

音響映像による物体認識の一手法

大木 誠・山崎 貴史・大北 正昭
鳥取大学工学部電気電子工学科

A Method of Object Recognition by Acoustic Imaging Makoto OHKI, Takashi YAMASAKI and Masaaki OHKITA

Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering,
Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan
E-mail: mohkita@ele.tottori-u.ac.jp

Abstract: An autonomous mobile robot uses many kind of sensors to detect obstacles and recognize the environment. As such sensors, CCD cameras, ultrasonic sensors, laser pointers are usually used. We have developed an object recognition using ultrasonic sensors as one of the environmental recognition in an autonomous mobile robot. In the previous study, we proposed a method that utilizes phase information and beamforming. However, in such a method, an object is not clearly recognized, because the real reflected point is not always located on the sensor's line-of-sight. In this paper, we propose a new method considering the inclination of reflection as one of the beamforming. The inclination of reflection is calculated from the difference of the propagation time.

Key words: Autonomous mobile robot, ultrasonic sensor, phase information, beamforming, inclination of reflection.

1. はじめに

現在、我々は、屋内環境を走行する自律移動ロボットの研究を行っている。このような走行ロボットが自律的に走行するには、前方に存在する人や荷物などの物体を認識する必要がある。このような屋内環境での物体認識の手法としては、画像処理による手法、超音波やレーザー等を用いた距離計測を行う手法等がある。カメラ画像を用いた画像処理の手法では、光源の影響を受けやすく、レーザーを用いた場合は、構造が複雑で大型化してしまうなどの問題点がある。しかし超音波センサにおいては、他のセンサと比べて小型、軽量、構造が単純で、光の影響を受けないなどの特徴を持つ。そこで我々は、超音波を用いた物体認識の手法について検討する。超音波を用いた手法には、ホログラフィの原理[1][2]を応用した手法や、直交関数による変調波を用いる手法[3]が提案されている。しかし、これらの手法では、アレイ状に配置された多数のセンサが必要となり、そのため解析時間が増大し、自律移動ロボットの環境認識には不向きである。屋内走行を前提とした自律移動ロボットの環境認識には、障害物の細かな形状についての情報よりも、障害物の大まかな形状、その障害

物までの距離などの情報が重要であると考えられる。そこで、比較的少ない送波子ならびに受波子を一次元的に配置し、簡易なセンサ・アレイから得られた観測波形に指向性形成を用い、物体認識を行う手法について検討してきた。しかしながら、以前用いていた指向性形成では虚像の分別が不完全であった。本報告では、できるだけ解析時間を短縮するために、以下に述べるアルゴリズムに基づき領域を限定する。また、その限定された範囲内で像強度を求め、さらに求めた像強度の中から虚像を取り除くために、対象物体の傾きを考慮し、像再生を行う方法について検討する。

2. 音響映像アルゴリズムの原理

本論文で提案する音響波を用いた物体認識の手法は、一次元的に複数の送波子および受波子からなるセンサ・アレイを構成する。その送波子から音響波を照射し、物体点で散乱・反射したのち、受波子において観測された波から得られる位相ならびに距離情報を用いる。その情報から解析領域を限定して解析時間を短縮し、像強度を求め、その求めた像強度の中から虚像を取り除く。ここではその原理について述べる。

2. 1 センサアレイの構成

音響波を用いた環境認識の手法としては、送・受波子を一对として取り扱う相関[4][5]を用いた手法などがある。この手法を用いた場合、送・受波子一对で一つのデータとして扱うため、センサ正面付近の物体しか認識できず、広範囲の物体認識が不可能である。そのため自律移動ロボットへ搭載するには、多数のセンサが必要となる。そこで我々は、複数の送・受波子からなるセンサ・アレイを構成し、各受波子で受信した複数のデータを用いて解析することにより物体認識を行う。図1にセンサ・アレイの構成を示す。一次元方向に送・受波子を配置してセンサ・アレイを構成し、送波子から発射した音響波が物体で散乱・反射し、受波子で観測される。この観測された位相情報に基づいて、以下のアルゴリズムを用いることにより物体認識を行う。

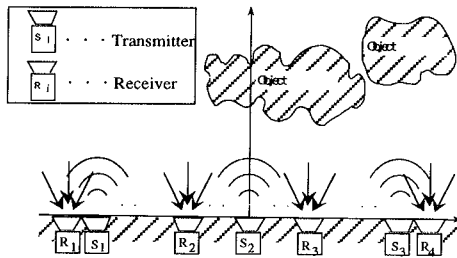


図1 センサ・アレイの配置

2. 2 無物体領域の限定

ある送波子 $S_i = (s_i, 0)$ から発射された音響波は、物体点 $P = (p_x, p_y)$ で散乱・反射され、受波子 $R_j = (r_j, 0)$ へと伝搬する。このとき、各受波子で観測された波形の立ち上がり時刻を測定することにより、伝搬距離 L_{ij} を求めることができる。

$$L_{ij} = \sqrt{(s_i - p_x)^2 + p_y^2} + \sqrt{(r_j - p_x)^2 + p_y^2} \quad (1)$$

このとき、観測された波形の立ち上がり時刻以前に音響波が伝搬していることはないので、この伝搬距離よりも近い位置に物体は存在しない。そこで、各送・受波子の組み合わせにおいて、それぞれ式(2)の楕円で表された曲線の内側には物体がないと考えられる。

$$\frac{\left(x - \frac{s_i + r_j}{2}\right)^2}{\left(\frac{L_{ij}}{2}\right)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{L_{ij}}{2}\right)^2 - \left(\frac{s_i - r_j}{2}\right)^2} = 1 \quad (2)$$

この領域を無物体領域と呼ぶことにする。今後、この領域については物体が存在しないものとして、解析する領域を限定する。図2にその概要を示す。

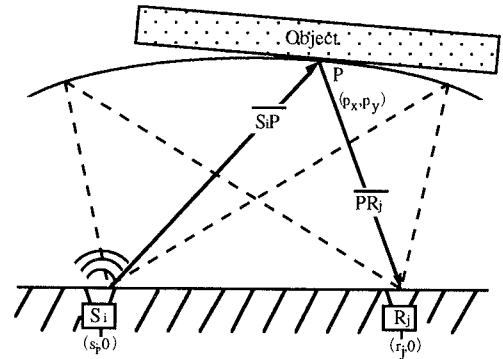


図2 無物体領域の限定

2. 3 解析方向の限定

無物体領域の外側で、解析方向を限定する。これにより必要な像候補点のみ計算すればよいので、像強度の計算時間を短縮できる。

図3で示すように、同一 θ 方向に存在する像候補点の像強度を重ね合わせる。重ね合わせた像強度が比較的強い θ 方向のみ物体認識を行う。このように解析すべき物体方向の限定を行うことにより、計算する像候補点を減らすことができる。ここで、像強度の計算には、ある送波子に対する各受波子の絶対的な位相差を考慮する。受波子 R_j で観測した音響波が物体候補点 P において反射されたものなら、仮想的に R_j から点 P を経由して送波子 S_i に逆伝搬させたときの位相 $(-\phi_{ij} + \omega L_{ij}/c)$ は、 $2n\pi$ ($n \in \mathbb{N}$) に近づく。これより同一 θ 方向に存在する像強度の重ね合わせを次式のように定義する。

$$\alpha_\theta = \sum_{i,j, L_{ij}} \frac{1 + \cos(\omega L_{ij}(L_{OP}, \theta) / 2 - \phi_{ij})}{2} \quad (3)$$

ここで ϕ_{ij} は位相定数、 c は音速である。分子の項に1を加えてあるのは、像強度 α_θ が整数になるようにするためである。また $(-\phi_{ij} + \omega L_{ij}/c)$ が $2n\pi$ のとき像強度は最大値をとる。伝搬距離 L_{ij} は式(4)を用いて次式のように表すことができる。ここで L_{OP} は、図3に示すように、原点と物体候補点 P の間の距離である。

$$L_{ij}(L_{OP}, \theta) = \sqrt{s_i^2 - 2s_i L_{OP} \cos \theta + L_{OP}^2} + \sqrt{r_j^2 - 2r_j L_{OP} \cos \theta + L_{OP}^2} \quad (4)$$

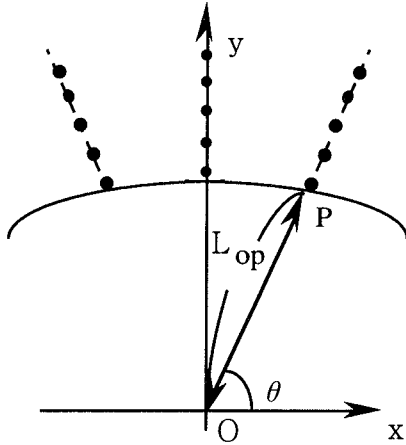


図3 解析方向の限定

2.4 有限長バースト波による解析領域の限定

本論文では、送波子から射出する音響波にバースト波を用いる。このバースト波の照射時間を考慮することにより、対象とする解析領域を限定することができる。受波子 R_j のあるサンプル時刻において観測された音響波は、送波子 S_i の射出時にはバースト波の先頭から末尾のいずれかの時刻において発射されたものである。したがってその時刻にサンプルされた音響波は、帯状の有限領域内のいずれかで反射されたことになり、解析すべき領域を限定することができる。図4にその概要を示す。

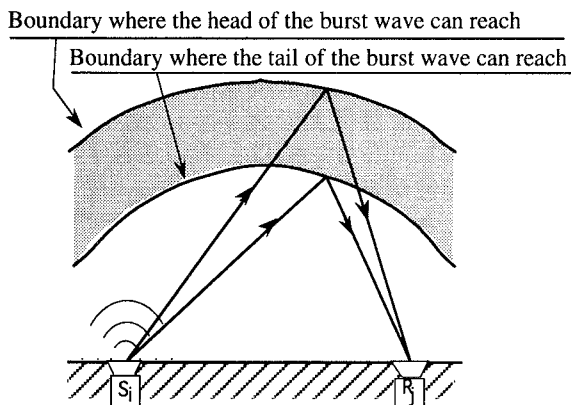


図4 有限長バースト波による解析領域の限定

図4の太線で挟まれた領域毎に像強度を求め、各々の結果を重ね合わせることで、領域全体の像強度

が求まる。各サンプル時刻での解析領域の幅は、バースト波の射出時間によって決まる。

2.5 受信波の位相に基づく像強度

受波子で観測された波形からは、距離情報と各時刻での位相情報が得られる。この位相情報を用いて、2.2, 2.3, 2.4で限定した範囲内で、それぞれの像候補点の像強度を求める。ここでは、各受波子で観測した波形の相対的な位相のみに着目する。通常、音響波を用いている場合には、空気中を伝搬することによる減衰についても考慮する必要があるが、本手法では波の振幅情報を用いないで位相情報に着目して像強度を求める。空気中の伝搬による減衰は無視するものとする。送波子 S_i から照射され、物体点Pで散乱し、受波子 R_j で観測された音響波を次式のように表す。

$$\xi_{ij}(t) = \sin(\omega t + \phi_{ij}) \quad (5)$$

ここで ϕ_{ij} は位相定数である。このような波形を S_i から像候補点Pを経由して R_j まで仮想的に逆伝搬させたときの S_i での波形を次式のように表すものとする。

$$\xi'_{ij}(t) = \sin\left(\omega t - \phi_{ij} + \frac{\omega}{c} L_{ij}\right) \quad (6)$$

ここで c は音速である。各受波子からの逆伝搬波形は、 S_i で合成される。この合成波の振幅強度は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \beta_i(P) &= \int_T \left(\sum_j \xi'_{ij}(t) \right)^2 dt \\ &= \int_T \sum_{j,k} \sin\left(\omega t - \phi_{ij} + \frac{\omega}{c} L_{ij}\right) \sin\left(\omega t - \phi_{ik} + \frac{\omega}{c} L_{ik}\right) dt \\ &= \frac{T}{2} \sum_{j,k} \cos\left(\phi_{ij} - \phi_{ik} - \frac{\omega}{c} L_{ij} + \frac{\omega}{c} L_{ik}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで T は音響波の周期 $2\pi/\omega$ である。受波子 R_j で観測された波形のある時刻で、位相差 ϕ_{ij} が強められた場合、位相に基づく像強度 β_i は大となる。また逆に位相差 ϕ_{ij} が弱められた場合、 β_i は小となる。物体点Pについて位相に着目した像強度を次式で定義する。

$$\eta(P) = \sum_i \beta_i(t) \quad (8)$$

2. 6 対象物体の傾きを考慮した物体候補の限定

受信された波形において振幅が比較的強く観測された点は、壁面において鏡面反射された物、またはその位置に近い点で反射された物として考えられる。このことより、観測された各波形から基準となる壁面の傾きを想定して各像候補点ごとの傾きと比較し、像強度を求める。

2. 6. 1 観測された波形からの傾き

まず、各受波子で観測された波形の振幅が強く現れている点の伝搬距離を L_{ij} とする。そのうちの二つの伝搬距離 L_{ij} 、 L_{ik} と送波子の座標 $S_i = (s_i, 0)$ 、受波子の座標 $R_j = (r_j, 0)$ 、 $R_k = (r_k, 0)$ から(9)式のような鏡面反射における壁面の傾き A が得られる。これらの傾きの平均を取り、それを基準の壁面の傾き A_s と定義する。

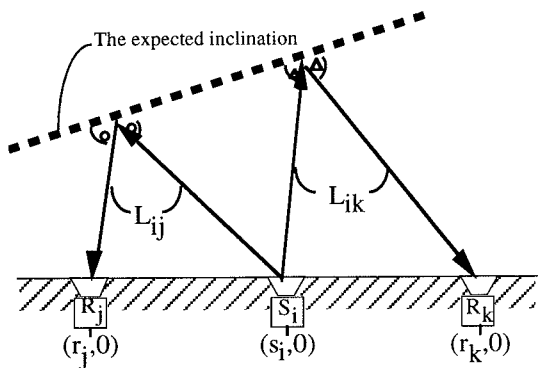


図5 観測波形からの傾き

$$A = \frac{L_{ij}^2 - L_{ik}^2 - r_j^2 + r_k^2}{2(r_k - r_j)} - s_i}{\sqrt{L_{ij}^2 - \left(\frac{L_{ij}^2 - L_{ik}^2 - r_j^2 + r_k^2}{2(r_k - r_j)} - r_j \right)^2}} \quad (9)$$

2. 6. 2 像候補点における傾き

次に図6に示されるように、像候補点 P で鏡面反射したときの傾きを送波子の座標、受波子の座標から式(10)のように求めることができる。

$$A_{ij} = \frac{P_y (\overline{S_i P} - \overline{P R_j})}{\overline{S_i P} (p_x - r_j) - \overline{P R_j} (p_y - s_i)} \quad (10)$$

このとき、像候補点における傾きと基準となる傾きの差から次式のように壁面の傾きによる像強度を定義する。

$$\gamma = \sum_i \sum_j e^{-|A_s - A_{ij}|} \quad (11)$$

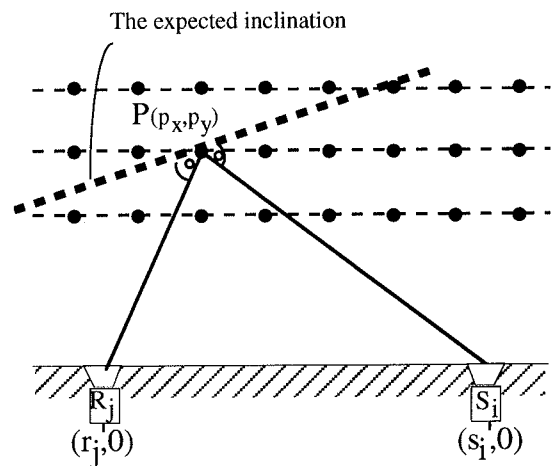


図6 像候補点における傾き

3. シミュレーションによる検証

3. 1 シミュレーションの概要

前章で述べた音響映像アルゴリズムの有効性を検証するため、計算機上でシミュレーションを行った。シミュレーションでは、ある送波子から発射された音響波がある物体点で散乱し、受波子まで伝搬したときの伝搬距離から、受波子での音響波の位相を計算することによって、得られた値を受波子において得られる位相情報とする。図7にシミュレーションの流れを示す。

対象となる空間（解析領域の範囲内）において像候補点を格子状に設定し、各像候補点について上記の位相情報を用いてこれまで述べた像強度の計算を行う。その概要を図8に示す。

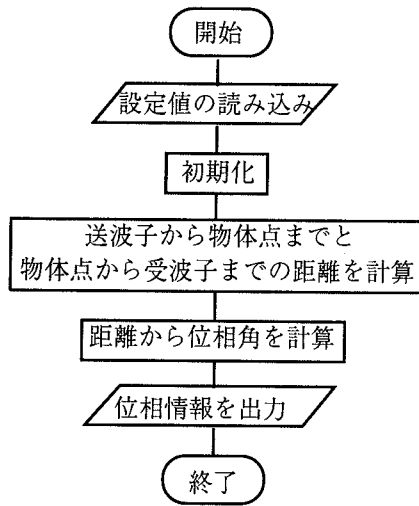


図7 シミュレーションプログラムの流れ

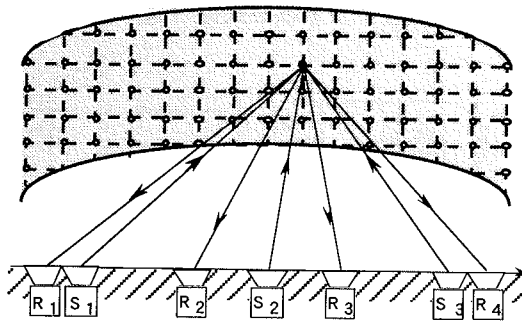
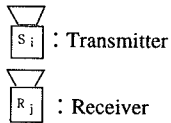


図8 格子状に配置した像候補点の概要図

3.2 シミュレーションの条件

今回行ったシミュレーションの条件を以下に示す。

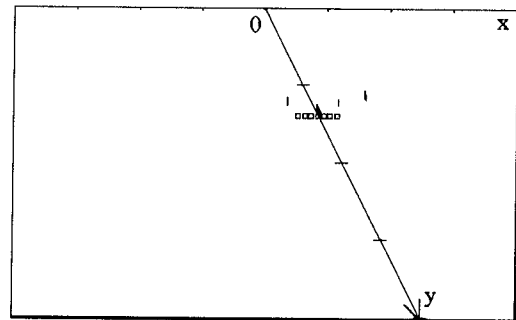
- ・3個の送波子と4個の受波子を一次元状に配置したセンサ・アレイを用いる。
- ・送波子間隔：0.204[m]，受波子間隔：0.102[m]
- ・対象物体は，点物体を連続的に配置して大きさを持った物体として模擬する。（幅35cm）
- ・対象空間は二次元空間とする。
- ・対象物体に対して周波数40kHzの音響波を照射し，反射された波が受波子に取り込まれるものとする。

- ・送波子から射出された音響波は，点物体Pで散乱し，受波子まで伝搬する．このときの伝搬距離から受波子での音響波の位相を計算し，この値を受波子において得られる位相情報とする。
- ・空間伝搬による減衰は考えない物とする。
- ・対象となる物体点の反射係数は1とする。

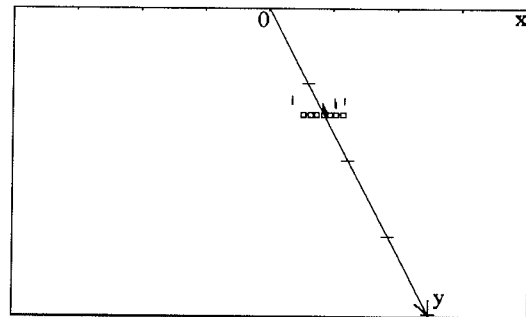
上記の条件によりシミュレーションを通じて，像強度の分布ならびに物体位置を変化させたときの像強度の変化について検討する．物体位置を表す座標の単位は[m]である。

3.3 シミュレーションの結果

ここでは，音響映像アルゴリズムの有効性を検証するためにシミュレーションを行い，得られた位相情報をもとに解析した結果を示す．今回提案した対象物体の傾きを考慮した物体候補の限定の有効性を調べるために，以前の指向性形成による結果[6]と今回提案した手法の結果を以下に示す。

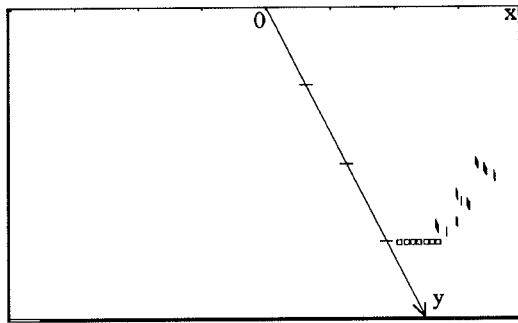


(a) 指向性形成

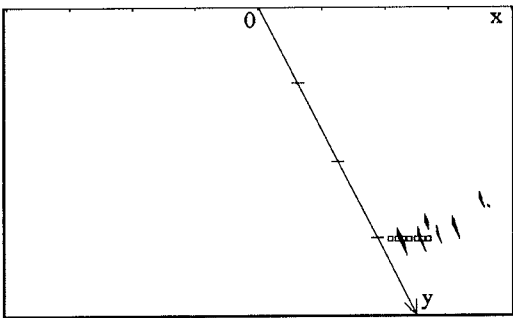


(b) 本手法

図9 対象物体の中心座標が(0.00m, 0.70m)のときの像強度

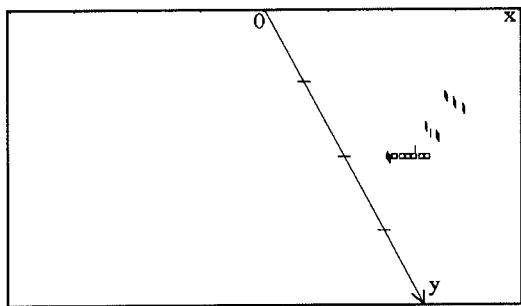


(a) 指向性形成

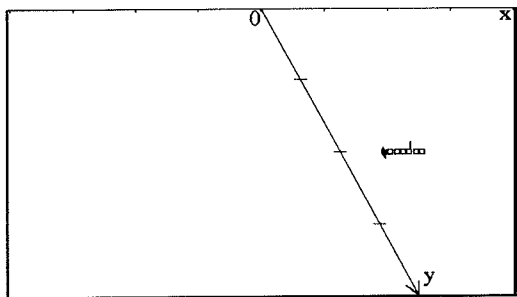


(b) 本手法

図10 対象物体の中心座標が中心 (0.25m, 1.50m) のときの像強度



(a) 指向性形成



(b) 本手法

図11 対象物体の中心座標が中心 (0.50m, 1.00m) のときの像強度

4. 音響映像再生実験

4.1 実験の概要

ここでは、アルゴリズムの有効性を検証するために計算機上で位相情報をシミュレーションし、これまで述べたアルゴリズムを用いて解析した。さらに、実際に音響データ収集装置を用いて測定実験を行い、得られた位相情報をもとに解析を行った。以下にその概要を示す。

4.2 音響データ収集装置の作製

自律移動ロボットによる屋内環境での物体認識においては、物体の細かな形状よりも大まかな物体の位置を短時間で認識することが重要である。そこで、このような物体認識を行うために小型で高速に位相情報を収集できる装置を作製した。

作製したデータ収集装置は、3つの送波子と4つの受波子を持ち、アナログ回路部、タイミング回路部、インターフェースおよびA/D変換部からなる。図12に音響データ収集装置の構成図を示す。

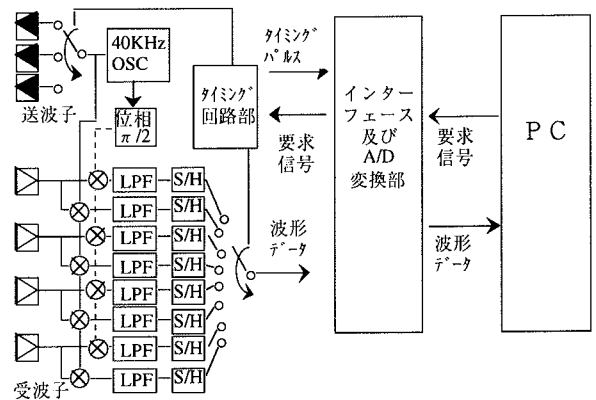


図12 音響データ収集装置の構成図

・アナログ回路部

4個の受波子から取り込まれる信号は、演算増幅器で構成される2段の反転増幅器によって増幅され、超音波を照射した波と、 $\pi/2$ 位相をずらした波とでそれぞれ掛け合わされる。これにより、各受波子で取り込んだ音響波データを複素成分に変換する。変換したデータをサンプル・ホールドし、順次A/D変換部へデータを渡す。

・ タイミング回路部

5.76MHzのXtal発振器から分周して得られた180kHzの周波数を得て、A/Dコンバータの出力要求パルス（タイミングパルス）を生成。またインターフェース部からの照射開始パルスによって各送波子の切り換えおよび、照射する音響波のサンプル開始時刻と照射時間をカウントする。

・ インターフェースおよびA/D変換部

インターフェース部では、パソコンからの要求信号の送受信とアナログ回路部から送られてきた信号をA/D変換部に送り、複素成分に変換された受信データをパソコンに取り込むためにA/D変換を行う。

4. 3 実験の条件

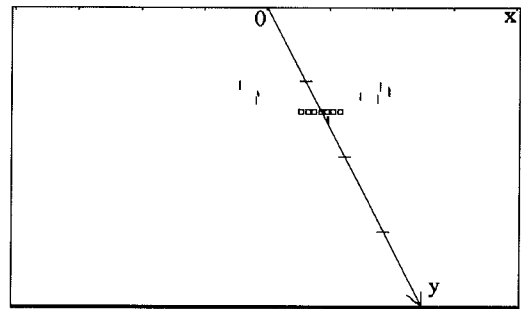
今回行った測定実験の条件を以下に示す。

- ・ 3個の送波子と4個の受波子を1次元上に配置したセンサ・アレイを用いる。
- ・ 送波子間隔：0.204[m]，受波子間隔：0.102[m]
- ・ 対象物体は、幅35cmの物体を実際に位置する。
- ・ 対象空間は2次元とする。
- ・ 対象物体に対して周波数40kHzの音響波を照射し、反射された波が受波子に取り込まれるものとする。

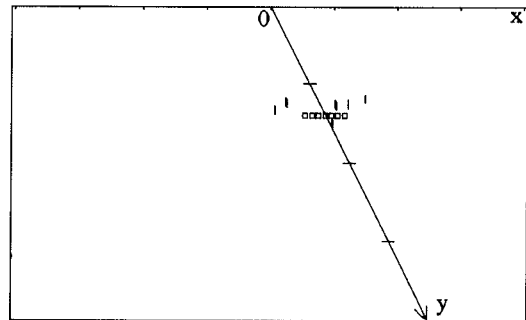
上記の条件により実際に測定を行い、像強度の分布ならびに物体位置を変化させたときの像強度の変化について検討する。

4. 4 実験の結果

ここでは、実際に音響データ収集装置を用いて得られた位相情報をもとに解析した結果を示す。本手法の有効性を検討するために、以前の指向性形成による結果と今回提案した手法の結果を以下に示す。

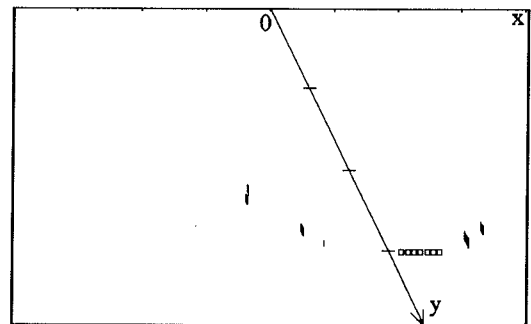


(a) 指向性形成

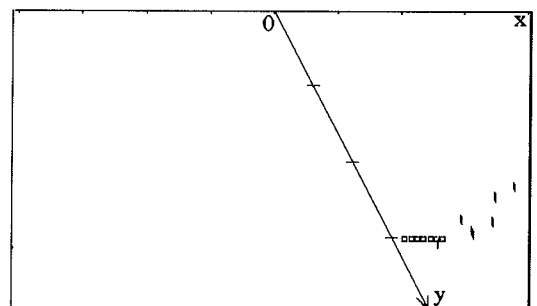


(b) 本手法

図13 対象物体の中心座標が中心 (0.00m, 0.70m) のときの像強度

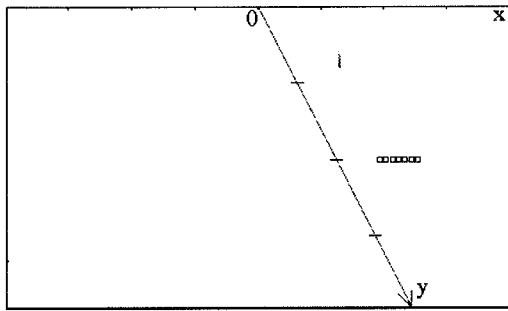


(a) 指向性形成

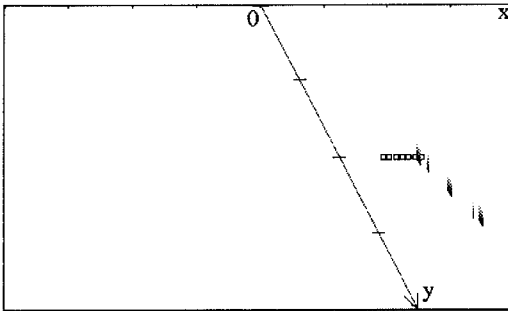


(b) 本手法

図14 対象物体の中心座標が中心 (0.25m, 1.50m) のときの像強度



(a) 指向性形成



(b) 本手法

図15 対象物体の中心座標が中心 (0.50m, 1.00m) のときの像強度

5. 検討

シミュレーションおよび実験の両方の結果で、センサの正面に物体を配置した場合(図9, 図13)において、以前の指向性形成を用いた手法より像強度のピークが各物体点付近に現れており、その物体の位置がほぼ特定できる。

しかしながら、実験の場合において、以前の手法よりは物体の付近に像強度が現れているが、対象物体の位置がy軸上から離れるにつれ(図14, 図15)、像強度が横方向に広く現れているのが分かる。これは超音波センサの指向性が60度ぐらいで音響波が必ずしも球面波になっておらず、横方向の分解能が弱くなっているためと思われる。

また物体点の中心が(0.50, 1.00)の場合において、シミュレーション(図11)で使用している音響波を球面波としているため良好な結果を得られ

ているが、実測実験(図15)において、対象物体の傾きを考慮した物体候補の限定以前のアルゴリズムで対象物体がうまく限定されていないものの、本手法以後では対象物体の方向が良好に求められているのが分かる。

6. おわりに

我々は、自律移動ロボットの視覚センサの一つとして、超音波を用いた物体認識について研究してきた。

本論文では、自律移動ロボットの走行に必要な物体認識の手法として、少ない送・受波子を一次的に配置し、送波子から発射された音響波が物体において散乱・反射されて受波子まで伝搬するときに観測された音響波から得られた位相情報および、音響波の鏡面反射性を考慮した像強度について検討した。またこの有効性を検証するために、シミュレーションおよび、実際に測定装置を用いて、実時間での物体認識を行った。

今後の課題として、実際に自律移動ロボットに搭載するため解析時間の短縮、複数の位相情報に基づく像強度のデータと対象物体の傾きを考慮した像強度のデータの統合手法について検討を行う事などがあげられる。

参考文献

- [1]永井啓之亮：超音波ホログラフィー開口合成による映像，日刊工業新聞社，1989。
- [2]青木由直：波動信号処理，森北出版，1986。
- [3]田村，石原，伊藤，石井，久本，湯浅：Walsh関数変調波を用いた3次元音響ホログラフィ撮像水中3次元撮像システムの開発，計測自動制御学会論文集vol.31,no.7,pp.824-833,1995。
- [4]丹沢勉，渡邊貴文，清弘智明，森英雄：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，vol.15,no.4,pp.542-549,1997。
- [5]丹沢勉，渡邊貴文，清弘智明：相関を用いた超音波センサの高速演算手法，日本ロボット学会誌，vol.15,no.8,pp.1134-1138,1997。
- [6]小引裕司：音響映像による物体認識の一手法，平成9年度鳥取大学大学院工学研究修士論文。

(受理 平成11年9月30日)