スライディングモードシステムを用いた超音波センサの混信回避*

江 丸 貴 紀^{*1}, 土 谷 武 士^{*1}

Avoiding Crosstalk of Sonar by Using Sliding Mode System

Takanori EMARU^{*2} and Takeshi TSUCHIYA^{*2} Graduate School of Engineering, Hokkaido University,
N13W8, Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido, 060-8628 Japan

For autonomous mobile robots, sensors are very important to recognize an environment. In this paper, we pick up ultrasonic wave sensor, which today is the most common technique employed on indoor mobile robotic systems, and we propose a new technique to avoid crosstalk of sonar sensors. Even though many methods have been proposed to avoid crosstalk, it is very difficult to eliminate the influence of crosstalk perfectly. In this paper, supposing the continuity of the distance signal given by the sonar, we smooth the distance value. The estimator is based on the *sliding mode system*.

Key Words: Sensor, Filter, Supersonic Wave, Information Processing and Signal Analysis, Moving Robot, Crosstalk

1. は じ め に

超音波センサは、小型、軽量、システムの構成が簡単などの特徴を持ち、多くの自律移動ロボットにおいて自己位置同定⁽¹⁾、ナビゲーション⁽²⁾、障害物回避⁽³⁾などを行うために用いられている。しかし、実環境では測定に際して様々なエラーが混入する。本論文では、その中で超音波センサの混信を取り上げ、混信を伴うセンサデータから、平滑値・微分値を推定する。

1.1 混信とは 安価でシステムの構成が簡単、という理由から、複数の超音波センサが自律移動ロボットに搭載されることが多い。このとき、隣接した複数の送信器から同時に超音波を送出すると、互いに干渉し、正しい測距ができない。また、超音波センサを搭載した他のロボットが近づいてきたときも、干渉は避けられない。このような干渉の結果、計測に際してエラーが混入する。これが、混信と呼ばれる現象である。

一般に用いられている *TOF (Time-of-flight)* による測距システムは、超音波のパルスを送出し、対象物からの反射波の振幅がある閾値を越えるまでの時間を計測することによって測距を行う。複数の物体を同時に検出するために、受信波形の中にある複数の反射波を利用する研究⁽⁴⁾もあるが、ここではシステムの構成を簡単にするため、一番最初に受信された反射波だけを用いることにする。

Fig. 1 Sonar data with crosstalk

Fig. 2 Situation of crosstalk

混信は、自らが送出した超音波が戻ってくる前に、他の送信器からの超音波を受信することによって生じる。そのため、実際の距離値よりも短い値が計測値として得られる。例として、混信を伴う超音波センサのデータを図1に挙げる。横軸が時間、縦軸が距離を表す。なお、ロボットには複数の超音波センサが備えられることが多いが、簡単のため、ここではロボット前方にある1つのセンサのみを用いる。このデータは、図2に示す以下のような状況で得られたものである。

- 測定対象を、超音波センサを備えたロボットとし、

* 原稿受付 2000年6月19日。

^{*1} 正員、北海道大学大学院工学研究科(☎060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)。

E-mail: emaru@ctrl.coin.eng.hokudai.ac.jp

静止させておく。

- データ取得用のロボットは、一定速度で測定対象に近づきながら距離のセンシングを行う。

正確な距離値が得られれば、グラフは右下がりの直線になるはずだが、混信の影響により、実際の距離値よりも短いインパルス性の雑音が大量に混入している。なお、本論文では図1の右下がりの直線を信号成分、インパルス性の信号を雑音成分としている。本論文の目的は、このような混信の状況下で得られるセンサデータの平滑化、そして微分値の推定である。これは、移動障害物の回避などを考えた場合、距離のみならずその微分値、すなわち速度を得ることが大変有用だからである⁽⁵⁾。我々は、反射波が必ずしも得られない場合の問題解決手法としてESDS⁽⁶⁾ (*the system which Estimate the Smoothed value and the Differential value by using Sliding mode system*) を提案しており、本論文ではESDSを混信に適用する。

1.2 従来の混信対策手法とESDSの立場 これまで行われたきた混信に対する研究を、3群に大別する。

第一群は、ロボット自身の有する複数のセンサが相互干渉することを防ぐために、時系列で切り換えてスキャンする方法である⁽⁷⁾。この手法では、トランスデューサが増加するに伴って計測に必要とする時間が長くなるという欠点があり、その高速化に工夫を必要とする⁽⁸⁾⁽⁹⁾。しかし、超音波センサを搭載した他のロボットの接近に対しては本質的に混信が避けられない。

そこで第二群として、送信した自己の信号を、他者の発した信号から識別するという方法がある。送信信号に特徴付けを行い、その特徴抽出を自己相関⁽¹⁰⁾・相互相関⁽¹¹⁾などを利用して行う。混信対策としてはもっとも本格的な手法であるが、特別なハードウェア、また多くの計算量を必要とする。

最後に第三群として、通常用いられているTOFの特徴と、環境やロボットの行動モデルを利用して、期待される距離値を抽出する方法がある。例えば、超音波センサの測定範囲をグリッドでモデル化することにより、センサによって得られた距離値を解釈し、修正を行う⁽¹²⁾ことが行われている。これらの手法では、従来のTOFによって求められた距離値に対して、事前に用意されたモデルを利用することにより修正を行う。

以上、従来の混信対策手法を3つに分類したが、

- 環境中には、超音波センサを搭載する複数のロボットが存在する。
- 特別なハードウェアを用いることなく、またより少ない計算資源でセンサの雑音を除去する。

という点を重視し、我々は第三群のアプローチを採用

Fig. 3 Situation of reflected waves are not always received continuously

Fig. 4 Signal with impulse noise

する。ただし従来の方法と異なるのは、得られた距離値を修正するために特別なモデルを用いず、“時系列的な距離値の傾向(トレンド)”を用いる、ということである。本論文では、このアイデアに基づいて構成されたESDSを混信に対して適用する。

なお、ESDSの構造は非線形フィルタとなるため、非線形フィルタの代表的なものであるメジアンフィルタを比較対象として選んだ。メジアンフィルタについては4章で説明する。

2. ESDS の概要

本章では、ESDSを提案した背景について説明し、システムを構成するための定理、そして実際のシステム構成について説明する。

実環境においては、センシングに際してエラーの混入する要因が数多く存在する。例えば、図3のように、反射波が得られにくい円柱に対して、ロボットが一定速度で近づきながら測距を行うものとする。このとき行った測距の結果が図4である。図1の場合と同様に、正確な距離値を得ることができれば、データは右下がりの直線になるはずであるが、大量のインパルス性雑音が混入している。これは、反射波を受信することができないときには、測定レンジの最大値が距離値として計測されるためである。このように、送出したパルスが受信できない、という状況は、

- ロボットに搭載されたセンシングシステムが、ロボットの移動に基づく振動の影響を受ける。
- 測定対象となる物体、環境が、常に反射波を返しやすそうな面で構成されているとは限らない。

などの理由によって十分に起こり得る。ESDS は、このようなインパルス性雑音を効果的に除去し、同時に微分値の推定を行う⁽¹³⁾。ESDS の概要を以下で述べる。

2.1 定理の概要 インパルス性雑音が混入した信号に対しては、通常の平滑化手法や微分値推定法、例えば帯域通過フィルタや指数平滑法⁽¹⁴⁾では、有効な処理はできない⁽¹³⁾。そこで、このような信号に対してより有効な平滑化・微分値推定を行うシステムとして、以下の手法を提案する。

図 5 に示す推定器において、入力信号 $y(t)$ をセンサによる測定信号とし、 $x_1(t)$ をその平滑値、 $x_2(t)$ を微分推定値とする。以下の定理では、 $t \rightarrow \infty$ のときに $x_1(t)$ が $y(t)$ の推定値となるので、 $x_2(t)$ が $y(t)$ の微分推定値を与える。なお証明については、参考文献⁽⁶⁾を参照して頂きたい。

【定理】 次の式で表されるシステム、

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) \end{cases} \quad (1)$$

が原点で大域的一様漸近安定であれば、次式

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = R^2 f(x_1 - y, x_2/R) \end{cases} \quad (2)$$

の状態 $x_1(t)$ は、 $R \gg 0$ のとき一定信号 $y(t) = C$ に対し漸近する。ただし C は一定とする。

2.2 スライディングモードシステムによる推定器 (ESDS) の構成 以上示した定理を用いて、実際にシステムを構成する。ここでは、大域的一様漸近安定なシステムとして、以下のような非線形な切換線を持つスライディングモードシステムを取り上げる。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -U \text{sign}(Ux_1 + |x_2|x_2/2) \end{cases} \quad (3)$$

ただし $U > 0$ とする。このシステムは、以下の 2 次系

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = u \end{cases} \quad (4)$$

の状態変数 x_1, x_2 を、制御入力 $|u| \leq U$ の制限の下、最短時間で原点に収束させることが保証されており、最短時間システムとして知られている⁽¹⁵⁾。本論文では、最も簡単な二次系として式 (4) を元にシステムを構成したが、他のシステムに変更した場合のフィルタの性能に関する考察は、別報で報告の予定である。

Fig. 5 Aspect of estimator

式 (3) で表される大域的漸近安定なシステムを式 (2) に適用すると、次のようになる。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -UR^2 \text{sign}(U(x_1 - y) + |x_2|x_2/2R^2) \end{cases} \quad (5)$$

式 (5) を以下 ESDS と呼ぶ。実際に処理を行う場合、この微分方程式をルンゲクッタによって逐次解くことになる。計算量であるが、実際にロボットに搭載された 1 チップマイコン (日立:H8/3048F) により実時間で処理可能であるため充分実用的であるといえる。

なお、ESDS の性質は、設計者が任意に与えるパラメータ U, R に依存する。そのため、インパルス性雑音を無視し、ゆっくりと変化する信号成分に追従するように構成された ESDS は、突発的な信号成分の変化に対して素早く追従できない。この欠点を補うため、パラメータの異なる 2 つの ESDS を並列に動作させ、一つはゆっくりとした信号成分に追従、もう一つを突発的な変化の検出用と機能を分担することにより、突発的な信号成分の変化に対応している⁽⁶⁾。なお、パラメータの設計指針については、別報告⁽¹⁶⁾で検討する。

本章では、センシングに際して受ける混信の影響、そしてその雑音を除去するフィルタの性能を定量的に評価するために、2 つの指標を定義する。

3. 定量的評価を与える指標の定義

3.1 混信の影響の定量的評価 測定の結果得られたデータに対して混信がどの程度影響しているか、ということ定量的に評価するために、雑音混入率 (Noise Mixing Ratio : NMR) という指標を定義する。ここで、後述する S/N 比による評価を行わないのには理由がある。S/N 比は信号と雑音の比であるから、S/N 比を用いた評価量は、信号の大きさ、すなわち距離値に依存することになる。ここでは、様々な要因によって引き起こされた混信が、測距に対して結果的に及ぼした影響を評価したい。すなわち、混信が引き起こされる要因とは無関係に、その影響を表す指標が望まれる。そのためには、評価量が「距離」というパラメータに直接依存する形で定義されているとは正確な評価ができない。以上のような理由により、信号成分の大きさに無関係な評価量として、NMR を定義した。

NMR は、測距を行った回数 (K) に対する、混信の影響を受けた回数 (k) の割合を示すもので、以下のよう定義される。

$$\text{Noise Mixing Ratio (NMR)} = \frac{k}{K} \quad (6)$$

なお、距離 L に存在する障害物までの測距を K 回行った場合、超音波センサによって得られる値 $l_i (i =$

Fig. 6 Relation between increment of S/N and NMR

1, 2, ..., K) は次のようになる。

$$l_i = \begin{cases} L & \text{混信がない場合} \\ U(0, L) & \text{混信がある場合} \end{cases} \quad (7)$$

ただし、 $U(0, L)$ は一様分布を表し、0 以上 L 未満のあらゆる実数を等しい確率でとる確率分布である。

3.2 雑音除去性能の定量的評価 提案手法の適用による、混信の影響の軽減を定量的に評価するために S/N 比の増分⁽¹⁸⁾という指標を用いる。これはフィルタ出力 $y(n)$ における S/N 比が、フィルタ入力 $x(n)$ (原信号+雑音) における S/N 比に対し増加した量を示すもので、次式のように計算される。

$$\begin{aligned} \text{Increment of S/N (S/N 比の増分)} \\ &= (\text{Output S/N}) - (\text{Input S/N}) \\ &= 10\log(P_s/\sigma^2) - 10\log(P_s/E) \\ &= 10\log(E/\sigma^2) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで P_s は信号のパワー、 σ^2 は出力誤差 $y(n) - d(n)$ の 2 乗平均、 E は入力雑音のパワーを示す。なお、 $d(n)$ は第 n 時点の真の信号値である。入力雑音のパワー E は雑音の 2 乗平均、すなわち $x(n) - d(n)$ の 2 乗平均として定義した。この定義に従うと、信号のパワー、すなわち信号成分の大きさと無関係に、フィルタの性能を評価できるという長所がある。

なお、実験の結果、S/N 比の増分が 100 を越えると、平滑化結果と原信号はほぼ一致する。そのため、S/N 比の増分が 100 を越えた場合の値は 100 とした。また、定義に従うと、 $\sigma^2 = 0$ 、すなわち平滑結果が原信号と一致するとき S/N 比の増分が計算できない。そこで、このときの S/N 比の増分も 100 とした。

本章では、ここで定義した 2 つの指標を利用して、どのような状況でどの程度の混信が発生するのかを明らかにする。さらに、ESDS・メジアンフィルタによる混信の影響の除去を行い、その性能を評価する。

4. シミュレーション

4.1 ESDS・メジアンフィルタの雑音除去性能の評価 任意の雑音混入率を持つデータを模擬的に作り

Fig. 7 Experimental environment

Fig. 8 Relation between NMR and environmental parameters: an interfering robot

出し、それらに対して ESDS を適用する。なお、比較対象としてメジアンフィルタを取り上げる。メジアンフィルタは、 M 個のサンプルを大きさ順に並べ替え、その中央値をフィルタ出力とするものである。比較的簡単な構造を持ち、かつ良好なエッジ保存性とインパルス性雑音除去能力を有している⁽¹⁷⁾ため、画像処理などの分野で良く用いられている。

混信に対する両手法の特徴を検討するために、雑音混入率が 0%~100% まで 1% 刻みのデータを準備し、それらに対して ESDS、メジアンフィルタを適用した。その結果が図 6 である。横軸が雑音混入率、縦軸が S/N 比の増分を表す。この図から、ESDS が、40% 程度の NMR まで高い S/N 比の増分を持つ、すなわち効果的な平滑化が可能であることがわかる。一方、メジアンフィルタでは、NMR が 20~25% 以上になると、望ましい平滑化を行うことができない。

4.2 測距条件と雑音混入率との関係 雑音混入率 (NMR) は、各々の超音波センサが測距を行うサンプリングタイム、お互いの距離や位置、測距対象までの距離、そして環境など様々な要因によって影響を受ける。そこで、どのような状況でどの程度の NMR となるのかを明らかにするため、シミュレーションを行った。想定している環境を図 7 に示す。A は測距を行う

Fig. 9 Relation between NMR and environmental parameters : interfering robots (1)

Fig. 10 Relation between NMR and environmental parameters : interfering robots (2)

ロボットであり、距離 L の障害物に対して測距を行う。ロボット B は、超音波を送出することによって混信を引き起こし、 A が行う測距を妨げる。問題設定に関して以下の仮定を用いている。

- 測距を行うロボット(A)の他に、 N 台のロボット($B_j: j=1, 2, \dots, N$)が存在する。 B_j から送出された超音波は、必ず A に干渉するものとする。
- そのタイミングは、 B_j のサンプリングタイム内にランダムに1回とする。
- 超音波センサ A が測距を行っている間(超音波を送出してから戻ってくるまでの間)に B_j からの超音波を受信したとき、混信が起こったとする。

ここで、混信が引き起こされるタイミングはランダムであると仮定しているが、混信には周期性があるという主張もある⁽¹⁹⁾。ロボット同士の位置・方向・距離、そして環境が不変であれば周期性が現れることも考えられるが、ロボットが動いていれば、お互いの位置や方向は時々刻々と変化する。このような考え方に基き、ここでは混信の影響をランダムであるとした。

以上の条件に従い、次のシミュレーションを行う。

1. 干渉を引き起こすロボット(B_j)が単数。
2. 干渉を引き起こすロボット(B_j)が複数。

また、NMRを決定するため、いずれの場合も10000回の測距を行い、混信の生じた回数をカウントした。

4.2.1 干渉ロボット：単数 測距を行うロボット(A)の他に、ロボットが1台(B_1)存在する。 A のサンプリングタイムは30[msec]で固定とし、測定対象物までの距離を20~480[cm]とする。また、 B_1 のサンプリングタイムを6~60[msec]とした。このときのNMRを図8に示す。障害物までの距離が長くなるほど、そして、測距に干渉する超音波センサのサンプリングタイムが短くなるほど、混信の影響が大きい。

また、このとき得られたデータを検証した結果、混信がある場合の距離値が一様分布に従っていることが確認された。従って、先ほどのシミュレーション結果(図6)を利用できる。例えば測距に干渉する超音波センサのサンプリングタイムが30[msec]、すなわち測距を行う超音波センサのサンプリングタイムと同じとき、ESDSでは200[cm]程度(図中●)まで望ましい平滑化が可能である。図8より、このときのNMRは41[%]であり、図6より、ESDSによって処理したときのS/N比の増分は57[dB]となる。200[cm]の測定に対する平滑化の結果、その誤差は高々0.2[cm]程度となり、実用上十分な精度となる。その一方、メジアンフィルタでは100[cm](図中■)を越えると望ましい平滑化ができない。図8より、測距距離が120[cm]のときのNMRは25[%]となり、図6より、メジアンフィルタ($M=49$)によるS/N比の増分は42[dB]となる。平滑化の結果、120[cm]の測定に対して誤差が最大20[cm]となり、平滑結果として妥当ではない。このように、ESDSはより広い範囲で信号を平滑化できる。

4.2.2 干渉ロボット：複数 測距を行うロボット(A)の他に、ロボットが N 台存在($B_j: j=1, 2, \dots, N$)する。 A のサンプリングタイムは30[msec]で固定とし、測距対象物までの距離を20~480[cm]とする。このときのNMRを、図9,10に示す。これらのデータも、干渉ロボットが単数の場合と同様に一様分布に従うことが確認された。図9は、 B_j のサンプリングタイムが

Fig. 11 Appearance of our robot

Fig. 12 Experiment of crosstalk : Situation.1

30[msec], 図 10 は 60[msec] の場合である。測距対象物までの距離が長くなるほど、そしてロボットの台数が増えるほど、混信の影響を強く受けている。さらに図 9,10 を比較すると図 9 の方が混信の影響を強く受けており、測距に干渉する超音波センサのサンプリングタイムが短いほど、混信の影響が大きくなっている。お互いの超音波は必ず干渉する、という最悪の条件のため、ロボットの台数が増えるに従って混信の影響が大きくなっているが、実際には、ロボットが増加しても、その全てのセンサが干渉するとは考えられない。そのため、実際にはより多くのロボットが、混信の影響を回避しながら環境中に存在できる可能性がある。

Fig. 13 Experimental data without crosstalk (B)

Fig. 14 Processed result by using ESDS (Sensor B)

4.3 考察 以上の結果から、ESDS は、混信の存在 (図 1), 反射波が必ずしも得られない (図 4) という異なった原因に基づくインパルス性雑音を、その区別無く除去できる。その理由を考察する。ESDS は、スライディングモードを用いて構成されており、あるトレンドを持つ信号が入力されたとき、その入力を原点とする切換線が定義され、システムの状態はその切換線に向かう。トレンドから離れた突発的な入力、すなわちインパルス性雑音が入力した場合、その雑音を原点とする新たな切換線が定義され、システムの状態はその切換線に向かうが、ESDS 内部の飽和要素 (signum 関数) が過大な応答を抑制する。そのため、雑音への応答を抑制しつつ、トレンドへの追従を可能にする⁽¹⁶⁾。

なお、混信の存在に起因するインパルス性雑音の場合、ESDS では NMR が 40% 程度のデータまで平滑化が可能である。ところが、反射波が必ずしも得られない場合、NMR が 50% 程度のデータまで平滑化することができる⁽⁶⁾。これは、反射波が得られない場合のデータは、測定レンジの最大値であるからトレンドから大きく外れるが、混信の場合は一様分布となることに起因していると考えられる。

5. 実機による検証

本章では、ESDS による混信回避の有効性を実際のロボットによって検証する。実験を行ったロボットの

Fig. 15 Experimental data with crosstalk (Sensor B)

Fig. 16 Processed result by using ESDS (Sensor B)

Fig. 17 Experiment of crosstalk : Situation.2

概観を図 11 に示す。

主な実験環境 2 例を図 12, 17 に示す。まず、図 12 は、静止したロボット前方に 4 つのセンサを配置し、その前を障害物となるロボットを通過させた実験の様子である。ここで、4 つの超音波センサを、左から A, B, C, D とする。このとき、障害物となるロボットの超音波センサを、図のように 1 つだけ駆動させた。なお、測距用のロボットに搭載された超音波センサのサンプリングタイムを 25[msec]、ノイズとなるセンサのサンプリングタイムを 30[msec] とした。

最初に混信の有無による影響を調べるために、混信がない場合のデータを図 13 に、そして混信がある場

合のデータを図 15 に示す。いずれのデータもトランスデューサ B によって得られたものである。比較してわかるとおり、混信の影響によって、実際の距離よりも短いものが測定値として得られている。これらのデータを、ESDS によって処理したものが図 14, 16 である。図 16 のとおり、特徴的な混信の影響が、ESDS によってほぼ除去できていることが確認できる。さらに、ここで求められた測距方向の速度について、平均・分散・標準偏差を求めてみたが、混信がある場合、無い場合とも速度 0 という推定結果が得られており、分散も十分小さいことから、望ましい推定が行われていることが確認できた。

なお、実験結果を NMR や S/N 比の増分によって評価することは大変困難である。なぜなら、測定対象が常に平面で構成されているわけではなく、かつセンサがある程度広い指向性(半値角:20~30 度)を持つために、厳密な距離値の定義が難しいからである。この点は、今後の課題としたい。

次に、図 17 はロボットの前に 2 つ、側部に 2 つのセンサを配置し、壁際に置かれた障害物の横を、前方の壁に向かって一定速度で前進するものである。ここで、4 つの超音波センサについて左前方を A とし、時計回りに B, C, D とした。これも同様に、障害物となるロボットの超音波センサを、図のように 1 つだけ駆動させた。実験結果としてロボット側部のセンサ C

Fig. 18 Experimental data with crosstalk (Sensor C)

Fig. 19 Processed result by using ESDS (Sensor C)

Fig. 20 Experimental data with crosstalk (Sensor A)

Fig. 21 Processed result by using ESDS (Sensor A)

によって得られたデータを図 18 に、ロボット前方のセンサ A によって得られたデータを図 20 を示す。まず、ロボット側部のセンサについてだが、先ほどと同様に図 19 のような結果が得られた。平滑値・測距方向の速度ともに望ましい値が得られている。次に、ロボット前方のセンサについてであるが、図 21 のような結果が得られた。ロボットの測距方向の速度は 7.0[cm/sec]であったが、収束にかかるまでの時間が 1.35[sec]、実験により求められた推定速度が 7.03[cm/sec]、分散が 0.25 となり、精度の良い測定がばらつき無く行われていることがわかる。

6. 結 論

我々は、センサによって得られる信号の連続性を利用して、その平滑化・微分値推定を行う ESDS を提案している。本論文では、この ESDS を超音波センサの混信問題に対して適用し、シミュレーション・実験によってその有効性を確認した。本手法を適用することによって、既存のシステムに手を加えることなく、環境中に複数のロボットが存在することが可能になる。また、そのロバスト性は、インパルス性雑音に対してロバストであるメジアンフィルタと比較しても高い。

さらに、移動ロボットを用いた実験によって、シミュレーションのみならず、実環境における ESDS の有効性を明らかにした。結果を、以下にまとめる。

- 環境中に、超音波センサを備えた他のロボットが存在した場合、距離データは混信によって大きな影響を受ける。しかし、ESDS を適用することによって、その影響を大幅に軽減することができる。
- ESDS による微分値の推定を行い、平均・分散により評価した。その結果、測距方向の速度成分については、精度良く求められた。

これらの結果が、比較的簡単な計算によって求まり、さらに、反射波が必ずしも得られないことに起因するノイズ、混信に起因するノイズを区別することなく除去できる、という点で本手法は有効である。なお、

- 推定された距離・速度を利用して、障害物に衝突するまでの時間を予測する。
- 上記で推定された時間を用いることによって、自律移動ロボットにおいて、静止障害物・移動障害物などに対する有効な回避行動を生成する。

などが今後の課題として挙げられる。

文 献

- (1) 関啓明・田中康夫・高野政晴・佐々木健, 超音波灯台を用いた屋内移動ロボット用位置検出システム, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1996), 13-14.
- (2) Maja J. Mataric, Integration of Representation Into Goal-Driven Behavior-Based Robots, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 8-3 (1992-6), 304-312.
- (3) N.E.Pears, An Intelligent Active Range Sensor for Vehicle Guidance: System Overview, *Proc. of the 1996 IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS'96)*, (1996), 81-88.
- (4) 矢田晃子・大矢晃久・油田信一, 高速・高精度に反射点群を計測可能なソナーリングシステム, 日本ロボット学会誌, 17-8 (1999), 121-130.
- (5) 石川繁樹・浅香俊一, 移動障害物を含むような動的変化を伴う走行環境における自律移動ロボットの走行誘導方式, 日本ロボット学会誌, 11-6 (1993), 856-867.
- (6) 江丸貴紀・土谷武士, スライディングモードを利用したセンサ情報に対する平滑化および微分値推定法(超音波センサへの適用), 機論, 66-652, C (2000), 3947-3954.
- (7) Hans Moravec and A. E. Elfes, High Resolution Maps from Wide Angle Sonar, *Proc. of the 1985 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (1985-3), 116-121.
- (8) Johann Borenstein, The Vector Field Histogram - Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 7-3, (1991), 278-288.
- (9) 梅田和昇・木村久幸・太田順・廣瀬毅, 複数の超音波センサと画像情報の融合による移動ロボット用センサシステムの構築 - 第 1 報カルマンフィルタを用いた移動物体の運動計測 -, 第 13 回日本ロボット学会学術講演会, (1995), 305-306.
- (10) K.Audenaert, H.Perremans, Y.Kawahara and J.Van Campenhour, Accurate Ranging of Multiple Objects using Ultrasonic Sensors, *IEEE Int. Conference on Robotics and Automation Vol.2*, (1992), 1733-1738.
- (11) Tsutomu Tanzawa, Noriaki Kiyohiro, Shinji Kotani and Hideo Mori, The Ultrasonic Range Finder for Outdoor Mobile Robots, *IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems Vol.3*, (1995), 368-373.
- (12) J. Borenstein and Y. Koren, Histogramic In-Motion Mapping for Mobile Robot Obstacle Avoidance, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 7-4, (1991), 535-539.
- (13) 江丸貴紀・高氏秀則・及川一美・土谷武士, 超音波センサの距離値に対する平滑化, 及び微分値推定法の提案, 第 4 回ロボティクスシンポジウム, (1999), 56-61.
- (14) 柳井浩, Z 変換とその応用: 予測と見積り基礎, (1988), 91-132, 日科技連出版会.
- (15) 平井一正・池田雅夫, 非線形制御システムの解析, (1986), 49-52, オーム社.
- (16) 江丸貴紀・及川一美・土谷武士, 位相面を利用した ESDS の理論的検討, 第 6 回ロボティクスシンポジウム, (2001), 125-130.
- (17) 前田隆宏・棟安実治・雛元孝夫, 対向伝搬ネットワークを用いた適応形荷重メジアンフィルタ, 電子情報通信学会論文誌 A, J80-A-1(1997), 19-26.
- (18) 荒川薫・原島博, バックプロパゲーションによる階層形ニューラル非線形フィルタの設計, 電子情報通信学会論文誌 A, J74-A-3(1991), 421-429.
- (19) J. Borenstein and Y. Koren, Error Eliminating Rapid Ultrasonic Firing for Mobile Robot Obstacle Avoidance, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 11-1(1995), 132-138.