無指向性超音波センサと無線通信を併用した 室内移動ロボット用高精度位置・姿勢計測システムの開発*

青柳 誠司** 能登 肇*** 岸本 博吉+ 高野 政晴**

Development of a Position and Orientation Localization System for an Indoor Mobile Robot
Using Non-directional Ultrasonic Sensors and Radio Frequency Wireless Communication

Seiji AOYAGI, Hajime NOTO, Hiroyoshi KISHIMOTO and Masaharu TAKANO

A high-precision position and orientation localization system for an indoor mobile robot, which utilizes non-directional ultrasonic sensors and radio frequency wireless communication, is proposed in this paper. The transit times of the ultrasonic pulses from a transmitter attached to the robot to four receivers located on the ceiling are measured, and the transmitter's position is obtained by a simple triangulation principle. An electric spark, which works as a non-directional point sound source, is adopted as a transmitter. Since the transit times are obtained by a subsystem set on the ceiling, a measurement demand signal and transit times data are sent via wireless communication between the robot and the ceiling. A position measuring method proposed in this paper estimates in real time both the delay time of wireless communication caused by the modulation process and the sound velocity in the measured space. Static position accuracy of this system is experimentally inspected. It is proved that the accuracy is several mm and fairly good compared with other systems using image processing, etc. The developed system is mounted to a mobile robot and practical dynamic position and orientation accuracy is also inspected.

Key words: mobile robot, position and orientation localization, non-directional ultrasonic sensor, wireless communication

1. 緒 言

今後の高齢化社会を迎えるにあたり、工場内のみならず病院内、家庭内等で介護や家事等の複雑で汎用性の高い作業を行う室内移動型福祉・ホームロボットの開発が望まれている。移動ロボットのナビゲーションを行う場合、室内における絶対的なロボットの位置・姿勢を知ることが有効である。このための基本的な手法として車輪の回転量を積分するデッドレコニングがあるが、床面と車輪との間の滑りにより走行距離が長くなるほど誤差が蓄積してしまう。このため何らかの外界センサを用いて環境における自己の絶対的な位置・姿勢を測定し、このデータを用いてデッドレコニングによる位置・姿勢を修正する必要がある¹⁾。外界センサを用いる最も簡単な方法は床に埋め込んだ誘導線によるものであり、最も高度な方法はTVカメラで周囲を観測しながら走行することである。しかしながら前者は環境変化のコストが大きく、頻繁なルートの変更に対応することが困難であり、後者は環境変化は不要だが、実用に耐えうる画像認識技術がまだない。

そこで環境中の既知の位置に存在するランドマークを検出することで室内でのロボットの絶対位置の検出を容易にする方法が有効である²⁾。エアコンの吹出し口等環境に既に存在するものをランドマークとして利用する方法も提案されているが³⁾、これらはロボットが必要とする場所に必ずしも設置されているとは限らないという問題点がある。新たにランドマークを設置する方法として、コーナキューブ等のレーザ反射装置を用いる方法⁴⁾、偏向フィルムなどの反射板を用いる方法⁵⁾、特定の工学的パターンを画像処理する方法²⁾⁶⁾⁷⁾などが提案されている。これらの方法は複雑で高価な検出装置を必要とし、またマークの大きさも画像処理の

精度等の制約から小さくするのが困難であると思われる。このため筆者らのうち高野はランドマークの代わりにアクティブにLED光⁸⁾、超音波⁹⁾等を発生する灯台を室内天井に設置する手法を提案してきた。灯台はランドマークと異なりサイズを駆動回路の工夫により人に目立たない程度に小さくできる可能性があり、これを安価に作製できれば環境変化は小さくて済む。しかもロボット側の受信装置で灯台までの角度または距離の情報を獲得することで、高度な画像処理等を用いることなく簡単な三角測量の原理により高精度で確実、リアルタイムに位置・姿勢の計測が可能となる。

この灯台の概念に基づいて文献8)では赤外LED灯台とPSD素子を組み合わせて計測システムを構成したが、路面に凹凸がありロボットが傾いた場合PSDから得られる仰角情報が不正確となり、角度を用いた測量を行うため位置計測精度が大きく劣化してしまった。また文献9)では市販のバイモルフ型超音波センサを用いて計測システムを構成したが、共振を用いたバースト波を送受信するため波形の立上りが鈍く、正確な超音波の到達時間を検出するのが困難であった。また素子の指向の半減角が $\pm 50^\circ$ と制限されているため高い精度で計測ができる範囲が制限された¹⁰⁾。このような事情から現状では上記両システムとも $\pm 30\text{mm}$ 、 $\pm 10^\circ$ 程度の絶対位置・姿勢計測精度しか得られていない。

これらの精度の改善を目指して、本研究では上記超音波灯台システムを参考にし、ロボット側に設置した無指向性点音源に近似可能な電気火花放電を用いた超音波発信器と¹¹⁾、天井(環境側)に設置した市販の無指向性コンデンサ型マイクロホンを組み合わせて、立上りの鋭い超音波パルスの伝播時間計測に基づいて位置・姿勢を計測するシステムを提案・開発した。本システムでは無線通信を併用しており、無線の遅れ時間および測定空間内の音速を未知数としてリアルタイムで正確に推定する位置計測手法を新たに提案した。また開発したシステムの位置・姿勢計測精度を実験的に検証した。

* 原稿受付 平成11年11月9日

** 正会員 関西大学工学部(吹田市山手町3-3-35)

*** NTT(株) (武蔵野市緑町3-9-11)

+ 学生会員 関西大学大学院

Fig.1 Composition of position and orientation localization system

なお本研究は筆者らが提唱している、「人間が許容できる最小限の範囲で作業環境を改変することにより、現状のロボット技術で目的作業の達成を容易にする」という RECS (Robot-Environment Compromise System) コンセプト¹²⁾に基づいて遂行されている。本研究における環境側の改変は天井への超音波受波器の設置であり、これによりロボットが容易に高精度な自己位置・姿勢情報を獲得することが可能となる。

2. システムの構成と特徴

本章では、提案・開発する計測システムのハードウェア構成と計測手順を述べ、それに関連するシステムの特徴を列挙して説明する。また次章で詳述する位置計測原理（ソフトウェア）に関連する特徴もあわせて列挙することで、本システムの全体的な特徴を俯瞰し、次章以降の論旨を明確にすることにする。

2.1 システム構成と計測手順

本計測システムの構成を図1に示す。天井の既知の位置に複数の超音波受波器を設置し、移動ロボットに姿勢の計測も考慮して2個の超音波発信器を設置する。超音波パルスの伝播時間を測定することにより、次章で述べる計測原理に従って各発信器の位置（ロボットの位置）が測定できる。2個の発信器とロボットとの相対位置関係が既知であればロボットの姿勢も容易に求めることができる。

ロボット側には超音波発信器の他に、無線送受信装置とワンボードコンピュータが搭載されており、これらを合わせてロボット側システムと呼ぶ。一方、天井に設置された各受波器はプリアンプを具備しており、そこから有線で伝播時間測定回路に接続されている。またこの回路には無線送受信装置が併設されている。これらを合わせて天井側システムと呼ぶ。

計測処理手順を図2に示す。ロボット側システムは自己の位置データを必要とする時に、天井側システムに計測をこれから始めたい旨を無線で通知して、超音波パルスを発信する。この無線信号を以下「計測要求」と呼ぶ。一方天井側システムは計測要求を受信すると、伝播時間測定回路がクロックパルス（周期 200ns）のカウントアップを開始する。この回路は各受波器における超音波の到達時点を検出し、その各時点のカウント値を保存する。こ

Fig.2 Schematic flowchart of localizing process

Fig.3 Received pulse waveform by electric spark discharge

の各カウンタ値（これに上記周期を乗ずれば伝播時間となる）は無線によるシリアルデータ通信によりロボット側に送出される。ロボット側システムのコンピュータは天井側システムより返された伝播時間データを用いて三角測量の原理により発信器の位置を計算する。

2.2 本計測システムの特徴

本計測システムの特徴を以下各項目ごとに説明する。

2.2.1 電気火花を用いた無指向性超音波発信器の採用

移動ロボットは2次元平面内で様々な位置・姿勢をとるので発信器は測定精度、指向性の観点から無指向性点音源であることが望ましい。そこで本研究では無指向性点音源に近似可能（指向角 $\pm 90^\circ$ ）で、立上りの鋭い超音波パルスを発生でき、音圧もロボット計測の用途に十分なもの（1 m で 10 Pa）が得られる電気火花放電を超音波発信器として採用した¹¹⁾。適切な放電ノイズ対策¹¹⁾を行うことにより本システム自身および周辺機器の誤動作は完全に防止されている。

超音波受波器として、コンデンサマイクロホン（B & K 社製、型式 4138、帯域 0~160 kHz、直径 1/8 インチ）を採用した。本受波器の指向の半減角は $\pm 80^\circ$ であり¹³⁾、近似的に無指向性とみなせる。このため受波器を走査させたり多数用いたりすることなしに物体からの反射波形を計測することができ、装置構成が簡便となる。図3に電気火花放電より発信された超音波パルスを本受波器で受信した受信波形を示す。

2.2.2 ゼロクロス点を採用した高精度到達時刻検出

超音波パルスの到達した時点として図3に示すしきい値から先のゼロクロス点を用いることにより、測定距離の変化等に伴う振幅の変化の影響を受けにくくしている¹¹⁾¹⁴⁾。このため、1 m で ± 0.1 mm 程度の高い距離測定精度が実現できる。

2.2.3 距離を用いた三角測量による位置計測

ランドマークを画像処理する方法や LED 灯台を用いる方法では角度情報を用いた測量を行うため、路面の凹凸、傾きにより大きく位置計測精度が劣化する。これに対して本システムでは距離情報を用いた三角測量を行うためロボットの傾きに影響されず、比較的高い精度で発信器の位置が計測できる。

Fig.4 Frequency modulation method of wireless communication

2.2.4 超音波と無線の併用

ロボット側システムと天井側システムの間では、超音波の他に計測要求、伝播時間情報の信号をやりとりする必要がある。ロボットは室内の様々な場所に移動するため、両システムを有線で接続することは好ましくない。また超音波自体を変調してこれらの信号として用いるのでは通信速度が遅すぎる。そこで本計測システムでは無線通信を採用した。

2.2.5 無線による遅れ時間のリアルタイム推定

一般にFM変調方式の無線通信には図4に示すような変調・復調処理時間に起因する信号伝達の遅れ時間が存在する。さらに壁や床の反射に起因するマルチパスの影響によりこの遅れ時間は一定でなくばらついた値をとる¹⁵⁾。本研究で採用した無線送受信モジュール（ヘルツ電子（株）製、型式 HRF-260-T/RB、仕様 260MHz 搬送波、通信レート 9600bps）においては、表1に実験値を示すように伝送距離により変動する $160\mu\text{s}$ 程度の遅れ時間があり、この遅れ時間は同一距離においても $2\mu\text{s}$ 程度の標準偏差でばらつく。従って超音波を発信した瞬間に無線で1ビットの信号を送る方式⁹⁾では、天井側システムは正確な発信時刻を知ることができない。音速を 340m/s と仮定して $160\mu\text{s}$ は 54mm の距離に相当し、これはロボットの高精度な位置計測において無視できない誤差である。本研究では冗長な受波器を用いて無線の遅れ時間をリアルタイムで高精度に推定する手法を提案した。これに関する具体的な計算手順等の詳細については次章において説明する。

2.2.6 測定空間内の音速のリアルタイム推定

音速は空間的、時間的に変動する。本研究では新たな音速補正センサを別に設けることなしに、測定空間内の平均的な音速を未知数としてリアルタイムで推定する手法を提案した。これに関する具体的な計算手順等の詳細については次章において説明する。

Table 1 Example of average and standard deviation of delay time at carrier frequency of 260MHz (Unit; μs)

Communication distance	1m	2m	3m
Delay time	158.3	165.8	164.8
Standard deviation	2.4	2.1	1.6

※Delay time between transmitting time and receiving time of signal '1' is measured for 100 times for each communication distance.

3. 位置計測原理

まず無線の遅れ時間が無い場合を考える。発信器・受波器間の超音波伝播時間 t を測定すると、音速 C が既知ならば距離 $L = C \cdot t$ が求まる。ロボットが床面を移動する場合発信器のZ座標の値が既知なので、2個の受波器までの距離から発信器の位置（XY座標）が計算できる。冗長な受波器を1個用いて3個の受波器までの距離が分かれば音速 C を未知数として取り扱え、測定空間内の平均的な音速が推定できる。

実際には無線の遅れ時間があるので、本システムではこれを考慮して図5のタイミングチャートに示すように無線で計測要求を送信した後に、意図的に間隔 t_a (2ms) をおいて超音波を発信する。天井側システムの伝播時間測定回路は計測要求を受信した時点から計測開始時刻 $t=0$ とし、各受波器のゼロクロス点 t_i ($i=1 \sim n$, n は受波器の個数) を検出する。なおこの回路は全受波器で共用するので、各受波器の計測開始時刻は同一となる。図5に示すように無線の遅れ時間を t_r とし $t_{d1} = t_a - t_r$ とする。また実際のパルス到達点からゼロクロス点までの遅れ時間を t_{d2} とし、 $t_d = t_{d1} + t_{d2}$ とする。 t_d は各受波器に対して一定の値であるが t_r が不明のため未知の値であり、これを未知パラメータとして扱う。

実際の伝播時間は $t_i - t_d$ で表され、発信器を (X, Y, Z) 、受波器を (x_i, y_i, z_i) として以下の式が成立する。

$$(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2 + (Z - z_i)^2 = C^2 \cdot (t_i - t_d)^2 \quad (1)$$

ここで未知数は X, Y, C, t_d であり、冗長な受波器を2個用いて合計4個の受波器を用いることにより C, t_d が推定できることになる。ただし式(1)は解析的に解けないため、非線形最小二乗法により数値的に解く。繰返し演算の初期値は音速を 340m/s と仮定したときの X, Y, t_d の解析解を用いる。

Fig.5 Timing chart of measuring procedure

Fig. 6 Setting of measurement coordinate system

4. 静的位置計測精度の検証実験

4.1 計測座標系の設定

計測座標系は受波器の位置を基準として以下の手順で設定した。(1) 天井に設置した4個の各受波器 $R_1 \sim R_4$ から鉛直下方に振り子を付けた糸を垂らし、床面との交点をプロットする。また糸の長さをメジャーで測定し、これを各受波器の z 座標 $z_1 \sim z_4$ とする。(2) プロットした点と点の間の距離をメジャーで測定し、図6に示すように $R_1(0, 0, z_1)$, $R_2(a, 0, z_2)$, $R_3(b, c, z_3)$, $R_4(d, e, z_4)$ を求める。

この設定法は床面が凹凸のない平面で、かつ重力加速度の方向に対して正確に垂直をなしているという条件の下で有効であるが、一般の室内ではこの条件は満たされていない。またメジャーによる測定誤差も計測座標系設定誤差の要因となる。本実験ではこのような現実的な計測座標系の設定誤差が存在する条件下で、本システムの位置計測精度を検証する。

4.2 実験条件および結果

校正基準として 4×4 個の 100mm 間隔の格子点を水平基準器で水平を確認した作業台上に設けた。超音波発信器を各格子点に設置し、その位置をそれぞれ100回計測した。4個の受波器の中央付近において高さ1 (668.9mm)、高さ2 (1023.9mm) の2種類の高さに格子点を設置する(それぞれ条件A, Bと呼ぶ)、4個の受波器の周辺部分において高さ1に格子点を設置する(条件Cと呼ぶ)という3通りの条件において計測を行った。各条件における受波器と格子点の2次元配置を図7に示す。

100mm 間隔で隣り合う格子点のすべてのペア(24通り)において、測定座標から格子点間距離を求めた結果を表2に示す。これより本条件下での距離計測精度は中央付近で 0.7mm 、周辺部分で 1.1mm 程度であり、間接的にはあるが本システムが高い位置計測精度を有していることが判明した。

最小二乗法により測定座標(100回計測の平均値)と最も一致するような格子点を求め、これよりの測定座標の誤差を求めた結果を図8および表3に示す。中央付近(条件A, B)では誤差ノルムは約 2mm 程度に収まっている。周辺部分(条件C)では誤

Fig. 7 2-D layout of receivers and lattice points

Table 2 Results of measured distance between two lattice points (Unit: mm)

	Condition A	Condition B	Condition C
Average of error	0.7	0.7	1.1
Standard deviation	0.1	0.1	0.2

※Distance between each adjacent lattice point is measured for 100 times. Average of absolute error from 100mm and standard deviation are calculated. These values are obtained for all 24 pairs of lattice points and average of them are shown in this table.

Table 3 Results of static position measurements (Unit: mm)

	Absolute error				Error norm	
	X coordinate		Y coordinate		$\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$	
	Average	Max.	Average	Max.	Average	Max.
Condition A	0.3	0.6	1.0	2.2	1.1	2.2
Condition B	1.0	1.7	0.5	1.2	1.1	2.0
Condition C	1.0	2.7	1.3	3.0	1.9	3.5

※Average and max. value for 16 lattice points data are shown.

Fig. 8 Results of error distribution of static position measurement

Fig. 9 Error of XY coordinates caused by distance measurement error

差ノルムが最大で 3.5mm 程度と劣化しており、計測座標のばらつきも特に X 方向において 1mm 以上と大きい。

4.3 誤差要因の考察

誤差要因としては、1) 音速の補正誤差に伴う距離測定誤差、2) 計測座標系の設定誤差、が主に考えられる。

4.3.1 音速補正に伴う距離測定誤差

本計測法では測定空間内の平均的な音速を推定計算しているが、これは発信器から各受波器への超音波伝播経路における真の音速とは異なる。この音速補正誤差により距離測定誤差が生じてしまう。図 8(a), (b)より格子点の高さが高い方が精度が良いが（特に y 方向）、これは図 9(a)に示すように天井と発信器との距離が大きいほど距離測定誤差が大きな感度で XY 座標の測定誤差に影響することで説明できる。また図 8(c)より条件 C では精度が劣化し、 X 方向の計測値のばらつきが大きい理由も同様に図 9(b)より定性的に説明できる。

4.3.2 計測座標系の設定誤差

本実験では 4.1 節で述べたように基準座標系の設定誤差が存在する。例として条件 B の場合においてすべての受波器の z 座標に +10mm の誤りがあった場合、受波器 R_1 の z 座標にのみ +2mm の誤りがあった場合の 2 条件下で精度をシミュレーションした結果、誤差ノルムの平均値は前者で 0.8mm、後者で 2.5mm となった。これよりすべての受波器の高さ情報に共通の大きな誤差がある場合よりも、1 つの受波器のみに小さな誤差がある場合の方が、大きな位置計測誤差が生じることがわかる。これは本計測法が発信器の Z 座標を既知として XY 2 次元座標を求めるためであり、定性的に図 10 から説明できる。これより将来的に 4 個の受波器をプレートに固定する等、相対的な高さ情報を正確に得る工夫を行えば精度が改善される可能性がある。

4.4 本システムの精度の有効性に関する検討

表 3 に示したように本システムは天井、床面の整備を行わない一般の室内において、1.5m 四方程度の測定領域の中央付近で約 1mm、周辺付近で約 2mm の XY 座標計測精度（平均値）を有しており、比較的安価な超音波素子と簡単な距離を用いた三角測量の原理を用いて、現在提唱されている他のシステムより 1 けた程度高い計測精度を得ることができるのが特徴である。また測定空間の拡大に関しては、多数の受波器を用いて 4 個の受波器を切り替えながら計測を行うことで対応可能である。

作業対象物の付近に移動ロボットを粗く位置決めした後、対象物との相対位置情報を得てセンサフィードバック制御を行えばよいので、位置計測精度は数十 mm で良いという議論もあるが、精度が良い程度位置決め後の作業が容易になることは明らかである。また対象物の絶対位置が正確に与えられているような用途では、位置計測精度が高ければ上記センサ制御が不要になる可能性もある。従って、本システムの 2mm 程度の精度は室内移動ロボットに必要な位置計測精度として十分であると考えられる。

5. 動的位置・姿勢計測精度の検証実験

5.1 移動ロボットのシステム構成

図 11 に外観を示す移動ロボットを試作し、開発した位置・姿勢計測システムを搭載した。本ロボットは左右に 2 個の駆動輪、

Fig.10 Influence of setting error of receivers' positions on XY accuracy

Fig.11 Outline of developed indoor mobile robot

Fig.12 Orientation calculation combined with dead reckoning information

前後に 2 個のキャスタを持ち、駆動輪の速度差で回転運動を行う。駆動輪の回転角度はエンコーダにより検出可能である。

5.2 デッドレコニング情報を併用した姿勢計測

本計測システムでは、移動ロボットの位置のみでなく姿勢も計測するために 2 個の発信器をロボットに設置している。図 12 に示すように 2 次元平面内において、2 個の発信器を結ぶ直線の垂線方向と、計測座標系の x 軸方向とのなす角をロボットの姿勢角 θ と定義すれば、 θ は 2 個の発信器の位置から容易に求めることができる。

本計測システムでは、混信を防ぐために 2 個の発信器は交互に発信を行う。従って本システムで得られるのは図 12 に示すように $T_{1(n-1)}(X_{1(n-1)}, Y_{1(n-1)})$ と $T_{2n}(X_{2n}, Y_{2n})$ であり、両者にはタイムラグが生じる。時刻 n における移動台車の姿勢を算出するためには T_{1n} と T_{2n} の位置が両方必要なので、デッドレコニング情報を利用して $T_{1(n-1)}$ から $\hat{T}_{1n}$ を推定する。以下その手順を述べる。図 12 において時刻 $n-2$ における姿勢 θ_{n-2} が本システムより得られているとする。時刻 $n-2$ から $n-1$ までの間のデッドレコニングにより得られる姿勢変化を $\Delta\theta_{n-1}$ とすると、時刻 $n-1$ での姿勢の推定値 $\hat{\theta}_{n-1}$ は、

$$\hat{\theta}_{n-1} = \theta_{n-2} + \Delta\theta_{n-1} \quad (2)$$

により得られる。これと実測される $T_{1(n-1)}(X_{1(n-1)}, Y_{1(n-1)})$ およびデッドレコニングから得られる ΔX_n , ΔY_n を用いて、

$$\hat{T}_{1n} = \begin{bmatrix} \hat{X}_{1n} \\ \hat{Y}_{1n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{1(n-1)} \\ Y_{1(n-1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \hat{\theta}_{n-1} & \sin \hat{\theta}_{n-1} \\ -\sin \hat{\theta}_{n-1} & \cos \hat{\theta}_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_n \\ \Delta Y_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

※Receivers' positions are same as condition A in Fig.7.

Fig.13 Results of dynamic position measurement

により $\hat{T}_{1n}$ が推定できる。この推定値 $\hat{T}_{1n}$ と実測値 T_{2n} より姿勢 θ_n が計算できる。以上の手順を繰り返すことでロボットの姿勢が常に計算できることになる。

5.3 動的位置・姿勢計測精度の検証実験

移動ロボットの両駆動輪に同じ指令速度を与えることにより直線軌道を約 80mm/s で走行させ、本システムでその位置・姿勢をサンプリング周波数 4Hz で計測した。また校正基準としてモーションキャプチャシステム Vicon370 (Oxford Metrics 社製) を用いて同時にロボットの位置・姿勢を計測した¹⁶⁾。このシステムは多数の球状の反射マーカを多方向から CCD カメラで撮影してその 3 次元座標を得るものであり、サンプリング周波数は 200Hz、精度は公称で 0.1mm である。ただしこのシステムは高価であり、人体動作計測が主な用途であるため計測範囲が制限され、低コストな室内移動ロボットの位置・姿勢計測システムの用途には本来適していない。

2 個の超音波発信器、2 個の反射マーカをロボットに取り付けて計測を行った。計測に先立ち測定空間内の 8 点において両システムでロボットの位置を測定し、それらが最も一致するような両システム間の座標変換行列を求め、実際の計測においてはこれに従って Vicon370 システムの計測結果を本システムの座標系での値に変換した。結果を図 13 に示す。本システムと Vicon370 システムの計測結果は位置で最大 2mm、角度で最大 0.4° 程度の偏差があるものの、精度良く一致している。これより本システムがロボットの動的位置・姿勢計測の用途にも十分有効であることが確認された。

サンプリング周波数は現在のところ 4Hz と遅いが、超音波の伝播時間は最大で 14ms (音速を 340m/s とし 4.76m の測定距離に相当)、天井側からロボット側への伝播時間データの無線送信時間は 7.5ms であり、位置計算の繰返し演算処理が律速段階となっている。今後採用する CPU の高速化、ソフトウェアの工夫等により改善を行いたい。

6. 結 言

無指向性超音波センサと無線通信を併用した室内移動ロボット用高精度位置・姿勢計測システムを開発した。本研究の主要な結果は以下の通りである。

- (1) ロボット側に設置した無指向性点音源に近似可能な電気火花放電を用いた発信器と、天井側に設置した小径の無指向性コンデンサマイクロホンを組み合わせ、超音波パルスの伝播時間計測に基づいて位置・姿勢を計測す

るシステムを提案・開発した。

- (2) 本システムでは超音波伝播時間の測定を天井側で行うため、ロボット側から天井側への計測要求信号、天井側からロボット側への伝播時間データの送信を無線通信により行う。
- (3) 冗長な受波器を 2 個用いて合計 4 個の受波器を用いることにより、変調・復調処理に伴う無線の遅れ時間および測定空間内の音速を 2 つの未知数としてリアルタイムで推定する位置計測法を提案した。
- (4) 静的位置 (XY 座標) の計測精度を検証した結果、1.5m 四方程度の測定領域の中央付近で約 1mm、周辺付近で約 2mm であった。比較的安価な超音波素子と簡単な距離を用いた三角測量の原理により、ランドマークを画像処理する等の他方式に比べて高い精度を得た。
- (5) 交互に発信する 2 個の発信器の実測位置と、デッドレコニング情報とを併用して動的な姿勢を計測する手法を提案した。
- (6) 実際に本システムを移動ロボットに搭載して直線軌道の計測精度を検証し、本システムの動的位置・姿勢計測の用途に対する有効性を確認した。

今後の課題として、1) 多数用いても環境変化のコストを増大させないような安価な無指向性受波器の開発、2) 火花放電に伴う可聴域クリック音の人に不快感を与えない程度までの低減、3) 伝播時間測定回路の小型化および天井配線の簡略化等が挙げられ、RECS コンセプトに基づいてこれらの改良を行っていきたい。

参 考 文 献

- 1) 坪内孝司：自律移動体の位置決め技術の現状と展望、精密工学会誌、65, 10 (1999) 1385.
- 2) 太田 順：知能ロボットのための環境整備、精密工学会誌、65, 10 (1999) 1407.
- 3) 伊藤茂則、福田敏男、新井史人、阿部靖則、田中祥夫：自律移動ロボットの視覚によるナビゲーションシステム、日本機械学会論文集 (C編)、64, 618 (1998) 636.
- 4) 津村俊広、橋本雅文、藤原直史：レーザとコーナキューブを利用した三次元移動体の能動位置計測法、日本ロボット学会誌、6, 1 (1988) 26.
- 5) 美馬一博、金森哉史、梶谷 誠、明 愛国：偏光フィルムを用いた移動ロボット用ランドマークシステムの開発、日本ロボット学会誌、16, 4 (1998) 518.
- 6) 春日智恵：デジタル標識パターンを用いた自己位置同定、日本ロボット学会誌、12, 6 (1994) 857.
- 7) C.Becker, J.Salas, K.Tokusei and J.C.Latombe: Reliable Navigation Using Landmarks, Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., (1995) 401.
- 8) 岩田宗之、高橋英男、佐々木 健、高野政晴：LED 灯台を用いた移動ロボット用位置姿勢検出システム、精密工学会誌、61, 11 (1995) 1579.
- 9) 関 啓明、高野政晴、佐々木 健、田中康夫：超音波灯台によるロボットナビゲーション、超音波TECHNO、10, 5 (1998) 23.
- 10) K.Takamasu, R.Furutani and S.Ozono: Development of the Three Dimensional Coordinate Measuring System with Ultrasonic Sensors, Proc. Int. Symp. Metrology for Quality Control in Production, (1984) 300.
- 11) 青柳誠司ほか：超音波によるロボットの 3 次元位置・姿勢計測、精密工学会誌、61, 2 (1995) 273.
- 12) 高野政晴、吉見隆洋、佐々木 健、関 啓明：RECS コンセプトに基づく屋内移動ロボットシステムの開発、精密工学会誌、62, 6 (1996) 1334.
- 13) Condenser Microphones Data Handbook, Bruel Kjaer, Maerum, Denmark, (1982) 1.
- 14) 佐々木 健、小野勝久、高野政晴：ロボットのための高精度超音波センサの開発研究、精密工学会誌、51, 6 (1985) 1238.
- 15) 電波による無線データ伝送技術 (トランジスタ技術増刊)、CQ 出版社、東京、(1999) 32.
- 16) A.Macleod, J.R.W.Morris and M.Lyster: High Accurate Video Coordinate Generation for Automatic 3D Trajectory Calculation, SPIE vol.1356 Image-Based Motion Measurement, (1990) 12.