超音波センサネットを用いた広範囲位置検出システムの開発*

俞 竹青** 那須康雄*** 中嶋新一† 水戸部和久***

Development of Position Measurement System in Wide-area Using Ultrasonic Receiver Net

Zhuqing YU, Yasuo NASU, Shin-ichi NAKAJIMA and Kazuhisa MITOBE

This paper proposes an ultrasonic position measurement system for mobile robot moving in wide-area. The system uses ultrasonic receiver net which consists of many ultrasonic receivers with wide beam (100°) allocated at a constant interval on a ceiling. The ultrasonic receiver net covers all area where mobile robot moves. And two ultrasonic transmitters with wide beam (100°) are placed at rear and front of mobile robot to transmit ultrasonic wave toward ceiling alternately. Some receivers of receiver net can receive the ultrasonic wave, so the distances between transmitters and receivers can be obtained. Three optimal distances are selected to estimate the positions of the transmitters, and the posture of the mobile robot is estimated by the positions of the two transmitters. Theoretical analysis and experimental results show that the estimated position measurement error is $\phi 62\text{mm}$ and estimated posture error is $\pm 4^\circ$. The ultrasonic receiver net can be expanded easily, making possible to measure position of a mobile robot moving in wide-area, especially in bad visible environment.

Key words: mobile robot, position measurement system, ultrasonic receiver net, wide-area

1. 結 言

大型 GFRP (Glass fiber reinforced plastic) 成形部品のトリミング作業は、熟練者による手作業に頼っているのが現状である。この作業では、ガラス繊維が粉塵となって大量に発生し、人体に悪影響を及ぼすため、自動化が強く望まれている。著者らはマニピュレータと車輪型移動ロボットによって構成された移動作業ロボット (Mobile working robot) の開発を行ってきた¹⁾。開発した移動作業ロボットは三つのレーザセンサを用いて大型 GFRP 成形部品からの相対位置を検出し、目標軌道に沿ってトリミング作業を行う。これまで開発したシステムにおいて、トリミング作業自体の自動化を行ってきたが、数か所で作業する場合は、それぞれの位置に移動作業ロボットを自律走行させなければならない。

ロボットの位置を検出することは自律走行の基本的な技術である。大型 GFRP 成形部品のトリミング作業現場では、ガラス繊維の粉塵が存在するため視界が悪く、周囲の環境の画像処理は難しい。簡単な方法は床に埋め込んだ誘導線によるナビゲーション法であるが、経路変更ができない。車輪の回転量を積分する方法では滑りの誤差が蓄積してしまう。屋内超音波灯台方法²⁾は工場現場に対して計測範囲が足りない。GPS と PHS を用いる位置計測法³⁾⁴⁾は計測範囲が広いが、移動作業ロボットにとって計測精度が低過ぎる。そこで、本研究では、移動ロボットの 2 か所に取り付けた超音波送信センサからの超音波を天井に取り付けた受信センサネットで測定することで、広範囲で移動ロボットの位置と姿勢を計測するセンサシステムを提案する。

2. 位置測定システム

提案する超音波センサネットの位置計測システムの概略を図 1 に示す。計測システムは超音波送信システム (送信システムと呼ぶ)、超音波受信器ネット (受信器ネットと呼ぶ) と無線通信システムの 3 部分で構成される。

(1) 送信システム

作業移動ロボット上の前部と後部 2 か所に送信センサ T_1 と T_2 を設置することで、送信システムを構成する。

(2) 受信器ネット

Fig.1 Position measurement system of mobile robot using sonar net

* 原稿受付 平成 12 年 6 月 28 日

** 学生会員 山形大学大学院 (米沢市城南 4-3-16)

*** 正 会 員 山形大学工学部

† 正 会 員 新潟工科大学 (柏崎市藤橋 1719 番地)

Table 1 Technical specifications for MA 40E7^R/_S electrostatic transducer

Nominal frequency	40kHz	Operating conditions	temperature -30-85℃
Minimum receiving sensitivity	-74dB	Measuring range	0.2-3m
Minimum transmitting sensitivity	106dB	Resolving power	9mm
Beam angle	100°	Cover sizes	φ 18×h12 (mm)
Capacitance	2200± 20% pF	Mass	4.5g
Maximum voltage	85Vp-p	Character	Waterproof

移動ロボットの移動範囲を覆う天井に $d \times d$ の均等な間隔で多数の超音波受信センサを配置し、制御計算機と接続することで、受信器ネットを構成する。送信センサから受信器ネットまでの超音波の伝播時間を測定し、各距離を求める。この受信器ネットは受信センサの数を増やすことで、容易に位置計測範囲を拡大することができる。

(3) 無線通信システム

一対の無線通信器を用いて無線通信システムを構成する。受信器ネットの制御計算機は送信センサと受信器ネットの各受信センサに、無線通信システムを介して作動スタート指令を出す。

使用した超音波センサは株式会社村田製作所製防滴型センサ MA40E7^R/_S である。センサの仕様は表 1 に示す。

3. 位置姿勢の計測原理

本研究で使用する MA40E7^R/_S 超音波センサは指向角が広いので、受信器ネットに複数の受信センサが同時に送信センサからの超音波を受信する。移動ロボット上の二つの送信センサ位置を $T_1(x_1, y_1, 0)$, $T_2(x_2, y_2, 0)$ とする。送信センサ T_i ($i=1,2$) から超音波を受信した受信センサのうち、三つの受信センサを選び、 R_{i1} , R_{i2} , R_{i3} とする。それぞれの位置を $R_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, H)$, $R_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, H)$, $R_{i3}(x_{i3}, y_{i3}, H)$ とする(図 2)。受信器ネットの各受信センサは一定の間隔で配置されているため、それぞれの位置の座標値は既知である。従って、式(1)による送信センサの水平面の位置 $T_i(x_p, y_p, 0)$ が求められる。

$$\left. \begin{aligned} (x_{i1} - x_i)^2 + (y_{i1} - y_i)^2 + H^2 &= \rho_{i1}^2 \\ (x_{i2} - x_i)^2 + (y_{i2} - y_i)^2 + H^2 &= \rho_{i2}^2 \\ (x_{i3} - x_i)^2 + (y_{i3} - y_i)^2 + H^2 &= \rho_{i3}^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

T_1 , T_2 の位置が求まれば、移動ロボットの水平面の姿勢 θ (図 9 に示す) は式(2)により求められる。

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}\right) \quad (2)$$

4. 受信器ネットでの受信センサの配置

受信器ネットでは受信センサを縦横に一定の間隔(配置間隔と呼ぶ)で配置する。配置間隔を大きくすると、送信センサからの超音波を同時に受信できる受信センサの数は少なく

Fig.2 Position estimation of transmitter

Fig.3 Influence of measured distance error on position estimation

なると、移動ロボットの位置の測定ができなくなる。逆に小さくすると、同時に受信できるセンサの数は増すが、個々のセンサの距離測定精度が低下する。

移動ロボットの位置の測定精度の影響に関しては 4.1, 4.2 節で詳しく述べる。図 3 に示すように、送受信センサ間の鉛直方向の距離(受信高度と呼ぶ)を H 、送受信センサを結ぶ直線方向と鉛直線方向の挟角(受信角度と呼ぶ)を γ 、送受信センサの距離(受信距離と呼ぶ)を ρ 、水平方向の距離(水平受信半径と呼ぶ)を r とする。

4.1 受信距離誤差の影響

図 3 に示すように、送受信センサ間の距離の測定誤差は移動ロボットの位置測定に影響を与える。受信距離の誤差 $\Delta \rho$ と水平受信半径の誤差 Δr_p の関係は式(3)となる。

$$\Delta r_p = \frac{\Delta \rho}{\sin \gamma} \quad (3)$$

Fig.4 Influence of vertical distance error between transmitter and receiver on position estimation

4.2 受信高度誤差の影響

送受信センサ間の受信高度の誤差も移動ロボットの水平面の位置測定に影響を与える(図4)。受信高度 H の誤差 ΔH と水平受信半径の推定誤差 Δr_H の関係は式(4)となる。

$$\Delta r_H = \frac{\Delta H}{\tan \gamma} \quad (4)$$

4.3 最小受信角度

4.1, 4.2 節に述べたように、送受信センサ間の受信距離の測定誤差と受信高度誤差は水平受信半径の計測精度に影響を及ぼす。水平受信半径 r の推定誤差 Δr は式(5)となる。

$$\Delta r = \Delta r_\rho + \Delta r_H = \frac{\Delta H}{\tan \gamma} + \frac{\Delta \rho}{\sin \gamma} \quad (5)$$

これより、受信センサの受信角度 γ を小さくすると、水平受信半径の誤差が大きくなる。この結果、移動ロボットの位置推定誤差も大きくなる。従って、移動ロボットの位置推定精度を確保するためには γ を最小受信角度より大きくしなければならない。水平受信半径の許容誤差 Δr_σ と最小受信角度限界 $\gamma_{\min}$ の関係は式(6)のように表される。

$$\Delta r_\sigma = \frac{\Delta H}{\tan \gamma_{\min}} + \frac{\Delta \rho}{\sin \gamma_{\min}} \quad (6)$$

4.4 受信器ネットの最大受信範囲

超音波センサの指向性のため、送信センサから指向角度以内だけで強い超音波を発射する。従って、送信センサから発射した超音波は受信器ネット上の円形範囲内だけに届く。この範囲以外の受信センサは送信波を受信できない。この範囲を最大受信範囲と呼ぶ。図5に示すように、最大受信範囲の半径(最大水平受信半径と呼ぶ)を $r_{\max}$ 、円周の点の受信角度(最大受信角度と呼ぶ)を $\gamma_{\max}$ 、受信距離(最大受信距離と呼ぶ)を $\rho_{\max}$ とする。MA40E7^{R/S} 超音波センサの

Fig.5 Maximum receiving area in receiver net to receive ultrasonic wave from transmitter

Fig.6 Optimal receiving area in receiver net

指向角は 100° であるが、実際の指向角は超音波センサの配置と回路の性能よりある程度小さくなる。従って、超音波センサの実際の指向角と最大受信範囲は実験で求める必要がある。

4.5 受信器ネットでの受信センサの配置

4.3, 4.4 節に述べたように、送信センサの水平面の位置を円中心とし、半径 $r_{\min}$ と $r_{\max}$ の同心円により囲まれた範囲(最適受信範囲と呼ぶ)内の受信センサは送信センサからの超音波を受信でき、かつ位置測定精度を満足する(図6)。送信センサの水平面の位置を推定するために、最低三つの受信センサが必要である。従って、受信器ネットでの受信センサの配置はこの条件を満足しなければならない。本研究では、 $d \times d$ の間隔で受信センサを配置する(図7)。これより、間隔 d が式(7)を満たせば、送信センサをどこに移動しても最適受信範囲内に最低三つの受信センサが存在する。

$$\left. \begin{aligned} d &> 2r_{\min} \\ \sqrt{2}d &< r_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Fig.7 Distribution of receivers in receiver net

4.6 三つの受信センサの選択

受信器ネットに受信センサを n 個 ($R_i, i=1, n$) 配置し、各センサの受信距離を $\rho_i (i=1, n)$ とする。送信センサから天井の受信器ネットに超音波を発射する時、各受信センサは同時に作動し、各受信センサの受信データを制御計算機に読み込む。最適受信範囲にある受信センサ $R_k (1 \leq k \leq n)$ は式(8)を満たす。そこで、この中から受信距離の大きい順に三つの受信センサを選ぶ。

$$\rho_{\min} < \rho_k < \rho_{\max} \quad (8)$$

5. 移動ロボットの位置と姿勢の推定誤差分析

送信センサ $T_i (x_i, y_i) (i=1, 2)$ に対する三つの受信センサ R_{i1}, R_{i2}, R_{i3} を選び、水平面位置を $R'_{i1}(x_{i1}, y_{i1}), R'_{i2}(x_{i2}, y_{i2}), R'_{i3}(x_{i3}, y_{i3})$ 、それぞれの受信距離を $\rho_{i1}, \rho_{i2}, \rho_{i3}$ 、水平受信半径を r_{i1}, r_{i2}, r_{i3} とする。送信センサの水平面位置をこの三つの受信センサの水平受信半径 r_{i1}, r_{i2}, r_{i3} から計算する。この場合、送信センサの水平面の位置推定誤差 ΔE は受信センサ自身の設置誤差 ΔE_1 と相対位置誤差 ΔE_2 の二つの部分により構成される。すなわち、

$$\Delta E = \Delta E_1 + \Delta E_2 \quad (9)$$

5.1 相対位置誤差の影響

図8に3点 R'_1, R'_2, R'_3 を中心とし、 r_{i1}, r_{i2}, r_{i3} を半径とする三つの円を考える。各水平受信半径 r_{i1}, r_{i2}, r_{i3} は式(10)により求める。この場合、3円の交差する点が送信センサ T_i の位置となる。

$$\left. \begin{aligned} r_{i1} &= \sqrt{\rho_{i1}^2 - H^2} \\ r_{i2} &= \sqrt{\rho_{i2}^2 - H^2} \\ r_{i3} &= \sqrt{\rho_{i3}^2 - H^2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

r_{i1}, r_{i2}, r_{i3} の誤差は Δr_o を超えないから、最悪の状況と考えると $\Delta r_{i1} = \Delta r_{i2} = \Delta r_{i3} = \Delta r_o$ である。図8に示すように送信センサの位置推定誤差はほぼ六角形の中に入ると考えられる。この六角形の外接円の直径を送信センサの水平面の相

Fig.8 Estimation error of transmitter's relative position

Fig.9 Posture estimation error of mobile robot

対位置誤差 ΔE_2 とすると、式(11)のように表すことができる。

$$\Delta E_2 = \frac{\Delta r_o}{\cos 30^\circ} \quad (11)$$

5.2 ロボット姿勢測定の誤差

移動ロボットの水平面の姿勢 θ の誤差を $\Delta \theta$ とする。図9より、位置誤差 ΔE と姿勢誤差 $\Delta \theta$ の関係は式(12)により求められる。

$$\left. \begin{aligned} \sin \frac{\Delta \theta}{2} &= \frac{\Delta E}{L} \\ \Delta \theta &= 2 \arcsin \frac{\Delta E}{L} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

6. 位置計測実験

6.1 計測システムの制御システム

実験検証するため、計測システムの制御システムは二つ送信制御システム、16個受信制御システム、自作無線通信システムと制御計算機により構成される(図10に示す)。超音波センサの送信距離が伸びるため送信制御システムに送信周波数を $40 \pm 0.2 \text{ kHz}$ 範囲内に調節する。計測精度が向上するよう受信制御システムの信号の整流に全波整流器を採用した。実験用の超音波受信センサと取付け方を図11に示す。

$P_1(0.11, 0.11)$: Point near corner of net
 $P_2(2.14, 0.12)$: Point near border of net
 $P_3(1.81, 2.17)$: Point in net

Fig.13 Distribution of estimated positions around its true position

6.4 受信器ネットでのセンサ配置間隔の確定

式(7)で示すように、受信器ネットでのセンサ配置間隔 d は上限と下限がある。天井にセンサの配置作業を十分に考えると、 d の上下限の差は 0.20m と考えることが必要である。 d の上限を $d_{\max}$ 、下限を $d_{\min}$ とすると、式(15)、(16)となる。

$$\left. \begin{aligned} d_{\max} &= \frac{r_{\max}}{\sqrt{2}} \\ d_{\min} &= 2r_{\min} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$d_{\max} - d_{\min} = 0.20\text{m} \quad (16)$$

6.2 節で得た $r_{\max} = 1.8\text{m}$ を式(15)、(16)に代入して、

$$d_{\max} = 1.27\text{m}$$

$$d_{\min} = 1.07\text{m}$$

$$r_{\min} = 0.58\text{m}$$

$$d = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{2} = 1.17\text{m}$$

となる。本研究では $d = 1.17\text{m}$ の配置間隔で受信器ネットを試作した。

6.5 位置と姿勢の推定誤差の計算

本研究では受信器ネットでのセンサの受信高度誤差は $\Delta H = 5\text{mm}$ 、水平面の設置誤差は $\Delta E_1 = 5\text{mm}$ 、二つの送信センサの距離は $L = 0.90\text{m}$ と考えられる。従って、

$$\gamma_{\min} = \arctan \frac{r_{\min}}{H} = 17.5^\circ$$

式(6)、(11)、(9)、(12)により、

$$\Delta r_g = 49\text{mm}$$

$$\Delta E_2 = 57\text{mm}$$

$$\Delta E = \Delta E_1 + \Delta E_2 = 62\text{mm}$$

$$\Delta \theta = 8^\circ$$

7. 実験結果

図7に示す代表的な三点 $P_1(0.11, 0.11)$ 、 $P_2(2.15, 0.13)$ 、 $P_3(1.81, 2.17)$ を選んで、それぞれの位置を測定した。各点は 10 回ずつ測定した。10 回の測定値から推定した位置を実際の位置を中心として図 13 に示した。それぞれの分布は直径 ΔE 以内であり、予想位置測定精度を満足する。この実験結果により提案した計測システムの有効性が示された。

本研究の実験で用いた超音波センサ MA40E7[®]_S は検知距離が短いため、設定した天井は低くいので人間の行動には邪魔になるが、検知距離の長い超音波センサを使えば、この問題がなくなる。そのほか、超音波送信器と受信器ネット間の距離計測時間は 40ms より少ないので、二つ送信器を交替に使うと1回の位置計測時間がわずか 80ms である。したがって、本研究の超音波センサネット計測システムを使うと、移動ロボットの移動中の位置・姿勢をリアルタイムで計測することができる。

8. 結 言

本研究では、可視性の不良な現場で広範囲で移動作業ロボットの位置計測を行う超音波センサシステムを提案した。理論解析と実験により得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 提案した位置計測システムの計測原理を示した。
- (2) 受信器ネットで安定した受信と精度の条件を満たす最適受信範囲について検討を行った。
- (3) 位置計測誤差の解析を行った。
- (4) 受信器ネットでのセンサの配置法を示した。
- (5) 試作センサネットで実験を行い、実験結果により提案した位置計測システムの有効性を示した。

今後の研究として、位置計測精度を向上させるため、計測システム回路の改善と4点以上のデータの利用を考えられる。

参 考 文 献

- 1) 那須康雄, 水戸部和久, 柴田佳一: 全方位モービ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, 16, 1 (1997) 38.
- 2) 関 啓明, 坂下英司, 神谷好承, 岡部佐規一, 高野政晴, 佐々木謙: 屋内移動ロボット用の超音波灯台を用いた位置検出システムの開発, 先端加工, 17, 1(1998) 53.
- 3) 鈴木 昇: パーソナルナビゲーションにおける位置決め, 精密工学会誌, 65, 10(1999) 1394.
- 4) 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, 65, 10(1999) 1389.