

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)

— 超音波フェーズドアレイ測位システム —

田畑 克彦 久富 茂樹 岩井 俊昭*

遠藤 善道 西田 佳史**

Development of a New Wireless Sensor System using Embedded Technology (3rd Report) - The Ultrasonic Phased-Array Positioning System -

Katsuhiko TABATA Shigeki KUDOMI Toshiaki IWAI*
Yoshimichi ENDO Yoshifumi NISHIDA**

あらまし 我々は、無人搬送車(AGV)の経路移動をナビゲーションするための超音波フェーズドアレイ測位システムを開発している。本システムは、無人搬送車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い、相対位置を計測しながら走行する。これまで無人搬送車とランドマーカ間の相対位置は、1つのランドマーカの位置情報を使用することを想定して測位実験と改良を繰り返してきた。しかし、ランドマーカまでの距離が遠く、方位角が大きい場合には、超音波通信のSN比が低下し、位置精度が低下する。本稿では、この問題を解決するために、2つのランドマーカの距離情報から測位する手法について検討し、精度の向上を図った。また、本測位システムを移動装置に実装し、1つのランドマーカの位置情報を使用した簡易な経路走行実験から、その可能性を確認した。

キーワード 超音波センサー、フェーズドアレイ、測位システム、無人搬送車(AGV)、組込技術

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。従来のAGVの経路走行のためのナビゲーションとして、経路上に磁気テープを貼るタイプやレーザーレンジセンサーを使用するタイプなどがある。前者はコストパフォーマンスが高いが経路変更の自由度が低く、後者は経路変更の自由度は高いが高価であるという課題がある。そこで我々は、経路変更の自由度が高く、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測位システムの研究開発^[1~3]を行っている。

本センサーシステムは、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。また、AGVに搭載する超音波センサーアレイシステム(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通信を行い順次識別しながら、マーカとの相対位置(距離と方位角)を計測し、これを基準として走行する。このため、無人搬送車は従来の磁気テープを用いたラインレースと同様に電子地図を持たない簡便な手法による走行が可能であるにもかかわらず、マーカの配置を変更するだけで柔軟に走行経路を変更できる利点がある。

したがって、従来システムのように超音波センサー素子単体を用いて超音波信号を送信し、壁などの建物構造物等からの反射信号を単数または複数の超音波センサー素子で受信し、電子地図を作成し、この電子地図をもとに移動する方法とは異なるシステムである。

本研究では、マイコンやFPGAを用いて実用機に近いソナーシステムとマーカからなる超音波フェーズドアレイ測位システムの原理モデルの研究開発を進めている。昨年度は、多重反射信号による計測精度の劣化や誤検知が観測され、前述の対策だけでは不十分であることが判

* 岐阜県情報技術研究所

** 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

明したため、改良を加えて精度向上を図った^[3]。これらの改良の結果、マーカーまでの距離と方位角が、それぞれ5000mmと30°以内の測位において、±100mm、±5°の精度で測位が可能となった。

今年度はさらに改良を加えた測位システムを開発し、複数のマーカーに対して測位実験を行った。その結果、マーカーのID毎に測位可能であることを確認した。しかしながら、マーカーまでの距離が遠く、方位角も大きい場合は、受信センサー素子の指向性によって感度が低下するので、通信信号のSN比が低下し、測位精度が低下する。また、現状の測位方法上、SN比の低下による方位角の計測精度の低下が位置誤差に大きな影響を与えることが分かった。

本報告では、SN比が低下しても比較的安定した計測が可能な距離情報のみを使用して測位精度の向上を図った。具体的には、既知の位置に設置した2つのマーカーまでの距離計測値を用いて、GPSと同様の方法により位置を計算する。これにより、SN比が低下する位置関係においても、測位精度を維持できることを確認した。

さらに共同研究機関である株式会社ブイ・アール・テクノセンターが開発している移動ロボットと誘導ソフトウェアに本測位システムを実装し、1マーカーを測位する方法にて経路走行実験を行い、その可能性を確認したので報告する。

2. 超音波フェーズドアレイ測位システム

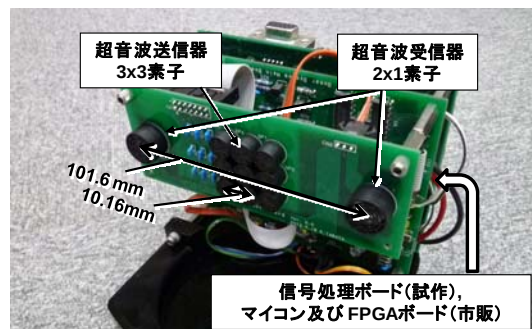
図1に、試作したソナーシステムとマーカーを示す。次節以降に記すマーカー位置の計測処理をマイコンボード(プロセッサ、STM32F103ZE)及びFPGAボード(FPGA, XC3S1200E)に実装した。表1に使用した超音波センサー素子の主な仕様を示す。ソナーシステムとマーカーとの相互通信の仕様は、ID信号長を7bit、通信速度を625bpsとした^[1]。また、送信する超音波信号の搬送周波数はソナーシステムに40kHz、マーカーに32.7kHzを割り当てた。この周波数は市販されている一般的な空中超音波センサー素子の共振周波数である。ソナーシステムとマーカーが送信する超音波受信信号の周波数が異なると、素子の共振点が異なるため、自分が送信した信号をそのまま受信してしまう信号レベルを抑制できる。これによって、自身が送信する超音波信号の多重反射成分などの自己雑音による誤検知を回避する。

2. 1 ランドマーカーの測位手法

マーカーの測位は、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となるFPGAでの処理を考慮して、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た。処理内容を以下に述べる。

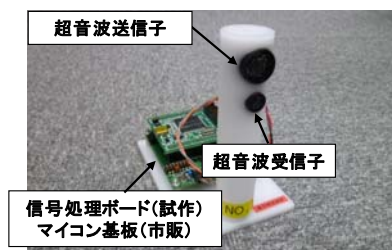
2. 1. 1 ランドマーカー方位角 θ_{MK}

マーカー方位角 θ_{MK} は、左右受信センサー素子の受信時間差を計測することにより、次式を用いて計算する。



寸法: 130(幅)×100(高さ)×90mm(奥行き)

(a) ソナーシステム(試作機)



Size: 80(幅)×20mm(高さ)×80(奥行き)
(ポールサイズ: Φ25×115mm)

(b) ランドマーカー(試作機)

図1 超音波フェーズドアレイ測位システム外観

表1 超音波センサー素子の仕様

	ソナーシステム 送信器 ランドマーカー 受信器	ランドマーカー 送信器	ソナーシステム 受信器
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

$$\theta_{MK} = \sin^{-1} \left(\frac{d\ell}{\ell_{RL-RR}} \right) \quad (1)$$

ここで、 $\theta_{MK}=0^\circ$ の時にマーカーが正面に存在しているとして、 ℓ_{RL-RR} は受信センサー素子間の距離、 $d\ell$ はマーカーからの左右それぞれの受信センサー素子までの行路差であり、以下の式で表される。

$$d\ell = c \cdot dt \quad (2)$$

ここで、 c は音速[m/s]である。ゆえに、左右受信センサー素子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計測する。実際には、標本化周期 T_s でAD変換を繰り返し行うので、左右受信センサー素子に到達する時点での標本点の差を N_d とすると時間差 dt は次式で与えられる。

$$dt = N_d \cdot T_s \quad (3)$$

本稿の開発システムでは、(1)式の方位角を求めるパラメータとして標準化周期 T_s を $10\mu\text{s}$ に、左右受信素子間の距離 ℓ_{RL-RR} を 101.6mm としている。

2. 1. 2 ランドマーカーまでの距離 ℓ

左右受信センサー素子からマーカーまでの距離 ℓ_{Right} と ℓ_{Left} は、それぞれ次式より算出できる。

$$\ell_{Right} = \frac{c}{2} \cdot (t_{Rflight} - t_{process}) = \ell \pm \frac{d\ell}{2} \quad (4)$$

$$\ell_{Left} = \frac{c}{2} \cdot (t_{Lflight} - t_{process}) = \ell \mp \frac{d\ell}{2} \quad (5)$$

ここで、 $t_{Rflight}$ と $t_{Lflight}$ は、それぞれ左右受信センサー素子について超音波信号が往復するの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、一定の応答遅延となるように設計する。ここで、 ℓ は左右受信センサー素子を結ぶ線分の中点からマーカーまでの距離で、 $d\ell/2$ は左右受信素子の中点を基準とした場合の行路長のずれ量である。

(4)式と(5)式の平均値を計算すると、 $d\ell/2$ が消去され、マーカーまでの ℓ を求めることができ、2つの受信素子で検出することにより、誤差の影響を小さくできる。方位と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、送受信パルスの最大値の50%に設定した閾値を超えたタイミングで計算する。

なお、音速 c は気温 $T[^\circ\text{C}]$ との間に次の関係がある。

$$c = 331.45 + 0.61T \quad (6)$$

このため、方位角と距離を計算する際に、あらかじめ気温を計測し音速を求める。

2. 2 本測位システムの動作

本測位システムの動作について簡単に述べる。無人搬送車の走行システムに該当する測位データ取得用PCから、探索するマーカーIDをソナーシステムに通知する。ソナーシステムに搭載されているマイコンがそのIDを受信し、探索ビーム方向をFPGAに通知する。FPGAは、送信センサー素子アレイを並列駆動し、指定された方向へフェーズドアレイによって合成された探索信号を送信する。この合成信号は7bitのID情報を含んでおり、2値デジタル振幅変調方式(ASK)としている。さらに、FPGAはマイコンから左右受信センサー素子が受信する信号のAD値を $10\mu\text{s}$ の標準化周期で取得し、5m以上先のマーカーを計測可能な82msの間の超音波受信信号データを保存した後、マーカーからの応答信号のID識別と前述の測位計算のためのタイミングを計測する。マイコンはこれらの情報からマーカー検出の有無と、検出が成功した場合の距離 ℓ と方位角 θ_{MK} の測位計算を行い、PCに通知する。

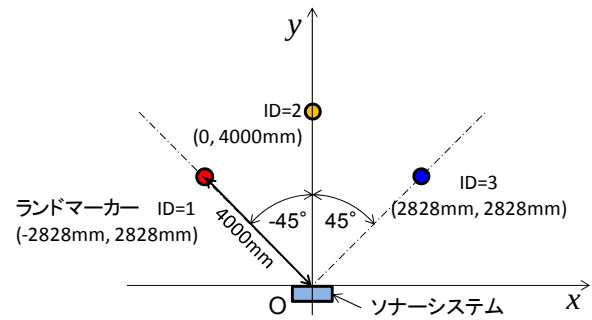
マーカーは超音波受信センサー素子が受信した超音波信号に対して逐次信号処理を行いながら、割当てられたIDが到来するのを待つ。そして、割当てられたIDが到来した場合、一定の応答遅延 $t_{process}$ 後にID毎に割り振られた固有の応答信号を送信する。

2. 3 ランドマーカーの測位実験と課題

本測位システムは1つのマーカーに対して位置計測し、相対位置を把握することを想定している。そこで、図2(a)に示すように室内の3箇所に異なるIDを持つマーカーを



(a) 実験の様子



(b) マーカー座標の定義

図2 ランドマーカー測位実験

表2 実験条件

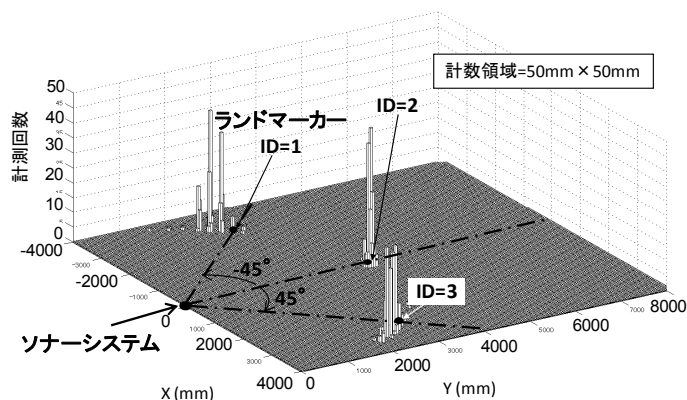
測定条件			
実験配置(図2のとおり)			
室温			25℃
室温25℃における超音波伝搬速度			347 m/s
システム条件			
ランドマーカー計測回数			200 回
通信信号パターン(7 bits)			
ランドマーカーID	探索信号	応答信号	
1	1100110	1011001	
2	1010010	1101101	
3	1011010	1100101	

設置し、運用時と同様にすべてのマーカーの電源を投入し、稼働させた状態で測位実験を行った。便宜上、マーカーの座標はソナーシステムを原点として、図2(b)のように定義する。そして、1個のマーカーに対して、ソナーシステムから200回の探索信号を送り、マーカーの測位を行った。測位実験の実験条件を表2に示す。

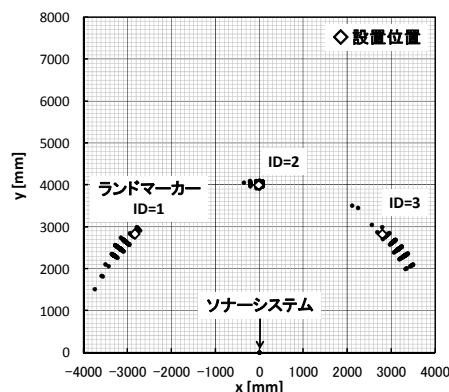
なお、ソナーシステムの方角は図2(a),(b)に示すようにID=2と正対するように設置している。

表3が測位結果である。また、図3(a)は、同じ実験データを用いて測位した頻度を2次元ヒストグラムで表したグラフである。同図のグラフ原点にソナーシステムが設置されている。1マスは50mm×50mmの領域であり、その領域内の位置を計測した回数を計数する。計測頻度の分布が集中して、より高い数値となる方が安定した精度で測位できていることを意味する。また、図3(b)は、2次元測位結果の点群データである。

表3および図3より、マーカーID毎に識別し、その位置が分離できていることが確認できる。しかしながら、±45 $^\circ$ と方位角が大きい位置に設置しているID=1およびID=3のマーカーの方位角については、平均値の誤差と標



(a) マーカー測位の2次元ヒストグラム



(b) 測位結果の分布

図3 ランドマーカーの測位結果グラフ

表3 ランドマーカーの測位結果一覧

ランドマーカー ID	設置距離 [mm]	設置 方位角 [deg]	測定距離 [mm]		測定方位角 [deg]		測定頻度 [Hz]
			平均値	SD*	平均値	SD*	
1	4000	-45	4040.5	48.7	-51.4	3.3	7.8
2	4000	0	4033.3	35.7	-0.7	1.0	7.7
3	4000	45	4033.7	48.8	52.0	4.0	7.4

* 標準偏差

標準偏差が大きい。これは表1より、ソナーシステム受信センサー素子の指向性は、 $\pm 35^\circ$ であるため、これ以上の方位角となる場合には、感度の低下によりSN比が低下した結果、精度も低下していると考えられる。図3(b)より、距離方向に対しては、円弧状に計測値が分布しており、どのIDに対しても、安定して計測できていることが確認できる。また、測位頻度は7.4Hz~7.8Hzであり、市販されているレーザーレンジセンサーによるナビゲーション手法によるものと同程度である。

ここで、精度低下の著しい方位角方向の計測結果に着目する。図3より櫛の歯状に周期的に計測値が並んでいることが確認できる。これは、(3)式の左右受信センサー素子に到達する時間差 dt を計測する際に、マイコンが受信信号を10 μ sの標準化周期でAD変換を行っているため、 dt が離散的になるためである。例えば、室温25 $^\circ$ Cの環境下でID=1が存在する $\ell=4000$ mm, $\theta_{MK}=-45^\circ$ 付近の角度分解能 $d\theta$ は、 2.9° であり、外乱などにより標本点の差 N_d が1ずれるだけで、真値からの方位角方向への測位誤差 Δr は202mmとなる。測位誤差 Δr は $d\theta$ を用いて以下の近似式から求めている。

$$\Delta r = 2\ell \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) \quad (7)$$

一方、距離分解能については、標本点が1ずれたとしても測位誤差は1.7mmにしかない。以上のことから、距離 ℓ が遠くなり、SN比が低下した状態では、方位角誤差が測位精度の低下に大きく影響することが課題である。

3. 方位角計測精度の向上

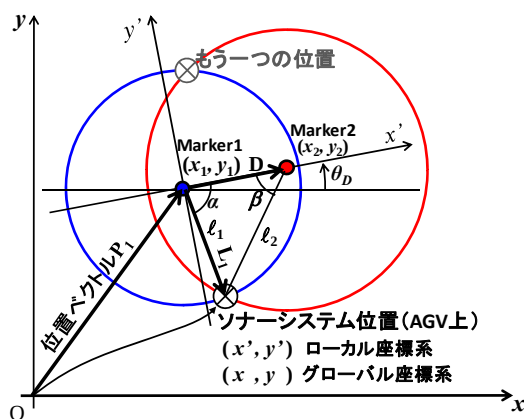


図4 2つのランドマーカー距離による測位

本章では、前章の検討結果をもとに、距離情報のみを用いた測位を行う。このために、マーカーの位置座標から、GPS^[4]と同様の方法で測位する。最初に本研究の測位方法について述べ、次に前章のマーカーの距離データを用いて測位計算した結果、方位角精度が飛躍的に改善されたことを示す。

3. 1 2つのランドマーカーによる測位方法

図4は本研究における測位方法の概要である。図中のMarker1とMarker2が、それぞれグローバル座標 (x_1, y_1) および (x_2, y_2) に設置されている。そして、AGVに搭載したソナーシステムが、2つのマーカーまでの距離を計測した値を、それぞれ ℓ_1 および ℓ_2 とする。この時、Marker1を中心とする半径 ℓ_1 の円とMarker2を中心とする半径 ℓ_2 の交点にソナーシステムが存在し、その位置 (x, y) は次式で表される。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \mathbf{P}_1 + \mathbf{L}_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \theta_D & -\sin \theta_D \\ \sin \theta_D & \cos \theta_D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{P}_1$ はグローバル座標系原点からローカル座標系原点への位置ベクトル、 $\mathbf{L}_1$ はMarker1の存在するローカル座標系原点からソナーシステムへの位置ベクトルである。また、 θ_D はグローバル座標系に対するローカル座標系の

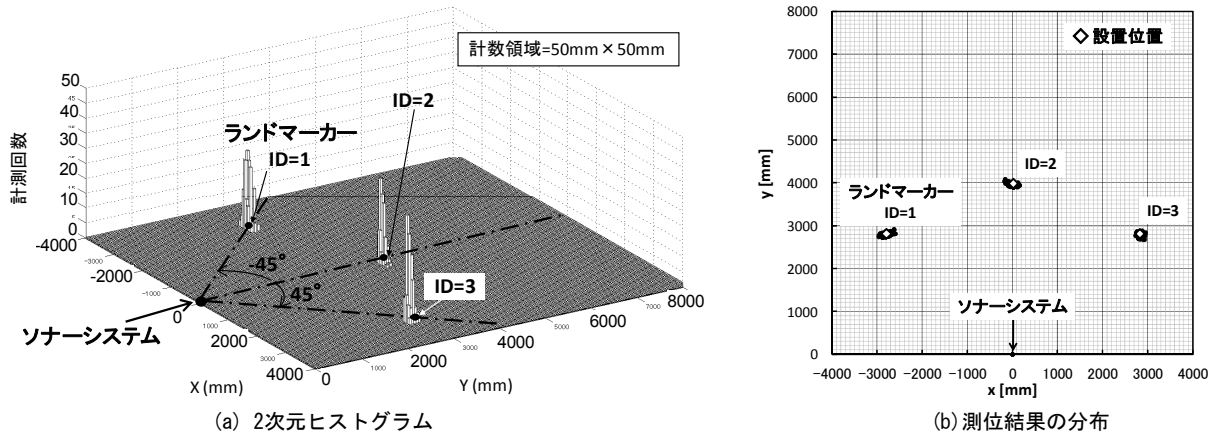


図5 2つのランドマーカーによる測位結果グラフ

表4 2つのランドマーカーによる測位結果一覧

ランドマーカー ID	設置距離 [mm]	設置方位角 [deg]	測定距離 [mm]		測定方位角 [deg]	
			平均値	SD*	平均値	SD*
1-(2) **	4000	-45	3965.3	48.7	-45.1	1.1
2-(3)	4000	0	3968.2	36.2	-0.2	1.1
3-(1)	4000	45	3971.7	48.8	45.5	0.7

*標準偏差, ** ()内は測位に使用したもう1つのマーカーID

回転角であり、次の式で表される。

$$\theta_D = \sin^{-1} \left(\frac{y_2 - y_1}{|D|} \right) \quad (9)$$

ここで、 D はローカル座標系において x' 軸上に存在するMarker1からMarker2への位置ベクトルであり基線ベクトルと呼ぶ。また、その大きさ $|D|$ を基線長と呼ぶ。

そして、(8)式における (x', y') はローカル座標系におけるソナーシステムの位置であり、次の式で表される。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ell_1 \cos \alpha \\ -\ell_1 \sin \alpha \end{pmatrix} \quad (10)$$

ここで、 y' には符号が正の解も存在するが、常にソナーシステムはマーカーの手前にあるとして、解を選択する。また、 α は位置ベクトル D と L_1 の成す角であり、余弦定理により、以下の式で求めることができる。

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{|D|^2 + \ell_1^2 - \ell_2^2}{2|D|\ell_1} \right) \quad (11)$$

上式の余弦定理が成り立つためにはソナーシステムと2つのマーカーにより三角形を形成する必要があるため、これらが直線上に存在すると解を求めることはできない。

3. 2 測位結果と考察

前章の実験データを用いて、前節に示した2つのランドマーカーの距離計測値を用いてソナーシステムの位置を算出した。ソナーシステムの位置は図2に示すように座標系の原点に存在するので、原点付近に測位値が分布する。前章の実験結果との比較を容易にするために、ソナーシステムの測位値と、計測対象としたマーカー座標と

の差をとった。このことは、AGVを基準にして、AGVからマーカーを観測した場合の相対的なマーカー測位値の分布として置き換えていることを意味する。

表4に測位結果を、図5に測位結果の分布をそれぞれ示す。なお、表4における () 内のマーカーIDは、計測対象のマーカー位置を求めるために使用したもう一つのマーカーである。表3の測位精度ではID=3の方位角の標準偏差 θ_σ は 4.0° である。ここで(7)式の $d\theta$ に θ_σ を代入すると方位角方向への測位値は真値から279mmにわたって分布していることになる。しかしながら、表4では方位角の標準偏差が 0.7° であり、真値からの測位値の分布は49mmに抑えられている。さらに、方位角の計測平均値の誤差も 7.0° から 0.5° に改善されている。ID=1の計測結果についても同様の結果が得られた。したがって、マーカーまでの距離が遠くなった状態で、さらに方位角が大きくなるなど、SN比が確保できないケースにおいて、有効な手法であると言える。このような代表的なケースとしては、経路の方向が大きく切り替わるコーナー部などが挙げられる。

距離結果については、距離情報を用いた位置計算のため、精度は変わらない。距離の計測精度を高めることで、両手法ともに計測精度が向上するため、今後も改良を重ねる予定である。

3. 3 2つのマーカーによる経路誘導方法

本測位システムにおいて、電子地図を用いずに経路走行する場合には(10)式と(11)式のローカル座標系において、2つのマーカーに対して相対的な自己位置を測位し、次のいずれかの方法により経路走行できる。いずれも基線長 $|D|$ は既知である必要がある。

- ・ 2つのマーカーをゲートとして、その中点を保つよう走行制御する
- ・ 基線ベクトル D を仮想的な壁とし、これに沿う形で走行制御する

また、2つのマーカーを測位する必要があるため、測位頻度が半分低下してしまう。これについては、交互にマーカーを測位し、一方のマーカーまでの距離を計測した際に、他方のマーカーまでの距離はオドメトリなどで補

正することで測位頻度を保持できると考える。現在のAGVは方向制御と速度制御を行っているの、オドメトリとの併用は現実的な手法である。AGVが最高速度1000mm/sで走行していると仮定すると、表3に示す7.4～7.8Hzの測位頻度結果では最大でも135mm程度の走行間の位置補正でよい。オドメトリとジャイロを併用したデッドレコニング^[5]では数mの走行で数cmの位置誤差であることから、累積誤差の影響はほとんど無視できる。

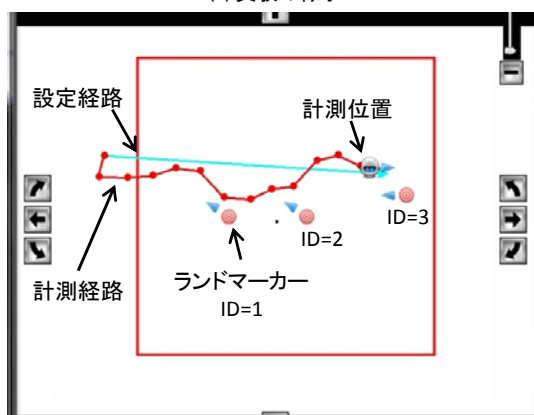
4. 本測位システムによる経路走行実験

本測位システムによるナビゲーションが可能であることを確認するため、移動装置による経路走行実験を行った。実験では、異なるIDのランドマーカを経路上に3個配置し、従来想定したように、マーカを1個ずつ測位しながら経路走行する。図6(a)は共同研究機関（株式会社ブイ・アール・テクノセンター）が介護施設等を巡回警備することを目的に開発した見守りロボットと誘導ソフトウェアにより、実験を行っている様子である。なお、このロボットと誘導ソフトウェアは、電子地図による経路走行を想定したシステムである。図6(b)は誘導ソフトウェアにて、設定経路と走行経路をモニタ表示した結果である。ロボット内蔵の方位センサーのトラブルによる蛇行がみられるが、本測位システムによる測位は安定しており、経路誘導の可能性を確認できた。



※株式会社ブイ・アール・テクノセンター開発

(a) 実験の様子



(b) 誘導ソフトウェアによる走行経路表示

図6 経路走行実験

5. まとめ

無人搬送車のナビゲーションのための測位システムとして、超音波フェーズドアレイ技術と双方向通信技術を使用する超音波フェーズドアレイ測位システムを開発し、超音波ランドマーカの測位実験を行った。この結果、マーカまでの距離が遠く、かつ方位角が大きい場合に、超音波通信のSN比が低下し、測位精度が低下することを示した。特に方位角精度の低下に伴い測位誤差が著しく増大することが計測方法においても、課題であることを示した。一方、方位角精度が低下した場合でも距離精度は保たれていることから、2つのマーカまでの距離情報を用いて、GPSと同様の方法により位置計算する方法を取り入れた。この結果、SN比が低下する状況においても、方位角の計測精度を維持できることを示した。この方法は、経路のコーナー部など、マーカの計測方位角が大きくなり測位精度の低下が懸念される個所で有効と考える。さらに、移動装置を用いた経路走行実験により、その可能性を示した。今後は、測位距離の拡張および精度向上のための改良を重ねつつ、実用化のための課題解決を行っていく予定である。

謝辞

経路走行実験については、株式会社ブイ・アール・テクノセンターが開発した移動ロボットと誘導ソフトウェアにより、同社主体のもと実施され、実験データをご提供頂きました。ここに感謝の意を表します。

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2報)-超音波位置計測システムの精度向上-”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.14, pp.1-5, 2013.
- [4] B.W.Parkinson and J.J.Spilker, “Global Positioning System: Theory and Applications”, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1996.
- [5] 橋本雅文, 富家孝宏, 大場史憲, “冗長オドメトリ系とジャイロ情報の融合によるモジュール型全方向移動ロボットのデッドレコニング”, 日本機械学会論文集(C編), vol.66-645, pp.1613-1620, 2000.