

ゲイン調整により測定レンジを拡大した超音波センサ

Enhancing the range of sonar by gain adjustment

○石山 敏規, 高橋 隆行, 中野 栄二

○Toshinori Ishiyama, Takayuki Takahashi, Eiji Nakano

東北大学

Tohoku University

キーワード: 超音波センサ(Sonar), 相互相関(Cross correlation), 変調信号(Modulated signal),
ゲイン調整(Gain adjustment), 測定レンジの拡大(Range enhancement)

連絡先: 〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉 東北大学大学院 情報科学研究科 中野研究室(青葉山キャンパス機
械系) 石山 敏規, Tel.: (022)217-7025, Fax.: (022)217-7023, E-mail: ishiyama@robotics.is.tohoku.ac.jp

1. はじめに

超音波センサは、屋内移動ロボットの環境認識やナビゲーションに用いた場合、簡単な装置で比較的精度良い距離測定が可能である。そのため、多くの移動ロボットに搭載されている。しかし、近接した複数の超音波センサを同時に動作させた場合や、超音波センサを搭載した他の移動ロボットが近づいた場合、センサ同士が互いに干渉を起こし正確な計測をすることができない。そこで、丹沢らは¹⁾²⁾送信波をあるパターン信号で変調し、対象物に反射して受信された信号との間で相互相関を計算することにより、他のセンサからの信号や雑音などの外乱に影響されずに対象物までの距離を測定できる超音波センサシステムの開発を行った。

本報告はこの相互相関を用いた超音波センサシステムを製作し、屋内移動ロボットに搭載することを想定した実験を行う。また、より外乱の影響を受けにくくするための手法を提案する。

2. 測定原理¹⁾²⁾

2.1 個体識別信号

通常の超音波センサは短いパルスを送信し、これが対象物に反射して戻って来るまでの時間を計測し距離を算出している。しかし、超音波センサが複数個存在する場合は、それぞれが発信したパルスの区別ができず、干渉を起こすことがある。

そこで各超音波センサは、40kHzの搬送波を固有の個体識別信号で変調して送信する。そして、受信信号と送信した個体識別信号との間での相互相関を計算することで雑音を除去し、必要とする信号を抽出して距離を算出する。

Fig.1 のように送信信号の1周期分を N 等分し、各区間に0または1を与える。この0または1の組合せを各センサで変えることにより個体識別信号とした。これを信号列

$$T(i) (i = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1)$$

とする。このとき、送信信号と受信信号との間の

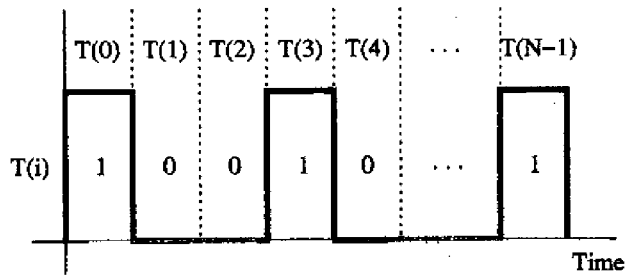


Fig. 1 個体識別信号

時間遅れを一意に、かつ、できるだけ確実に検出しなければならない。そこで、送信信号と受信信号の相関を計算する際、2つの信号が一致した時のみ大きな相関値をとり、他の時にはできるだけ小さな値をとるようにする。そのため、以下のように $T(i)$ を決定する。

$$\sum_{i=1}^{N-1} T(i) \cdot T(i+j) = \sum_{i=1}^{N-1} T(i) \quad (j=0) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} T(i) \cdot T(i+j) \leq 1 \quad (0 < j < N) \quad (2)$$

さらに、近接した複数の超音波センサが同時に動作した場合にも互いに干渉を起こさないように、それぞれの超音波センサの個体識別信号間の相互相関の値は小さいものでなければならない。よって、各超音波センサの個体識別信号は式(3)も満たさねばならない。

$$\sum_{i=1}^{N-1} T_1(i) \cdot T_2(i+j) \leq 1 \quad (0 \leq j < N) \quad (3)$$

ここで、 T_1, T_2 は異なる超音波センサの個体識別信号で、それぞれ式(1),(2)を満たしている。超音波センサが近接して3つ以上存在する場合には、全ての組合せで上式を満たす必要がある。

実際に使用した個体識別信号をFig.2 に示す。

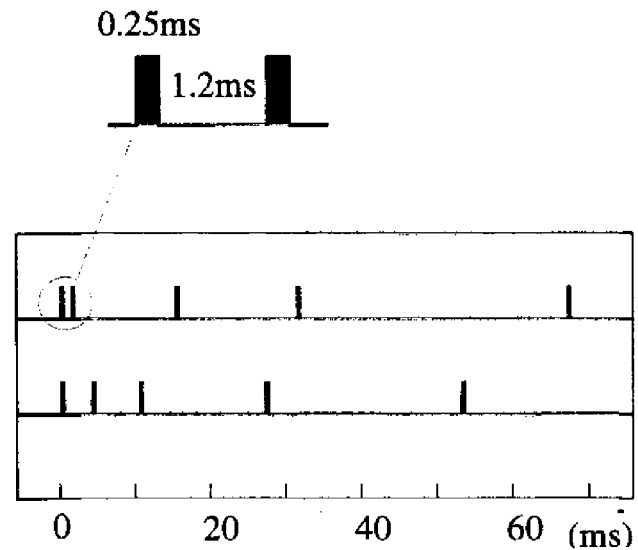


Fig. 2 個体識別信号の様子

2.2 距離の計算

受信した信号は増幅され、適当な閾値により0または1の2値に変換される。これを受信信号 $R(i)$ とする。 $R(i)$ の中から各超音波センサの個体識別信号 $T(i)$ を検出するために、 $T(i)$ と $R(i)$ の間で相互相関の値 $M(k)$ を計算する。

$$M(k) = \sum_{i=0}^{N-1} T(i) \cdot R(i+k) \quad (4)$$

$T(i)$ と $R(i)$ はある k で一致し、このとき $M(k)$ は最大値をとる。この k にサンプリング周期をかけたものを超音波の飛行時間として対象物との距離を算出する。

実際には式(4)の計算量はかなり大きくなるため、個々の個体識別信号で $T(i) = 1$ の部分のみ計算を行う。

$$M(k) = \sum_{n=0}^{N_{pulse}} R(S_{pulse}(n) + k) \quad (5)$$

ただし N_{pulse} は $T(i) = 1$ となる個数、 $S_{pulse}(n)$ は n 番目のパルスの時間 i である。

3. システム構成

今回製作した超音波センサは、16kHzの68000ワンボードマイコンを中心に構成されている。その構成をFig.3 に示す。

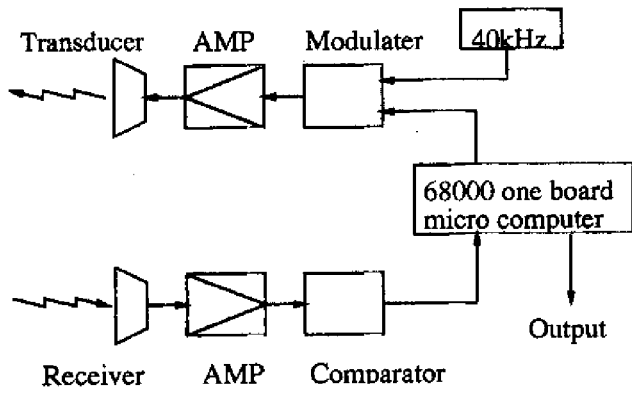


Fig. 3 超音波センサの構成

4. センサの性能

超音波センサでは、発信素子から受信素子への直接波が問題となる。今回製作した超音波センサでは発信素子と受信素子にホーンを取り付け、直接波を遮断している。しかし、わずかに直接波は存在し、これを読み込まない程度まで受信信号を増幅することができる。よって、測定範囲には限界があり、対象物が平面の場合、距離測定はおよそ 400cm まで可能であった。

センサの性能を調べるため、外乱の無い状況で以下の実験を行った。

まず、超音波センサの測定範囲を調べるため、直径 3.5cm、10cm、21.5cm の丸棒を立て、センサの反応を調べた。Fig.4 に距離が測定できた範囲を示す。この図から、センサの指向性はおおよそ 30° であることが分かる。

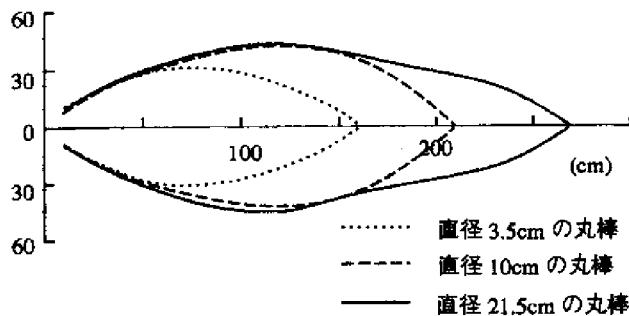


Fig. 4 超音波センサの測定範囲

次に、机の足を想定して、一辺 3cm の角柱をセンサの正面に立て、測定を行った。角柱の場合、角柱面の角度による影響が大きいので、測定可能な角柱面の角度 θ と距離の関係を測定した。

この結果を Fig.5 に示す。この図において、斜線で示されている部分が測定可能な領域である。この結果、距離が 50cm 以上の場合は、 θ による影響が大きく超音波センサで机の足を検知するのは困難な場合が多いことがわかった。しかし、距離が 50cm 以下の場合は、 θ に関係なく距離測定が可能である。

また、実際の机の足などには角に丸みを持たせており、これを想定して角に丸み (R5) を持っている角柱で同様の実験を行った。この場合は測定可能範囲が広がり、100cm 以下であれば距離測定が可能であることが分かる。よって、衝突回避をするための情報としての利用は可能であると思われる。

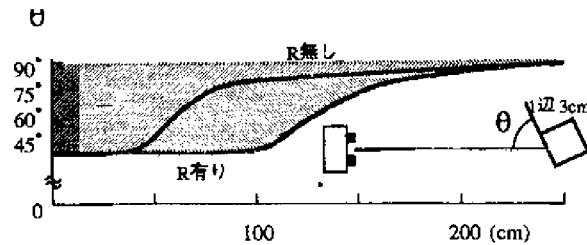


Fig. 5 角柱面の角度と測定距離の関係

5. 外乱による影響

5.1 雑音による影響

雑音による影響を調べるため、Fig.6 のように、センサに向かい合わせて、パルス状の雑音を発信する超音波発信素子を置き、距離測定を行った。センサと壁との距離は 150cm である。この時、雑音源の位置を変化させたが、距離測定には影響がなかった。

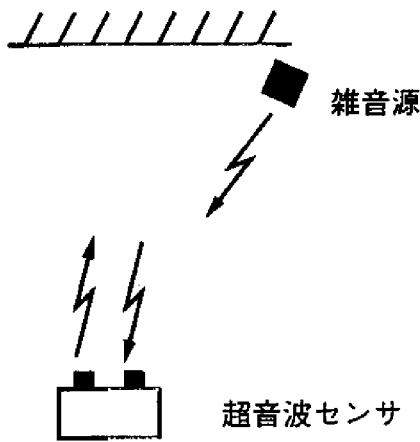


Fig. 6 雑音による影響

5.2 センサ同士の影響

Fig.7のように、距離を測定している超音波センサAに、別の個体識別信号を発信している超音波センサBを近づけ、Aでの距離測定に影響があるかを実験した。

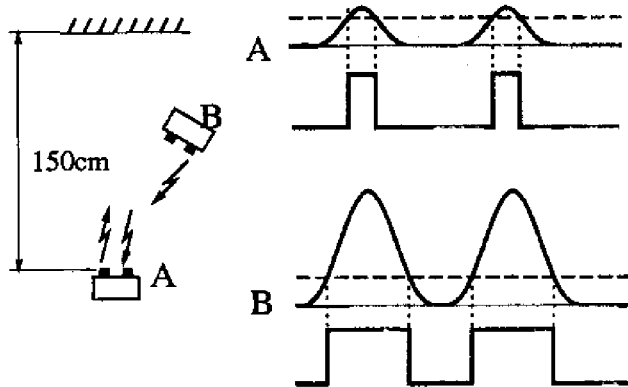


Fig. 7 センサ同士による影響

Aで発信した信号は一旦壁に反射してAの受信素子で受信されるので、その振幅は減衰している。それに対して、Bで発信した信号は直接Aの受信素子に到達しているため、振幅の減衰は少ない。よって、二つの信号を同じ閾値でコンパレートすると、Bの信号の時間軸方向の幅はAのものに比べて大きくなる。

この実験での受信波の様子をFig.8に示す。横軸は超音波の飛行時間を距離に換算したものとする。

図中A'、A''、B'はセンサA、Bの個体識別信号を右にシフトしたものである。受信波のパルスのうち、1~4はセンサBで発信したもの、5~8はセンサAで発信したものと思われる。AとBの個体識別信号は、相関値が小さくなるように設定されている。しかし、前記のように、Bからの受信信号1~4は幅が広がっているため、A'と大きな相関値を示してしまう。その結果、距離測定に影響が生じる。

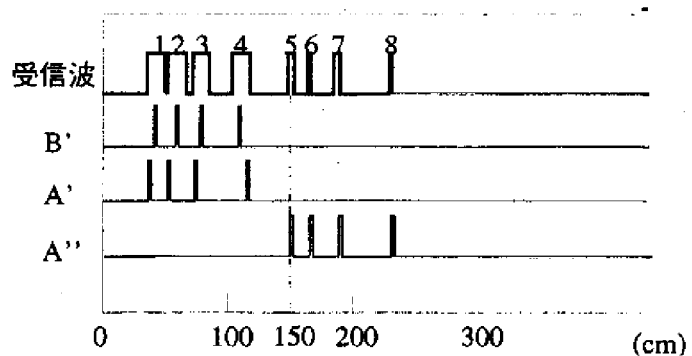


Fig. 8 パルス間隔が短い場合

そこで、個体識別信号のパルス間隔を広げ、同様の実験を行った。受信波の様子をFig.9に示す。

受信波のパルスのうち、1,2,6はセンサBで発信したもの、3,5,7はセンサAで発信したもの、4はセンサAとBからのパルスが重なったものと思われる。AとBの個体識別信号の違いが大きいため、Bからの受信信号1,2,4,6とA'の間の相関値は小さく、センサBはAの距離測定に影響を与えない。

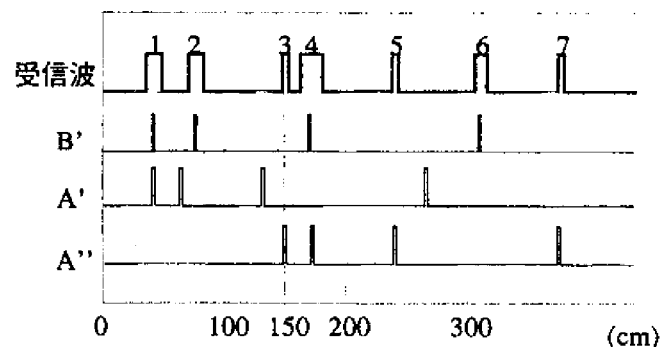


Fig. 9 パルス間隔が長い場合

6. ゲイン調整

6.1 ゲイン調整の意味

一般に、屋内移動ロボットが必要とする距離情報は数cmから数mと考えられる。超音波センサで数mの距離を測定する際、対象物からの反射波はかなり減衰していると考えられ、受信信号を大幅に増幅させる必要がある。よって、ゲインが固定されている超音波センサでは、かなり大きめのゲインを設定しておく必要がある。

Fig.6のように外乱のある環境において、40cm程度の短い距離の測定を行った。ゲインが適切な場合の受信波はFig.10のようになり、相関をとることで正しい距離測定が可能である。

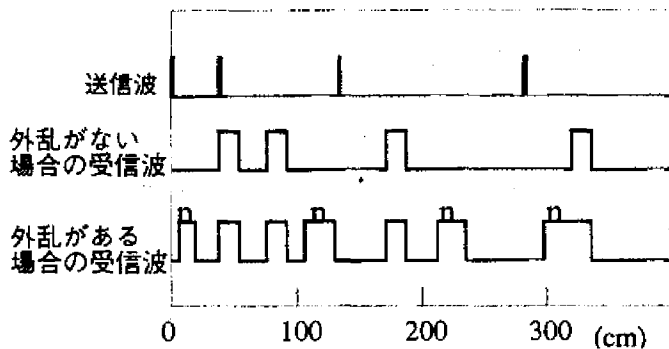


Fig. 10 ゲインが適切な場合

一方、大きいゲインで短い距離を測定する場合の受信波はFig.11のようになり、外乱がある場合には受信信号の大部分で1(high)の状態になってしまうことがある。よって、正しい距離よりも短い距離で大きな相関値が存在し誤動作する可能性がある。

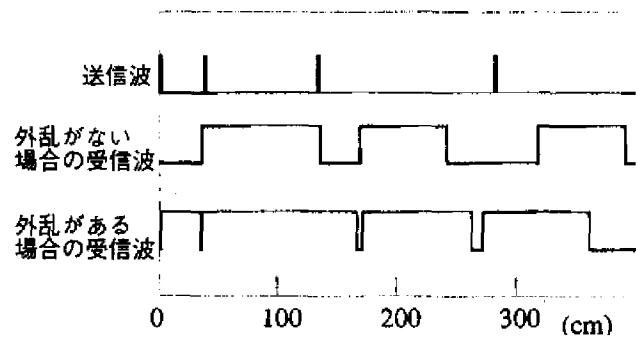


Fig. 11 ゲインが大きい場合

これを5.2のように、個体識別信号のパルス間隔を広げることで解決しようとする、かなり大きな間隔をとる必要があり、個体識別信号全体が非常に長くなる。その結果、相関の計算量が増え、1回の測定に時間がかかってしまうため、パルス間隔を広げる方法では限界があると考えられる。したがって、ゲインを調整することが望ましい。

6.2 ゲイン調整の方法

ゲインの調整は、あらかじめ4段階のゲインを決め、測定毎に低い方からゲインをスイープし、最初に適切な測定結果が得られるゲインを選択することとした。ここで、適切な測定が行われたかどうかの判断は、相関の値がある閾値を越えた場合を適切な測定とし、越えない場合はゲインを1段階上昇させることとした。

1つのパルスを発信する通常の超音波センサでは、信号と外乱の区別ができないため、受信波の強さに応じたゲイン調整はできない。そこで、超音波の飛行時間によりゲインを調整することが考えられる。大野らは³⁾受信波検出の際の閾値を時間とともに下げることで、弱い反射波も検出できるようにした。しかし、センサに対して斜め45度を向いている平面などは、たとえ近距離であっても反射波は弱く、この方法では測定できない。

これに対し、本報告の方法では、信号と外乱の区別を行っているため、信号の強さに応じたゲイ

ン調整が可能となる。

6.3 実験

実際に外乱のある環境で、ゲインが大きい場合とゲイン調整をした場合とで、距離測定を行い、誤動作する確率を調べた。実験はFig.6のような位置関係で行い、パルス状の外乱をランダムに発信させている。実験は、各測定を10000回ずつ行い、測定誤差が±1cm以下であれば正確に測定できたとしている。実験結果はTable 1のようになり、ゲイン調整をすることで誤動作が無くなったことが分かる。

Table 1 ゲインの大きさによる正動作の確率

測定距離	30cm	60cm	90cm
ゲインが大きい場合	97.9%	96.1%	98.0%
ゲイン調整をした場合	100%	100%	100%

7. 考察

5.1の実験から、パルス状の雑音が存在する状況下であっても測定可能であることが分かった。よって、他の超音波センサを搭載した移動ロボットが近付いても、影響を受けずに距離測定が可能であることが分かった。

5.2の実験から、個体識別信号を変えることで、近接して複数個の超音波センサを同時に動作させても、互いに干渉を起こさず、距離測定が可能であることが分かった。

6.3の実験から、ゲインが大きい場合、5.1や5.2で示したように正確な測定ができるとは言えないことが分かった。しかし、ゲインが適切であれば外乱の影響を受けないので、ゲイン調整を行うことで外乱がある環境でも確実な距離測定が可能となり、測定レンジが広がったと考えられる。

8. 結言

相互相関を利用した超音波センサについて、個体識別信号のパターンを工夫することでより外乱に強くなった。また、ゲイン調整を行うことで、近距離についても外乱の影響を受けず、距離測定が可能となった。よって、外乱の影響を受けずに距離測定が可能な範囲が広がった。この結果、製作した超音波センサは、障害物回避やドアの通過など、広い測定レンジを必要とする屋内環境を移動するロボットに搭載する上で、非常に有効と考えられる。

しかし、このゲイン調整方法の場合、測定毎に1段階ずつゲインを上昇させるため、対象物までの距離が遠く、大きなゲインが必要な場合には測定に時間がかかるという欠点がある。よって、他のゲイン調整方法の検討や、センサを搭載している移動ロボットの環境やタスクにより、ゲイン調整の設定を変化させるアルゴリズムの検討が必要と思われる。

参考文献

- 1) Tsutomu Tanzawa, Noriaki Kiyohiro, Shinji Kotani, Hideo Mori "The Ultrasonic Range Finder for Outdoor Mobile Robots", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol.3,p368~p373,1995
- 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,p73~p78,1993
- 3) 大野 孝幸, 大矢 晃之, 油田 信一 "送受信回路の改良による超音波センサの測距性能の向上", 第12回ロボット学会学術講演会予稿集,p1093~p1094,1994