技術論文

超音波による壁面の法線方向の高速測定

大 矢 晃 久^{*1} 永 島 良 昭^{*2} 油 田 信 一^{*1}

High Speed Measurement of Normal Direction of Walls by Ultrasonic Sensor

Akihisa Ohya^{*1}, Yoshiaki Nagashima^{*2} and Shin'ichi Yuta^{*1}

A novel ultrasonic sensing method which can measure the normal direction of walls is proposed. The inclination of the wall is calculated from the difference of the round-trip time-of-flight detected by using plural receivers. This sensor system has four receivers for the error correction using inconsistency check of the propagation times.

Key Words: Ultrasonic Sensor, Normal Direction of Wall, Mobile Robot, High Speed Measurement

1. は じ め に

移動ロボット用の環境認識センサとしては、システム構成が容易で安価な超音波センサがよく用いられる。通常の屋内環境は、多くの平らな壁面から構成されており、この場合、壁面までの距離だけでなく、その法線方向も検出することが重要となる。

超音波を使って壁面の法線方向を検出する方法としては、指向性の鋭い超音波パルスをあらゆる方向に順次送受信し、反射波の受信された方向を壁面の法線方向とみなす方法が考えられる。また、指向性のある程度広い超音波を送受して壁までの距離を測定するという操作を、ロボットが移動しながら複数の位置で繰り返し、ロボット自身の移動軌跡データに基づいて壁面の法線方向を求める方法もある [1][2]。ただし、このいずれの方法においても、壁面の法線方向を測定するためには超音波の送受を何回か繰り返す必要があり、これを高速に測定することは難しかった。

これに対して、受信器の数を複数にすることにより、壁面の位置とその法線方向を1度の計測で得ることができる方法も提案されている [3]。筆者らはこれまでに、この方法に基づく移動ロボット用超音波センサシステムを構築し、実験によってその有効性を検証してきた [4]。しかしながら、このシステムにおいても受信波のリーディングエッジの誤検出に基づく大きな角度計測誤差を軽減するためには、複数回の計測を行い、得られるデータを統計的に処理する必要がある。そこで、受信器の数を二つから四つに増やし、リーディングエッジの誤検出が

あった場合でも1回の測定で壁面の位置とその法線方向を正しく計測できるよう、筆者らの提案した超音波センサシステムに改良を加えた。本論文では、本手法の原理、システムの構成、および実験による有効性の検証結果について述べる。

2. 壁面の法線方向の測定原理

一つの送信器と二つの受信器を用いた、壁面の法線方向の測定原理を Fig. 1 に示す。送信器 (T) から超音波パルスを発射し、壁面で反射した超音波の伝搬時間を二つの受信器 (R) により測定する。このとき、壁面の法線方向、すなわち反射波の入射方向 θ は、角度 θ が小さい範囲であれば、二つの受信器に受かるエコーの伝搬距離差 Δl から次式のような近似関係により求めることができる。

$$\theta \approx \frac{\Delta l}{2d} \quad (1)$$

Fig. 1 Principle of the method for the measurement of the normal direction of the wall using one transmitter (T) and two receivers (R).

原稿受付 1994年7月4日

^{*1}筑波大学

^{*2}(株)日立製作所

^{*1}University of Tsukuba

^{*2}Hitachi, Ltd.

Fig. 2 An example of received echo signal.

ここで、超音波の伝搬時間は、リーディングエッジの検出に基づいて求められる。Fig. 2 は、実際に受信される反射波形の例であるが、通常のシステムでは、このような反射波のレベルがある閾値を越えた瞬間をもって、リーディングエッジが検出されたものとみなされる。このとき、反射波の振幅の微妙な大小により、閾値を越える受信波の周期が受信器ごとに異なる場合、これに起因して角度の算出に大きな誤差が生じる。そこで筆者らは、本来二つで足りる受信器の数をさらに増やして冗長性を持たせることにより、リーディングエッジの誤検出のチェックを行う方法を考案した。

3. 冗長な受信器による角度測定誤差の補正

今、3個の受信器をある間隔で横1列に並べたとすると、それらに受かる超音波の伝搬時間の差は受信器間の間隔に比例して変化するはずである。これに対して、伝搬時間の測定誤差は超音波の周期の倍数の値しか取らないため、もしこの条件に反する場合、いずれかの受信器間に相対的な位相誤差があることが分かり、誤差の修正を行って正確な角度を求められる可能性がある。

本手法では、送信器を中央とし、その両側に等間隔で二つずつ、計四つの受信器を配置することとした。この場合、各受信器における伝搬時間の誤差が多くとも周期の3倍以内であれば、その誤差の存在を検出することができる。ただし、実際には2周期以上の誤差はほとんど発生しないため [4]、次のようなアルゴリズムにより、1周期の誤差を補正することとした。

- 四つの受信器 R_1, R_2, R_3, R_4 で測定される距離を、おのおの L_1, L_2, L_3, L_4 とする。 $L_1 \sim L_4$ の四つの値から二つを取り出す組み合わせは計6通りある。
- 各組み合わせに対して、他の二つの距離を計算により求める。計算値と実際の測定値が等しいか、あるいはちょうど1周期の誤差に収まっているれば、その角度を採用する。

Fig. 3 を用いて、角度測定誤差の具体的な補正方法を説明する。同図中、縦軸は各受信器で測定された超音波の伝搬距離であり、黒丸が各測定値を示している。この図では、 R_1 と R_3 には誤差はないが、 R_2 と R_4 には超音波の1周期の測定誤差が発生している場合を表している。ここで、上に述べたように四つの測定値から二つを取り出して他の二つの距離を計算により求めたとすると、それぞれ図中1~6で示した直線上に値が存在することになる。各直線に対して、計算値と実際の測定値が等しいか、あるいはちょうど1周期の誤差に収まっているものを調べてみると、直線2と5だけが候補として残る。伝搬距離

Fig. 3 An example of measured angle error elimination using four receivers.

Fig. 4 Arrangement of the transducers.

の測定誤差は、値の正方向にしか発生しないため、より近い直線2を採用して角度を求めればよい。

この方法は、受信器を2個だけ用いる場合と比べて測定角度値そのものの精度を向上させるものではないが、リーディングエッジの誤検出に基づく離散的な角度測定誤差の発生確率を減少させることができる。三つ以上の受信器を用いる方法としては、各受信器で得られる伝搬時間を単純に最小二乗法で直線にフィッティングして角度を求める方法も考えられる。しかし、そのような方法ではリーディングエッジの誤検出がない場合には測定精度が向上するが、リーディングエッジの誤検出が起こった場合に、その影響を取り除くことはできない。

4. 測定システム

トランスデューサ間の距離が長ければ、角度測定において高い精度を得ることができるが、各受信器間での受信波の相関が低くなるため、前述した角度測定誤差が発生しやすくなる。そこで、本システムではトランスデューサを横1列に並べるのではなく、上下に段差を設けた配置とした (Fig. 4)。そして、上段の R_2 と R_3 が下段の R_1 と R_4 と同じ高さにあるとみなすことができるように伝搬時間の補正を行うこととした。受信器 $R_1 \sim R_4$ で測定された超音波の伝搬時間をおのおの $t_1 \sim t_4$ とするとき、 t_2 と t_3 に対する補正式は次式で与えられる。

$$t_2 = t_2 - \frac{-t_1 + t_2 + t_3 - t_4}{2} \quad (2)$$

$$t_3 = t_3 - \frac{-t_1 + t_2 + t_3 - t_4}{2} \quad (3)$$

トランスデューサ (村田製作所製, MA23L3) を Fig. 4 に示したように配置し, 実験システムを製作した. ただし, 図中 W の値は 1.75 [cm], H の値は 3 [cm] とした. 各トランスデューサの直径は 2 [cm] であり, 共振周波数は 25 [kHz] である. なお, 各受信器における伝搬時間の測定は, 測定用のタイマを 4 個用意することにより, 同一の送信波に対して同時に行うことができるようにしてある.

5. 壁面の法線方向測定実験

まず, センサ全体を -54 度 $\sim$ 54 度まで 0.9 度おきに回転させ, 平滑な壁面に対して角度を 1 回ずつ測定した. Fig. 5 と Fig. 6 は, それぞれ壁面までの距離が 70 [cm] と 150 [cm] のときの伝搬時間 (a) と求められた壁面の法線方向 (b) を示している. なお, 図中の R1 $\sim$ R4 は, Fig. 4 に示した配置図中のトランスデューサの記号と一致させてある. Fig. 5, 6 の (a) より, 超音波の伝搬時間は角度の変化に比例して変化しているが, ある角度において約 40 [μ s] の離散的な変化が現れている. 40 [μ s] は 25 [kHz] の超音波の一周期に相当する時間であり, この変化がリーディングエッジの誤検出によるものである. 受信器を 2 個しか用いないシステムでは, ここで角度測定誤差が発生するが, 本手法では前述したアルゴリズムにより Fig. 5, 6 の (b) に示したように壁面の法線方向を正しく求めることができている. なお, 計測に要した時間は, 音波の往復伝搬時間, 補正計算時間を含めて壁面までの距離が 70 [cm] の場合には約 5 [ms], 150 [cm] の場合には約 10 [ms] である.

Fig. 5 Measured time-of-flight (a) and the normal direction of the wall (b). (Distance to the wall: 70 [cm])

次に, 壁面までの距離を 50 [cm] $\sim$ 370 [cm] まで 20 [cm] おきに变化させ, 各距離においてセンサを -63 度 $\sim$ 63 度まで 0.9 度おきに回転させて, 角度を 1 回ずつ測定した. このとき, 角度を正しく求めることのできた範囲を調べた結果を Fig. 7 に示す. この図は, 横軸がセンサと壁面との距離, 縦軸が壁面の角度であり, 白い領域は壁面の法線方向が正しく求められた場合を示しており, 黒い領域は反射波が戻らなかったりして角度を求めることができなかった場合を示している. この図から, 距離が 50 [cm] $\sim$ 150 [cm] の間で壁面の角度が -27 度 $\sim$ 27 度の範囲内であれば, ほぼ確実に角度を得ることができる.

さらに, 壁面に対して 50 [cm], 100 [cm], 150 [cm] の各距離で, センサを -45 度 $\sim$ 45 度まで 0.9 度おきに回転させて角度の測定をそれぞれ 50 回ずつ行い, 測定値の平均値と標準偏差値を計算した結果を Fig. 8 に示す. 縦軸は測定値の平均値と実際の角度との差であり, 誤差棒はその長さを標準偏差値の 2 倍としてある. この図からは, 角度測定の誤差は長距離になるほど発生しやすいが, その誤差は 2 度 $\sim$ 3 度程度であることが分かる. また, 角度が大きくなるにつれて誤差が増大するのは, 正弦関数の近似 $\theta \approx \sin \theta$ を用いた式 (1) が成立しなくなっていることが原因と考えられる. なお, 誤差が正に偏っているのは, センサと壁面を正対させて設置したときのアライメントのずれによるものと思われる.

6. ま と め

本論文では, 筆者らの提案している移動ロボット用の超音波センサシステムに改良を加え, 壁面までの距離と壁面の法線方

Fig. 6 Measured time-of-flight (a) and the normal direction of the wall (b). (Distance to the wall: 150 [cm])

Fig. 7 Region where the normal direction of the wall can be measured.

向を高速に測定することのできる方法を提案した。本システムでは、一つの送信器と四つの受信器を用いることにより、超音波のリーディングエッジの誤検出に基づく角度測定誤差を補正している。本システムの有効性を検証するために測定システムを製作して実験を行った結果、本システムにより壁面の法線方向が正しく求められることが分かった。

参考文献

- [1] H.P. Moravec and A. Elfes: "High Resolution Maps from Wide Angle Sonar," Proc. 1985 IEEE Int. Conf. on Robotics and Au-

Fig. 8 The average and the standard deviation of the measured value of the normal direction of the wall. Distance to the wall is 50 [cm] in (a), 100 [cm] in (b) and 150 [cm] in (c).

tomation, pp.116-121, 1985.

- [2] J. Borenstein and Y. Koren: "Histogrammic In-Motion Mapping for Mobile Robot Obstacle Avoidance," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.7, no.4, pp.535-539, 1991.
 [3] 中嶋新一, 高橋慎一: "分布型受信器を持つ姿勢計測用超音波センサ", 日本ロボット学会誌, vol.6, no.1, pp.52-61, 1988.
 [4] Y. Nagashima and S. Yuta: "Ultrasonic Sensing for A Mobile Robot to Recognize An Environment—Measuring The Normal Direction of Walls—," Proc. of the 1992 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.805-812, 1992.

大矢晃久 (Akihisa Ohya)

1965年3月16日生。1987年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。1992年同大学大学院理工学研究科後期博士課程電気工学専攻修了。工学博士。同年4月筑波大学電子情報工学系助手。1994年同講師。移動ロボットのためのセンシングシステムに関する研究に従事。超音波センサ、視覚センサとそれら

を用いた移動ロボットのナビゲーションなどに興味を持つ。電子情報通信学会、計測自動制御学会、日本音響学会各会員。

(日本ロボット学会正会員)

永島良昭 (Yoshiaki Nagashima)

1969年2月20日生。1991年筑波大学第三学群情報学類卒業。1993年同大学大学院修士課程理工学研究科修了。同年、株式会社日立製作所に入社。在学中は、移動ロボットの超音波センサの研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)

油田信一 (Shin'ichi Yuta)

1948年3月23日生。1975年慶應義塾大学大学院(電気工学専攻)修了。現在筑波大学電子情報工学系教授。知能移動ロボット、ロボットセンサ、ロボット用コントローラなどの研究に従事。自動制御や信号処理の理論と応用にも興味を持つ。工学博士、IEEE、計測自動制御学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)