{TR}) / V_{1sp}(\theta_0=0, \theta_{TR}=0)) \text{ [dB]} \quad (4)$$

図より、意図した方向にビームを照射できており、得られる音圧は単一素子の12dB(4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、これはサイドローブとして知られているグレーティングローブまたは量子化ローブ^[4]であり、主ビーム角 θ_0 に制御した場合におけるサイドローブの発生角の理論値を表1に示す。

図6と表1を比較すると、隣り合うセンサ素子の1波長ずれによるグレーティングローブ θ_{g1} は、ほぼ理論値通り

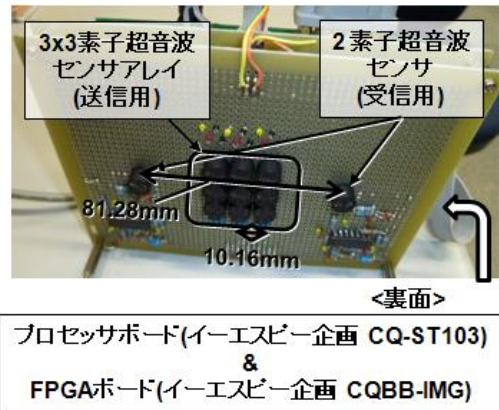


図5 試作ソナーシステム

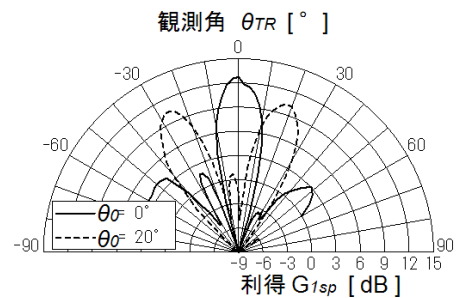


図6 フェーズドアレイビームパターン

表1 メインローブとサイドローブの出現角（理論値）

| メインローブ角 θ_0 [°] n=0 | サイドローブ角 [°] | | | |
|----------------------------------|------------------------------|--------|---|------|
| | グレーティングローブ角 θ_{g1} | | グレーティングローブ角 θ_{sp1-3} & 量子化ローブ角 θ_{q1} | |
| | n=-1 | n=1 | n=-1 | n=1 |
| ● 0.0 | ● -57.7 | ● 57.7 | -25.0 | 25.0 |
| ● 10.0 | ● -42.2 | - | -14.4 | 36.6 |
| ● 20.0 | ● -30.2 | - | -4.6 | 49.9 |
| ● 30.0 | ● -20.2 | - | 4.4 | 67.3 |
| ● 40.0 | ● -11.7 | - | 12.7 | - |
| ● 50.0 | ● -4.6 | - | 20.1 | - |

の角度で発生しており、そのビーム幅と強度は主ビームと同等である。このため、マーカー探索にこのグレーティングローブ θ_{gl} を利用する。利用するグレーティングローブ θ_{gl} を表中の“●”として記す。

$\pm 60^\circ$ の範囲を 10° 刻みで走査する場合には、通常13方向のパルス列の送信が必要であるが、サイドローブで補完することにより、約半分の7方向に削減でき、マーカー探索時間の短縮が可能である。

3. 5 マーカー位置の推定

マーカー位置の推定はマイコンの処理負荷の軽減のため、FPGAで可能な限り高速ハードウェア処理を行わせたいため、比較的単純な送受信パルスの到来タイミングから推定する方法とした。概要を以下に述べる。

(1) マーカー方位角 θ_{MK} の推定

マーカー方位角 θ_{MK} は、左右受信センサの受信時間差を計測することにより次式を用いて推定する。

$$\theta_{MK} = 90 - \cos^{-1}\left(\frac{dl}{l_{RL} - l_{RR}}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{dl}{l_{RL} - l_{RR}}\right) \quad (5)$$

ここで、 $l_{RL}-l_{RR}$ は受信センサ間の距離、 dl はマーカーから左右の受信センサ間の行路差であり、

$$dl = c \cdot dt \quad (6)$$

で表される。ゆえに、左右受信センサの信号到達時間の差 dt を測定することで、マーカーの方位角を推定する。

この実験における推定条件では、(5)式および(6)式の角度分解能を決めるパラメータとして、サンプリング周期を $10\mu\text{sec}$ に、左右受信センサ間の距離 $l_{RL}-l_{RR}$ を 81.28mm に設定した。

(2) マーカー距離 l の推定

左右受信センサの受信タイミングにより、計測できる距離は以下の式である。

$$l_{Right} = \frac{c}{2} \cdot (t_{R_flight} - t_{process}) = l \pm \frac{dl}{2} \quad (7)$$

$$l_{Left} = \frac{c}{2} \cdot (t_{L_flight} - t_{process}) = l \mp \frac{dl}{2} \quad (8)$$

ここで、 l_{Right} 、 l_{Left} 、 t_{R_flight} 、 t_{L_flight} はそれぞれ左右受信センサによる推定距離、左右受信センサに対して超音波信号の往復に要する時間である。また、 $t_{process}$ はマーカーのID認識に要する時間であり 13.1msec の一定時間で応答するように設定されている。さらに、 l は左右受信センサを結ぶ線分の中点からマーカーまでの距離で、 $dl/2$

は左右受信センサの中点を基準とした場合の行路長のずれ量である。

(7)および(8)式の平均値を計算することで、 $dl/2$ が消去され、 l を求めることができ、かつ値を安定化することができる。

$$l = \frac{l_{Right} + l_{Left}}{2} \quad (9)$$

なお、これらの方位や距離を計算するため、パルスが到来したと判定するタイミングは、設定した閾値(送受信パルスの最大値の50%に設定)を超えたタイミングを計測する。

4. ハードウェアの基本設計と開発

本研究では、図2に示すように1軸(θ_0)の超音波ビームをフェーズドアレイによって走査し、3. 1節に示した一連のシーケンスを実行する。

ハードウェア構成としては、ソナーシステムとマーカーの2種類がある。ソナーシステムは、フェーズドアレイによってマーカーを探索し、マーカーの位置を推定するなど、比較的複雑な処理を必要とするが、1つのAGVに1つ搭載すれば良いので、性能を重視し、プログラムを作り込むことができる構成とする。マーカーは、経路に多数設置することが想定されるが、自分のID信号が到来したことを識別し、送信するだけで良いため、コストを意識して、できるだけ単純な構成とする。

4. 1 ソナーシステム

図5の試作したソナーシステムの機能ブロック図を図7に示す。大きく分類すると、送信部、受信部およびコントロール部から構成される。

超音波信号の送信部は、図5に示すような 3×3 個の超音波センサ素子(日本セラミック(株)AT40-10)を使用する。ここで、素子間の距離 d は 10.16mm で、素子の励振電圧は 15V としている。この超音波センサ素子の共振周波数は 40kHz で、指向性は半減(-6dB)半角で $\pm 50^\circ$ である。

フェーズドアレイ制御は、並列処理に適しているFPGAボードにより行う。1軸のビーム走査のため、縦列

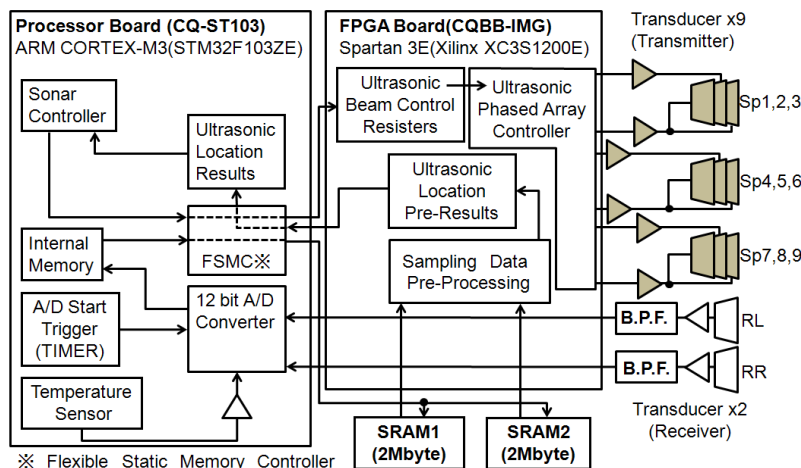


図7 試作ソナーシステムのブロック図

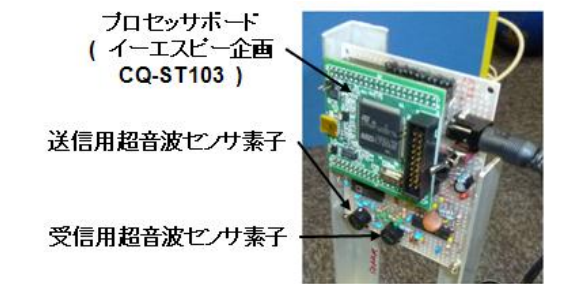
の3個は同相とし、横列間の位相差をコントロールする。位相コントロールのための時間タイミングの制御には、FPGA(Xilinx社XC3S1200E)に供給しているクロック50MHz(20nsec)を使用し、その量子化位相誤差は、 $\pm 0.144^\circ$ である。なお、マーカー探索時の主ビーム角 θ_0 を決定する時間タイミングの制御変数や送信するデータ形式は、後述するマイコンボードから通知される。

受信部は、ソナーシステムの中心線に対し、左右対象に各1個ずつの超音波素子を81.28mmの距離で実装する(図5)。受信素子も送信素子と同じ型番のものを使用した。超音波素子の受信信号は、バンドパスフィルタとアンプを経て、FPGAボードのアナログ入力端子に入力され、増設したマイコンボードで左右2CH同時にAD変換される。増設マイコンボードのプロセッサはARM CORTEX-M3(型番STM32F103ZE, CPUクロック72MHz, 内蔵SRAM 64KBytes)である。

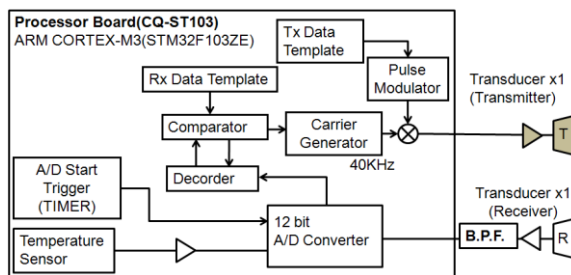
コントロール部は増設マイコンボードであり、マイコンに蓄積された左右2CHのAD変換データを、FPGAを介してFPGAボード上の外付SRAMに書き込み、FPGAにより超音波信号の伝搬時間と左右時間差を求めた結果を元に、マーカー位置を計算する。また、この結果から定めた、位相コントロールのためのタイミング変数や探索ID等の情報をFPGAに通知する。なお、マイコンボードにRS232C通信機能を付加し、探索コマンド送信や位置推定結果等のデータ受信が可能である。

4. 2 マーカー

試作したマーカーの写真とブロック図を、それぞれ図8(a)と(b)に示す。超音波センサ素子は送信用、受信用センサ素子ともに各1個とし、ソナーシステムと同じ型番のものを使用する。また、制御コントロール用としてマイ



(a)試作マーカー



(b)マーカーの機能ブロック図

図8 マーカー

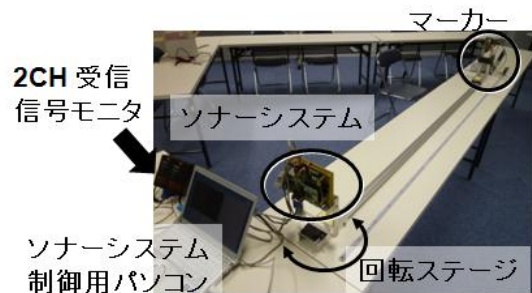
コンボードのみを使用する。受信部が超音波信号を受信し、図4のリングバッファによりIDデータを識別し、自分のIDであれば応答信号を送信するプログラムを搭載する。

5. マーカーの位置推定実験

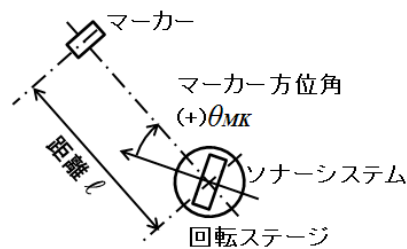
上述の機能を実現するために試作した超音波センサシステムを図9(a)に示す。同図は一連の動作を確認するために周辺機器も含めて開発した実験系である。回転ステージの上にソナーシステムを取付け、マーカーの方位角を変更して測定できるようにしている。実験座標系を図9(b)で定義する。

図10は距離 l を680mm一定でマーカー方位角 θ_{MK} が 0° と 20° とした場合において、ソナーシステムが信号パルス列を200回送信し、その都度、マーカーの位置を繰り返し推定し、プロットした結果である。また、マーカー方位角 θ_{MK} を 0° から 60° まで 10° 刻みで変更して同様の位置推定を行った結果を表2に示す。表2中の成功率とは、信号の送信回数に対してマーカーからの応答信号を識別した回数との割合である。計測誤差は $\pm 27.0\text{mm}$ で、標準偏差もマーカー方位角によっては、目標としている工場の床のマーキングテープ幅50mmの精度までは達しておらず、さらなる改良が必要である。

また、方位角は $+5^\circ$ 以内の誤差であるが、方位角が 30° 程度以上の大きな角度において、標準偏差が広がっている。これは左右受信センサの音圧が下がって雑音の影響を受けやすくなることと、3.5節のシステム設計で設定した値により、1サンプル時間遅れの角度分解能が方位 0° 付近の 2.4° から方位角の増加とともに徐々に減少して、方位 60° 付近では 4.8° になることも要因と考えられる。分解能の問題は左右受信センサ間の距離を広げることに対応できるが、センサ間の信号レベル差が大きくな



(a) 試作した一連の超音波センサシステム



(b) 実験座標系

図9 超音波センサシステムの動作確認のための実験系

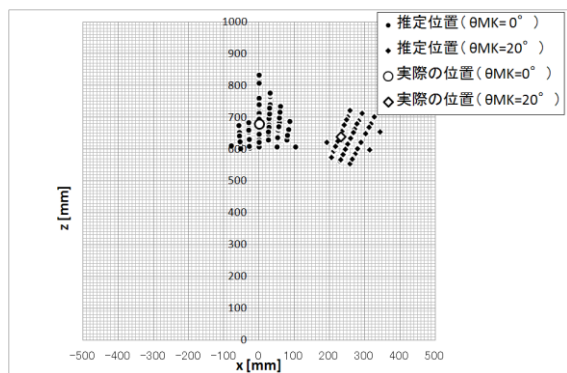


図10 L=680mmにおけるマーカー位置推定結果

表2 マーカー方位角を変化させた場合の位置推定結果

| マーカー方位角 [°] | ソナーシステムの推定結果 | | | | | |
|----------------|---------------|---------------------|---------|------|---------|------|
| | 推定成功回数 [回] | 推定成功率 SCS/200[%] | 距離 [mm] | | 方位角 [°] | |
| | | | 平均 | 標準偏差 | 平均 | 標準偏差 |
| 0 | 99 | 49.5 | 679.8 | 51.8 | 1.4 | 3.4 |
| 10 | 82 | 41.0 | 653.7 | 32.1 | 11.6 | 2.3 |
| 20 | 132 | 66.0 | 680.3 | 46.1 | 21.8 | 1.9 |
| 30 | 63 | 31.5 | 688.7 | 51.8 | 32.2 | 7.5 |
| 40 | 63 | 31.5 | 705.0 | 62.8 | 41.7 | 13.9 |
| 50 | 93 | 46.5 | 690.9 | 48.8 | 54.0 | 5.6 |
| 60 | 55 | 27.5 | 706.5 | 63.0 | 64.6 | 18.8 |

り、遠距離推定時における精度劣化に繋がるので慎重に検討する必要がある。

自動搬送車のような移動システムへの適用を考えた場合、位置推定周期も重要なファクターである。本ソナーシステムは、超音波信号が10m往復する時間だけ、データを蓄積した後、位置推定を行う手法であり、推定周期は約90msecであるため^[3]、200回の位置推定の所要時間は18secである。表2の推定成功数から、平均の位置推定周期は3.1Hzから7.3Hzである。目標としているレーザーレンジファインダによる更新周期8Hz^[5]と比較しても、さらに推定成功数を上げる必要がある。

6. まとめ

本稿では提案している自動搬送車の新しいナビゲーションシステムで利用することを目的とした超音波位置計測システムの開発を進め、連続動作可能なソナーシステムとマーカーを試作し、近距離L=680mmにマーカーが存在する場合の位置推定を行った。その結果、推定誤差はマーカーの方位角に依存し、±27mm以内で位置推定周期は3.1Hz～7.3Hzであることを確認した。

現状では、マーカー位置推定周期ならびに精度ともに課題が残る。今後は課題について検討し、改良を加えるとともに、マーカーが遠距離にある場合でも位置推定が可能なシステムとして開発を進める予定である。さらに、実際の移動装置に搭載し、その評価を行う。

文献

- [1] 田畑克彦, 西田佳史, 飯田佳弘, “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 (第2報) -超音波センサアレイの改良と通信速度の把握-”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.12, pp.47-50, 2011.
- [2] 田畑克彦, 西田佳史, 岩井俊昭, “超音波センサアレイを用いたナビゲーションシステム -超音波センサアレイの試作と通信速度の把握-”, 第29回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2011AC2N1-2, 2011.
- [3] 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.
- [4] 吉田孝監修, “改訂 レーダ技術”, 電子情報通信学会, 1996.
- [5] ジック株式会社, http://www.sick.jp/product/automatic/laser/ld_ha_scanner/NAV200/ (2012年3月現在)