マルチオブジェクトおよび環境雑音による誤動作を防ぐ 超音波センサの送信信号の解析

塩 澤 奨*・丹 沢 勉**・清 弘 智 昭**

A Study of a Transmitting Signal to Prevent Erroneous Measurement Caused by the Influence of
Multi-obstacles and Undesired Sound in Living Environment

Susumu SHIOZAWA*, Tsutomu TANZAWA** and Noriaki KIYOHRO**

The main purpose of this research is to study and develop a robust sonar system for mobile robots. In order to realize the robust system, the sonar which calculates the cross-correlation is used. This sonar transmits wave coded by the pattern that consist of some narrow pulses, then calculates the cross-correlation between the transmitted signal and the received one. But if the sonar can measure multi-obstacles, it may cause erroneous measurement by the wave reflected from each one. The measurement result will keep to include this error, unless the positional relationship of the obstacles changes. It is difficult to navigate a robot safely. In this paper, the necessary conditions for a transmitting signal of the sonar which always obtain an exact result are proposed. Especially we define the proper form of the transmitting signal for the situation, when the cycle of one is varied.

Key Words: sonar, cross-correlation, multi-obstacles, environment noise, erroneous measurement

1. はじめに

超音波センサは、小型、軽量、低コスト、構造が簡単、ガラスなどの光を透過してしまう物体の測距が可能などの特徴から自律移動ロボットの環境認識などに広く利用されている^{1)~5)}。昨今、移動ロボットは屋内だけではなく屋外を移動することも想定されるため、さまざまな環境でも対応できる超音波センサが求められている。

これまでに、送信信号として複数のパルス信号を用いて固有のパターン信号を構成してこれを出力し、このとき得られる受信信号との間で相互相関演算を行なう雑音に強い超音波センサが提案されている^{6),7)}。さらに、センサごとに固有のパターン信号を用いることで、複数の超音波センサで同時に、また環境雑音に影響されずに屋内・屋外問わず測距することが可能であるため、有用性が期待されている。

しかし、対象物や超音波センサが多く存在する場合、実際

には対象物がない領域にもかかわらずあたかも対象物が存在するような誤った測距結果を出力してしまう誤検出が生じる可能性がある。この誤検出は対象物やセンサの位置関係が変化しない限り発生し続けるため、影響を取り除くことが困難である。そこで、文献 6) では複数の対象物が存在する場合、固定した周期において送信信号を構成するパルスの数を検討することで、解決を図っている。また、複数のセンサを同時に動作させた場合、先の文献で提案された条件を満たすように送信信号を構成すると周期が極端に長くなり優位性を損なってしまう恐れがあることを指摘し、できる限り周期の短い送信信号の生成方法が提案されている^{8),9)}。

一般的に、パルスエコー法を用いた超音波センサでは測距レンジと測距頻度によって送信信号の周期は決定される。遠方の対象物を測距する場合、伝搬時間を考慮して測距周期を長くする必要がある。一方、移動する対象物などを遅れなく確実に検出するためには測距頻度を高くすることが求められるため、周期を短くする必要がある。このようにセンサの用途によって要求される送信信号の周期は異なる。

しかし、これまで相互相関を用いた超音波センサに使用される送信信号に対して、送信信号を構成するパルスの数だけでなく周期までを含めた解析は報告されていない。そこで、本論では測距領域内に複数の対象物が存在する環境において送信信号を構成するパルスの数に加え、周期も考慮した高い堅牢性を実現する送信信号の解析を行ない、新たに誤検出の起こりにくい送信信号の条件を提案する。さらに、実環境を

* 山梨大学大学院医学工学総合教育部 甲府市武田 4-3-11

** 山梨大学大学院医学工学総合研究部 甲府市武田 4-3-11

* Dept. Education, Interdisciplinary Graduate School of Medicine and Engineering, Univ. Yamanashi, 4-3-11 Takeda, Kofu

** Dept. Research, Interdisciplinary Graduate School of Medicine and Engineering, Univ. Yamanashi, 4-3-11 Takeda, Kofu

(Received June 5, 2012)

(Revised November 2, 2012)

模した環境雑音を含めたシミュレーションを行ない、解析の妥当性を示す。

2. 相互相関を用いた超音波センサ

2.1 測距原理

各超音波センサに送信信号として 0 または 1 の 2 値で構成された固有の信号列をもたせ、この送信信号により 40 kHz のキャリアを変調（送信波）して送信する方法が提案されている。この方法では対象物により反射して得られた信号（受信波）を増幅・復調・2 値化した後、送信信号との間で相互相関を計算することで雑音に影響されずに超音波の TOF を算出することができる。このとき、遅延時間 l に対する送信信号と受信信号との相互相関値 $C(l)$ は次式により求められる。

$$C(l) = \frac{\sum_{k=0}^{N_d-1} Tr(k) \cdot R(k+l)}{\sum_{k=0}^{N_d-1} Tr(k)} \quad (1)$$

$Tr(k)$ は送信信号、 $R(k)$ は超音波の時間的な減衰に対応したしきい値で 2 値化した受信信号、 N_d は 1 周期のサンプリングデータ数である。受信信号 $R(k)$ は周期のデータ数 N_d で環状になっており、周期を越える場合には $R(0)$ に戻る。この相関値が閾値 C_{thr} より大きくなったとき対象物からの反射波を受信したと判断し、その距離を算出する。

2.2 送信信号の生成方法

送信信号は複数の幅の狭いパルスを配置することにより、生成する。Fig. 1 のように送信信号の周期を L 等分し、間隔の幅を T_{re} とする。各区間に 0 または 1 を与え、1 の区間にパルスを配置する。 T_{re} は、反射して戻ってきた受信パルスの広がりやを考慮し、隣り合うパルスの分離が可能となるように定める。実際に送信信号を構成するパルス幅 T_{tr} は T_{re} より小さくなるが、議論を簡単にするため、送信信号の構成を考える際にはパルスの幅を T_{re} として考える。このとき、送信信号と受信信号との時間の遅れを一意にかつ、できるだけ確実に検出するために、送信信号は次式を満たす必要がある。

$$\begin{cases} C_A(l) = \frac{\sum_{k=0}^{L-1} Tr(k) \cdot Tr(k+l)}{\sum_{k=0}^{L-1} Tr(k)} = 1.0 & (l=0) \\ \text{Max}\{C_A(l)\} \ll 1.0 & (l \neq 0) \end{cases} \quad (2)$$

この C_A は区間ごとに演算を行なった送信信号の自己相関値を示し、シフト時間 $l = 0$ のときのみ唯一最大値を取り、それ以外の範囲ではできる限り小さな値となることを表わす。上記の条件を満たすように試行錯誤時にパルスを配置し、送信信号を生成する。

2.3 対象物測定時に誤検出が発生する原因

前述の送信信号と相互相関演算を行なうことにより、従来の超音波センサと比較して雑音に対して非常に堅牢性の高いセンサが実現できる。しかし、測距領域内に複数の対象物が

Fig. 1 The profile of a transmitted signal

Fig. 2 Transmitting signal $Tr(k)$

Fig. 3 A ghost of the transmitting signal $E(k)$ formed by some reflected signals

存在するとき、誤検出が発生する可能性がある。この誤検出が起こる仕組みについて、送信信号を構成するパルス数が三つのときを例に挙げて述べる。

送信信号 $Tr(k)$ を Fig. 2 に示す。 $Tr(k)$ は (2) 式で示した条件を満たしており、シフト時間 $l = 0$ のとき以外の範囲では多くても一つのパルスしか重ならないものとする。

この送信信号を出力する超音波センサの測距領域に対象物が三つ存在し、各対象物から反射波を $r_1(k)$, $r_2(k)$, $r_3(k)$ とする。また、各反射波の TOF は d_1 [s], d_2 [s], d_3 [s] とする。これら三つの反射信号を重ね合わせた信号がセンサの受信信号 $R(k)$ となる (Fig. 3 参照)。

このとき、受信信号 $R(k)$ には三つの対象物からの反射波に加えて、TOF が d_4 [s] の地点で送信信号と一致するパターン $E(k)$ が生じ、誤検出が発生する。このパターン $E(k)$ は $r_1(k)$, $r_2(k)$, $r_3(k)$ のパターンからそれぞれ一つずつパルスが組み合わせられ抽出され、偶発的に送信信号と同一のパターンが構成されている。このように複数の対象物からの信号を受信した場合には (2) 式を満たす送信信号でもシフト時間 $l = 0$ 以外の範囲で重なり合うパルスの影響によって誤検出が生じてしまう。この誤検出はセンサと対象物との位置関係が変化しない限り安定して発生し続けてしまい、統計処理により排除することは難しい。さらに、ロボットなどの障害物センサとして超音波センサを使用した場合、今回のように実際に存

Fig. 4 The noise waveform measured near the public road

在する対象物より近い距離で誤検出が発生すると、ロボットは衝突回避の急停止や無意味な障害物回避を起こしてしまい、危険な動作の原因となる可能性がある。

また、この現象は対象物からの反射波だけでなく、多数の雑音の存在する環境下もしくは複数の対象物と雑音との組み合わせでも発生し得る。

2.4 環境雑音

屋外環境には屋内にはない雑音が存在するため、この雑音による誤検出の影響について考える。そこで、超音波センサに影響を与える雑音の特徴を調べるため、屋外環境で存在する雑音として考えられる自動車やバイクの排気音、工事現場の騒音などの測定を行なった。測定装置は、40 kHz の超音波レシーバ、増幅器、復調器、10 bit の A/D コンバータから構成されており、50 μ s ごとにサンプリングを行なう。

ここでは屋外での代表的な雑音源の例として工事現場の騒音を測定した結果を示す。Fig. 4 は工事現場から約 5m 離れたところにレシーバを設置し、増幅・復調した波形を AD 値として取得、それを A/D コンバータの帯域で正規化した。

Fig. 4 から確認できるように、超音波センサが影響を受けやすい高周波で、かつ音圧レベルの高い雑音は屋外ではほとんどが破裂音であるため、雑音はインパルス状の形状をしており、対象物からの反射波として受信されるパルスに類似している。この雑音がセンサの測距周期中に複数受信した場合、対象物からの反射波以外にも送信信号と一致するパターンが生じ、誤検出が発生する。さらに、前項で述べた環境の中で、対象物が二つになった場合でも特定のタイミングで外部から一つでも雑音を受信すると誤検出が生じる。また、対象物が一つの場合でも同様に特定のタイミングで二つの雑音を受信した場合にも誤検出が発生する。

よって、想定する環境での誤検出を考える場合、対象物からの反射波による雑音と外部で発生する環境雑音の両方を考慮する必要がある。

2.5 送信信号を構成するパルスの数と雑音に対する強度

送信信号を構成するパルス数を P とした場合について考える。このとき、送信信号の条件式 (2) は次式として表わすこともできる。

$$\begin{cases} C_A(l) = \frac{\sum_{k=0}^{L-1} Tr(k) \cdot Tr(k+l)}{P} = 1.0 & (l=0) \\ \text{Max}\{C_A(l)\} = \frac{N}{P} = C_N & (l \neq 0) \end{cases} \quad (3)$$

遅延時間 l が 0 のときにはパターンが一致するため、パルス数 P で割ると自己相関値は最大である 1.0 となる。一方、遅延時間 l が 0 以外のときにはパターンが一致しないため相関値は 1.0 にはならないが、その中でも最大となる相関値を C_N とし、これを相関ノイズとする。また、 N はこのときに重なるパルスの数であり、相関雑音パルス数とする。このパターン信号を送受信したときには周囲に全く雑音のない環境でも、最大 N 個の雑音パルスが含まれることと等価となる。

本超音波センサでは (1) 式で示したように送信信号と受信信号との相互相関演算を行ない、得られた相関値が閾値 C_{thr} より大きければパターンが一致したとみなす。よって、閾値 C_{thr} を相関ノイズ C_N より大きな値にすることで誤検出なく測距することができる。そこで、本論では議論を簡単にするため、閾値 C_{thr} はパターンが完全に一致したときに得られる相関値 1.0 とする。このとき、閾値 C_{thr} と相関ノイズ C_N の差を雑音パルスの許容率 R_{PN} とし、次式に示す。許容率 R_{PN} が大きければ雑音に対して強く誤検出を生じない。

$$R_{PN} = C_{thr} - C_N = 1.0 - \frac{N}{P} \quad (4)$$

ここで、 P 個のパルスで送信信号を構成した場合に発生する雑音パルスの数 N について述べる。この送信信号から任意の二つのパルスを抽出し、形成されるパルス間の数 K_P は次式で表わされる。ただし、送信信号は連続して出力するものとし、送信信号を環状と考え、パルス間の距離が一周期未満のものを対象とする。

$$K_P = {}_pC_2 \times 2 = P \cdot (P - 1) \quad (5)$$

送信信号の周期を L 分割し、その区画にパルスを配置すると、 K_P と N の関係は次式となる。式中の int は括弧内の計算結果から少数点以下を切り捨てた整数値を得る関数とする。また、ここで検討する送信信号は (2) 式を満たすことを前提としており、この雑音パルスの数 N はパルスの配置に関係なく、送信信号を構成するパルス数 P と区分数 L に対応して一意に決まる⁶⁾。

$$\text{int}\left\{\frac{K_P}{L}\right\} + 1 = \text{int}\left\{\frac{P \cdot (P - 1)}{L}\right\} + 1 = N \quad (6)$$

また、センサの測距領域内に n 個の対象物が存在するときには、Fig. 3 で示したように n 個の送信信号と同じパターンを受信する。このときの誤検出の状態を考慮し、雑音として現れる相関ノイズパルスの数 N_A は次式で表わすことができる。この N_A を自己相関ノイズパルス数とする。また、 N_A をパルス数 P で割った値を自己相関ノイズ C_{NA} とし、このときの雑音パルスの許容率 R_{PN} は以下となる。

$$\begin{aligned} N_A &= N \cdot n \\ C_{NA} &= \frac{N_A}{P} = C_N \cdot n \\ R_{PN} &= C_{thr} - C_{NA} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \quad (7)$$

$L = 64$, 対象物の数 n が 1 から 4 個としたとき、(6),

(a) The number of pulses of the autocorrelation noise

(b) The permissible ratio for the noise

Fig. 5 Varying the number of objects the sonar can detect at the same time

(7) 式より送信信号を構成するパルス数 P と N_A との関係を図 5(a) に、雑音パルスの許容率 R_{PN} との関係を図 5(b) に示す。

Fig. 5(b) より、パルス数 P により雑音パルスの許容率 R_{PN} はピークをもつ。実際には要求される測距領域内にある対象物の数や使用する環境下の雑音を考慮して、雑音パルスの許容率 R_{PN} から送信信号を構成するパルスの数 P を決定する。例として、測距領域内に最大四つの対象物が存在する環境で使用し環境雑音パルスを二つまで許容できる送信信号のパルス数 P を求める。四つの対象物が存在するときの許容率 R_{PN} に送信信号のパルス数 P をかけた値が許容できる雑音パルスの数となる。この値より許容したい雑音パルスの数が小さければ誤検出なく測距できる。よって、八つのパルスで送信信号を構成すれば三つの屋外雑音パルスを許容できる（選択できるパルスの数に幅をもたせる）。

3. 送信信号の周期を考慮した雑音に強い送信信号

3.1 送信信号を構成するパルスの数と周期との関係

つぎに送信信号の周期を変化させたときの雑音に対する強度について述べる。送信信号を構成する区分幅はこのままで区分数 L によって周期 T を変える。このときの送信信号を構成するパルス数 P と自己相関ノイズパルス数 N_A の関係と許容率 R_{PN} の関係を Fig. 6(a), (b) にそれぞれ示す。ただし、測距領域内には三つの対象物が存在するものとする。

L が増えると送信信号を構成するパルスを配置できる位置が増えるためノイズパルス数 N_A が減少し、雑音パルスの許容率 R_{PN} が大きくなる。周期 T とパルス数 P を考慮したノイズパルス数 N_A は (5) 式から次式のように表わすことができる。

(a) The number of pulses of the autocorrelation noise

(b) The permissible ratio for the noise

Fig. 6 Varying the number of divisions in the transmitting signal **Fig. 7** The permissible ratio for the noise varying the number of pulses and 1 cycle time

$$N_A = \left(\text{int} \left\{ \frac{P \cdot (P-1) \cdot T_{re}}{T} \right\} + 1 \right) \cdot n \quad (8)$$

以上のことから、受信パルスの幅を $T_{re} = 1.6 \text{ ms}$ としたときの送信信号のパルス数 P と周期 T 、雑音パルスの許容率 R_{PN} の関係を Fig. 7 に示す。

横軸が送信信号の周期 T 、縦軸は送信信号を構成するパルス数 P 、色の明度によって雑音パルスの許容率 R_{PN} を表わす。

環境雑音を考慮せず、かつ測距領域内に対象物が一つしかない場合において、周期 T を長くすると許容率 R_{PN} は大きくなり、ある地点で飽和する。このことから、測距レンジや頻度と照らし合わせながら送信信号の周期をなるべく長くすることで許容率 R_{PN} は高くなり、誤検出が発生しにくくなるとされてきた。しかし、実際の雑音の多い環境で使用する場合には送信信号の周期 T が伸びると、1 周期中に受信する雑音も増加してしまい、誤検出の原因となることが考えられる。

Fig. 8 The permissible ratio for the noise when the sonar received the reflected wave from objects and the environment noise N_E (n : the number of objects, $n_E = 20$ pulses/s)

3.2 雑音が多い環境下での許容度の変化

これまで議論されていなかった、送信信号の周期 T が変化したときに受信する環境雑音について考える。超音波センサに影響を与える雑音は Fig. 4 で示したようにインパルス状の形状をしている。この環境雑音を周期中に N_E 個受信したとする。このとき、パルス幅は受信パルス幅 T_{re} と同じと仮定する。この環境下で測定を行なった場合、自己相関ノイズパルス数 N_A と環境雑音パルス数 N_E が相互相関値 $C(l)$ に影響を与える。このとき、次式を満たすことで誤検出をせずに常に正しく測距を行なうことができる。この式中の C_{NE} を環境相関ノイズとし、パルス数 P のときに相関結果に影響を与えるノイズ量を表わす。

$$C_{thr} > C_{NA} + C_{NE} = \frac{N_A}{P} + \frac{N_E}{P} \quad (9)$$

このときの雑音パルスの許容率 R_{PN} を (10) 式に示す。ここで、確率的に単位時間当たり受信する雑音パルスの数を n_E 個とし、環境雑音パルス数 N_E は送信信号の周期に比例して増加する。

$$R_{PN} = C_{thr} - (C_{NA} + C_{NE})$$

$$= 1.0 - \frac{1}{P} \left[\left\{ \text{int} \left(\frac{P \cdot (P-1) \cdot T_{re}}{T} \right) + 1 \right\} \cdot n + \{ \text{int}(n_E \cdot T) + 1 \} \right] \quad (10)$$

環境雑音を考慮したときの許容率 R_{PN} の変化を示す。受信パルスの幅 $T_{re} = 1.6$ ms、環境雑音として $n_E = 20$ 個/s の環境を想定し、 n 個の対象物の反射波を受信した場合の許容率 R_{PN} を **Fig. 8** に示す。縦軸は送信信号を構成するパルスの総数 P 、横軸は送信信号の周期 T 、色で雑音パルスの許容率 R_{PN} を表わす。

まず、測距領域内に一つの対象物が存在するとき、環境雑音を考慮しない Fig. 7 と考慮した Fig. 8(a) を比較する。環境雑音を考慮しない場合、送信パルス数 P を固定し、送信信号の周期 T を長くすると自己相関ノイズパルス数 N_A が減少するため許容率 R_{PN} は高くなり、あるところで飽和する。一方、環境雑音を考慮した場合は周期 T を長くすると受信する環境ノイズパルス数 N_E が増えてしまうため、許容率 R_{PN} は限られた範囲でのみ有効な値を取り、次第に低くなる。また、そのピークの値は考慮しない場合より低い値となっている。

このことから、これまでは許容率が高くなるように、測距

Fig. 9 The permissible ration for the noise when the sonar received the reflected wave from objects and the environment noise N_E ($n = 3$, $n_E = 10$ pulses/s)

に影響が出ない程度に周期が長く、かつ自己相関ノイズ C_{NA} が小さい範囲でできる限り多くのパルスを用いて送信信号を構成していた。しかし、環境雑音を考慮するとさらに拘束条件が発生し、周期 T ごとに許容率がピークになる範囲が限定され、送信パルス数 P が厳しく限定される。

また、測距領域内の対象物の数を増やした場合には自己相関ノイズ C_{NA} が増加するため許容率 R_{PN} は全体的に低下し、選べるパルス数 P の範囲が限定されてしまうため、その中から選択しなければならない。

ここで、環境雑音による影響を考えるため受信する環境雑音を $n_E = 10$ 個/s と少なくし、対象物の数を三つとしたときの許容率 R_{PN} を **Fig. 9** に示す。Fig. 8(c) と比較して、受信する環境雑音が増加すると許容率 R_{PN} は狭い範囲でピークをもつようになり、さらにピークの値も低くなる。

以上より、測距レンジを考えた場合、遠方にある対象物を検出するには TOF を考慮して送信信号の周期を長くする必要がある。また、測距頻度という観点から見た場合、対象物を確実に検出するために周期を短くし一定時間内の測距回数を増やすことが求められる。したがって、使用する用途によって送信信号の選択できる周期 T が限定される。また、環境雑音の数や想定する測距領域内の対象物の数などセンサを使用する環境によっても条件が大きく絞られるため、その中から送信信号を構成するパルス数 P を選定する。そして、周期 T 、構成するパルス数 P の送信信号を、(2) 式を満たすように、試行錯誤的にパルスを配置しながら生成することで、安定して測距を行なうことができる。

4. 環境雑音を考慮した送信信号を用いたセンサに関するシミュレーション

上記において雑音環境下でも誤検出が発生しない送信信号について示した。この妥当性を検証するため、超音波センサを使用する環境を模した条件でシミュレーションを行ない、誤検出の有無や雑音パルスの許容率 R_{PN} を求める。

シミュレーションでは前述選択した送信信号の周期 T と送

Fig. 10 The relation between the number of objects the sonar can detect at the same time and the incidence

信パルス数 P から (2) 式の条件を満たすように試行錯誤的に送信信号を構成し、想定する環境に対応した受信信号を生成して、相互相関演算を行ない、誤検出の有無や許容率 R_{PN} を求める。そして、このシミュレーション結果と検討して得た (10) 式による許容率 R_{PN} を比較する。

今回、屋外で移動するロボットに超音波センサを搭載し、周囲の環境認識を行なった場合について考える。超音波の減衰については受信信号を 2 値化する際に考慮しているため、ここでは省略する。

このときに必要となる各種パラメータについて以下に述べる。各超音波センサが一回の測定で検出する対象物の数 n を実環境で実測し確認する。3 台の超音波センサを移動ロボットにみたてた電動車椅子の前方と左右の側面に 1 台ずつ搭載し、一定速度で一般的な市街地の歩道約 1 km を走行させた。その際、各超音波センサが検出した対象物の数 n と頻度を求めた。結果を **Fig. 10** に示す。ここの頻度は、3 台の超音波センサの結果を合計して求めている。この結果から、対象物の数 n が四つ以上になる割合は 1% 以下であるため、対象物の数 n は 3 までを考慮すればよいものとする。

送信パルスの間隔 T_{re} は 4 m 先の対象物を検出可能なパルス幅とし、そのときの受信パルス幅は、実回路での反射パルスの波形を観測して $T_{re} = 1.6$ ms とした。また、環境ノイズ n_E は Fig. 4 で示した実測結果をもとに $n_E = 20$ 個/s とした。

シミュレーションの手順を以下に示す。

1. 検証する送信信号の周期 T と送信パルス数 P において、(2) 式を満たす送信信号を構成する。
2. 対象物の配置から、構成した送信信号を出力したときに得られる反射信号を生成し、環境ノイズを印加して受信信号を生成する。

生成するときの条件を以下に示す。

- 対象物はすべて異なる距離にあるものとする。
 - 反射波のパルスと重ならないように環境ノイズを配置する。
3. 構成した受信信号と送信信号との相互相関演算を行ない、閾値 C_{thr} を超えたすべての TOF から対象物の距離を算出する。
 4. 算出した距離から誤検出の有無を確認し、正しく測距

Table 1 The feature of the transmitting signal and the permissible ratio for the noise ($n_E = 20$ pulses/s)

P	4	8	8
L	64	64	128
T [ms]	102.4	102.4	204.8
The pulse position	{0, 9, 44, 57}	{0, 2, 14, 23, 47, 48, 51, 58}	{0, 2, 21, 36, 78, 98, 116, 125}
N_A	1	1	1
R_{PN}	Simulation	0 (ERROR)	0 (ERROR)
	Calculation	0 (ERROR)	0 (ERROR)

Table 2 The feature of the transmitting signal and the permissible ratio for the noise ($n_E = 10$ pulses/s)

P	4	8	8
L	64	64	128
T [ms]	102.4	102.4	204.8
The pulse position	{0, 9, 44, 57}	{0, 2, 14, 23, 47, 48, 51, 58}	{0, 2, 21, 36, 78, 98, 116, 125}
N_A	1	1	1
R_{PN}	Simulation	0 (ERROR)	0.375
	Calculation	0 (ERROR)	0.375

できたときは閾値 C_{thr} と相関値の差を得る。

- 2の条件を満たすすべての対象物の配置、および印加する環境ノイズの組み合わせで、2から4の試行を繰り返し行なう。
- 一度でも誤検出が発生した場合は R_{PN} を 0 (ERROR) とし、すべて正しく測距できた場合には4で得られる閾値と相関値の差の中で最小となる値をこの送信信号での R_{PN} の検証結果として出力する。

ここでは、閾値 C_{thr} を相関値の最大 1.0 とし、すべてのパルスが一致したときのみ対象物からの反射波と判断する。

送信パルス数 P と送信信号の周期 T を変えたときの送信信号のパルスの配置、シミュレーション結果および (10) 式より算出した許容率 R_{PN} の一例を **Table 1** に示す。

シミュレーション結果と (10) 式から求めた結果とも同じ値となることが確認できた。

また、送信パルス数 $P = 4$, $L = 64$ において、これまで提案された文献 6) では誤検出なく測距可能となっているが、実環境に近い状況、環境雑音下での測距では誤検出が発生する結果となった。

一方、同じ周期 T で八つのパルスで構成した送信信号でシミュレーションを行なった場合には常に正しく測距できている。

しかし、送信パルス数は同じで、区分数 L を増やし周期 T を2倍にした送信信号では、受信する環境ノイズ N_E が増加するため誤検出が発生する結果となった。

以上のことから、環境雑音を考慮した場合には正しく測距できる送信信号の周期 T と送信パルス P の使用できる範囲は限定されることがわかる。

つぎに、環境ノイズ $n_E = 10$ 個/s と仮定したときのシミュレーション結果を **Table 2** に示す。ただし、ほかのパラメータは Table 1 と同様のものを使用する。

Table 1 と Table 2 を比較すると、環境ノイズ N_E が多い環境では少ない環境と比べて許容率 R_{PN} は低く、正しく測距できる送信パルス数 P と送信信号の周期 T の使用できる範囲がより限定されることがわかる。

5. おわりに

相互相関を用いた超音波センサは移動ロボットの環境認識を行なう上で大変有用なセンサである。しかし、測距レンジや測距頻度は使用する用途によって異なり、これらの条件から送信信号の周期は決定される。

これまでは固定した周期において、測距範囲内にある対象物の数のみを考慮し、送信信号を構成するパルスの数を検討することで誤検出が発生しない送信信号の生成方法について提案された。また、そこでは環境雑音を考慮せず、送信信号の周期をできる限り長く確保できれば、より雑音に対して影響を受けずに測距可能とされてきた。

しかし、実際の屋外環境では送信信号の周期が長くなると受信する雑音も多くなる。そこで、本論文では測距範囲内にある対象物の数に加え、屋外で発生する雑音の密度を考慮することで、常に正しく測距できる送信信号の周期と送信信号を構成するパルスの数を明らかにした。その結果、この二つの間には拘束条件が存在し、さらに環境雑音が多い状況下ではこの条件が強まり、より限られた範囲でのみ満たすことを示した。

また、超音波センサに影響を与える雑音について確認を行ない、屋外環境を想定したシミュレーションからこの検討結果の妥当性を確認した。一方、超音波センサを搭載したロボットが屋内などといった狭い空間を移動する場合には、送信信号が複数の経路を通して反射する、マルチパスが発生し、正しい測距に大きく影響する恐れがある。今後、この点についても考慮し取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) R. Kuc and B. Barsham: Docking Mobile Robots Using A Bat like Sonar, International Conference on Intelligent Robots and Systems, **2**, 1439/1444 (1992)
- 2) D. Langer and C. Thorpe: Sonar based Outdoor Vehicle Navigation and Collision Avoidance, International Conference in Intelligent Robots and Systems, 1445/1450 (1992)
- 3) W.D. Rencken and Siemens AG: Autonomous sonar navigation in indoor, unknown and unstructured environment, International Conference in Intelligent Robots and Systems, **1**, 431/438 (1994)
- 4) 清水, 大矢, 油田: 縁石を利用した移動ロボットの屋外自律走行, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '04 講演論文集, 1A1-L1-76 (2004)
- 5) H. Mori, S. Kotani and N. Kiyohiro: HITOMI: Design and Development of a Robotic Travel Aid, Assistive Technology and Artificial Intelligence Lecture Notes in Computer Science **1458**, 221/234 (1998)
- 6) 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, **15-4**, 542/549 (1997)
- 7) 丹沢, 塩澤, 渡邊, 清弘: 屋外移動ロボットのためのワイドレンジ超音波距離センサ, 日本ロボット学会誌, **27-5**, 583/589

(2009)

- 8) 石山, 高橋, 中野: 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, **17-4**, 526/533 (1999)

- 9) 高橋, 石山, 中野: 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, 日本ロボット学会誌, **17-8**, 1183/1190 (1999)

=====

[著 者 紹 介]

塩 澤 奨 (学生会員)

2010 年山梨大学大学院医学工学総合教育部博士課程に入学, 現在に至る。

丹 沢 勉

1997 年山梨大大学院博士後期課程修了。博士(工学)。同年より富士重工業(株)入社。2007 年より山梨大学大学院医学工学総合研究部工学学域・情報システム工学系助教。計測, 制御などの研究開発に従事。

清 弘 智 昭

1971 年東京工業大学工学部制御工学科卒業。2000 年より山梨大学大学院医学工学総合研究部医学・工学融合学域生体環境医工学系教授。工学博士。計測, 制御, 情報通信, 電子デバイス, 機器工学の研究に従事。

=====