

# 超音波センサネットを用いた作業用移動ロボットナビゲーション研究 Ultrasonic sensor net for mobile robot navigation

鳴原崇之, 那須康雄, 俞 竹青, 水戸部和久, 山野光裕

Takayuki Shigihara, Yasuo Nasu, Zhuqing Yu, Kazuhisa Mitobe, Mituhiro Yamano

山形大学理工学研究科  
Yamagata University

キーワード : 移動ロボット(Mobile Robot),ナビゲーション(navigation),  
超音波センサネット(ultrasonic sensor net),デッドレコニング(dead reconing)

連絡先 : 〒992-8510 米沢市城南 4-3-16 山形大学工学部 機械システム工学科

システム設計講座 那須研究室 鳴原崇之

## 1. 緒言

様々な作業にモービルロボットが用いられるようになってきているが,大型 GFRP 成形部品のトリミング作業においては人体に有害な粉塵が大量に発生するために,ロボットによる作業の自動化への要望が強い.

そこで我が研究室ではモービルマニピュレータによる自動トリミングシステムの研究を行ってきた<sup>[1]</sup>. これまでの研究によりトリミング作業は自動的に行うことができるようになってきているが,トリミング作業場内での移動,例えばメンテナンスを行うため,

ロボットステーションから作業現場への移動や,複数存在する作業現場間の移動などの自動化は実現されていない. そこで,本研究ではトリミング作業場という環境を想定した,トリミング作業用モービルマニピュレータのナビゲーションシステムの開発を行った.

モービルマニピュレータをナビゲーションするためには,モービルマニピュレータの位置・姿勢などを把握することが必要であるが,GFRP トリミング作業現場という環境を考えた場合,ガラス繊維が粉塵となって大量

に発生し、作業現場での視界が悪くなるため、画像処理でのナビゲーションは難しい。簡単な方法としては、床に誘導線を埋め込むナビゲーション法があげられるが、経路変更が難しくなってしまうという欠点を持つ。近年では、GPS を用いた位置計測法があるが<sup>[2],[3]</sup>、計測範囲が広い反面、作業用移動ロボットにとっては計測精度が低いため、トリミング作業用移動ロボットのナビゲーション法としては向いていない。

本研究では、モバイルマニピュレータのデッドレコニング機能に加え、モバイルマニピュレータに超音波送信センサを搭載し、作業場天井に超音波受信センサネットを配置する。これによってモバイルマニピュレータの位置・姿勢を計測し、広範囲な位置・姿勢の計測、ナビゲーションを可能にするシステムを提案する。

## 2. モバイルマニピュレータ

モバイルマニピュレータは、いくつかのシステムを統合した構造を持っている。ここではナビゲーションするモバイルマニピュレータについて全体の構造とそれをなすシステムについて説明する。

図1に作業用ロボット、モバイルマニピュレータの概観、図2にシステム構成図を示す。モバイルマニピュレータはホストコンピュータを搭載し、モバイルロボット、マニピュレータ、各種センサを統括している。これらのシステムをすべて搭載することにより外部への配線を最小限に押さえている。また4輪独立駆動、4輪独立操舵の移動機構を有

しており、広い作業領域の確保と自律化を図っている。作業には2自由度のマニピュレータを使用し、トリミング作業用のグラインダを装備している。側面にはトリミング作業時に用いる軌道追従用のレーザ変位センサが取り付けられている。

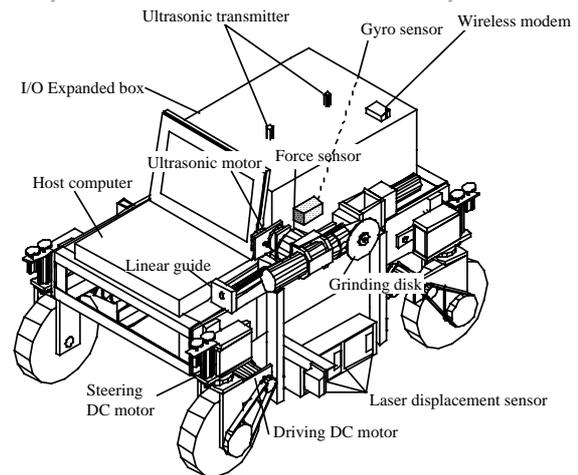


図 1. モバイルマニピュレータ概観図

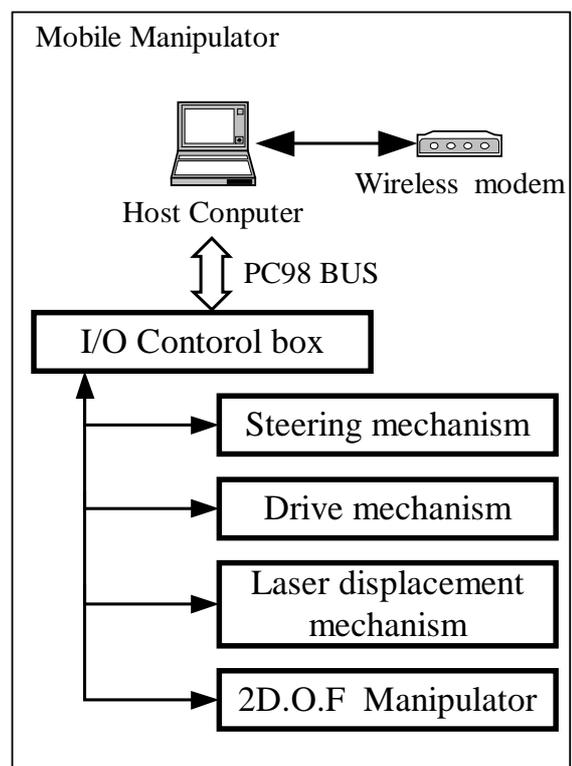


図 2. モバイルマニピュレータシステム構成図

### 3. 超音波センサネットシステム

図 3 に提案する超音波センサネットの概略図, 図 4 に通信システム図を示す.

計測システムはモバイルマニピュレータに搭載した超音波送信センサ, それを受信するために天井へ等間隔に配置した超音波受信センサ, そしてその超音波センサネットを制御するコントロール PC で構成されている.

使用した超音波センサは(株)村田製作所製防滴型超音波センサ MA40E7S/R である. MA40E7S が送信, MA40E7R が受信センサとなっている. 主な仕様を表 1 に示す.

送信センサから発信された超音波をセンサネット上の受信センサが受信する. 送信された超音波は放射状に伝わるので, 複数の受信センサが音波を受信することができる. このときの

送信センサから受信ネットへの超音波の伝播時間を測定し各距離を求める.

測定したデータはセンサネットを制御するコントロール PC から, 無線モデムを介してモバイルロボットのホストコンピュータに送信される. 無線モデムは(株)八重洲無線製特定小電力無線モデム装置 YSM-221 を使用している. 主な使用を表 2 に示す.

距離計測センサとして採用した超音波センサは他のセンサに比べ安価なため必要に応じて拡張可能であり, 計測可能範囲を広げることができる.

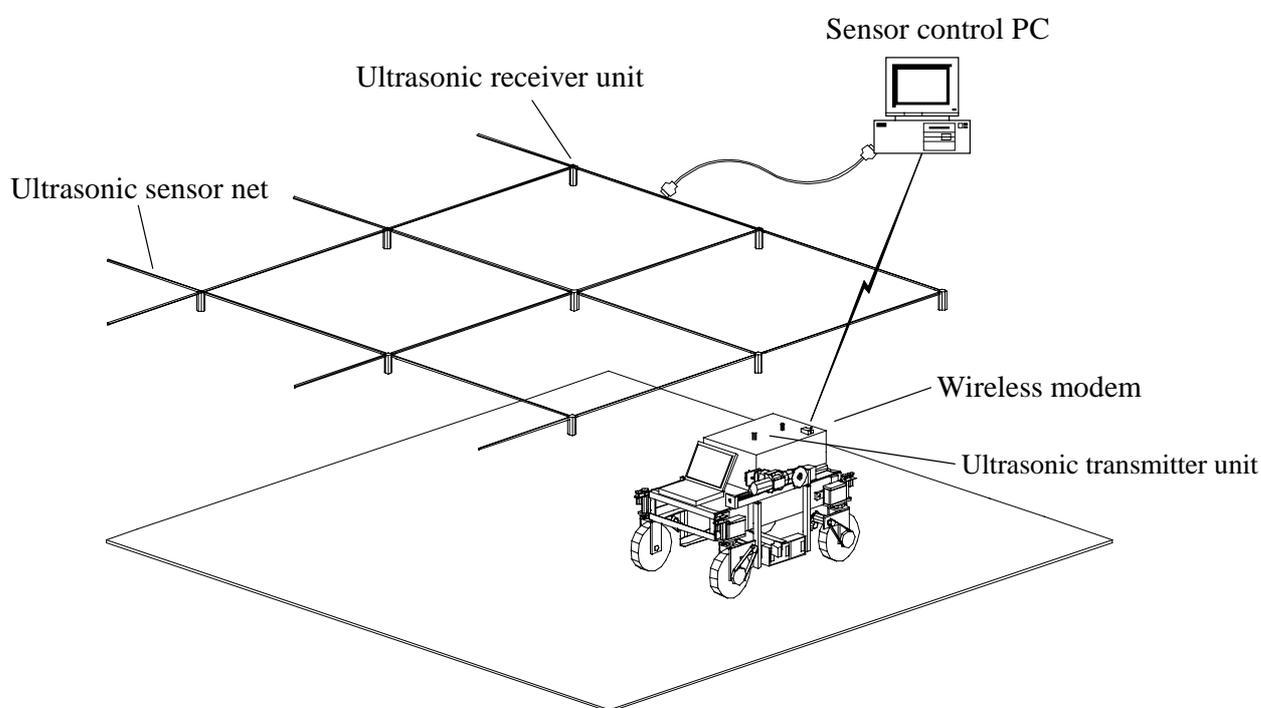


図 3.超音波センサネットシステム概観

表 1. 超音波センサ仕様

公称周波数	40 [kHz]
パルス幅	0.4 [msec]
周期	100 [msec]
指向性	100 [deg]
仕様温度範囲	-30 ~ 50 [ °C ]
外形寸法	18 × 12h [mm]
重量	4.5 [g]

表 2. 無線モデム装置仕様

標準規格	RCR-SDT-17A
電波方式	F1D
送信出力	10 [mW]
変調方式	直接 2 値 FSK 方式
無線伝達速度	4800 [bps]
最大交信距離	約 100 ~ 300 [m]
通信方式	短信方式
データバッファ	4095 [byte]
I/O インターフェイス	RS-232C 準拠
電源	DC ± 5 [V]
重量	150 [g]

## 4. デッドレコニング

モバイルマニピュレータは位置・姿勢を計測するために、エンコーダからのデータを用いたデッドレコニングを行う。本研究で用いているモバイルマニピュレータは全方向モード、回転モード、旋回モードの3つの走行モードを持っている。今回はナビゲーションに必要と思われる全方向モード及び回転モードについてのみ考えることとする。

図5に示す全方向モードの場合、モバイルマニピュレータの姿勢は変化しないものとして位置のみを計算する。ステアリング角を  $\theta$ 、単位時間あたりの移動距離  $l$  とすると、モバイルマニピュレータの位置(X,Y)、姿勢  $\phi$  は近似的に式(1)で示される。

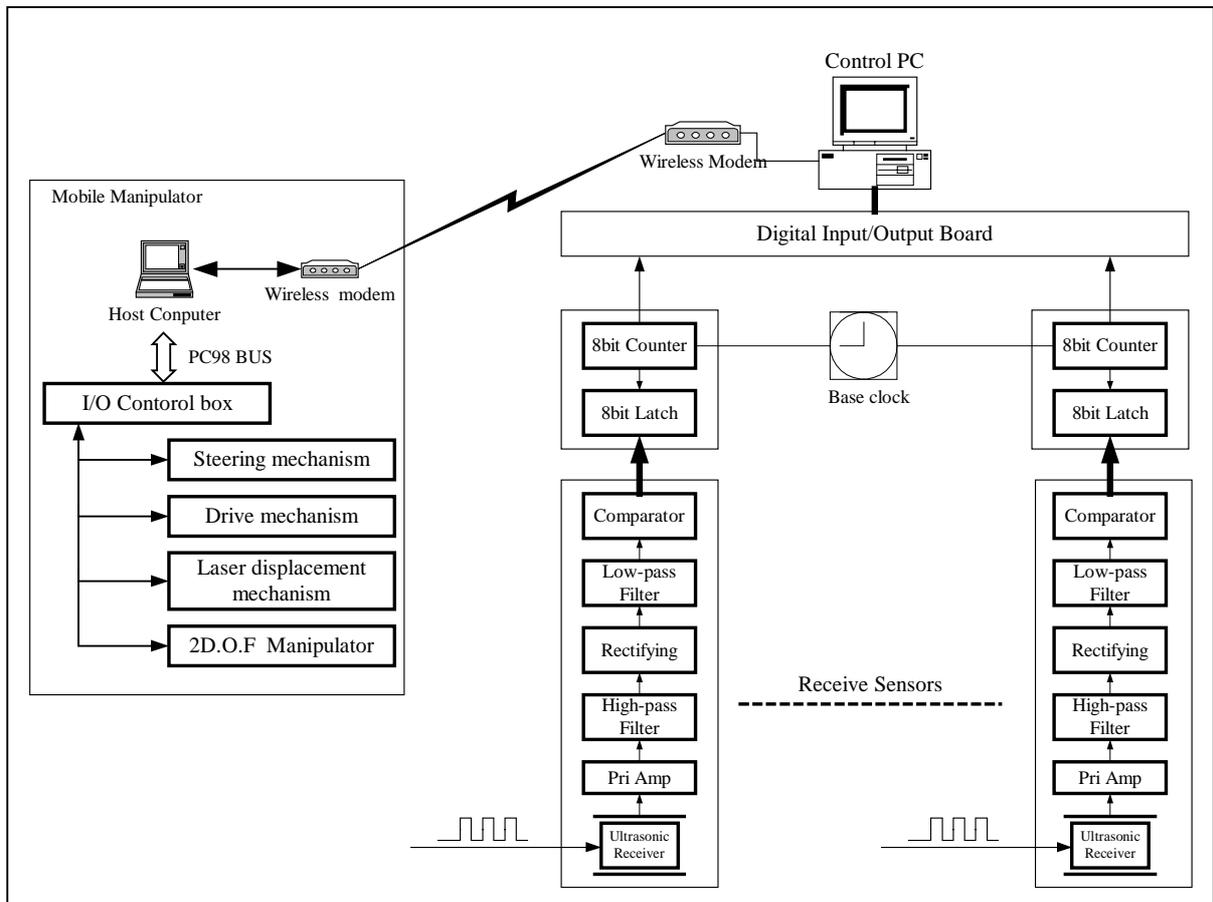


図 4. 通信システム図

$$\begin{cases} X_n = X_{n-1} + \Delta l \cos(\xi_{n-1} + \phi_{n-1}) \\ Y_n = Y_{n-1} + \Delta l \sin(\xi_{n-1} + \phi_{n-1}) \end{cases} \quad (1)$$

図6に示す回転モードの場合には、位置は変化しないものとして姿勢のみを計算する。

$$\begin{cases} X_n = X_{n-1} \\ Y_n = Y_{n-1} \\ \xi_n = \xi_{n-1} + \Delta l / \pi(W^2 + T^2)^{1/2} \end{cases} \quad (2)$$

この累積計算を用いてモービルマニピュレータの位置・姿勢を計測する。

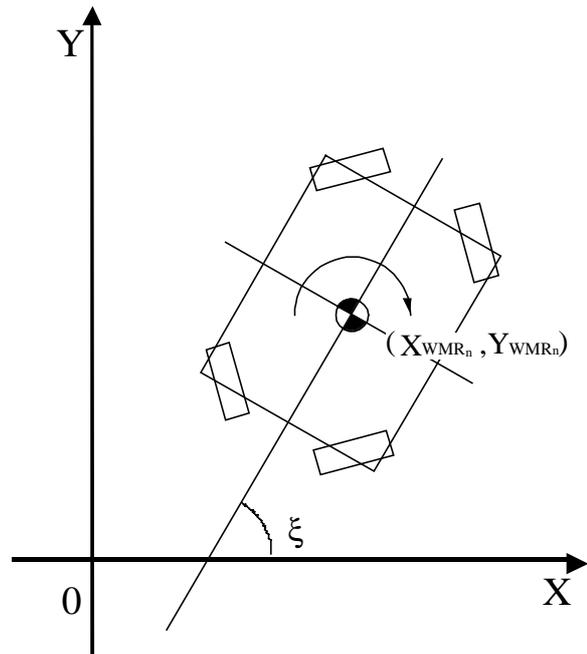


図6. デッドレコニング（回転モード）

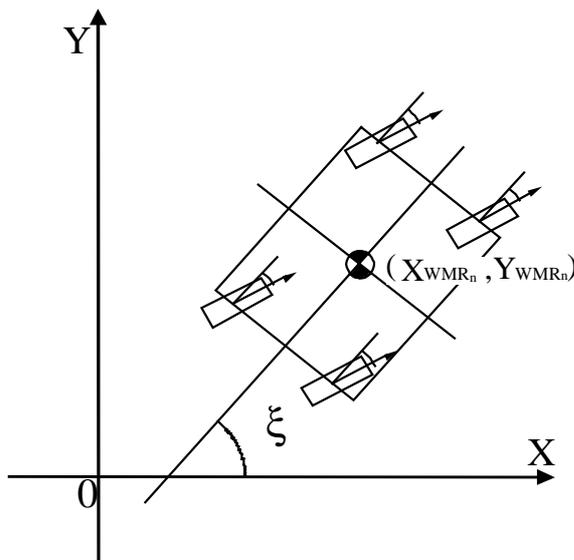


図5. デッドレコニング（全方向モード）

## 5. 作業可能な最終位置・姿勢

本研究ではモービルマニピュレータをトリミング作業開始点に移動させ、トリミング作業開始可能な体勢にするためのナビゲーションについて考える。

モービルマニピュレータがトリミング作業開始点へ移動する際、目標の位置・姿勢を整えないままに作業対象物へ接近すると、作業対象物などに接触し、作業対象物やモービルマニピュレータを破壊してしまうおそれがある。作業開始姿勢については目標姿勢から  $\pm 6.5$  [ ]以上のずれを生じたまま対象に接近すると、図7に示すような体勢となるので、レーザ変位センサが測定範囲にはいる前に車輪などが接触してしまう。

したがってモービルマニピュレータが作業開始点に接近する際はこの前の段階で位置・姿勢を修正しなければならない。

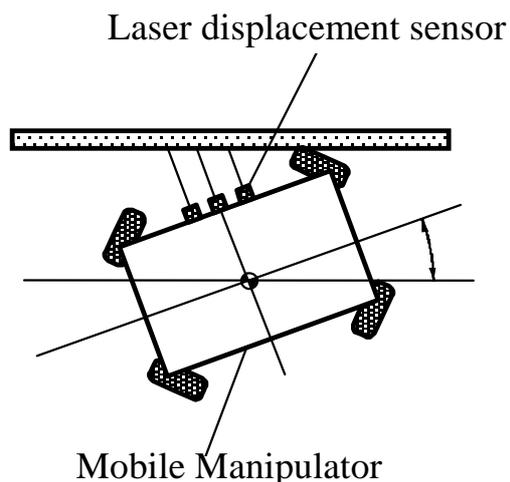


図 7. 許容進入角度

また, モービルマニピュレータがトリミング作業開始点で作業開始可能な範囲は, 過去の研究によって確認されており, その軌道追従可能な範囲はモービルマニピュレータに装備したグラインダから作業対象までの目標距離から  $\pm 2$  [mm], 姿勢は  $\pm 2$  [deg] となっている. したがって, この軌道追従可能な範囲を目標として最終的にトリミング作業開始点へナビゲートすることになる.

そこで内界センサのみならず, 超音波センサネットによるモービルマニピュレータの位置・姿勢の計測により, デッドレコニングによる走行によって生じた位置・姿勢の誤差を修正する.

## 6. 超音波センサネットによる計測法

モービルマニピュレータ搭載の送信センサから超音波を送信すると超音波は放射状に伝わり, 複数の受信センサがその音波を受信することができる. その計測距離から 3 点計算することによりモービルマニピュレー

タの位置を計測することができる. 図 8 に計測法の概略を示す.

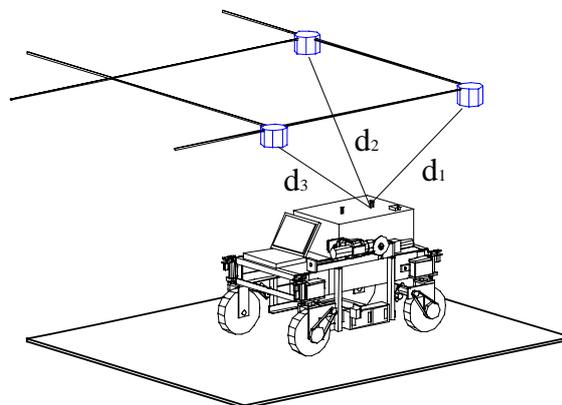


図 8. 位置計測法

送信センサの座標を  $T_1(X_1, Y_1, 0)$  受信センサの座標をそれぞれ  $R_1(x_1, y_1, H)$ ,  $R_2(x_2, y_2, H)$ ,  $R_3(x_3, y_3, H)$  とすると, 各センサによる測定距離  $d_n$  は

$$\begin{cases} d_1^2 = (x_1 - X_1)^2 + (y_1 - Y_1)^2 + H^2 \\ d_2^2 = (x_2 - X_1)^2 + (y_2 - Y_1)^2 + H^2 \\ d_3^2 = (x_3 - X_1)^2 + (y_3 - Y_1)^2 + H^2 \end{cases} \quad (3)$$

平面上での送信センサの位置  $T_1(X_1, Y_1)$  すなわちモービルマニピュレータの位置を導くことができる.

2 つ目の送信センサ  $T_2$  についても同様の手順で  $T_2(X_2, Y_2)$  を求めることができ,  $T_1, T_2$  を用いてモービルマニピュレータの姿勢を求めることができる.

モービルマニピュレータに 2 つ送信センサを搭載することにより姿勢を求めることができ, その計算式は以下ようになる.

$$\theta = \arctan\left(\frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2}\right) \quad (4)$$

(3), (4)式より導き出された位置・姿勢によってモバイルマニピュレータの状態を把握しナビゲートすることができる。

## 7. 測定実験

超音波センサネットの有効性を検証するために図9のように配置し測定を行った。

モバイルマニピュレータをセンサネット座標  $P_1(0,0)$  に設置した時と  $P_2(450,1000)$  [mm] に設置したときについて測定を行った。

超音波センサネットのグリッド間隔は 1000[mm] とし、モバイルマニピュレータ搭載の超音波センサからセンサネットへの高さは 1900[mm] となっている。以下に測定結果を示す。なお今回は送信センサを1つ搭載して測定を行った。

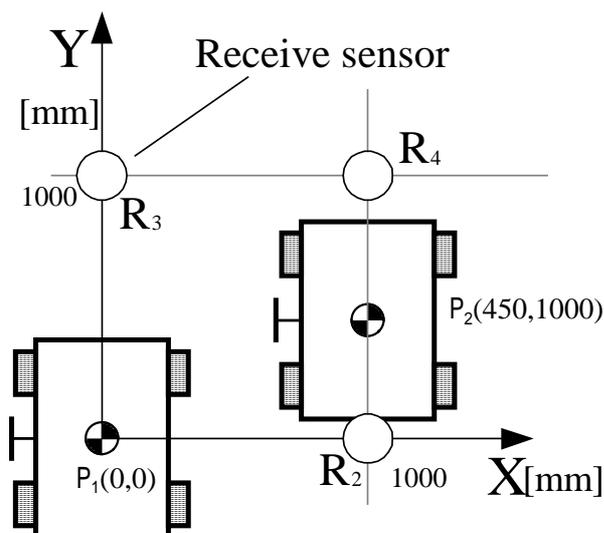


図9. 計測座標

表3. 座標(0,0)における測定結果

受信センサ	計測距離 [mm]
$d_1$	1899.2
$d_2$	2139.1
$d_3$	2229.1

表4. 座標(450,1000)における測定結果

受信センサ	計測距離 [mm]
$d_1$	2198.1
$d_2$	1949.2
$d_4$	1979.2

表5. 位置計測結果

モバイルロボットの座標	実測値 [mm]
(0, 0)	(303.5, 15.6)
(450, 1000)	(441.1, 999.0)

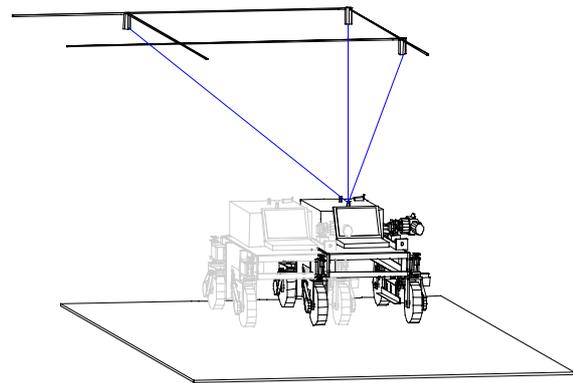


図10. 距離計測図

表3に座標(0,0)における距離測定結果、表4に座標(450,1000)における距離測定結果、表3,4から算出されたモバイルマニピュレータの位置計測結果を表5示す。

図10は平面座標原点(0,0)にモバイルマニピュレータを設置したときの計測概略図である。左側に描かれたモバイルマニピュレータの位置が測定された座標に相当する。この結果は実際の位置から大きくずれている。こ

れは受信センサ  $R_1$ ,  $R_3$  の設置位置が超音波センサネットの端であり, 壁面に近いために超音波の反射波を受信した結果, 測定距離が大きくなりすぎてしまったことが考えられる.

また今回製作, 使用したカウンタは 8bit カウンタであるが, これは 8bit カウンタで試験的に計測するためであり, 今後モバイルマニピュレータの位置・姿勢を修正するナビゲーション時には 12bit カウンタに仕様を変更する. これによって分解能を上げることによりさらに精度を向上する事が可能である.

座標(450, 1000)における測定結果は現段階でも位置計測においては十分な位置精度を持っていると言える. しかし, モバイルマニピュレータの姿勢を計測する際には 2 点の座標が必要となり, より高精度の計測結果が必要となる.

## 8. 結言

本研究では, 超音波センサネットにより広範囲に移動ロボットの位置・姿勢を計測し, ナビゲーションを可能にするシステムを提案した. また, 超音波センサネットによる位置計測について検証を行った.

今後は分解能を上げ位置精度の向上を図り, モバイルマニピュレータにトリミング作業可能な体勢を整えさせることを検討してゆく予定である.

## 参考文献

- [1] 那須康雄, 水戸部和久: 全方位モバイルロボットを用いた大型 GFRP 成形部品の精密トリミング法, 先端加工第 16 巻 1 号, p38-45, 1997.
- [2] パーソナルナビゲーションにおける位置決め, 精密加工学会誌(特集: 自律移動体の位置決め技術), vol. 65, No10 1999.
- [3] 平野和夫: カーナビゲーションにおける位置決め技術, 精密工学会誌(特集: 自律移動体の位置決め技術), Vol. 65, No 10 1999.