

車載用次世代超音波センサの開発

Development of Next-Generation Ultrasonic Sensors for Automotive Applications

JRCモビリティ株式会社

吹野 幸治 杉村 慎治 石川 高暁
Koji Fukino Shinji Sugimura Takaaki Ishikawa山下 哲心 阿部 尚義
Tesshin Yamashita Hisayoshi Abe

要旨

当社は、自動車の自動運転や無人操作を実現するうえで必須である「衝突防止」を実現する車載用の次世代超音波センサを開発した。本センサは、従来の超音波センサと比べ「より遠くの物標（障害物）」から「より近くの物標（障害物）」までの検出、および障害物までの測距の高精度化を実現し、自動駐車や無人の自動バレー駐車¹などのシーンにおける安全性を高めるとともに、自動車が障害物と衝突する事故のリスクを低減させる。次世代超音波センサは、従来の超音波センサと比べてより遠くの物標の検出・測距を可能とするため、信号の波数（超音波の波の数）を増やしているが、この阻害要素であるドップラー周波数シフトの回避策を応用することにより、センサと物標との相対速度の測定も可能となり、障害物との衝突リスクを低減させた。また、より近くの物標の検出・測距を可能とするため、センサの残響を抑えた。残響を最小化するため短時間の学習（最適値探索のための繰り返し測定）を行い、変数をセンサごとに自動的に最適化する。さらに、測距に用いる超音波を変調する際に、相互に相関関係が小さい異なる符号を用いることにより、2基の超音波センサを使用して同時に測距を行い、測距時間短縮の可能性についても示す。

Abstract

JRCM has developed a next-generation ultrasonic sensor for automotive applications that achieves “collision prevention,” which is essential for realizing autonomous driving and unmanned operation of automobiles. Compared with conventional ultrasonic sensors, this sensor realizes detection from “more distant objects (obstacles)” to “more nearby objects (obstacles)” and more accurate distance measurement to obstacles, thereby increasing safety in scenes such as automatic parking and unattended automated valet parking, and reducing the risk of accidents in which cars collide with an obstacle. The Next-generation ultrasonic sensors increase the number of waves in the signal (the number of ultrasonic waves) to enable detection and distance measurement of more distant objects than conventional ultrasonic sensors. By applying a workaround for the Doppler frequency shift, which is a disincentive, the relative velocity between the sensor and the object can also be measured, reducing the risk of collisions with obstacles. In addition, the reverberation of the sensor has been suppressed to enable detection and distance measurement of more nearby objects. Short-time learning (repeated measurements to search for optimal values) is performed to minimize reverberation, and variables are automatically optimized for each sensor. Furthermore, by using different codes with low cross-correlation when modulating the ultrasonic waves used for distance measurement, distance measurement can be performed simultaneously using two ultrasonic sensors, and the possibility of shortening the distance measurement time is also shown.

1. まえがき

昨今、自動車には、運転手の判断の遅れや操作ミスによる事故を防ぐための運転アシスト装置が搭載されることが増えており、運転アシスト装置が運転手の目と同様に周囲状況を認識するため、自動車にはカメラ、レーダ、超音波センサなどが装着されるようになった。現在研究が進んでいる自動運転においては、障害物との衝突回避は上記のセンサに大きく依存し、超音波センサに対する障害物検出範

囲の広範化や測距の高精度化が求められている。殊に自動駐車や無人の自動バレー駐りに超音波センサが活用されるようになったことに伴い、センサに対し、10 cmの至近距離から5 m以上の遠距離に至る広範囲における高い測距性能が求められている。

遠方にある物標（障害物）の検出性能を高めるためには測距信号のSNR²を改善する必要がある。至近距離にある物標の検出性能を高めるためには、センサが測距信号を送信

¹ 自動バレー駐車：大型施設の駐車場等で、運転手が出入口で乗降車する以外は車両の受け渡しと駐車スペースまでの往復と駐車を無人の自動走行により行う技術（駐車場内での運転手の乗降を伴わず、駐車場スペースの有効活用や駐車場内における事故回避に寄与する）

² SNR (Signal to Noise Ratio)：信号対雑音比（希望する信号と雑音信号のレベル比で、数値が大きいほど希望する信号を明瞭に検出することができる）

した直後の残響を抑圧する必要がある。当社は超音波の波数を増やすことによるSNRの改善と併せ、残響を打ち消すための信号を送信波の直後に付与することにより、これらの課題を克服し、高度な自動駐車や自動バレー駐車を可能とする次世代の車載用超音波センサを開発した。本稿ではこの超音波センサの仕組みについて解説し、動作試験の結果について紹介する。

2. 車載用の次世代超音波センサ

超音波は空気中を伝搬する過程で減衰し、遠方にある物標を検出する際には測距信号のレベルが小さくなるため、高いSNRが求められる。ここで、SNRを高めるために超音波の波数を増やすとセンサと障害物との相対速度によるドップラー周波数シフトの影響で検波出力が低下しやすくなり、そのような環境下ではSNRが低下して測距が困難となるため、ドップラー周波数シフトの影響を抑える必要がある。また、車載用の超音波センサには、スピーカ（超音波を送出する）とマイク（障害物で反射した超音波を受波し電気信号に変換する）を一体化した小型のトランスデューサ³が採用されるが、超音波の送信直後に振動板に残留する振動で残響が生じ、これが至近距離にある物標で反射した受信信号を妨害する。このため、振動板の残響を減少させる必要がある。

本稿では、一般的な車載用超音波センサの仕組みについて解説し、当社がどのようにして上記の課題を解決し、従来よりも障害物検出範囲の拡大や測距の高精度化に優れた次世代の超音波センサを開発したかについて述べる。

2.1. 超音波センサの仕組み

空気や液体の振動により伝搬する音波のうち、可聴域よりも周波数が高い領域（20 kHz超）を超音波と呼ぶ。当社が開発した超音波センサが使用する周波数は58 kHzである。超音波の伝搬速度は媒体により異なり、「気体<液体<固体」の関係である。空気中の伝搬速度は約340 m/sである。センサから送出された超音波は媒体の境界面で反射するため、物標（人や構造物など）に当たると反射し、センサに戻る。センサは、戻ってきた信号の強度および戻ってくるまでの時間を観測することにより、物標の存在および物標までの距離を判定する。超音波を用いた測距の仕組みを図1に示す。

測距時、送信回路は16波（16周期の正弦波）程度の電気信号（1）を送出する。電気信号（1）は圧電素子において超音波（2）に変換され、送出される。空気中を伝搬して物標に到達した送信波（2）は物標において反射し、圧電素子に戻ってくる。戻ってきた反射波（3）は圧電素子を振動させ、電気信号（4）に変換される。受信回路に入力された電気信号（4）は信号波の振幅の大きさをしきい値と比較し、しきい値を超えた場合に物標が存在すると判定する。ここで、しきい値はノイズや地面からの反射信号を物標からの反射信号と誤認しないレベルに設定する。

圧電素子は、超音波（2）を送出した直後から反射波（3）の受信を開始するが、超音波の送出直後は圧電素子の振動板が振動を続ける状態（残響）となり、これにより生じる振幅の大きな信号が受信される。物標から戻ってきた反射波は一般的に振幅が小さいため、残響が継続する間は検出が困難となる。

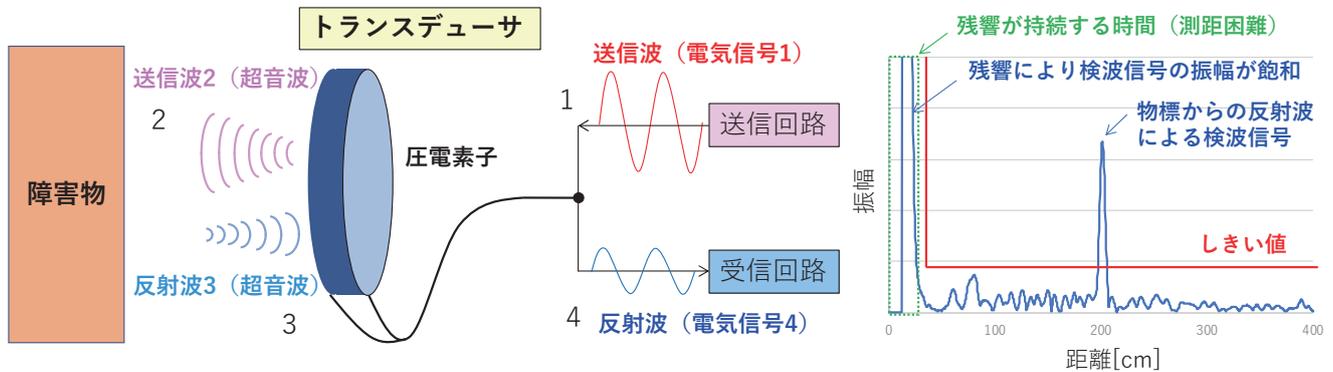


図1 超音波を用いた測距の仕組み

Fig.1 Mechanism of distance measurement using ultrasonic waves

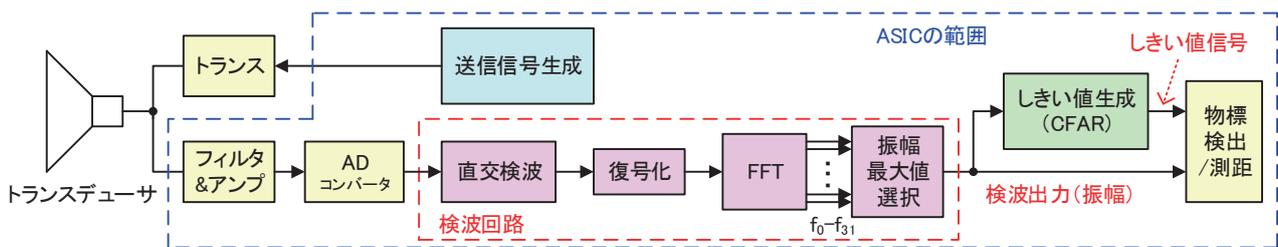


図2 次世代超音波センサの機能ブロック

Fig.2 Functional blocks of next-generation ultrasonic sensor

³ トランスデューサ：超音波を発するスピーカと反射音を電気信号に変換するマイクが統合された受動部品

センサから物標までの距離は、センサが超音波を送出してから反射波を受信するまでの時間（伝搬時間）の1/2に音速（毎秒340 m）を乗じることにより算出される。音速は伝搬路の温度の影響を強く受けることから、測距時には温度も併せて測定し、音速を補正する。当社が開発した次世代超音波センサの機能ブロックを図2に示す。

2.2. 次世代超音波センサの構成

トランスデューサとトランスを除く大部分の回路はASIC⁴に実装される。ASICを含む全ての部品を実装したPC板を樹脂製の筐体に収納し、図3に示す超音波センサを試作した。



図3 試作した次世代超音波センサの外観

Fig.3 Appearance of the prototype next-generation ultrasonic sensor

センサは、測距時に送信信号として無変調またはQPSK変調⁵された58 kHzの超音波信号を出力する。トランスデューサは十分な強さの超音波を送信するため、トランスを用いて送信信号を120 V以上に昇圧する。また受信した超音波信号をトランスデューサにおいて電気信号へ変換し、フィルタによる不要信号成分の除去、およびアンプによる増幅を経てADコンバータ⁶によりデジタル変換される。検波回路はデジタル変換された受信信号の振幅を検出する。検波回路は58 kHzで直交検波を行い、受信信号が符号化されている場合はベースバンド信号⁷へ変換した後に復号化する。FFT⁸（高速フーリエ変換）の出力 $f_0 \sim f_{31}$ は分解された周波数成分であり、受信信号が受けたドップラー周波数シフトに該当する出力を受信したタイミングでピーク波形が示される。すなわち、サンプル時間ごとに $f_0 \sim f_{31}$ の中から最大値を選択することによりドップラー周波数シフトの影響を排して受信信号の振幅成分を検出することができる。物標検出のしきい値信号は「検出された振幅」を用いてCFAR⁹などの手段によりリアルタイムに生成され、検波信号と比較することにより物標（障害物）の検出および物標までの距離の測定を行う。

3. 次世代超音波センサの優れた特長

次世代超音波センサが「より遠くから」「より近くまで」「より確実な」測距を実現する仕組みについて、図2に示した機能ブロックの詳述と併せて説明する。

3.1 「より遠く」の物標の検出と測距の精度向上

測距時にトランスデューサから送信された超音波は空气中を伝搬する過程で拡散し、また振動エネルギーが空気により吸収され、徐々に弱まってゆく。このため、物標で反射した超音波は物標がセンサから遠いほど弱くなり、検波出力信号波（反射波）の振幅が小さくなるので、雑音信号と区別することが困難となる。したがって、遠い位置にある物標（障害物）を検出するためには検波出力信号を強める必要がある。ここでトランスデューサの超音波出力レベルには上限があり、超音波出力レベルを単純に増強することが困難であるため、信号の波数を増やし、検波回路において相関処理を行い、処理利得により出力レベルを高める手法を採用した。相関処理とは、受信信号に対し送信信号を用いて畳み込み積分を施すもので、受信信号に送信信号（反射波）が含まれていると、受信したタイミングで検波出力にしきい値を超える大きな振幅のピークが形成される。

送信信号の波数が多いほど相関処理による信号波の振幅は大きくなるが、変調を加えずに（無変調の状態）送信波数を増やすと検波回路出力の波形が三角形となり、測距精度が下がる。このため、次世代超音波センサにおいては送信信号にQPSK変調をかけている。この概念を図4に示す。

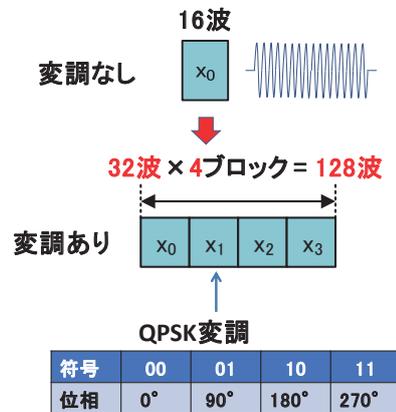


図4 次世代超音波センサの送信信号

Fig.4 Transmission signal of next-generation ultrasonic sensor

本手法では、16波～32波の無変調正弦波で構成されるブロックごとに位相を変えてQPSK変調をかける。この時に使

⁴ ASIC (Application Specific Integrated Circuit) : 特定用途向け集積回路

⁵ QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying) 変調 : 四位相偏移変調

⁶ ADコンバータ (Analog to Digital Converter) : アナログ電気信号をデジタル情報に変換する回路

⁷ ベースバンド信号 : 変調の対象となる情報信号 (ドップラー周波数シフトを受けている場合は帯域の中心周波数がずれる)

⁸ FFT (Fast Fourier Transform) : 時系列の信号波形を、その信号に含まれる周波数成分へ分解する演算を高速で行う手法

⁹ CFAR (Constant False Alarm Rate) 回路 : 検波出力をリアルタイムかつ部分的に平均化することで、地面からの反射波を障害物として誤検出する確率を一定に抑えるためのしきい値を自動生成する回路

用する符号により検波出力信号の波形が決まるが、Barker符号¹⁰を用いることにより図1に示すような整った波形の検波出力信号が得られる。図4に示すような4ブロックで変調をかける場合、Barker符号を適用するためには位相を $0^\circ \Rightarrow 0^\circ \Rightarrow 180^\circ \Rightarrow 0^\circ$ の順とすれば良い。図4に示すように送信信号を16波から128波に増やす場合、検波出力信号の振幅は図2に示した復号化とFFTによる相関処理(積分処理)によって同相加算され8倍となる。一方積分区間が8倍になることで、そこに存在する総雑音電力も8倍になるが、信号と同様に電圧比で考えると $\sqrt{8}$ 倍になり $(20 \log(\text{信号電圧}/\text{雑音電圧})) = 20 \log(8/\sqrt{8}) = 9\text{dB}$ となって、SNRは9dB(2.8倍)の改善が見込める。

物標(障害物)に見立てた塩化ビニル製のパイプをセンサの正面に配置し、試作した超音波センサを評価した。トランスデューサには送受信信号の指向角があり、正面方向から外れるにつれて反射波の受信レベルが低下する。実験により、試作した超音波センサが上記の物標をほぼ100%の確度で安定して検出するために必要なSNRが16 dBであることを確認した。また物標の検出が可能な最大距離は、従来の無変調16波を用いた場合は5 mであったのに対し、QPSK変調128波を用いた場合は7 mとなり、測距可能距離が従来比で40%延長したことが示された。さらに、理論的に導出されたSNR改善(9 dB)が実現可能であることについても実験により確認した。なお実験は無風の屋内(気温22℃、湿度31%)において実施したが、実稼働時における最大の測距可能距離は、温度、湿度、降雨および風の影響により変動する。

試作した超音波センサを用いてSNRを測定した結果を図5に示す。測定において障害物を設置する位置の影響で距離ごとの結果にばらつきが生じているが、波数の差によるSNRの改善(9 dB)を確認することができた。

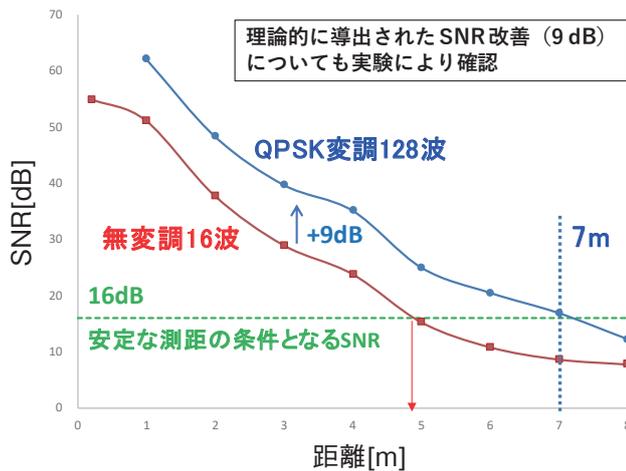


図5 試作した超音波センサによるSNR測定結果
Fig.5 SNR measurement results using the prototype ultrasonic sensor

3.2 「より近く」の物標の検出と測距の精度向上

送信波の電気信号によりトランスデューサを振動させて超音波を発すると、送信終了後しばらくの間は機械的振動が減衰しながら継続する。この振動が電気信号となりアンプにより増幅され、物標から到来する反射波よりも大きな振幅の残響として検波出力に現れる。この様子を図6に示す。

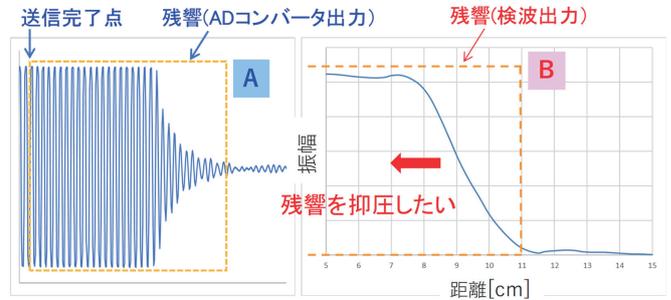


図6 超音波センサにおける残響
Fig.6 Reverberation in ultrasonic sensors

図6の[A]に示すグラフは、超音波センサが二つの正弦波(送信信号)を出力した場合にADコンバータの出力として観測された残響の波形である。残響波の振幅が大きいため、出力開始直後はアンプにおいて信号が飽和し、波形のピーク部が平坦となっているが、時間の経過とともに残響波の振幅が飽和レベルを下回り、次第に収束する。残響は、検波回路の出力部においては[B]のような波形で観測される。グラフ横軸の距離は出力開始時刻からの経過時間から換算している。残響波の振幅が観測される11 cm以下の距離範囲(オレンジ色の点線枠内)においては物標からの反射波が検出できないため、物標の検出および測距が困難である。したがって、より至近距離から物標の検出および測距を可能とするためには、残響を抑圧する必要がある。このため、残響波が確実に打ち消されるよう、センサ個体ごとに振幅と位相が調整された付加信号を送信信号の直後に送出する。この様子を図7に示す。

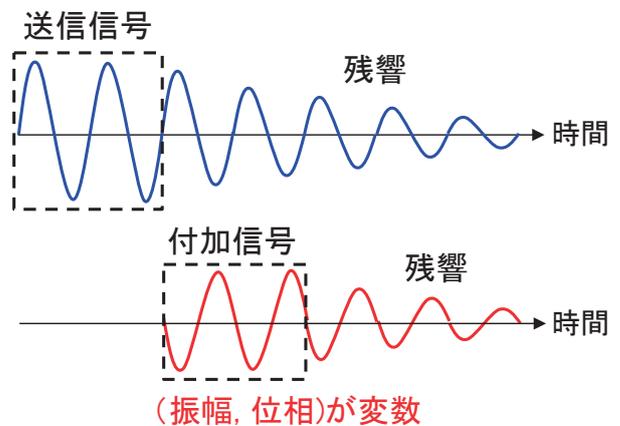


図7 残響を抑圧する付加信号
Fig.7 Additional signal to suppress reverberation

¹⁰ Barker符号: 同期やパルス圧縮などに用いられる自己相関のサイドローブが小さい符号

残響の打ち消し効果を最大化するため、超音波センサを構成するアナログ部品（主としてトランスデューサ）の特性に合わせて付加信号波の振幅および位相を制御する。アナログ部品の特性にはばらつきがあり、また経年劣化や環境温度による変化が生じるため、これらの実態に合わせて制御を行う。

試作した超音波センサ（サンプル）において、付加信号波の振幅と位相を変数とし、その全ての組み合わせによる残響面積（残響の大きさを示す値）を測定した結果を表示した3次元グラフを図8に示す。

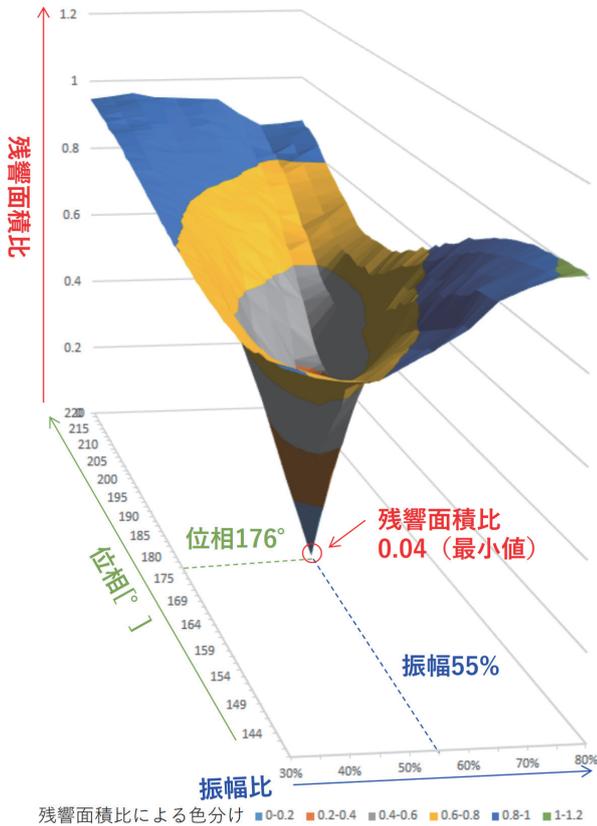


図8 付加信号波の振幅・位相と残響面積

Fig.8 Relationship between “amplitude and phase of the additional signal wave” and reverberation area

グラフの床面の変数は付加信号の振幅と位相であり、高さ方向は残響面積において等高線に相当する。ここで残響面積は図6 [B] に示した検波出力が飽和レベルから大きく減少する領域（図6においては8 ~ 12 cm）を予め決め、その領域の面積を実測して求める。残響面積を測定する領域は、付加信号の振幅と位相が最適化された時に残響面積が0に近づくよう超音波センサの設計時に設定する。ここで「振幅」とは「送信信号の振幅と付加信号の振幅の比」、また「位相」とは「付加信号の遅延時間」を指す。例えば送信信号と付加信号の間に半周期の遅延が生じている場合、位相は180°となる。なお、付加信号がない時の残響面積を1に

正規化しているため、図8に最適点として示される0.04は「付加信号により観測範囲の残響面積が4 %に縮小した」ということを示す。

図8に示す最適点（振幅比55 %、位相176°）は、製造直後の超音波センサのサンプルを室温において使用した場合のもので、最適点は個体間のばらつきにより変化し、またセンサの経年劣化や使用環境の温度変化によっても変化する。このため、センサを自動車へ実装した後、短時間の学習による恒常的な最適値の繰り返し測定が必要となる。図8に示されるデータの全ての組み合わせの変数を取得する測定プロセスは時間を要し、短時間の学習に適さない。当社は、図8に示されるグラフの特性が下向きの円錐形であることから、グラフ上のいずれの点を出発点としても下方へ移動すると必ず最適点へ到達することに着眼し、短時間で最適点を求める手法を開発し、センサへ実装した。なお、これと類似の手法として「最急降下法¹¹⁾」が知られているが、最急降下法と比べ、当社が開発した手法はASICの所要演算能力が小さくて済み、コスト上のメリットを有する。

10秒間の学習を実行して残響が最小となるように付加信号の振幅と位相を最適化し、残響抑圧機能ON時（付加信号付与）とOFF時（付加信号非付与）における残響の差（残響抑圧効果）を測定した。この結果、残響抑圧機能により、測距が可能な最小距離が従来比で約4 cm短縮することを確認した。残響抑圧効果の測定結果を図9に示す。

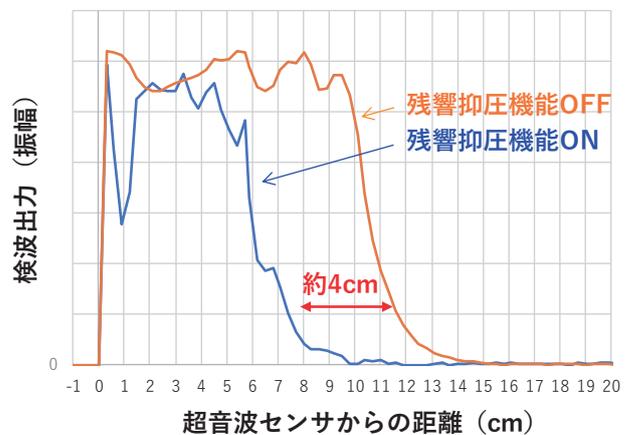


図9 残響抑圧効果の測定結果

Fig.9 Measurement results of reverberation suppression effect

以上の成果を確認するため、測距が可能な最小距離を実験により測定した。この結果を図10に示す。本実験では、SNRの測定において使用した塩化ビニル製のパイプを物標（障害物）に見立てている。本実験により、超音波センサと物標の間の距離がわずか9 cmでも測距が可能であることを確認した。

¹¹⁾ 最急降下法：現在と過去の変数における誤差（本件の場合は残響面積）の傾きを求め誤差を縮小するよう次の変数を更新することを繰り返しながら誤差の最小点（最適点）に変数を収束させる手法

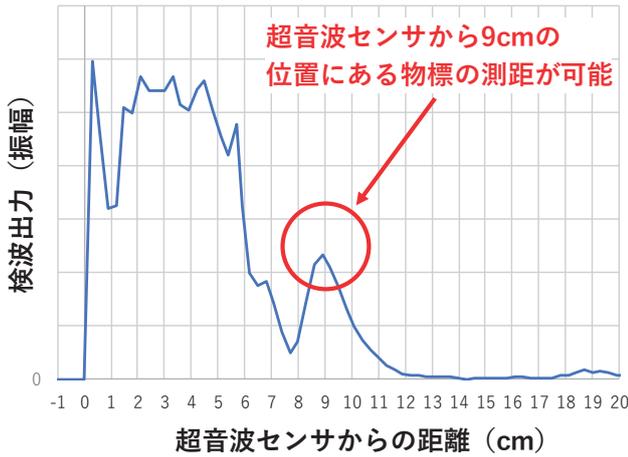


図10 物標測距能力 (測距可能な最短距離) の測定結果
Fig.10 Measurement results of ability to measure distance to object (shortest measurable distance)

3.3. 「より確実」な物標の検出と衝突防止

自動車に搭載する超音波センサは移動しながら障害物を検出し、また検出対象となる障害物も移動する可能性があるため、センサと物標の両者間の相対速度により生じるドップラーシフトについて考慮する必要がある。超音波におけるドップラーシフトの概念を図11に示す。

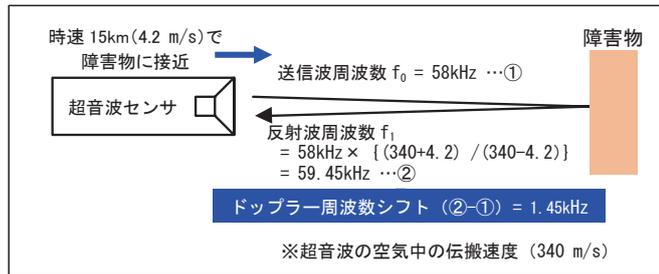


図11 超音波のドップラー周波数シフト
Fig.11 Doppler frequency shift of ultrasonic wave

自動車の低速移動時や駐車時の周辺監視に用いる超音波センサには、障害物との相対速度が時速15 km以下の時に測距が可能であることが求められる。静止した障害物に対し、送信周波数58 kHzの超音波センサが時速15 kmで接近する場合、障害物における反射波の受信周波数は59.45 kHzとなり、1.45 kHzの周波数シフトが生じる。この周波数シフトは送信波数が128波の場合に影響が大きくなり、センサの検波出力低下を招く。ドップラー周波数シフトの影響を受けた超音波センサの検波出力波形を図12に示す。最上段のグラフはドップラー周波数シフトの影響を受けていない(センサ、障害物共に静止している)状態を示し、その他のグラフは各々の図中に示す周波数におけるシフトの影響を受けている状態を示す。

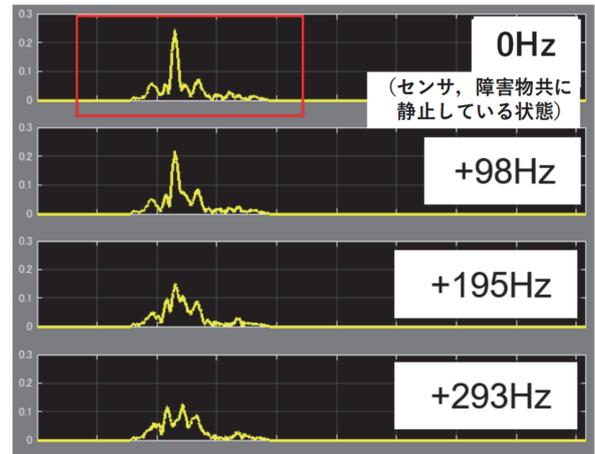


図12 ドップラー周波数シフトの影響を受けた超音波信号の検波出力波形
Fig.12 Detection output waveform of ultrasonic wave signal affected by Doppler frequency shift

相対速度が高まり、ドップラー周波数シフトが+195 Hzおよび+293 Hzになると検波出力信号波形は明瞭なピークを形成せず、設定したしきい値を超えないため障害物を検出することができない。この問題を解決するため、次世代超音波センサにおいては検波回路に32波出力のFFT演算回路を備える。FFT演算により、送信信号の周波数が58 kHzの場合、1出力当たりの周波数分解能は約113 Hzとなり、 $\pm 1.7\text{ kHz}$ の範囲のドップラー周波数シフトに対し57 Hz以下の誤差で検波することが可能となる。

超音波センサ、障害物共に静止している時、FFTの出力信号 f_0 の周波数は0 Hz、また障害物からの反射波が113 Hzのドップラー周波数シフトを伴っている時、FFTの出力信号 f_1 の周波数も0 Hzとなる。ドップラー周波数シフトの大きさが1.45 kHz以下の時、すなわち超音波センサと障害物の相対速度が時速15 km以下である時、図12の最上段のグラフに示される明瞭なピーク波形がFFTから出力される32波の信号のいずれかにおいて得られる。この関係を利用して、FFTが出力するいずれの信号が振幅のピークを形成しているかを観測することにより、反射波が受けているドップラー周波数シフトの値を推測することができ、超音波センサと障害物との相対速度を知ることが可能となる。このことを車載用の超音波センサに応用すれば「障害物が自動車に接近しているか否か」「自動車と障害物との相対速度」を知ることができ、衝突危険回避が可能となる。

次に、2基の超音波センサを用いた同時測距の可能性について述べる。図2に示すように、次世代超音波センサは符号を用いて送信信号を生成し、検波回路で相関処理を行うことにより波数を増やしている。2基のセンサの各々が相互に相関関係が小さい異なる符号を用いることにより、反射信号(受信信号)は自身が送信した信号との相関(自己相関)が強いため、検波出力は設定したしきい値を超え、障害物を検出できるが、他方のセンサが送信した信号との相関(相互相関)は弱いため検波出力は設定したしきい値を超えることがなく、無視できることになる。なお、他方のセンサ

が送信する信号との相互相関を抑えるため、信号の変調方式としてQPSKを採用している。2基の超音波センサによる相互識別の実現性について、相互相関が小さい異なる符号を用いて実験を行った。その結果得られた検波出力波形を図13に示す。

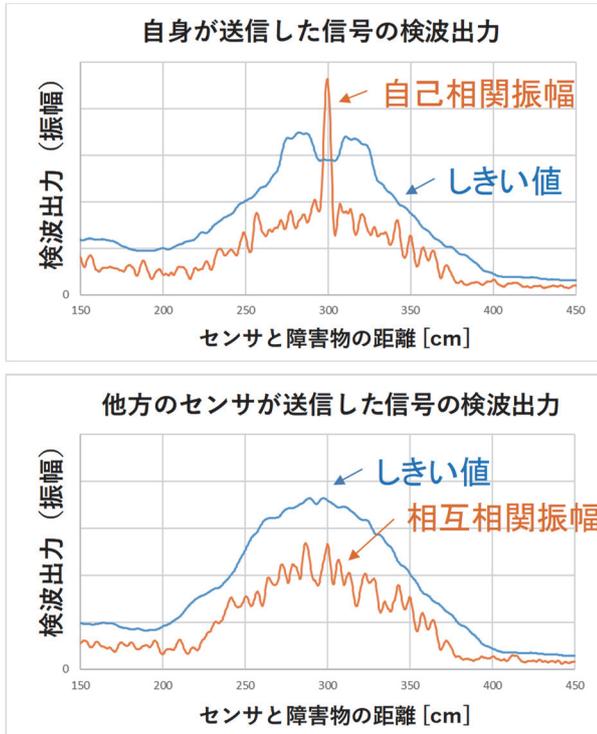


図13 相互相関が小さい異なる符号を2基の超音波センサに適用した時の検波出力

Fig.13 Detection output when different codes with low cross-correlation are applied to two ultrasonic sensors

相関振幅中央のメインローブのみを検出するため、しきい値生成回路としてCFAR回路を使用する。検波出力の変動が緩やかである場合、CFAR回路が自動生成するしきい値は出力波形に従って変化し、他方のセンサが送信した信号の検波出力はしきい値を超えることがない。しかし、自身が送信した信号の検波出力との間には強い自己相関があるため、反射波を受信したタイミングにおいて鋭いピーク（メインローブ）を形成し、しきい値を超えて障害物が確実に検出される。以上の動作原理により、2基の超音波センサから送信された信号は互いに混信することがなく、同時測距が可能となる。

2基の超音波センサを用いた同時測距により、従来のような2基のセンサが交互に測距を行う方法と比べ測距時間が半減し、自動車などの移動体における確実な衝突回避が可能となる。

4. あとがき

当社が開発した次世代超音波センサは、波数を増やしQPSK変調を施すことによるSNR改善によって、既存の超音波センサと比べ「より遠く」の物標（障害物）を高精度で検出することができる。また超音波センサにおける残響を抑圧することにより「より近く」の物標の測位を可能とする。さらに、物標との相対速度を推定することも可能である。これらの特長を有する次世代超音波センサは、「より確実」な衝突防止を実現する。次世代超音波センサを自動車に搭載することにより、従来以上にスムーズな自動駐車や無人の自動バレー駐車が可能となり、また運転操作の人的ミスによる事故の大幅な抑止効果が期待される。今後はトランスデューサの性能を向上させ、複数基の超音波センサが同時に測距を行った場合における各々のセンサの識別能力や他の自動車に搭載された超音波センサとの干渉の抑圧能力を向上させ、付加価値を高めてゆく所存である。

謝辞

今回の技術開発において、ASICおよび超音波センサモジュールの開発にご協力いただいた関係者の皆様に、深く感謝申し上げます。