

安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発（第8報）

－ 超音波フェーズドアレイソナー －

田畑 克彦 久富 茂樹 藤井 勝敏

Development of Sensors for a Safety Driving System of Electric Senior Vehicles (8th Report)

- An Ultrasonic Phased-Array Sonar -

Katsuhiko TABATA Shigeki KUDOMI Katsutoshi FUJII

あらまし 高齢者の生活を支えるツールの一つである電動車いすに対して、事故の危険を検知する安全装置を開発している。この安全装置の一つとして、障害物の有無や接近を広域に検出する超音波フェーズドアレイソナーを開発している。昨年度は、フェーズドアレイ送信を実現する音響管アレイの改良を行い、十分な送信信号強度を得ることができたが、まだ十分な検出能力を得られていないことが判明した。そこで、二値振幅偏移変調されたBarker符号を送信し、送信符号と受信信号との相関処理を行うことにより検出能力を高め、目標であった距離3000mm、方位60degにいる三歳児程度の大きさの子供を検出できる目途が立った。さらに、来年度以降に電動車いすで検証するためのシステムを開発したので報告する。

キーワード 超音波フェーズドアレイソナー、超音波音響管アレイ、Barker符号、相関処理

1. はじめに

高齢者が活動的な生活を送る支援機器の一つとして、電動車いすが有用であるが、障害物との衝突、歩行者や自動車等との接触事故が後を絶たない。そこで我々は、電動車いすの運転中に障害物や危険箇所の接近をセンサで検知することによって、安全な走行を支援する装置を開発している。この安全装置は、将来的に共同研究先である県内企業で開発されている新しい電動車いすへ搭載し、普及させることを目指している。なお、開発する安全装置付きの電動車いすを特に“電動ビークル”と記述する。

現在、電動ビークルの安全装置に搭載する複数のセンサを開発しているが、そのうちの一つとして、超音波を使用した障害物検出センサ(以降、“超音波ソナー”と記す)の研究開発を行っている^{[1][2]}。電動ビークルは直線走行が続く屋外だけでなく、高い頻度で移動方向が大きく変化する屋内での使用も想定しているため、正面だけでなく左右の広範囲にわたって存在する障害物を検出する必要がある。その上、車体が小型であることから、センサ自体もコンパクトにする必要がある。

これらの要求を同時に満たすため、本研究では多数の送信用超音波振動子を制御し任意の方向に強い超音波を送信するフェーズドアレイ技術を利用した超音波フェーズドアレイソナー(以降、“超音波PAソナー”と記す)を開発している^{[1][2]}。昨年度は、フェーズドアレイ送信を

実現する音響管アレイを改良したところ、これまでの2倍の信号強度にすることができた^[2]。

本年度は、この音響管アレイを使用して障害物の検出能力を確認する実験を行ったが、目標である距離3000mm、方位60degに設置した服を着せた3歳児大の人体ダミー(以降、“子供マネキン”と記す)を検出できなかった。そこで、障害物検知に使う超音波信号を変調し、反射信号を強調する信号処理を加え、検出能力の向上を図った。具体的には、自己相関値が高く符号長が比較的短いBarker符号で二値振幅偏移変調(以降、“二値ASK変調”と記す)された超音波信号を送信し、送信符号と受信信号との相関計算によって符号化パルス圧縮を行った。これにより障害物からの反射を明確にとらえることができ、実験により目標達成の目途を得た。さらには、将来的な車載システム化に向けて、コンパクト化を一段と進めた検証用システムを開発し、実験用台車に搭載して動作確認を行った。本稿ではこれらの改良内容と評価実験結果について報告し、実証実験に向けた課題を整理する。

2. 障害物検出実験

昨年度開発した超音波音響管アレイ^[2]を使用して超音波PAソナーを構築し、障害物の位置と種類を変えて検出能力を把握した。表1と表2は、それぞれ送信部と受信部の主な仕様である。本検出実験では搬送周波数40kHz、長

表1 送信部仕様

音響管アレイ:	
スリット開口サイズ	縦20mm×幅3mm
スリット間隔 (Center to Center)	4mm
スリット数	8
超音波素子数	16
超音波素子:	
中心周波数	40kHz
波長 (at 20℃)	8.6mm
素子型番 (開放型)	日本セラミックス株式会社 T4008A1(φ 8×6mm)

表2 受信部仕様

超音波素子:	
超音波中心周波数	40kHz
素子型番 (防滴型)	日本セラミックス株式会社 PR40-18(φ 18×12mm)

表3 障害物検出結果

距離[mm]	障害物 子供マネキン			障害物 低い壁		
	方位角 [deg]			方位角 [deg]		
	0	30	60	0	30	60
500	○	○	○	○	○	○
1000	—	—	—	—	—	—
1500	○	○	×	○	○	○
2000	○	○	×	—	—	—
3000	×	×	×	○	○	○

○検出可能 ×検出できず — 計測せず

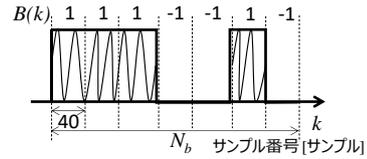
さ0.4msの単パルスを送信し、受信電圧がノイズフロアと分離可能な0.1V以上である場合に障害物の検出が可能と判定した。

表3は実験結果である。高さ450mmの低い壁に対しては目標の距離3000mm、方位角60degの検出を達成している。しかしながら、子供マネキンに対しては目標を達成できなかった。特に方位角が大きい60degでは距離1500mmでも検出困難であった。これは、衣服が超音波を吸収し反射信号の強度を弱めることに加え、送受信部の指向性により感度が低下していることが原因である。

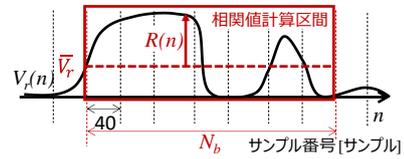
これまでのように音響管アレイを改良し送信強度を高めて検出領域を拡張することを継続するためには、さらに送信素子数と音響管数を増やす必要がある。このことは音響管が歪曲しすぎて超音波が減衰し易くなる、構造が複雑になるなど、効率、強度およびコストの面で問題となる。このため、Barker符号による相関処理により、反射信号を強調し検出領域の拡張を図ることとした。

3. Barker符号と相関処理による能力向上

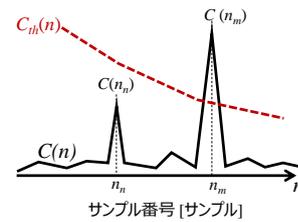
Barker符号は符号化パルスレーダにおいて位相符号化によるパルス圧縮などに用いられる符号列である。パルス圧縮とは、送信パルスとしてパルス内に特殊な変調を施したパルス幅の広い送信信号を用いて検出距離を拡張し、受信後の処理においてその復調を行って狭いパルス幅に変換することで距離分解能を向上させる技術である。本技術は、検出距離を拡張するには送信パルス幅を広くし、距離分解能を向上させるにはパルス幅を狭くするという相反する性質を解決する技術として用いられている^[3]。同様の目的で特徴的な信号を用いた方法が



(a) 送信信号 (Barker符号長7)



(b) 受信信号の振幅値 (検波後の拡大図)



(c) 相関値 (障害物判定)

図1 Barker符号による相関処理

幾つか報告されているが、本研究では近距離も検出したいために符号長の短いBarker符号を用いる。Barker符号は+1または-1から成り、(1)式で表されるように、符号列が一致した時(d=0)に高い自己相関値Nとなるが、不一致の場合は理論的最小値である0または±1となる符号列である。

$$C(d) = \sum_{i=1}^{N-d} X_i \cdot X_{i+d} = \begin{cases} N & (d=0) \\ 0, \pm 1 & (d=1, 2, \dots, N-1) \\ 0 & (d \geq N) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、符号長Nが6084までのうち、上式を満たすBarker符号はわずか9個である^[3]。

3. 1 Barker符号による相関値計算

Barker符号によるパルス圧縮は、符号+1を位相0とし、-1を位相πとする二値位相変調信号を用いることが一般的である。しかしながら、本システムは振動板の機械共振を利用した超音波素子を使用しているため、極小時間内に位相を反転することは困難である。このため本システムでは二値ASK変調信号を用いた相関処理を行うことで、パルス圧縮を行った。

図1を用いて本システムにおける相関処理の計算方法について説明する。図1(a)は40kHzの搬送波に対して二値ASK変調した符号長7bitのBarker符号関数B(k)である。励振時を符号1、非励振時を符号-1とし、1bit符号の時間幅は十分な励振時間である0.4msとしている。サンプリング周期Tsを10μsに設定したため、1bit符号は40サンプルから成り、符号長7のBarker符号を構成するサンプル長Nbは280である。一方、受信信号の拡大図は図1(b)であり、目標距離3000mmの1.5倍の4500mmまでの受信信号の振幅

値（以降，“受信振幅値”と記す） $V_r(n)$ をADコンバータで取得する．この時，観測データの n 番目のサンプルにおける相関値 $C(n)$ を次の式で表す．

$$C(n) = \sum_{k=0}^{N_b-1} B(k) \cdot R(k+n) \quad (2)$$

ここで， $R(k)$ は受信信号評価値であり，図1(b)に示すように受信振幅値 $V_r(n)$ と相関値計算区間 N_b における $V_r(n)$ の平均値との差であり，次の式で表される．

$$R(k+n) = V_r(k+n) - \overline{V_r}(n) \quad (3)$$

$$\overline{V_r}(n) = \frac{1}{N_b} \sum_{k=0}^{N_b-1} V_r(k+n) \quad (4)$$

最初は，評価値 $R(k)$ を二値化したのが，ノイズフロア程度に受信振幅値が低下すると誤検知が急増した．この対策として，(3)式のように平均値からの振れ量を符号の重みとすることで，振幅値も加味した評価値とした．

以上の式から図1(c)に示す相関値 $C(n)$ を得ることができるため，閾値 $C_{th}(n)$ を適切に設定することで，障害物からの反射信号 $C(n_m)$ を抽出する．障害物までの距離 l はサンプル番号 n から次の関係式で求めることができる．

$$l = \frac{c \cdot T_s \cdot n}{2} \quad (5)$$

ここで c は音速[m/s]である．

3. 2 相関処理による検出結果

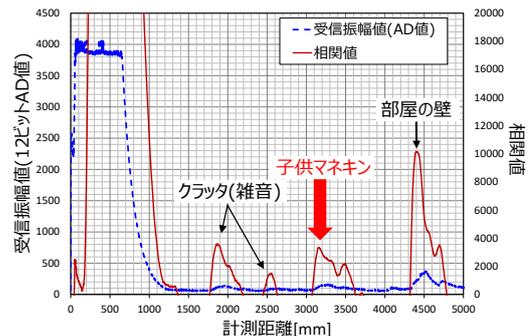
前述のようにBarker符号は9種類存在する．符号長 N は2～13の間に存在しており，どの符号を使用するか選定する必要がある．予備実験を行って検討した結果，符号長 N が11以上では符号列が長すぎるため，送信中に要求仕様である500mmの障害物からの反射信号と重なり，検出できない．また，(1)式において，符号がずれている場合に相関値が+1となる符号も極大値が別の位置に出現し，距離誤差が大きくなる傾向があった．以上の条件に合致しないBarker符号は，符号長 N が2, 3, 7の符号である．その中で符号長が最も長いために，符号一致時の相関値が最も大きくなる符号長7のBarker符号を選定した．

図2は第2章の障害物検出実験で最も検出が困難であった子供マネキン（距離3000mm，方位角60deg）に設置した場合における検出結果である．図2(b)から受信振幅値（12ビットAD値）は0～4095の値で比較的緩やかに変化することに対して，相関値の階調は50万を超えるため値の変動も大きく，子供マネキンからの反射をより明確に検出できていることがわかる．本結果より，目標値である距離3000mm，方位角60degに存在する検出困難な障害物も検出できる目途がたった．

しかしながら，距離2000mmおよび2500mmにおいて，位置決めシートの罫からの反射と思われるクラッタ（雑音）も検出している．子供マネキンがこの位置に存在する場合にはクラッタよりも相関値は大きくなる．よって，



(a) 実験のようす



(b) 相関値計算結果 (Barker符号長7)

図2 障害物検出実験の一例

今後はクラッタと障害物を判別するため，図1(c)における閾値 $C_{th}(n)$ を適切に設定して，誤検知を回避する必要がある．

4. 検証用システムの開発

これまで，屋内において超音波信号の送受信処理について検討し，処理内容が固まってきた．今後は，実験用移動台車や電動ビークルに搭載し，屋内外にある実際の障害物の検出条件を検討することが必要である．このため，よりコンパクトなセンサーヘッド(図3(a))と電子回路基板を試作し，マイコンとFPGAに送受信処理を実装した超音波パソナーの検証用システムを開発した．本システムには，制御用PCにマイコンから送られる障害物反射信号の位置と大きさ情報をロギングしCG表示する機能を追加した．さらに制御用PCに接続したUSBカメラから得られた画像を表示し，検出した障害物を確認できるようにした．図3(b)は検証用システムを実験台車に実装した写真である．

図4は動作確認のため，図3(b)の実験台車を高さ48cmの壁沿いに走行させているときの制御用PC画面のスナップショットである．図4(a)は符号長7のBarker符号信号を使用して，前述の相関処理によって右側の壁を検出した結果であり，同図(b)は受信振幅値（AD値）によって同じ壁を検出した結果である．表4は動作確認時の主な仕様である．また，(2)式におけるサンプル番号 n の最大値は，最大検出距離4500mm，サンプリング周期10μsに設定しているため，3100としている．



(a) 超音波PAソナーのセンサーヘッド



(b) 実験用台車への実装

図3 開発した検証用システム

図4において実験用台車は石畳の上を走行しているため、路面に多少の凹凸がある。このため図4(b)では、路面反射によるクラッタを検出してしまっているが、図4(a)の相関値による検出では、クラッタの検出を抑制できている。しかし、相関値による検出においても時々クラッタを検出していることを確認している。よってクラッタの抑制効果は、表4中の障害物検出条件において、単に相関値の閾値がより適切に設定されていたと考えられるが、図2(b)に示すように検出値が相関値となることで階調が広がり、クラッタと障害物の分離が容易になったとも考えられる。前述したように、今後は障害物の距離と方位角に対応して閾値 $C_{th}(n)$ を的確に定めることでクラッタによる誤検出をさらに抑制する。もう一つの課題は、最小検出距離を500mmに短縮することである。現状では表4のとおり相関値の場合、最小検出距離が600mmである。これは、低利得系の信号利得がまだ大きく、送信時の回り込み信号が膨張して、検出範囲に出現していることが原因であることから、利得調整を行う。

5. まとめ

高齢者用電動ビークルの安全装置として、広域に障害物を検出する超音波フェーズドアレイソナーの開発について述べた。本年度は、送信信号に自己相関値の高いBarker符号を二値ASK信号として用いて、受信信号との相関処理を行うことで、障害物からの反射信号を強調した。これにより、検出目標であった距離3000mm、方位角60degにいる三歳児程度大きさの子供を検出できる目処が立った。また、来年度以降の電動ビークルへの実装に



(a) 相関値による壁検出



(b) 受信振幅値(AD値)による壁検出

図4 検証用システムの動作例(スナップショット)

表4 動作確認時の主な仕様

障害物検出方法	相関値	受信振幅値(AD値)
使用符号	Barker符号(符号長7)	単パルス
検出距離	600~4500mm	500~4500mm
検出方位角	120deg (-60~+60deg)	同左
検出時間(1方向)	照射方向 13方向 55ms	40ms
障害物検出条件 (動作確認のため暫定)		
高利得系	距離1000mm以上 相関値5000以上	距離1000mm以上 AD値155以上
低利得系 (近距離検出用)	距離600mm以上 相関値10000以上	距離500mm以上 AD値465以上

備え、検証用システムを開発し、動作確認を行った。この結果、相関処理による検出値の階調が広がるために、路面からの反射雑音(クラッタ)の抑制が容易になることを確認した。今後は、障害物の的確な検出条件を設定することと、近距離における検出能力を向上させる。

謝辞

本研究で試作したセンサーヘッドは、公益財団法人JKAの補助事業で導入した三次元造形機で製作した。

文献

- [1] 田畑克彦, 久富茂樹, 藤井勝敏, “フェーズドアレイ送信を用いた超音波障害物センサの開発—音響管アレイによる送信ビームの改良—”, 第33回センシングフォーラム講演予稿集, pp.244-249, 2016.
- [2] 田畑克彦, 平湯秀和, 久富茂樹, “安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発(第5報)—超音波フェーズドアレイソナー—”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.17, pp.8-11, 2016.
- [3] 吉田孝, “改訂 レーダ技術 第11章 特殊なレーダ技術”, 社団法人 電子情報通信学会, pp.275-280, 1996.