

自動車の外界認識を目的とした超音波距離測定システムの開発研究*

Development Research on Ultrasound Sensor System aiming at External Recognition of a car

奥雲 正樹**
Masaki OKUGUMO

概要

超音波センサシステム,特に超音波で距離を測定するシステムは安価で比較的高精度な距離測定が可能な利点から自動車の外界センサなど幅広い分野に応用されている。しかし従来のセンサシステムでは,超音波の入射角に対して垂直でない物体の計測や,微小な表面積を持つ物体の計測は困難であり,高精度な駐車支援システムなどへは応用されていないものがほとんどである。本稿では,超音波を単波長放射し,その反射波を周波数解析することにより,従来の超音波センサシステムでは測定不可能である入射角に対し傾いた物体,また微小な表面積を持つ物体の検出および距離測定手法を提案し,従来の距離測定法との比較を含めた基礎的検討を行う。

1. はじめに

超音波センサシステムは,音波の伝播速度の遅さより安価で比較的高精度の距離測定が可能なことから,自動車のバックソナーなど幅広い分野での使用が見込まれている[1]。しかし,自動車の外界センサとして用いられている超音波センサシステムにおいては,センサからの入射波が対象物体に垂直でない場合で,反射波の強度が極めて小さくなるような環境では,反射波がノイズに埋もれてしまい計測が不可能であるといった問題がある[2][3]。自動車の操縦の自動化や,さらに高度な運転補助等に使用するには,こういった問題を解決するために高性能な超音波センサシステムが必要であると考えられる。

こうした自動車のナビゲーション等への応用を目的とした高性能な超音波センサシステムに関しては,これまで多くの研究がなされている。受信波形からノイズに埋もれた反射波を抽出する方法においては,スペクトル拡散を用いた方法[4][5]があるが,拡散符号を挿入した超音波信号を送信する必要があり,送信時間が長くなることにより奥行き方向の分解能が低下するといった問題がある。

本稿では,物体からの反射波形を周波数解析することにより,反射波がノイズに埋もれるような従来のセンサシステムでは測定不可能であるような状況,すなわち入

射角が物体に垂直でない場合の測定を可能にした。また,従来のセンサシステムに対し,超音波の反射強度の非常に小さい微小物体が超音波の入射方向に対し位置しているような場合において,物体の距離を測定可能なシステムを提案する。

2. 従来の超音波センサシステム

現在,一般に用いられている超音波センサシステムは,図1に示すように,バースト状の超音波の放射から,対象物体による反射波を取得するまでの時間を計測し,音速より物体距離を算出するTOF (Time Of Flight) と呼ばれる手法である。

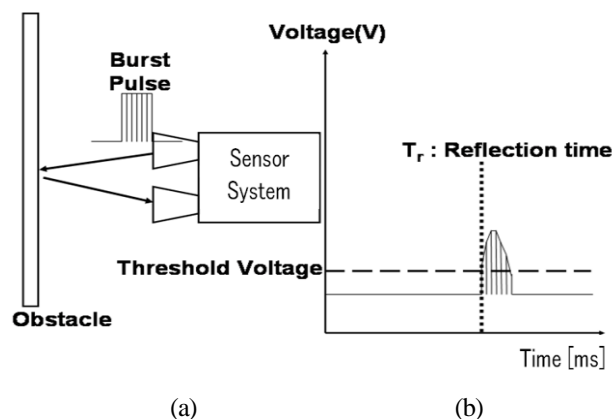


図1 (a)従来の超音波センサシステム
(b)反射波形

* 原稿受理 平成 25 年 1 月 10 日

** 電気情報工学科

この方法は、反射波の振幅と閾値電圧とを比較し、反射波が閾値を超えたときの時間を反射時間とし、これより対象物体までの距離を算出するシステムである。

2.1. 超音波の入射角に対して垂直でない物体の距離測定

円盤状トランスデューサから放射される超音波の音圧 p の伝播は一般に式(1)のように表される。

$$p = \frac{P_o}{r} R(\theta) \exp(-jkr) \quad (1)$$

ここで p_o : 放射音圧, r : トランスデューサからの

距離, $R(\theta)$ は音圧の指向性を示し、式(2)のように表される。

$$R(\theta) = \frac{2J_1(a\sigma \sin \theta)}{a\sigma \sin \theta} \quad (2)$$

ここで J_1 : 第1次ベッセル関数, σ : 音波の波数,

a : 発振子の開口半径, θ : トランスデューサと対象物体との相対角である。

また、対象物体をセンサシステムに対し平行でない無限平面と考えると、平面からの反射波は、図2に示すように鏡像法で考えることができる。

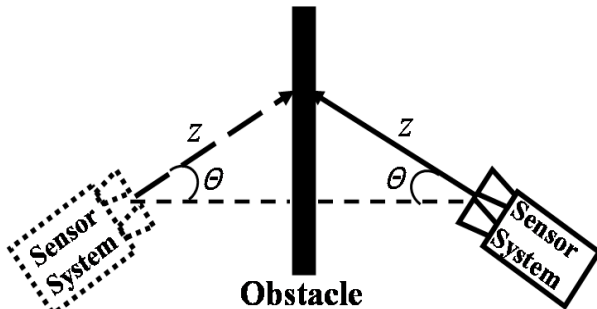


図2 センサシステムに対して傾いている物体からの反射超音波

いま、対象物体の面とセンサシステムの相対角を θ 、対象物体からの距離を z とおくと、反射波はトランスデューサと対象物体の面に対し対称な位置と角度に仮想的に設置されたトランスデューサから放射された音とみなすことができる。よって、鏡像法により仮想的に設置されたトランスデューサから放射される音が実際のトランスデューサまで到達した際の音圧が反射波の音圧とみなされ、式(1)中の r に鏡像と実際のセンサ間の直線距離

$2z \cos \theta$ を代入した次式(3)のように表せる。

$$p = \frac{P_o}{2z \cos \theta} R(\theta) \exp(-jkz) \quad (3)$$

いま、 $\lambda=0.0085\text{m}$, $a=0.01\text{m}$ として $R(\theta)$ が $0^\circ \leq \theta$

$\leq 90^\circ$ の範囲で0となる角度を計算すると $\theta=32^\circ$ となる。よって対象物体との相対角が $0^\circ \leq \theta < 32^\circ$ の範囲内では理論的に反射波の一部は再びトランスデューサに到達するが、 θ が增大するにつれて反射波の音圧は小さくなり約 32° の角度では反射波の音圧は極めて小さくなる。このような場合従来のセンサが用いている反射波の振幅と閾値とを比較して距離測定する手法では、超音波が減衰しても、受信信号は雑音より大きくなければならぬために、 θ が 0° に近い角度でない物体の距離が計測できないといった問題がある。

3. 提案する超音波センサシステム

本稿では、従来のセンサシステムでは困難とされているセンサからの入射波が対象物体に垂直でない場合の物体の検出が可能であり、また超音波の入射方向に対し微小な間隔で並んでいるような複数対象物体の測定が可能な超音波センサシステムを提案する。これらの機能を実現するために、図3に示すように周波数40kHzのサイン波状の超音波を1波長分(50 μsec)という非常に短時間出力するような特徴的な超音波を放射する。この周波数40kHzの超音波の出力時間は、超音波の入射方向に対して微小な間隔で並んでいる複数の対象物体を、約1.7cmという精度で検出・測定を可能にするためである。

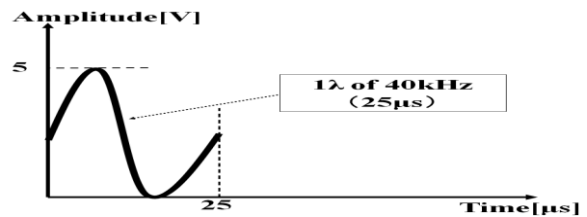


図3 提案する超音波センサシステムからの放射超音波

3.1. ハードウェア構成

提案した超音波センサシステムのハードウェア構成を図4に示す。超音波の送信には高周波スピーカ (Fostex FT-17H), 受信には音声用マイクロフォン (Shure Betagreen PHM903) を使用した。またシステムの制御には日立製1チップマイコン H8_3048F(以下 H8 と記述) を使用している。H8 内蔵の RAM には送信超音波波形がデ

デジタルデータで記録されている。システムの動作を以下に示す。

(i) H8 に記憶されている波形データを元に D/A 変換し送信超音波を生成し増幅した後、スピーカより出力する。

(ii) 反射波をマイクروفオンにより受信し、増幅した後 A/D 変換器により 200kHz のサンプリング周波数で約 10msec (2048 サンプル) の時間 RAM に格納する。

(iii) RAM に蓄えられている反射波形を USB 経由でホスト PC に転送する。

(iv) ホスト PC において信号処理を行い、対象物体の距離の算出を行う。

今回、H8 の制御プログラムには、アセンブラ、ホスト PC の処理プログラムには Visual C++ を使用した。

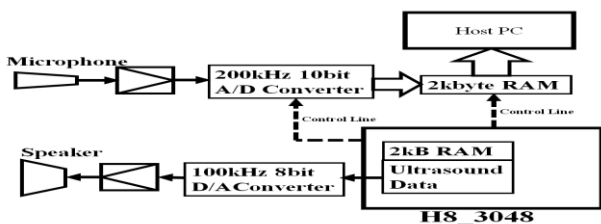


図4 ハードウェア構成

3.2. 反射波の周波数解析処理

ここでは、反射波を提案手法により周波数解析することにより微小時間当たりの周波数変動を計測する手法を提案する。これにより、周波数 40kHz, 1 波長という極めてエネルギーの小さい放射超音波により、反射波がノイズに埋もれてしまっているような場合においても反射時間の検出が可能となる。提案する超音波センサシステムでは、サンプリングされた反射波形に含まれる 1 波長の 40kHz 超音波の反射時間を、図 5 に示すような短時間 FFT を用いた手法において算出する。

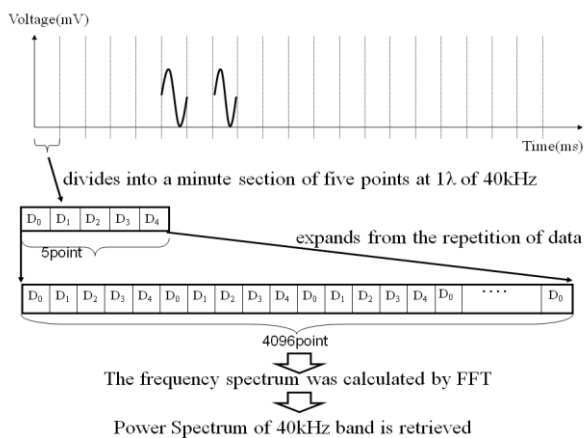


図5 反射波の周波数解析処理

FFT には周波数分解能と時間分解能が相反するという問題がある。そこで、次に示すような処理方法を提案することにより限られたサンプリング数の受信波形において高い周波数分解能と時間分解能を両立させる周波数処理手法を提案する。以下に、処理手法の実行手順を示す。

(i) 10msec 間サンプリングされた 2048 サンプルの受信波形に対し、40kHz 超音波の 1 波長分に相当する時間である 5 サンプルごとの微小区間に分割する。

(ii) 分割した微小区間毎に順番に、その微小区間に含まれる 5 サンプルのサンプリングデータ列を繰り返し並べることにより 4096 サンプルのデータ列を作成する。こうして得られた 4096 サンプルのデータ列に対しハニング窓で処理した後に FFT 処理を行なう。このデータ増長処理により FFT 処理後の周波数分解能が 40kHz から約 25Hz へと高まる、これにより 1 波長の 40kHz 超音波成分の検出精度が向上する。

(iii) それぞれの微小区間ごとの周波数スペクトルから 40kHz のスペクトル強度を抽出する。抽出した 40kHz のスペクトル強度を微小区間毎に比較してゆく。比較結果より、大きなスペクトル強度を持つ微小区間の時間軸上の位置より、送信した周波数 40kHz, 放射時間 1 波長の超音波の反射時間を算出する。この反射時間より対象物体の距離を算出する。

例として幅 0.26m, 高さ 0.30m の平板をセンサ前方に距離 1.00m, 角度 30 度で設置した場合の反射波形を図 6 に示す。

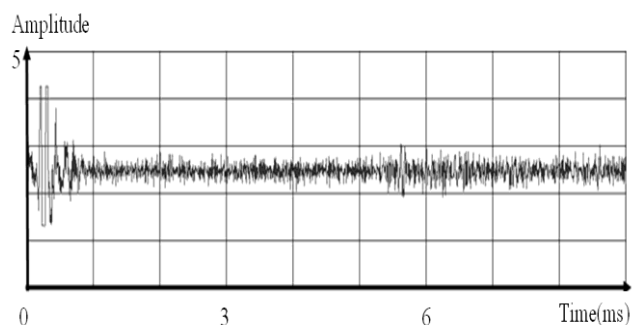


図6 傾いた物体からの反射波

図 6 中において物体からの反射波は 5.6ms 付近に観測されるが、センサからの入射波が対象物体に垂直でない場合の物体からの反射波は極めて微弱になるため、反射波がノイズに埋もれてしまい従来のセンサでは距離測定が難しい。

次に図 6 の反射波形を提案手法で処理した結果を図 7 に示す。

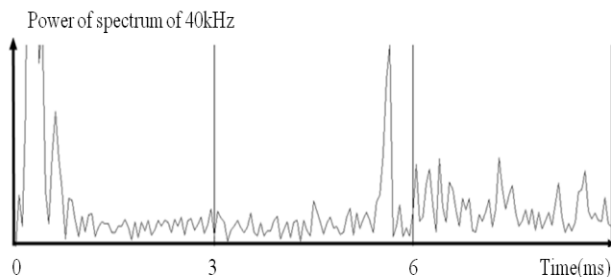


図7 提案手法による処理結果

縦軸は反射波に含まれる40kHzの周波数のスペクトル強度、横軸は反射時間である。同様に、物体からの反射波は5.6ms付近に観測されるが、対象物体の距離に対応する反射時間に40kHzのスペクトル強度が顕著に現れている。提案手法によりノイズに埋もれている40kHz、1波長の反射波を計測できていることがわかる。なお、図6および図7中においてサンプリング開始から1ms後までの大きなピークは、スピーカからマイクへ直接回りこんでくる超音波である。物体距離算出の際にはこの1msまでのデータは計算から除外している。

4. 実測による検証

4.1. 入射角が対象物体に垂直でない場合の距離計測

従来のシステムでは困難とされていた、入射角が対象物体に垂直でない場合の物体の検出能力を検証した、図8に実験概要を示す。

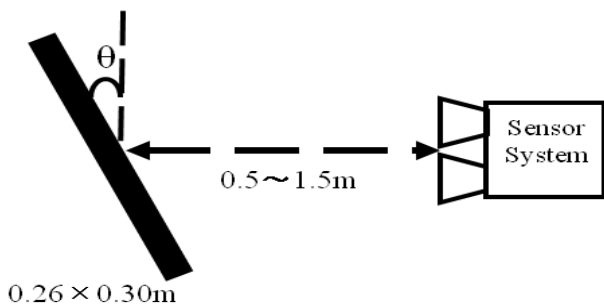


図8 傾いた物体の距離測定

実験は幅0.26m、高さ0.30mの平板をセンサとの距離が0.5~1.5mの間で6段階に変化させ、各距離において平板とセンサの入射波との角度を変化させ、反射波の電圧と閾値電圧の比較で反射時間を計測する従来法と、周波数解析を用いる提案法とで、距離が取得できる最大の角度を計測した。閾値はノイズを含むサンプリングデータの平均値を計算し、その平均値の2倍の電圧を閾値と設定した。また同実験において、各測定距離で物体の角

度を1°単位で増加させてゆき、その角度で10回測定を行い、10回全てで物体からの反射波ピークが閾値を上回った場合において“測定可能”とした。実験結果を図9に示す。◆：従来法における最大角、■：提案法における最大角を示している、また破線は各手法における近似曲線である。

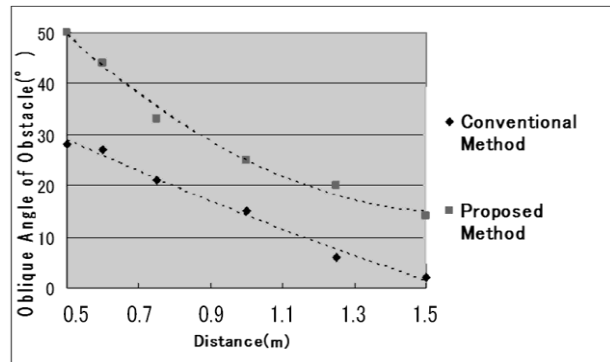


図9 実験結果

結果より、0.5~1.5mの全距離において提案手法は従来法より20度大きく傾いている物体まで認識可能なることがわかる。

4.2. 微小物体な物体における距離計測

微小な物体の距離計測実験を行い結果を検証した。図10に示すように直径0.01m長さ0.3mといった表面積の微小である金属性の支柱を、センサシステムの前0.1mから1.0mまで0.05m刻みで移動させ、物体距離を従来のセンサと提案センサとで測定した。

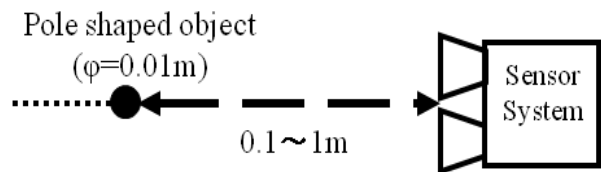


図10 実験概要

実験結果を図11に示す。閾値はノイズを含むサンプリングデータの平均値を計算し、その平均値の2倍の電圧を閾値と設定した。またそれぞれの測定距離で5回測定を行い5回全てにおいて距離測定が可能であった場合において、測定距離の平均をプロットしている。図中の■が提案手法での測定結果、●が従来法での測定距離を示す。このような物体の距離測定では、対象物体からの反射波が非常に小さいために、従来のセンサシステムでは0.2m以上の距離では測定が不可能である。一方提案手法では、ノイズに埋もれている反射波形を抽出できるため、

センサ前方の距離 0.8m の範囲内で、ほぼ正確に距離測定が可能であることがわかる。

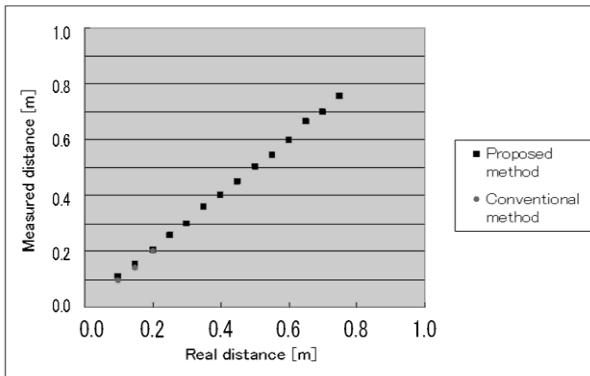


図 11 比較結果

4.3. 物体角の検出を想定した距離計測

図 12 に示すようにセンサシステムを、壁に対し 0.40m の距離を保ち平行移動させ、曲がり角の手前 0.15m から、曲がり角の先端とセンサとの距離が 0.27m になるような一定の旋回角で移動し、再び壁に対し 0.40m の距離となるように移動させる。この過程において、センサシステムが 0.01m 移動する毎に距離測定を行い、従来法と提案手法とで算出した距離値をグラフにプロットした。

実験結果を図 13 に示す。図中の■が提案手法での測定結果、●が従来法での測定結果、破線は実際の壁の位置を示す。従来法では、旋回開始時はセンサと壁との角度が垂直に近いために距離値を取得できているが、旋回が進みセンサと壁との角度が直角から傾いていくにつれ反射波の強度も小さくなるために、曲がり角の先端付近では距離測定が不可能であった。一方提案手法では、反射波の強度がノイズより小さくなるような状況においても反射波の抽出が可能のため、従来のセンサでは測定不能であった曲がり角の先端付近を含め全域で距離測定が可能であるという結果を得た。

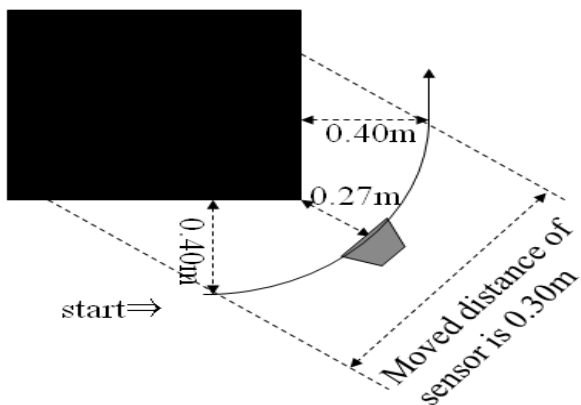


図 12 実験概要 (角からの距離 0.27m)

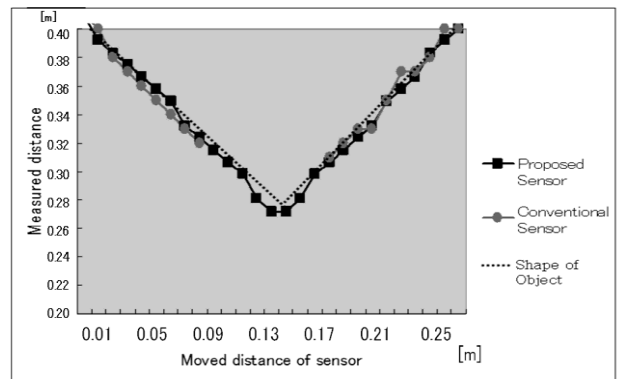


図 13 比較結果 (角からの距離 0/27m)

5. おわりに

本稿は、自動車の自動縦列駐車システムなどへ応用が可能な超音波センサシステムの開発を目標とし、一般の超音波センサシステムの問題点である超音波の入射角に対して傾いている物体の検出、および微小な表面積を持つ複数の物体の距離を計測する手法を提案した。実環境での実験において、従来の超音波センサシステムでは不可能であった傾きの物体に対して距離の測定が可能であることを確認した。今後の展望として、センサシステムの送受信機をアレイ状に拡張し、フェーズドアレイ技術と合わせることで表面形状の認識精度の向上、そして放射周波数をチャープ波とし幅広い周波数帯域において対象物の情報を取得し、その情報を自己組織化マップ (SOM) と合わせることで対象物の輪郭のリアルタイム計測などへの発展を考えている。

参考文献

- [1] 谷腰欣司, "超音波とその使い方," 日刊工業新聞社, 1994.
- [2] 江丸貴紀, 土谷武士, "スライディングモードを利用したセンサ情報に対する平滑化および微分値推定法," 日本機械学会論文集, Vol.52, No.66, pp.3947-3954, 2000.
- [3] 江丸貴紀, 土谷武士, "スライディングモードシステムを用いた超音波センサの混信回避," 日本機械学会論文集, Vol.667, No.68, pp.862-869, 2002.
- [4] 佐々木健, "空中超音波の反射波スペクトル解析による非接触形状計測," 日本造船学会論文集, Vol.195, pp.87-93, 2004.
- [5] 佐々木健, "超音波の反射波スペクトラム解析による反射面形状の識別," マイクロメカトロニクス, Vol.48, No.1, pp.41-47, 2004.