

## 超音波通信を用いたロボットトラッキングシステム

伊藤 俊夫<sup>†1</sup> 杉本 雅則<sup>†1</sup> 橋爪 宏達<sup>†2</sup>

本研究では、超音波通信を用いた新しいロボットトラッキングシステムを提案する。従来のシステムと異なり、我々のシステムは距離の測定に位相一致法と呼ばれる手法を採用している。これによって、超音波送信機の位置測定を行うのに必要な受信機が一台で済むため、システム構築にかかる費用や手間を抑えることができると考えられる。

我々は、システムの性能を評価するためにモバイルロボットを用いた位置認識実験を行った。その結果、送受信機が近い状況では十分な精度でトラッキングを行うことができたが、送信機が静止している時と比べ、大きな性能悪化が見られた。

### Robot Tracking System Using Ultrasonic Communication

TOSHIO ITO,<sup>†1</sup> MASANORI SUGIMOTO<sup>†1</sup>  
and HIROMICHI HASHIZUME<sup>†2</sup>

In this paper, we propose a novel robot tracking system using ultrasonic communication. Unlike other ultrasonic-based localization systems, our system adopts the Phase Accordance Method for distance measurement, which enables the system to locate a transmitter using just only one receiver.

In order to evaluate the system, We have conducted localization experiments where the system tracks a moving robot. The result of the experiments shows that our system performs well when the transmitter is near the receiver, although the accuracy was much better when the transmitter and the receiver were fixed. The reasons for the error and the issues to be solved are discussed as well.

#### 1. はじめに

近年になって、ロケーションウェアコンピュータという概念が注目されるようになり、これまでに数多くの研究がなされてきた。ロケーションウェアアプリケーションは種々の技術を複合させることで実現されるが、その中でも必要不可欠な技術要素が位置認識システムである。現在、一般的に利用されているロケーションウェアアプリケーションの多くはGPS (Global Positioning System) によって利用者の位置情報を取得している。GPSは人工衛星を用いて利用者の地球上における絶対座標を導き出すシステムであるが、電波の届かない屋内では利用することができない。また、誤差も数メートル程度ということから、屋内環境においてより高い位置認識精度が要求されるアプリケーションには向かないという欠点がある。

屋内環境における位置情報を利用したアプリケー

ションについても既に多くの提案・研究がなされている<sup>6),8)</sup>。これらのアプリケーションには施設内のナビゲーションシステムや建築計画支援システム、あるいは拡張現実 (Augmented Reality) やモーショントラッキングシステムが含まれるが、本研究は特にモバイルロボットの位置認識システムを目標として進められている。

モバイルロボットの位置認識システムとは、実環境で動作するモバイルロボット及びそれを取り巻く環境中の様々なものの位置を測定し、その位置情報をリアルタイムでロボットに提供するためのシステムである。位置情報はモバイルロボットが周囲の環境に適応して行動する上で重要かつ基本的な情報と言える。現在のシステムでは、位置情報はモバイルロボット自身に搭載されたカメラなどのセンサの情報に基づいて推定されるのが一般的である。しかし、ロボットに搭載されたセンサだけでは取得できる情報に限りがあり、広範囲の位置測定を正確に行うことはできない。そのため、位置認識システムを環境に導入することで、より包括的で正確な位置情報をロボットに提供するというアプローチが検討されている。

このように、屋内向け位置認識システムがユビキタ

<sup>†1</sup> 東京大学大学院 工学系研究科  
Graduate School of Engineering, University of Tokyo

<sup>†2</sup> 国立情報学研究所  
National Institute of Informatics

スコンピューティング環境に対してもたらず恩恵は大きい。このため、これまでも数多くのシステムが研究され、提案されてきた。しかしながら、GPSのように一般的に広く利用されるような可能性を持ったシステムは未だ現れていない。このことの要因の一つとして、測定精度と導入コストのトレードオフが挙げられる。屋内向け位置認識システムが普及するためには導入の際に必要なコストが問題となるが、コストを抑えつつ、十分な位置測定精度を維持するのは非常に困難である。

このような背景から、本研究では低コストで高精度な位置認識システムの開発を目指している。高精度な位置測定を実現するために、本研究のシステムでは超音波を用いた位置認識手法を採用している。従来の超音波による位置認識手法では、超音波ノード（受信機あるいは送信機）一つで得られる情報が測定対象との距離あるいは角度のみに限られていた。そのため、対象の絶対的な位置を測定するためには複数のノードを環境中に設置し、それらで得られた複数の測定データから位置を推定する必要があった。これに対し、我々の提案手法では、1対の超音波ノードのみで対象の2次元的な位置測定を可能にしている。このため、本研究のシステムは他のシステムと比べ、導入の際に必要な超音波ノードの数を少なく抑えることができる」と期待される。

我々は既に提案手法を実装したプロトタイプシステムを開発し、それを用いて位置認識実験を行っている<sup>1),2)</sup>。これらの結果より、我々の提案手法は、少なくとも静止している物体の位置を測定する際には従来のシステムを凌駕する性能を発揮することが分かった。しかし、このシステムをロボットトラッキングに応用するためには、運動する物体の位置認識精度を正しく評価しなければならない。そこで、我々はモバイルロボットとプロトタイプシステムを用いてロボットトラッキングシステムを開発した。また、このシステムを用いてトラッキング実験を行い、提案手法の評価を行った。本稿では、この実験の内容と結果、およびそこから得られた今後の課題について、我々の提案手法とともに紹介する。

## 2. 関連研究

本研究のシステム以外にも、超音波を用いた位置認識システムはいくつか研究されている。

ActiveBat<sup>9)</sup>は超音波とラジオ波 (RF:Radio Frequency) を用いて距離測定を行うシステムである。このシステムは、主にモバイルデバイスやユーザに取り付けられた“Bat”と呼ばれる送信機と、天井に格子状に設置された受信機によって構成される。Batは一定の時間間隔でRFと超音波の信号を同時に送信し、天井の受信機がそれらを受信する。超音波の伝播速度に

比べてRFの伝播速度は十分に大きいので、受信機がRFを受信してから超音波を受信するまでの時間は、超音波が送信機から受信機まで伝播するのにかかった時間とみなせる。従って、信号を受信した受信機はRFと超音波の受信時刻の差を計算し、それに超音波の伝播速度を掛けることで自身とBatとの距離を算定することができる。各受信機は算出した距離データをネットワーク経由でサーバコンピュータに送信し、サーバコンピュータはそれらの情報からBatの位置を割り出す。評価実験では、測定値の95%が誤差9cm以内であったという結果が得られている。ActiveBatでは位置計算の処理の大部分をサーバコンピュータで行うため、Batや受信機にかかる計算負荷が軽く、消費電力を抑えることができる。

Cricket<sup>4)</sup>はActiveBatと同様、RFと超音波の受信時間差を利用して位置測定を行うシステムであるが、ActiveBatとは逆にモバイル側に受信機を配置し、環境側に送信機を設置する。Cricket Compass<sup>5)</sup>では受信デバイスに5個の超音波受信素子を搭載し、超音波伝播の行路差を利用することでデバイスの向きも測定することができる。方向測定の精度としては、送信デバイスの向きを0°とした場合、±30°の範囲で誤差3°という結果が得られている。また、位置測定の誤差は最良の場合5cm程度であるが、最悪の場合は25cmもの値になっている。

Smithら<sup>7)</sup>はCricketの位置測定の精度についてさらに詳細に調査している。彼らは特に、位置測定の対象となる物体が運動している場合にCricketの測定精度が低下することに着目し、鉄道模型を用いた動体トラッキングの実験を行っている。実験は、トラッキング対象となる模型機関車の速度を様々に変化させて行われた。この結果によると、対象が0.78 m/sの速度で動いた場合に位置測定誤差の中央値が約8 cm、対象が1.43 m/sの速度で動いた場合は中央値は約15 cmとなったと報告されている。

以上で述べた位置認識システムはいずれもTOA (Time Of Arrival) 方式と呼ばれる手法によって位置測定を行っている。TOA方式とは、超音波送信機から受信機へある超音波信号を送信し、その伝播時間を測定することで送受信機間の距離を測定する手法である。この手法では送受信機間の距離しか測定することができない。そのため、測定対象の絶対座標を求めるには、絶対座標が既知である3つ以上の異なる超音波ノードと対象との間の距離を測定し、それらを元に推定を行わなければいけない。1回の位置測定を行うために最低でも3つの距離測定値が必要となるため、これらのシステムでは環境に対して比較的密に超音波ノードを配置しなければならない。例えば、Smithらの実験では、3.5m × 1.3mのトラッキング領域に6個の超音波送信機を配置している。環境に設置しなければいけない超音波ノードが密になればなるほど、設置

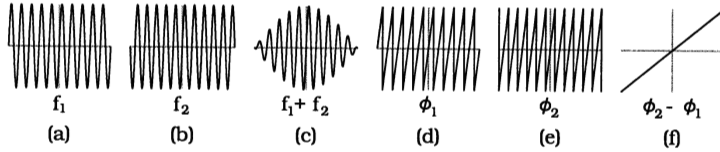


図 1 Sync pattern  
Fig. 1 Sync pattern

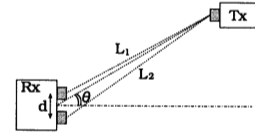


図 2 角度測定原理  
Fig. 2 Principle of  
angle measurement

の際のコストやキャリブレーションの手間などが増大し、システムの実用性が損なわれると考えられる。

従来のシステムに対し、我々のシステムは一つの受信機が超音波を受信すれば、送信機の 2 次元的位置を一意に定めることができる。これにより、環境に設置する超音波ノードの数を大幅に抑えることができると考えられる。受信機一つによる位置測定を可能にするために、我々のシステムは位相一致法 (Phase Accordance Method)<sup>2)</sup> と呼ばれる新しい手法を用いて非常に高精度な距離測定を行っている。次節では、位相一致法とそれを応用した位置認識手法について解説する。

### 3. 位置認識の原理

#### 3.1 距離測定原理

本研究のシステムでは送信機から受信機へ超音波を送信し、その伝播時間を計測することで送受信機間の距離を求める。送信機と受信機との間の距離  $L$  m は、送信機から受信機へ超音波が伝播した時間  $\Delta t$  s、超音波の伝播速度  $c$  m/s を用いて次のようにして求められる。

$$L = c\Delta t \quad (1)$$

音速  $c$  は 1 気圧の空気中では温度  $T$  °C を用いて  $c = 331.45 + 0.607T$  m/s で計算される。温度  $T$  が一定だとすると、距離測定値  $L$  の精度は  $\Delta t$  の検出精度で決まる。 $\Delta t$  を正確に測定するには、特に超音波の受信時刻を正確に検出できなければならない。

従来のシステムでは、超音波の受信時刻は受信信号の強度によって検出する場合がほとんどであった。この方法では、受信された信号の強度があるしきい値を越えた瞬間を超音波の受信時刻とする。しかし、超音波信号は超音波素子の周波数特性や媒体となる空気特性によって歪んでしまう。そのため、信号強度も送受信機的位置や環境によって大きく変化してしまい、検出される受信時刻に数十  $\mu$ s 程度の誤差が発生する。これは距離に換算すると 10~30 cm 程にもなる。信号強度を直接用いる代わりに、受信波形と参照波形の相関をとることで受信時刻を推定する手法も提案されている<sup>3)</sup>。しかし、この手法には計算コストが大きくなるという問題がある。

これに対し、我々のシステムでは、位相一致法と呼

ばれる手法によって受信時刻の検出を行っている。以下では、位相一致法とその特徴について述べる。

#### 3.2 位相一致法

位相一致法 (Phase Accordance Method) では超音波波形の位相に着目して受信時刻の解析を行う。そのために、送信機が送信する超音波波形には異なる複数の周波数の波が重ね合わさったものを用いる。この超音波波形を“sync pattern”と呼ぶ。

本研究のシステムでは周波数  $f_1 = 39.75$  kHz と周波数  $f_2 = 40.25$  kHz の二つの波を重ね合わせたものを sync pattern として使用した。この波の様子を図 1 に示す。図の (a)、(b) はそれぞれ周波数が  $f_1$ 、 $f_2$  の搬送波であり、図の (c) に見られる波がそれらを重ね合わせた sync pattern の形状を表している。形状から分かるように、これは周波数  $f_2 - f_1 = 500$  Hz のうなりの音波である。図 1 の (c) ではうなりの 1 周期分 (2ms) の波を表しており、送信機はこの波形を受信機に向けて送信する。

一方、図 1 の (d)、(e) はそれぞれ sync pattern を構成する二つの搬送波の位相を表している。また、(f) はそれらの位相の差である。ここで、sync pattern のうなりの 1 周期分の波には位相差  $\phi_2 - \phi_1$  が 0 となる時刻はただ一つしかないということに注意されたい。我々はこの時刻を位相一致点 (epoch) と呼んでいる。位相一致法では、位相一致点をもって sync pattern の受信時刻とする。

我々の先行研究<sup>2)</sup> が既に示しているように、位相一致点は受信波形とそれぞれの複素搬送波  $e^{j2\pi f_1 t}$ 、 $e^{j2\pi f_2 t}$  との内積演算を通じて解析的に求めることができる。位相一致法を用いることで、我々のシステムは sync pattern の信号強度によらず、標準偏差 0.2 mm 程度という高精度な距離測定を行うことができる。

位相一致法の利点としては、マルチパスの影響を受けにくいということも挙げられる。マルチパス波が誤差の原因として影響してくるのは直接波の受信中にマルチパス波が受信される場合であり、これは直接波の経路とマルチパス波の経路の差が信号の空間的な長さより短い場合に発生する。既に述べたように、位相一致法による距離測定で送信される超音波は 2ms の sync pattern 一つだけである。sync pattern の空間的な長さは 70cm 程度と比較的に短いものであるため、位相一致法による距離測定ではマルチパス波が混信し

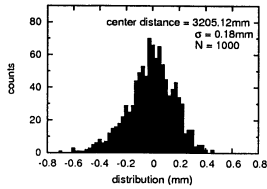


図 3 距離測定の誤差分布  
Fig.3 Error distribution of distance measurement

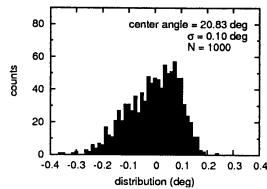


図 4 角度測定の誤差分布  
Fig.4 Error distribution of angle measurement

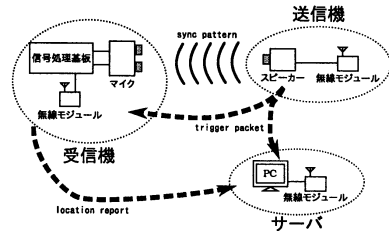


図 5 プロトタイプシステム構成図  
Fig.5 Prototype system

にくくなっている。

### 3.3 角度測定の原理

本研究のシステムでは送信機・受信機間の距離だけでなく、それらの位置する相対的な方向（角度）の計測も同時に行うことができる。ここでは、その原理について述べる。

角度測定のシステム概要を図 2 に示す。図のように、受信機には 2 つの受信素子が距離  $d$  だけ離れて設置されており、それぞれ送信機との間の距離測定を行う。2 つの受信素子を結ぶ線をベースラインと呼ぶ。角度測定ではベースラインの垂線と、ベースラインの midpoint と送信機を結ぶ線とのなす角  $\theta$  を求める。

送信機と受信機との距離がベースライン長  $d$  に比べて十分に大きい場合、それぞれの受信素子と送信機とを結ぶ直線は平行とみなせる。受信素子と送信機との距離は  $L_1, L_2$  として正確に測定されているので、これらの値とベースライン長  $d$  を用いて  $\theta$  は次のように計算される。

$$\theta = \arcsin\left(\frac{L_2 - L_1}{d}\right) \quad (2)$$

### 3.4 複合方式

以上より、本研究のシステムでは受信機に対する送信機の距離に加え角度も測定することができる。距離と角度を同時に測定し、それらを複合することで送信機の 2 次元位置を定めることから、我々はこの位置認識手法を複合方式 (integrated method) と呼んで、従来の TOA 方式などと区別している。位相一致法を用いない従来の手法では距離測定の精度が本研究のシステムほど高くないため、式 (2) によって角度  $\theta$  を信頼できる精度で算出するのは不可能である。そのため、従来のシステムでは異なる複数の点と対象との距離（または角度）の測定値から対象の位置を推定している。このことがシステムの実装に必要な送受信機の数を増やし、コストや管理の手間を増大させていることは 2 節で既に述べた通りである。

我々の先行研究<sup>1)</sup>では、複合方式によって静止している送信機の位置を測定する際の精度を実験によって評価している。この実験では、送信機を受信機に対して距離 3.2 m、角度 0° の位置に固定し、合計 1000 回の位置測定を行っている。その結果を図 3、図 4 に

示す。測定された距離および角度の平均値は真の値からわずかにずれている。しかし、この実験では送信機は巻尺を用いて人間の手で設置したため、距離にして数 mm 程度の誤差は発生しうる。また、このような系統誤差はキャリブレーションによって除去可能であるため、位置測定の精度としては測定値のばらつきに着目すべきである。そこで距離と角度の標準偏差を見てみると、それぞれ 0.18 mm、0.10° と、従来のシステムの 100 倍近い精度を実現していることが分かる。

以上の結果より、位相一致法を用いた複合方式が非常に高精度な位置測定を実現していることが言える。ただし、この結果は送信機が静止している場合のものであり、送信機が動き回った場合に同等の精度が得られるとは限らない。

## 4. システム構成

我々の開発した位置認識システムの構成を図 5 に示す。図に示されているように、本システムは送信機、受信機、サーバで構成される。現在のシステムでは、送信機とサーバがそれぞれ 1 台ずつ、受信機が複数台という構成となる。

送信機は超音波送信のタイミングを制御する無線モジュールと実際に超音波を送信するスピーカーからなる。まず、無線モジュールがシステム全体に RF トリガー信号を送って超音波の送信タイミングを通知する。それと同時にスピーカーは sync pattern の送信を行う。

複合方式による位置認識を行うために、受信機には二つのマイクが設置されている。二つのマイクは 80.2 mm だけ離れてアルミ製の箱に設置されている。sync pattern の受信は RF トリガー信号の受信と同時に開始される。信号処理基板にはマイコンやメモリ、AD コンバータが実装されており、受信信号のデジタル化から位相一致法の実行まで全て行う。位相一致法と複合方式によって送信機の相対位置を算出すると、信号処理基板はその情報を無線モジュールに渡す。無線モジュールは受け取った相対位置情報と受信機 ID を無線でサーバに送信する。このパケットを location report と呼ぶ。

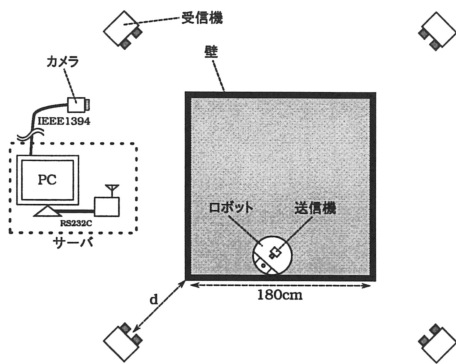


図 6 実験用トラッキングシステム (平面図)  
Fig. 6 Experimental tracking system (top view)

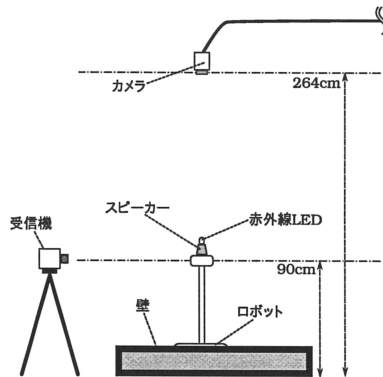


図 7 実験用トラッキングシステム (正面図)  
Fig. 7 Experimental tracking system (front view)

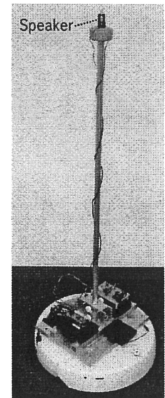


図 8 ロボット  
Fig. 8 Robot

一方、サーバは RF トリガー信号を受け取ると一定時間、location report が送信されてくるのを待つ。location report が一つ以上受信された場合、サーバ PC はその中から距離の測定値が最も小さいものを選び、それをを用いて送信機の絶対位置を算出する。これは、距離が小さければ小さいほど測定値に含まれる誤差が小さいと考えられるからである。サーバ PC はシステムに配置された受信機の絶対位置と向きを記録しており、送信機の絶対位置計算にはその情報が用いられる。

## 5. 実 験

前節で述べたプロトタイプシステムを用いて実験用のロボットトラッキングシステムを開発し、トラッキング実験を行った。本節ではトラッキングシステムの概要、実験の手順、およびその結果を述べる。

### 5.1 トラッキングシステム

図 6、図 7 に開発したロボットトラッキングシステムの平面図、正面図をそれぞれ示す。

このシステムでは、ロボットは木製の壁で囲まれた 180 cm 四方の領域を動き回る。ロボットには送信機が設置されており、壁の周囲に 4 つの受信機が配置される。受信機は壁からある距離 (図 6 の  $d$ ) だけ離れて設置される。本実験では、受信機の設置密度と位置認識精度との関係を調べるために  $d$  の値を 125 cm、175 cm、225 cm の 3 通りに変化させてそれぞれ実験を行った。

また、本実験ではシステムの性能を評価するために画像ベースの位置認識システムを別途実装し、組み込んでいる。画像ベースの位置認識では、ロボットに取り付けられた赤外線 LED を PC に接続されたカメラで撮影し、その画像フレーム中の LED の位置からロボットの実座標を計算する。カメラのレンズ部には赤

外線透過フィルタが取り付けられており、赤外線 LED のみをとらえるようになっている。精度の高い位置認識ができるよう、カメラは実験室の天井の高さおよそ 264cm の位置に真下を向けて取り付けられている (図 7)。

以下では、本システムの構成物についてそれぞれ述べていく。

#### 5.1.1 ロボット

本システムで使用するロボットは iRobot 社の “iRobot Create” である。iRobot Create は高さ 8cm、直径 35cm 程度の円盤状のロボットであり、二つの車輪によって平坦な床の上を動き回ることができる。ロボットの動作は UART 通信を通じて外部のマイコンなどからプログラムすることもできる。

本実験ではこのロボットに金属製の土台と棒を取り付け、図 8 のような状態で使用した。スピーカーは棒の先端の床から高さおよそ 90cm の位置に設置した。このように送信部を高くとったのは、床面に反射するマルチパスの影響を抑えるためである。また、ロボットの動きは「約 140mm/s の速度で直進し、壁にぶつかったら一定時間その場で回転する」ということを繰り返すようにプログラムした。

#### 5.1.2 受信機

本システムでは 4 つの受信機をトラッキング領域の周囲に設置し、それぞれが領域の中心を向くようにした。また、受信機のマイクの部分はスピーカーと高さと同じになるように三脚の上に固定した。

#### 5.1.3 スピーカー

既に述べた通り、ロボットは直進動作の他に回転動作も行う。ロボットが回転しても受信機が安定して超音波を受信できるよう、本システムでは図 9 に示す無指向性の超音波スピーカーを採用している。

#### 5.1.4 カメラ

カメラには解像度が 1620 × 1220 ピクセルである

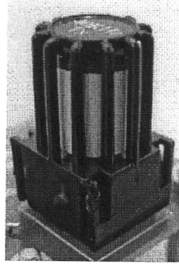


図9 無指向性スピーカー  
Fig.9 Omnidirectional speaker

カラーデジタルカメラを使用した。また、レンズは焦点距離が4.8 mmであるものを使用した。

このカメラを図7のように天井に設置したところ、トラッキングエリアにおける146cmが画像中のおおよそ940ピクセルとして撮影された。従って、カメラの実効的な解像度は1ピクセルあたり0.155 cmとなる。このことから、画像処理による位置認識の精度は誤差数mm以内であると考えられる。なお、レンズによる歪みは事前にチェスボードパターンを用いたキャリブレーションを行って補正している。

カメラから画像がキャプチャされるタイミングはPCによって制御される。また、PCは送信機からのRFトリガーを確認次第、画像のキャプチャを行うため、画像処理システムと超音波システムの間で時刻同期がなされる。キャプチャされた画像はPCによって処理され、ロボットの位置が計算される。画像処理にはOpenCVライブラリを使用した。

### 5.2 実験手順

実験では、ロボットを動作させた状態で40分間位置測定を続けた。位置測定はおおよそ800 msごとに行ったので、一回の実験につき約3000回の位置測定を行ったことになる。この位置測定実験を、 $d = 125$  cm、175 cm、225 cmのそれぞれについて繰り返した。

一回の位置測定で得られる位置情報は、画像処理による測定結果と超音波による測定結果の二つである。本実験では、これらの測定結果の差を超音波による位置認識の誤差とみなし、評価する。

なお、実験時の室温は19.9 °Cであった。

### 5.3 実験結果

図10は実験で取得した位置情報の一部を用い、ロボットの動いた軌跡を表示したものである( $d = 125$  cmの実験結果を使用)。図のCameraは画像処理によるものを、Usonicは超音波システムによるものを示している。図10より、我々の超音波システムは運動するロボットの位置を概ねトラッキングできているが、ところによって数cmから10cm程度の誤差が発生していることが見て取れる。以下では、誤差についてより詳細に調査していく。

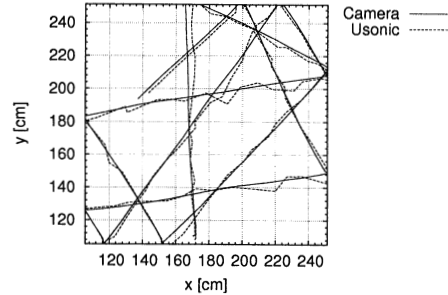


図10 トラッキング軌跡  
Fig.10 Localized path of the robot

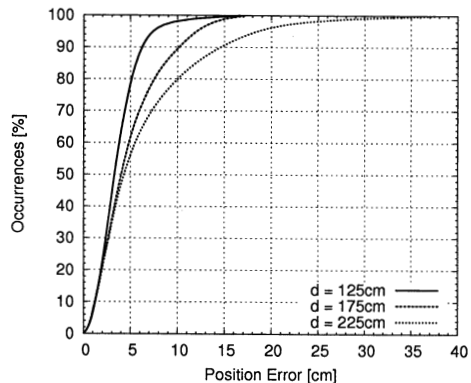


図11 トラッキング誤差の累積分布関数  
Fig.11 Error CDF of the tracking result

図11に位置測定誤差の累積分布関数を示す。ここで、位置測定の誤差は画像処理による測定結果と超音波による測定結果のユークリッド距離として定義している。図11より、受信機の配置がまばらになるに従ってトラッキング精度が悪化していく様子が分かる。送信機と受信機との間の距離が離れば離れるほど、受信されるsync patternには周囲の気流などの雑音の影響を受けることになり、精度が低下すると考えられる。最も条件の厳しい $d = 225$  cmの実験の場合、90パーセンタイルの誤差は14.6 cmとなっている。この程度の誤差であれば、例えば部屋の中にいる人間を識別する用途には十分な精度であると言える。しかしながら、本実験のように比較的小さなロボットをトラッキングするという状況では、この誤差は許容されるものではない。また、図11の実験結果は、図3および図4で示した静止実験の結果と比較すると100倍以上の性能悪化を示している。

既に述べた通り、複合方式による位置測定では距離と角度の測定値から2次元的位置を求める。従って、位置の測定誤差は距離と角度の測定誤差の関数となるはずである。これらの関係を調べるために、我々は位

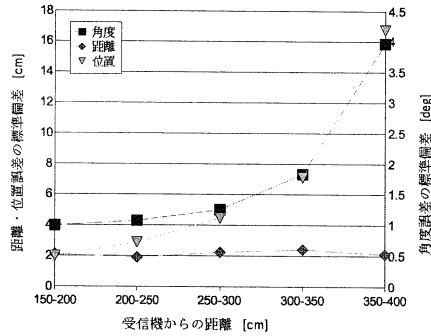


図 12 測定誤差の標準偏差

Fig. 12 Standard deviations of localization errors

置の測定誤差とともに距離と角度の測定誤差もそれぞれ算出した。さらに、これらの誤差を送信機と受信機との間の距離ごとに集計し、その標準偏差をとった。その結果を図 12 に示す。

図 12 から、送信機と受信機とが離れるに従い、位置測定の誤差が悪化していることが分かる。この結果は図 11 にも見られたものである。しかし一方で、距離測定誤差の標準偏差は送受信機間距離の変化の影響をほとんど受けず、ほぼ一定に保たれている。角度測定の誤差については位置測定の誤差と同様、送受信機間距離の増大に従ってばらつきが激しくなっていることが見て取れる。このことから、位置測定の性能悪化は主に角度測定の誤差によるものであることが分かる。

複合方式の位置認識では距離測定値  $r$  と角度測定値  $\theta$  を用いて  $x = r \cos \theta$ 、 $y = r \sin \theta$  として位置を求める。従って、ほとんどの場合、角度測定の誤差は距離測定の誤差よりも大きな位置測定誤差を与えることになる。例えば、送受信機間距離を 3 m とした場合、真の角度が  $0^\circ$  であるにもかかわらず  $1^\circ$  と測定された時の位置測定の誤差は  $300 \times \tan 1^\circ = 5.2$  cm となる。このことを踏まえて図 12 を見ると、観測された角度測定誤差がいかに大きいか分かる。

このように比較的大きな角度の誤差が発生した原因は、角度測定のアルゴリズムにある。本システムで測定される角度は式 (2) によって算出されるが、この式には  $(L_2 - L_1)/d$  という項が含まれている。このうち、 $(L_2 - L_1)$  の項には距離測定の誤差が含まれるが、その誤差は非常に小さく、送受信機間距離によってもほとんど変化しないと考えられる。ところが、我々のシステムでは、機器を小型化するためにベースラインを  $d = 80.2$  mm という比較的小さい長さに設定した。このため、 $(L_2 - L_1)$  の誤差の微小な拡大が増幅され、図 12 のように  $\theta$  の誤差が激しく拡大したものと考えられる。

非常に大きな位置測定誤差が観測された理由としては、超音波スピーカーの指向性の問題も挙げられる。

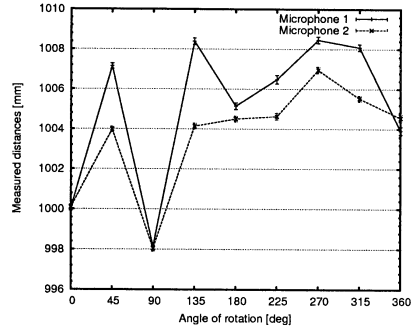


図 13 無指向性スピーカーによる距離測定結果

Fig. 13 Distance measurements with the omnidirectional speaker

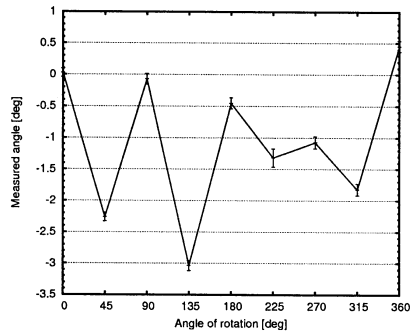


図 14 無指向性スピーカーによる角度測定結果

Fig. 14 Angle measurements with the omnidirectional speaker

5.1.3 節で紹介したように、本実験では無指向性のスピーカーを用いている。実際、このスピーカーを用いることでロボットが回転した場合でも安定した位置認識を行うことができた。しかし、このスピーカーにあるわずかな指向性が、位置測定結果にある程度の系統誤差を生むことが予備実験によって明らかになっている。

この予備実験では、送信機を受信機から距離 1 m、角度  $0^\circ$  の位置に設置し、スピーカーを  $45^\circ$  ごとにその場で回転させながら位置測定を行った。距離測定と角度測定の結果をそれぞれ図 13 及び図 14 に示す。なお、図 13 では二つのマイクそれぞれで観測された距離について示しており、エラーバーはそれぞれの位置測定における標準偏差を表している。これらの図より、スピーカーが回転するに従って、距離測定については約 1 cm、角度測定については約  $3^\circ$  もの範囲で測定値が変化していることが分かる。個々の測定における標準偏差が非常に小さいことから、これらの誤差はスピーカーに由来する系統誤差であると言える。この実験より、本実験で使用した無指向性スピーカーには実は指向性があり、それは位置測定結果の系統誤差

の変化として現れることが分かった。

スピーカーの向きによって変化する系統誤差が、ロボットトラッキング時の位置測定誤差に大きく寄与したと考えられる。トラッキング実験ではロボットは常に動き回るため、送信機から見た受信機の向きも時々刻々と変化する。さらに、位置測定に利用される受信機自体もロボットの位置によって切り替わっていく。このようなことから、スピーカーの指向性に起因する系統誤差が動的な誤差として観測されたと考えられる。

## 6. 結論と今後の課題

本稿では、まず超音波を用いた既存の位置認識システムを紹介し、その共通の欠点として位置測定を行うために複数のノード間距離（あるいは角度）の情報が必要であることを述べた。次に、我々の提案する位相一致法と呼ばれる手法を紹介し、これを用いることで受信機一台で送信機の二次元的な位置を高精度に測定できることを示した。我々は、提案手法が運動する物体のトラッキングにおいてどれほどの精度を発揮できるかを調べるためにロボットトラッキングシステムを開発し、位置認識実験を行った。その結果、最悪のケースで誤差の90パーセントが14.6 cmとなった。これはシステムを利用するアプリケーションの種類によっては十分な精度と言えるものの、静止している物体の位置測定を行う場合と比べ、100倍近い性能悪化を示している。そこで、今後の課題としては、システムのトラッキング精度の向上とさらなる応用範囲の拡大が挙げられる。

本実験では、トラッキング時の誤差拡大の要因として、短いベースラインによる角度誤差の拡大と、スピーカーの指向性による位置測定の系統誤差の存在が明らかになった。前者については、ベースラインの長さを維持する限り、解決するのは難しい。一方、後者は系統誤差に由来する誤差なので、適切なキャリブレーションを行うことで理論的には除去することができる。しかし、現在のシステムでは、受信機がロボットの向きを知る術を持たないため、キャリブレーション自体を行うことができない。ロボットの向きを知るためには、例えばロボットに送信機を3つ搭載し、それら全ての位置測定をすればよい。しかし、送信機が複数ある場合でも、超音波信号の衝突を避けるために一度に測定できる送信機は1つに限られる。従って、ロボットが動いている場合、異なる時刻で得られた送信機の位置情報から現在のロボットの向きを推定するアルゴリズムが必要となる。

本実験では、ロボットは140 mm/sの速度で動いた。しかし、人間の歩く速度はおおよそ1 m/sとされている。実用的なアプリケーションへの応用を目指すのであれば、本システムはこの速度で動く物体の位置も正確に測定できなければならない。3.2節で述べ

たように、位相一致法の計算では受信信号と  $e^{j2\pi f_1 t}$ 、 $e^{j2\pi f_2 t}$  との内積計算が含まれるため、キャリア周波数  $f_1$ 、 $f_2$  は既知の値として取り扱っている。しかし、送信機が1 m/s程の速度で運動すると、受信信号のキャリア周波数がドップラー効果によって無視できないほど変化し、位相一致法の計算結果に大きな誤差をもたらすことが明らかになっている。この問題に対し、我々は既に受信信号をフーリエ解析することでドップラーシフト量を推定する手法を考案し、いくつかの実験でその効果を検証している。今後は、これをトラッキングシステムに導入し、より速く動くロボットなどを用いてシステムのトラッキング精度を改めて評価する予定である。

## 参考文献

- 1) 橋爪 宏達、金子 歩、杉本 雅則: 位相一致法による正確な超音波位置認識手法とその特性、電子情報通信学会論文誌 A、Vol.J-90A、No.4、pp.435-447 (2008).
- 2) Hashizume H., Kaneko A., Sugano Y., Yatani K. and Sugimoto M.: Fast and Accurate Positioning Technique Using Ultrasonic Phase Accordance Method, *TENCON 2005 2005 IEEE Region 10*, pp.1-6, (2005).
- 3) Hazas, M. and Ward, A.: A Novel Broad-band Ultrasonic Location System, *Proceedings of UbiComp 2002: Ubiquitous Computing*, pp.264-280, (2002).
- 4) Priyantha, N.B., Chakraborty, A. and Balakrishnan, H.: The Cricket Location-Support system, *Proc. 6th ACM MOBICOM*, pp.32-43 (2000).
- 5) Priyantha, N.B., Miu, A., Balakrishnan, H. and Teller, S.: The Cricket Compass for Context-Aware Mobile Applications, *Proc. 7th ACM MOBICOM*, pp.1-14 (2001).
- 6) Schilit, B., Adams, N. and Want, R.: Context-Aware Computing Applications, *Proc. Wksp. Mobile Comp. Sys. App.*, pp.85-90 (1994).
- 7) Smith, A., Balakrishnan, H., Goraczko, M. and Priyantha, N.B.: Tracking Moving Devices with the Cricket Location System, *Proc. 2nd ACM MOBISYS*, pp.190-202 (2004).
- 8) Teller, S., Chen, K. and Balakrishnan, H.: Pervasive Pose-Aware Applications and Infrastructure, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.23, No.4, pp.14-18, (2003).
- 9) Ward, A., Jones, A. and Hopper, A.: A New Location Technique for the Active Office, *IEEE Personal Communications*, Vol.4, No.5, pp.42-47, (1997).