外乱が存在する環境下での マルチ超音波センサシステムの誤動作確率

高橋 隆行* 石山 敏規* 中野 栄二*

Probability of Erroneous Measurement of a Multi-Sonar-System under the Influence of Disturbances

Takayuki Takahashi*, Toshinori Ishiyama* and Eiji Nakano*

A multi-sonar-system for mobile robots under the influence of external disturbances is discussed. Many robots have on board more than ten sonars to detect obstacles on their surroundings. One of the most serious problem of such a multi-sonar-system is to prevent a crosstalk between sonars. Some papers reported a method that the transmitting signal of each sensor is modulated by unique binary pattern to identify individual sonar and to reduce the crosstalk. The authors have examined the probability of erroneous measurement of a multi-sonar-system whose transmitting signals are modulated by unique patterns, and proposed a method to synthesize a set of the pattern which gives the desired probability of erroneous measurement. In this paper, we extend the method to the multi-sonar-system under the influence of external disturbances. The effectiveness of a median filtering technique to reduce the probability of erroneous measurement is also discussed. Finally, some experimental results using a real robot are presented to verify the results.

Key Words: Sonar, Ultrasonic Sensor, Probability, Erroneous Measurement, Mobile Robot

1. はじめに

超音波センサは、ロボットの周囲環境を観測するためのデバイスとして、従来より広く用いられている [1]~[6]。しかし、死角が生じないようにするためには、ロボットの周囲に十数個以上のセンサを配置する必要がある。このような状況で単パルスのパルスエコー法を用いた場合、信号同士が混信を起こしてしまい、正確な距離計測は困難となる。これを避けるには、各センサを順次動作させる方法が考えられるが、その場合には、すべてのセンサの測定が終了するまでに、長時間を要してしまう。また、同じ環境で複数のロボットが同時に動作している場合や、送信信号に似たパルス状の超音波ノイズが環境に存在する場合にも、同じように誤動作を生じる。

これらの問題に対処するために、これまで、いくつかの研究がなされてきた。Borenstein ら [1] は、単パルスの送信タイミングを適切に選択することにより、また丹沢ら [2] や川端ら [9] は、複数パルスの送信パターンを各センサで固有に設定して受信信号間で相互相関を計算することにより、それぞれ混信の問題を解決しようと試みた。さらに丹沢ら [3] は、環境に存在する超音波ノイズの誤動作に対する影響を、雑音に対する強度を表す指標を用いて定量化を試みた。

筆者らは先の報告 [6] [7] において、送信パターンを各センサで固有に設定して送信する丹沢らの方法 [2] について考察し、センサ数の増加に伴ってパターンの長さが急激に増大してしまうことを指摘した。その上で、誤動作確率の理論的考察に基づき、誤動作をある程度許容することでパターンの長さを大幅に短縮できることを示し、合理的なパターン生成法を提案した。

本論文ではまず、先に提案した誤動作確率の解析法を環境にパルス状の超音波ノイズがある場合に拡張し、その場合にも誤動作確率が解析的に求められることを示す。次に、単発的に生じる誤動作を除去する目的で、過去のいくつかの測定値を用いてメジアンフィルタを構成することがあるが、これを誤動作確率の観点から考察し、その有効性および利用法について、理論的および実験的に検討する。また、得られた結果を移動ロボットに搭載されたセンサシステムに適用し、その有効性を実験により検証する。

2. 複数の超音波センサを同時に動作させる方法

2.1 原理と問題点

丹沢 [2] らの方法では、送信パターン（送信信号）は以下のように決定される。すなわち、値として 0 または 1 をとる長さ L の送信信号 $T(i)$ を

$$\sum_{i=0}^{L-1} T(i) \cdot T(i+d) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{L-1} T(i) & (d=0) \\ 1 \text{ or } 0 & (d \neq 0) \end{cases} \quad (1)$$

原稿受付 1999 年 2 月 8 日

*東北大学大学院情報科学研究科

*Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

Fig. 1 A ghost of the transmitting signal $T_a(i)$ formed by some reflected signals [6]

なる関係を満たすようにとる。ここで d は、 $L-1$ 以下の任意の整数である。また、センサが S 個存在する場合には、任意に選んだ二つの送信信号 $T_a(i)$ 、 $T_b(i)$ のすべての組み合わせに対して

$$\sum_{i=0}^{L-1} T_a(i) \cdot T_b(i+d) \leq 1 \quad (0 \leq d < L) \quad (2)$$

なる関係式も満たさなければならない。

いま、式 (1) および (2) を満たす S 個の $T_1, T_2, \dots, T_S$ が、Fig. 1 に示したように、それぞれ適当な時間差をもってある一つの受信素子により受信された場合を考えよう。このとき、センサ U_a で受信された受信信号を R_a とすると、 R_a の中には U_a が発信した送信信号 T_a に対応する反射信号 R_{aa} の他に、 U_a 以外の他の $S-1$ 個のセンサからの反射信号 $R_{\bar{a}a}$ が含まれている。この R_{aa} および $R_{\bar{a}a}$ があるタイミングで受信されたとき、Fig. 1 に示すように T_a とまったく同じパターン T_a' を作ってしまう場合がある。このとき、測距結果は誤ったものとなる。

この問題は、送信信号長さ L を十分に大きくとることで回避可能である [6]。しかしその場合、センサ数 S の増加に伴って L が急激に増大してしまう。例えば $S=24$ のときは L は 7200 を超えるものとなり、送信信号の送出やそれを検出するための相互相関演算に、無視できない時間を要することになる。

2.2 誤動作確率と送信信号長さ

筆者らは、前節の原理に基づく超音波センサシステムに対して、誤動作をある程度許容することで、 L を大幅に短縮できることをすでに示してきた [6]。ここでは、その内容のうち次章以降の議論に必要な部分をまとめておく。

解析では次の仮定を設けた。

- 誤動作確率を計算する際の時間軸は、送信信号のパルス幅を単位として離散化し、各信号の飛行時間もパルス幅の整数倍とする。
- 各センサの送信信号は式 (1) および (2) を満たし、かつ、パルス数 N 、信号長さ L は、 S 個すべての送信信号で等しいものとする。
- すべての反射信号は、互いに必ず重なり合うような最悪条件を考える。この条件により、確率を考える全事象集合は $(2L)^S$ 個の元をもつ有限集合になる。

Fig. 2 An example of a progression of correlation state; $\{e_1, e_2, e_3, e_4\} = \{0, 2, 0, 1\}$ [6]

また、受信信号 R_a から送信信号 T_a の飛行時間を検出するための相関値は次式により計算する。

$$C(T_a, R_a; d) = \sum_{i=0}^{L-1} T_a(i) \cdot R_a(i+d) \quad (3)$$

$T_a(i)$ と $R_{aa}(i)$ はある $d = d_0$ で完全に一致する。 $R_a(i)$ が $R_{aa}(i)$ を含むことより、このとき $C(T_a, R_a; d_0)$ は、上述の仮定 (b) から最大値 N をとる。

ところで、前節で述べたような原理で生じる誤動作の生起確率を解析するために、筆者らは相関状態数列を導入した。

相関状態数列とは、反射信号 $R_{1a}, R_{2a}, \dots, R_{Sa}$ のうちで、 T_a' の i 番目のパルス p_i と重なるパルスを有するものの数を e_i としたときに、 $\Pi = \{e_1, e_2, \dots, e_N\}$ と表される数列のことである (Fig. 2)。これにより T_a' を構成する反射信号の状態を分類することができる。例えば $N = S = 2$ のとき、 R_a の全事象集合は相関状態数列を用いて

$$\{\Pi_j\} = \{\{0, 0\}, \{1, 0\}, \{0, 1\}, \{2, 0\}, \{0, 2\}, \{1, 1\}, \{2, 1\}, \{1, 2\}\} \quad (4)$$

と表すことができる。なお、 $Q(\Pi)$ を Π に含まれる 1 以上の e_i の個数を与える演算子と定義すると、 Q は R_a と T_a' の相関値を与えることは明らかである。したがって、相関値が A 以上の場合に測距を行うとすると、測距の対象となる事象の集合は $\Omega_A = \{\Pi_j | Q(\Pi_j) \geq A\}$ と表すことができる。

この相関状態数列を用いて、誤動作確率 P_G は次のように求めることができる。

$$P_G = \frac{1}{(2L)^S} \sum_{\Omega_A} g_j \quad (5)$$

ここで g_j は、各 Π_j に含まれる誤動作を生じる事象の数であり、 Π_j に対応して決まる。以下 j を省略して書くと、

$$g = h_{00} \cdot h_{01} + h_{10} \cdot h_{11} \quad (6)$$

であり、それぞれ

$$h_{00} = \{2L - N(N-1) - 1\} \cdot (2L - N^2)^{S - \sum e_i - 1} \quad (7)$$

$$h_{01} = \frac{(\sum e_i)!}{e_1! \cdot e_2! \cdot \dots \cdot e_N!} \cdot {}_{S-1}C_{\sum e_i} \cdot N^{\sum e_i} \quad (8)$$

$$h_{10} = (2L - N^2)^{S - \sum e_i} \quad (9)$$

$$h_{11} = \frac{(N-1)(\sum e_i)!}{e_1! \cdot e_2! \cdot \dots \cdot e_N!} \cdot {}_{S-1}C_{\sum e_i - 1} \cdot N^{\sum e_i - 1} \quad (10)$$

で与えられる [6]. これを Ω_A に含まれるすべての Π_j について求めれば, 式 (5) により誤動作確率 P_G を求めることができる.

前報 [6] では, 例えばセンサ数 $S = 12$, パルス数 $N = 4$ のときに, 混信による誤動作をまったく起こさないように送信信号を決定すると必要な信号の長さは 936 となるが, 0.3% の誤動作を許容することで, 送信信号の長さが約 10 分の 1 の $L = 98$ に減少することを示した.

また同じ誤動作確率に対して S , N および L には複数の組み合わせが存在する. 本手法の標準的な利用法としては, センサ数 S が与えられたときに, L が最も短くなるように N を選択するということが考えられる. 例えば $S = 10$ のとき, 誤動作確率を $P_G \leq 0.06\%$ の範囲に設定した場合には送信信号のパルス数を $N = 5$, $0.06\% < P_G \leq 0.78\%$ の範囲では $N = 4$, $0.78\% < P_G$ の範囲では $N = 3$ とすると送信信号の長さ L が最も短くなることが明らかになっている [6]. 他の S についても同様に, 誤動作確率の許容範囲から送信信号の最適な L を見つけることができる.

3. 外乱影響下での誤動作確率

本章では, これまでの議論を, 環境にパルス状の超音波ノイズが存在する場合に拡張する. すなわち, 混信と外乱の両方を考慮した誤動作確率の解析法を示し, 実験により検証する. なお, ここで考える外乱は, 以下の仮定を満たすものとする.

- (a) 外乱はインパルス状である.
- (b) 外乱のパルス幅は送信信号のそれと等しい.
- (c) 外乱は, 最も誤動作を生じやすいタイミングに発生する.

インパルス状の外乱は, 例えばエンジンのかかっているオートバイなどから発生し, 特に屋外での使用を考えた場合には, 超音波センサにとって極めて有害な外乱となる [3]. 他方, 屋内においては, 超音波センサを搭載している他のロボットから発生するような場合が考えられる. 仮定 (b) に関しては, 仮に外乱のパルス幅が広い場合には, パルス数が増加したものとして扱えばよいので, この仮定は一般性を失うことはない. また, (c) の仮定は, 誤動作確率の最悪値を評価するためのものである. これは, Fig. 1 において T'_a に重なるように外乱が混入した場合に相当する. この仮定により, 外乱位置の全事象数は L となる.

3.1 外乱影響下での誤動作確率の性質

外乱のパルス数を N_n , 相関の閾値を A とした場合の誤動作確率を $P_N(N_n, A)$ とする. さらに, 相関値が厳密に q のときの誤動作確率を $\tilde{P}_N(N_n, q)$ とすると, P_N と $\tilde{P}_N$ の間には

$$\begin{aligned} P_N(N_n, q) &= \tilde{P}_N(N_n, q) + \tilde{P}_N(N_n, q+1) + \cdots + \tilde{P}_N(N_n, N) \\ &= \tilde{P}_N(N_n, q) + P_N(N_n, q+1) \end{aligned} \quad (11)$$

なる関係があり,

$$\tilde{P}_N(N_n, q) = P_N(N_n, q) - P_N(N_n, q+1) \quad (12)$$

を得る. ここで, 相関値がパルス数 N を超えることはないので,

$$\tilde{P}_N(N_n, N) = P_N(N_n, N) - P_N(N_n, N+1)$$

$$\begin{aligned} &= P_N(N_n, N) - 0 \\ &= P_N(N_n, N) \end{aligned} \quad (13)$$

である. また, $N_n = 0$ のときは外乱がない場合の誤動作確率に等しいので

$$P_N(0, q) = P_G|_{A=q} \quad (14)$$

が成り立ち, この具体的な値は式 (5) で計算できる.

3.2 誤動作確率 $P_N(N_n, q)$ の計算

前節で定義した $P_N(N_n, q)$ は, 次のように考えることで求めることができる.

- (a) 外乱パルス数が $N_n - 1$ のときに, すでにセンサ同士の混信により相関値が q 以上となっている場合には, N_n 個目の外乱パルスがどの位置に乗っても相関値は q 以上となる.
 - (b) 外乱パルス数が $N_n - 1$ のときに, すでにセンサ同士の混信により相関値がちょうど $q - 1$ となっている場合には, N_n 個目の外乱パルスが T'_a の残りのパルスの位置に乗れば相関値が q になる. このような事象の数は $N - (q - 1)$ 個ある.
 - (c) 外乱パルス数が $N_n - 1$ のときに, センサ同士の混信による相関値が $q - 2$ 以下の場合には, N_n 個目の外乱パルスがどの位置に乗っても相関値は q 以上にはならない.
- このことより,

$$P_N(N_n, q) = P_N(N_n - 1, q) + D(q) \tilde{P}_N(N_n - 1, q - 1) \quad (15)$$

が成り立つ. 右辺の各項がそれぞれ上の (a) および (b) の条件に対応する. (c) は誤動作を生じないのでゼロであることに注意する. また, $D(q) = \{N - (q - 1)\}/L$ である. これを式 (12) を用いて変形すると

$$\begin{aligned} P_N(N_n, q) &= \{1 - D(q)\} P_N(N_n - 1, q) \\ &\quad + D(q) P_N(N_n - 1, q - 1) \end{aligned} \quad (16)$$

となる. これは漸化式であり, 式 (14) および $P_N(0, 0) = 1$ に注意すると, 任意のノイズ数について誤動作確率 $P_N(N_n, q)$ を求めることができる.

なお, 誤動作確率が上のように与えられたとき, 本試行がベルヌーイ試行であることに注意すると, M 回の試行を行ったときに生じる誤動作回数は二項分布に従う確率変数となる. しかしながら M が十分に大きければ, 中心極限定理によりこの確率分布は正規分布に近似可能である [10]. したがって誤動作回数は, 期待値 μ とその分散 σ^2 が

$$\mu = M \cdot P_N \quad (17)$$

$$\sigma^2 = M \cdot (1 - P_N) P_N \quad (18)$$

で与えられる正規分布に従うと考えて差し支えない.

いくつかの N_n について, 式 (16) を用いて誤動作確率を計算した結果を Fig. 3 に示す. 外乱パルス数 N_n の増加に伴って, 誤動作確率が上昇していることが分かる. しかし, 多少の外乱が存在しても, 誤動作確率が急激に上昇する傾向はない. これは, 2.1 節で述べた方法が, 本質的にインパルス状の外乱に対してロバストであることを示していると言える.

3.3 実験結果

以上の解析を検証するために、**Fig. 4** に示したような装置を用いて実験を行った。超音波の飛行距離は往復 2[m] である。使用したセンサは村田製作所製 MA40B8R/S であり、指向性が 50 [deg]、公称周波数 40 [KHz] のものである。送信信号の 1 パルスは 10 波長のバースト波とした。送信素子を計 5 個、受信素子を 1 個用いている。実験では、最大 40 個の送信素子が場に仮想的に存在する状況をシミュレートするために、一つの送信素子から複数の送信信号を合成して送信した。外乱パルスも同様に、この 5 個の送信素子のうちの一つにランダムに重畳させて送信している。また、用いたセンサの距離分解能は 0.01 [m] であったので、これを超えるような測距誤差があった場合に誤

Fig. 3 Probability of erroneous measurement with impulsive external disturbances ($L = 130, N = 3$)

Fig. 4 Experimental setup of sonars

Fig. 5 Comparison of the experimental and theoretical results about the number of erroneous measurement with impulsive external disturbances ($L = 130, N = 3, N_n = 10$)

動作としてカウントした。

実験結果を **Fig. 5** に示す。ここでは、外乱パルス数 $N_n = 10$ としている。横軸は場に仮想的に存在するセンサの数を表し、縦軸は、5,000 回の送受信に対する誤動作の割合である。実験結果は黒点で示した。仮想センサ数を $S = 5$ から 5 おきに 40 まで増加させ、それぞれについて 5 回ずつの実験を行った。図には、式 (17) および (18) で与えられる誤差範囲を示してある。ここで用いた $\pm 3\sigma$ は品質検査などに用いられる値であり、これにより 99.7% の事象をカバーする。図から明らかなように、すべての実験データは $\pm 3\sigma$ の範囲に収まっており、上で述べた解析の妥当性を裏付けている。

4. メジアンフィルタを用いた場合の誤動作確率

一般に、超音波センサによる測距結果には、単発的な異常値が混入することが多い。このような単発的な異常値を除去するために、過去 f 個の測距値の中央値を出力するメジアンフィルタがよく用いられる。本章では、このフィルタを用いたときの誤動作確率について考察する。

4.1 フィルタリングの効果

f 回の試行のうち、確率 $1 - P_G$ なる正動作が k ($\leq f$) 回生じる確率 $P(k)$ は次式で表される。

$$P(k) = {}_fC_k (1 - P_G)^k P_G^{f-k} \quad (19)$$

測定が定常的とみなせる領域では、過去 f 回の測定値を用いてメジアンフィルタを構成することにより、誤動作の回数が $f/2$ より少なければ、誤った測定値を出力しないようにすることができる。今後、誤った測定値を出力してしまった場合をフィルタリング後の誤動作と呼ぶことにすると、フィルタリング後の誤動作確率 P_F は、正動作の回数が $f/2$ より少なくなる確率に等しい。

一般に f は奇数値がとられるものとする $P_F(f)$ は

$$\begin{aligned} P_F(f) &= \sum_{k=0}^{(f-1)/2} P(k) \\ &= \sum_{k=0}^{(f-1)/2} {}_fC_k (1 - P_G)^k P_G^{f-k} \end{aligned} \quad (20)$$

で与えられる。

式 (20) を用いて、いくつかの f について $P_F(f)$ を計算した結果を **Fig. 6** に示す。横軸がフィルタリング前の誤動作確率、縦軸がフィルタリング後の誤動作確率を表す。例えば、最終的な誤動作確率 P_F を 0.3% 程度としたい場合であっても、 $f = 7$ とすることにより $P_G = 10\%$ 程度まで許容できることが分かる。

なお 3.2 節で述べた同じ理由により、このフィルタを用いて M 回の計測を行った場合の誤動作回数の確率分布も、 M が十分に大きいという仮定の下で正規分布に近似可能である。したがって、誤動作回数の期待値 μ_F とその分散 σ_F は

$$\mu_F = M \cdot P_F \quad (21)$$

$$\sigma_F = M \cdot (1 - P_F) P_F \quad (22)$$

で与えられる。

4.2 実験結果

以上の解析を検証する実験を行った。実験は環境ノイズのない屋内で行い、装置は3.3節で用いたものと同じである (Fig. 4)。各センサからの送信信号は、互いに重なり合うように、かつ送信開始タイミングがランダムとなるように送信した。送信信号の長さ $L = 130$ の場合の結果を Fig. 7 に示す。ここでは $f = 3$, $N = 3$, $N_n = 0$ としている。実験結果は理論的な推定値の中に収まっており、解析の妥当性を裏付けている。

4.3 フィルタリングの有効性と利用法

さて、前節のメジアンフィルタを用いる場合、連続した f 回の測定を行う方法には、以下のようにいくつか考えられる。

- (1) 一つの送信素子から同じ送信パターンを時間的に直列になるように f 回送信し、順次受信して計測する。
- (2) f 個の送信素子からそれぞれ異なる送信パターンを時間的に並列になるように送信し、同時受信して計測する。

このうち (1) はさらに、

- (1a) 一つの反射波を完全に受信した後に次の送信を行う。
- (1b) f 回の送信を、反射波の到着にかかわらず連続的に行う。に分けられる。ここではおのおのについて詳しく検討する。

まず (1b) の場合には、誤動作確率が低くかつ測定が定期的に行われている条件下では、平均的に $(f + 1)/2$ 回の測定を

Fig. 6 The effect of a median filter to reduce the probability of erroneous measurement

Fig. 7 Comparison of the experimental and theoretical results about the number of erroneous measurement ($L = 130$, $N = 3$, $N_n = 0$, $f = 3$)

行った時点で結果を出力できると期待できる。すなわち、出力に $L^* = L \cdot (f + 1)/2$ の遅延が生じることと等価となる。このことは、相互相関演算の計算量の違いを無視して出力遅延にのみ注目したとき、実効的な送信信号長が L^* となった場合に等しい。一方で、式 (5) から明らかなように、フィルタリングを行わずに単に L を長くすることによっても誤動作確率を減少させることが可能である。そこで、そのような送信信号の組を改めて設計した場合とフィルタリングを行う場合とで、その効果を比較する。

Fig. 8 に N および f をパラメータとした誤動作確率を示す。横軸が実効的な信号長さ ($f = 1$ の場合には L)、縦軸がフィルタリング後の誤動作確率を表す。例えばフィルタリング後の誤動作確率として 0.01% を得ようとした場合、 $N = 3$, $f = 5$ とするよりも $N = 5$, $f = 1$ とした方が実効的な信号長さを短くできることが分かる。また、この図には示していないが、他の N および f についても誤動作確率を計算して最も短い送信信号長さを与えるものを求めたところ、そのほとんどが $f = 1$ の場合であった。

結局 (1b) の場合、同じ誤動作確率ならば、信号長さを効果的に減少させることはできないことが分かった。(1a) の場合には、出力遅延が (1b) よりも大きくなることから、その傾向は更に顕著となる。

次に (2) の場合を考えよう。この場合、送信信号長は短く抑えられる代わりに、送信信号の種類を $f \cdot S$ 個用意しなければならない。つまり見掛け上のセンサ数が増加することになる。

そこで改めて S および N , f をパラメータとして誤動作確率を求めた。結果を Fig. 9 に示す。この方法の場合も、(1a) および (1b) の方法と同様、 f よりも N を大きくした方が、送信信号長が短くなる傾向が読み取れる。

以上の検討結果より、メジアンフィルタは、誤動作確率を必ずしも効果的に減少させるわけではないことが明らかになった。しかしながら、 N や L を変更することは、送信信号を改めて設計し直さなければならないことを意味する。他方、メジアンフィルタを用いれば、そのような変更をせずに即時的に誤動作確率を減少させることができる。

Fig. 8 The relation between the expectation of erroneous measurement with median filters and the effective length of transmitting signal L^* ($S = 10$)

Fig. 9 The relation between the expectation of erroneous measurement and the length of transmitting signal, when several sequences transmitted simultaneously from one sensor

したがって、例えばロボットが動作中に外乱等の影響により誤動作頻度の上昇を検出した場合などに、一時的にフィルタを用いて誤動作を抑えるなどの利用法や、センサのデータ処理用のプロセッサの処理速度が遅い場合などで、有利性を発揮できると考えられる。Fig. 8 および Fig. 9 の結果は、確かに N を増加させることによる効果の方が有効であることを示しているが、その差は大きいわけではない。

5. 実際の環境での検証

5.1 ロボットへの実装

この超音波センサシステムを、筆者らの研究室で開発しているメッセンジャロボット「政宗2号」[8]に搭載して実験を行った。このロボットは、手紙・書類や小荷物の運搬、来客の案内などの作業を行うことを想定した屋内移動ロボットである。

超音波センサユニットは床面からの高さ 0.45 [m] の位置に、Fig. 10 に示すように配置した。図中、薄い網かけが遠距離用、濃い網かけが近距離用のセンサの測定範囲を表す。前後左右方向には遠距離用と近距離用の二種類のセンサを配置してある。

このうち近距離用センサは、壁面を利用した自己位置補正に用いるためのものである。このように 2 種類のセンサを配置したのは、先の報告 [6] でも述べたように、数 [m] の測距可能範囲を持つように受信側のゲインを調整すると、至近距離で受信信号レベルが過大になり、受信回路が飽和して誤動作頻度が増加してしまうためである。

実験に用いた実際のセンサユニットの写真を Fig. 11 に示す。一つの送信素子と二つの受信素子を一組として、受信側のゲインを遠距離用 (0.5 [m]~3.0 [m]) と近距離用 (約 1 [m] 以下) に調整することで、受信可能範囲を拡大している。なお、Fig. 11 では近距離用の基板にも送信素子が搭載されているが、実際には使用していない。また受信素子には、直接波の侵入を防ぐための簡易的なフードをとりつけている。他方、ロボットの斜め方向に取りつけられているセンサは、遠距離専用のユニットのみで構成されている。

センサシステムのブロック図を Fig. 12 に示す。一つのシステム当り 6 個のセンサユニットを含んでおり、計 12 個のセン

Fig. 10 Arrangement of sonars on indoor mobile robot

Fig. 11 A sonar unit built on the indoor mobile robot

Fig. 12 The block diagram of a sonar unit

サユニットは 2 個の MC68332 CPU (クロック 25 [MHz]) でコントロールされる。本システムの場合、各センサユニットにつき平均で約 7.3 [回/秒] の測定を行っている。また、各送信信号の送信開始タイミングはランダムとしている。ここで送信開始タイミングをランダムにするのは以下の理由からである。すなわち、仮に送信開始タイミングを常に同一にとった場合、反射信号が常に同じタイミングで重なることとなるため、環境によっては常に混信条件を満たすような状況が生じる可能性があり、それを避けるためである。

5.2 送信信号の決定

相関の閾値 $A = 3$, フィルタリングするデータ数 $f = 3$, 外乱パルス数 $N_n = 3$ として以下の手順により送信信号を決めた。

まず与えられたセンサ数 $S = 12$ に対して, 誤動作確率が目標値以下となるように式 (20), (16), (5), および 2.2 節の最後で述べたことを考慮して N および L を決める。この結果に基づき, 式 (1) および (2) を満足するように送信信号を決める。ただし, この条件を満たす送信信号のパターンは一般に複数個あるので, できるだけパルスが L の全域に互って分布しているものを選ぶこととする。このようにしてパルス数 $N = 3$, 長さ $L = 48$ の送信信号を, 以下のように決定した。

$$\begin{aligned} & [0, 5, 44], [0, 6, 29], [0, 7, 47], [0, 8, 46], \\ & [0, 9, 30], [0, 10, 37], [0, 11, 31], [0, 12, 36], \quad (23) \\ & [0, 13, 35], [0, 14, 32], [0, 15, 34], [0, 16, 33] \end{aligned}$$

ここで, 各 $[p_1, p_2, \dots, p_N]$ がそれぞれ一つの送信信号を表し, p_i は信号内のパルスの位置, つまり $T(i) = 1$ となる i を表している。フィルタリングの方法として, 4.3節で述べた (1a) を用いている。この送信信号の場合, 外乱がない状態でのフィルタリング後の誤動作確率は $P_F = 0.17\%$ となる。

また, この信号を用いて外乱パルス数 $N_n = 3$ の環境下で測定を行う場合, 式 (16) および式 (20) より $P_F = 0.41\%$ となる。

5.3 実験結果

実験結果を Fig. 13 に示す。ロボットは, start 点から幅 2.3[m] の廊下を右側に向かって約 5[m] 直進走行する。途中には, 0.68[m]×0.18[m] の凸部 (柱) や, 0.83[m]×0.10[m] の凹部 (ドア) などがある。図中×印が測定点を, また破線が壁やドアの境界線を表している。

パルス状外乱の発信源は, 図の下向の矢印の根元に, 矢印の方向に向けてそれぞれ一つずつ計 3 個置いてある。また, 各外乱源からは, 長さ L の送信信号あたりそれぞれ 1 回程度の頻度でランダムに外乱を発信した。したがって, ある受信信号に混入する外乱パルス数の最大は, すべての外乱源から影響を受けたときに生じる 3 個である。

また Fig. 14 は, 環境中の外乱の状況を示すために, 通常の単パルスによる順次計測を用いて同条件で実験を行った結果である。

ところでこれらの図は, 斜め方向を除く前後左右計 8 個のセンサの, ロボット走行中における約 8,400 点の全計測データをプロットしたものである。斜め方向のセンサの計測データを除いたのは, 混信や外乱以外を原因とする誤計測が比較的多めに含まれるためである。これは, 堅く角の多い人工的な空間において超音波が斜めに進行すると, 角部で複数回の反射が起こること等に起因するもので, 超音波センサシステムにおいて本質的な弱点であり, 本論文の手法を適用してもそれを解決することはできない。しかし, 斜め方向のセンサには前後左右のセンサに対する混信信号としての役割もあるので, 動作はさせている。

Fig. 13 An experimental result under the influence of external disturbances ($N = 3$)

Fig. 14 An experimental result under the influence of external disturbances ($N = 1$)

Fig. 13 より, 角部による誤計測と推定できるものを除いた誤計測数は合計 20 回である。したがって誤動作確率は約 0.24% となり, 理論値よりも若干小さい。これは, 搭載されている全 12 個のセンサユニットの送信信号がすべて混信するという仮定が最悪の場合を想定してのものであり, 実際の混信はより少ない個数のみに関係していると推測できることや, 混入する外乱パルス数が平均的には 3 個より少ないことなどが原因と考えられる。

6. 計測に要する時間に関する考察

ここでは, 単パルスをつづつ順次送信してその反射波を計測する方法 (順次計測法) と, 本論文で提案した方法に関して, その計測に要する時間長さに関する考察を行い, 本手法が計測時間を短縮するという点でも有効であることを示す。

一般に, 屋内環境で移動するロボットに搭載する超音波センサに期待される測定レンジは約 3~5[m] である。このとき超音波の飛行距離は, 測定レンジの往復分の 6~10[m] となる。ここでは, 順次計測法が有利となるように測定レンジ 3[m] (飛行距離 6[m]) とする。すると飛行時間は音速を 340[m/s] として

$$T_f = 6/340 = \text{約 } 18[\text{ms}] \quad (24)$$

となる。誤動作を避けるためには, 反射して戻ってくる音波がないことが保証できるまで次の音波の送信を待つ必要がある。

これは本手法も順次計測法も同様である。通常これは、受信素子の感度および測定レンジ内の S/N 比の観点から $2T_f$ 程度を見込むことが多い。本論文で使用したロボットに搭載されている超音波センサは計 12 個であるから、結局、1 回の計測に要する時間は $12 \cdot 2T_f = 432 [\text{ms}]$ となる。

次に、5章で述べた実験条件の場合について考察を行う。実験では信号長さ $L = 48$ の送信信号を用い、4章で述べた (1a) の方法を用いているので、これの送信に要する時間は

$$T_{sa} = 10 \cdot 48 / (40 \cdot 10^3) = 12 [\text{ms}] \quad (25)$$

となる。これに超音波の飛行時間および次の計測までの休止時間を考慮して、

$$\frac{f+1}{2} \cdot (T_{sa} + 2T_f) \quad (26)$$

が 1 回の測定に要する時間であり、 $f = 3$ のとき約 $96 [\text{ms}]$ となる。4章で述べた (1b) や (2) の方法を用いればさらに測定時間を短くすることが可能である。

また、センサ数が 12 個より多い場合、あるいは少ない場合にも同様の考察ができ、本手法の優位性が容易に確認できる。例えばセンサ数 24 個の場合には $L = 101$ となり、測定時間は約 $123 [\text{ms}]$ となる。このとき順次計測法では $864 [\text{ms}]$ を要する、以上より、測定に要する時間に関しても、本手法は有効である。

7. おわりに

搬送波を固有の送信信号で変調することで、多数の超音波センサが同時に動作することを可能にする方法に関して、筆者らが先に提案した誤動作確率に基づく解析法を、外乱が存在する場合に拡張した。その過程で、搬送波を各センサ固有の信号で変調する方法が、本質的に外乱に強いことを理論的に示した。

また、いくつかの測距値を用いてメジアンフィルタを構成した場合の性質について議論した。その結果、誤動作確率の観点から見ると、送信信号の再設計をした方がより効果的であるこ

とが明らかとなった。ただし、フィルタリングは、送信信号の再設計をせずにほぼ同等の誤動作確率の減少効果があるので、例えば、外乱の増加などの環境の変化により動作中に誤動作が増加したような場合に一時的に用いるなどの利用法により、その効果が発揮できると考えられる。

なお本研究の一部は、文部省科学研究費補助金重点領域研究 (領域番号: 266)、および文部省科学研究費補助金 (課題番号: 10750180) の援助を受けて行われた。ここに記して関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- [1] J. Borenstein and Y. Koren: "Error Eliminating Rapid Ultrasonic Firing for Mobil Robot Obstacle Avoidance," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.11, no.1, pp.132-138, 1995.
- [2] 丹沢勉, 清弘智昭: "相互相関を用いた超音波センサ", 第 7 回知能移動ロボットシンポジウム, pp.73-78, 1993.
- [3] 丹沢, 清弘, 森: "屋外移動ロボットのための雑音に強い超音波センサ", 日本ロボット学会誌, vol.15, no.4, pp.542-549, 1997.
- [4] L. Kleeman and R. Kuc: "Mobile Robot Sonar for Target Localization and Classification," Int. J. Robotics Research, vol.14, no.4, pp.295-318, 1995.
- [5] H. Peremans, K. Audenaert and J.M.V. Campenhout: "A High-Resolution Sensor Based on Tri-aural Perception," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.9, no.1, pp.36-48, 1993.
- [6] 石山敏規, 高橋隆行, 中野栄二: "複数の超音波センサの混信によって生じる誤動作の確率的考察", 日本ロボット学会誌, vol.17, no.4, pp.526-533, 1999.
- [7] 石山敏規, 高橋隆行, 中野栄二: "超音波センサの相互干渉によって生じる誤動作の確率的考察", 第 15 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, no.1, pp.181-182, 1997.
- [8] 中野, 高橋, 王, 大久保: "メッセンジャロボットの概要と基本動作", 第 1 回重点領域研究「知能ロボット」シンポジウム予稿集, pp.121-124, 1996.
- [9] 川端邦明, 小林尚登: "複数自律型超音波センサによる距離計測", 電気学会論文集 C 編, vol.117, no.6, pp.799-804, 1997.
- [10] 東京大学教養学部統計学教室編: 自然科学の統計学, p.16, 東京大学出版会, 1992.

高橋隆行 (Takayuki Takahashi)

1961 年 11 月 1 日生。1987 年東北大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了, 同年 4 月同大学工学部助手, 1993 年より同大学情報科学研究科講師, 現在に至る。博士 (工学)。非線形機械の制御, 移動ロボットなどの研究に従事。計測自動制御学会, 日本機械学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)

中野栄二 (Eiji Nakano)

1942 年 3 月 24 日生。1970 年東京大学大学院工学研究科産業機械工学専門課程博士課程修了, 同年通産省工業技術院機械技術研究所入所。1987 年東北大学工学部教授。1993 年東北大学大学院情報科学研究科教授。現在に至る。この間, 1976 年から 1977 年米国スタンフォード大学人工知能研究所客員研究員。不整地移動ロボット, マルチロボット, メッセンジャロボット等の研究開発に従事。工学博士。(日本ロボット学会正会員)

石山敏規 (Toshinori Ishiyama)

1973 年 2 月 27 日生。1996 年東北大学工学部機械知能工学科卒業。1998 年同大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。同年日本電気 (株) 入社。現在に至る。(日本ロボット学会正会員)