

コウモリの反響定位をモデルとする環境認識方式

佐々木 忠之* 伊福部 達** 彭 辰**

*国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所

**北海道大学応用電気研究所

本報告では、コウモリの反響定位をモデルとした、移動する自立型ロボットや重度障害者用移動機器の視覚のための環境認識方式を提案する。この方式では、コウモリを模擬することにより2個の超音波受波器のみで、複数の物体の位置を認識することができ、CCDカメラなどの光学機器を利用した画像処理方式による視覚に比較してトランスデューサが小型で、かつ処理するデータの量も少ないことから、システムの小型化が可能であるとともに認識時間も短縮できる。

実験では、標的として4本の円柱を広く範囲に置いた場合について、本方式で物体位置の認識を行った。その結果、4本の円柱の位置が認識でき、移動用の視覚として有効であることが分かった。

A RECOGNITION METHOD OF SURROUNDING MODELED AFTER ECHOLOCATING BATS

Tadayuki SASAKI, Tohru IFUKUBE and Chen Peng

*Research Institute, National Rehabilitation Center for the Disabled,
4-1 Namiki, Tokorozawa, Saitama, 359, Japan

**Research Institute of Applied Electricity, Hokkaido University)
N12-W6, Kita-ku, Sapporo, 060, Japan

We propose a recognition method of surrounding modeled after echolocating bats as a vision system for self-sufficient mobile robot and transfer aids for heavy disabled. In this method, the vision system can recognize multi obstacles using only two ultrasonic receivers. Comparing this method with optical method using CCD camera, it make the vision system to be small. And the system can recognize fast.

We experiment on recognition of surrounding in which four poles are set as obstacles. As a result, our vision system can recognize positions of four poles approximately.

1. はじめに

自立型ロボットや重度障害者用移動装置では、移動する必要から、障害物の回避や通路の発見などが簡単にできるように環境を大まかに把握する機能が要求される。こうした機能は、視覚における周辺視に相当するもので、広い範囲をできるだけ簡単に認識できるようにすることが重要な課題になっている。現在、この種の研究の多くは、CCDカメラなどの光学機器を利用した画像処理方式を中心としたものになっている。しかし、画像処理方式では扱う情報量が多く、その処理も複雑になっているため、装置が大規模になり、自立ロボットなど小型・軽量であることが要求される機器への応用は難しいのが現状である。

一方、超音波によるイメージングは、医用の超音波断層法が実用化されているが、この方法を空中超音波にも適用するには、

- 1) 水中に比べて超音波ビームのサイドローブが大きい。
- 2) 空気中での音速が小さいことと、広い範囲を対象とする用途が多いため、スキヤニングに時間がかかる。

などの問題があるため難しい。

しかし、超音波による「視覚」は、コウモリが非常に優れた超音波の「視覚」を持つ動物としてよく知られるように、高機能の視覚を実現できる可能性を持っている。

筆者らは、これまでに超音波式盲人歩行補助器への応用を目的として、コウモリの反響定位機構とそれをヒトの聴覚に応用する方法について、生体工学的観点から調べてきた。その結果、

- 1) 複数の障害物が存在する場合や比較的広い空間を認識する、周辺視的な機能には超音波トランスデューサの指向性が広い方が有利である。
- 2) 物体検出の感度は、使用する超音波受波素子の応答速度が速いほど高くなる。
- 3) 反響定位の能力は超音波定位音の性質に大きく影響される。

などのことが分かった。(1, 2, 3, 4)

本報告では、2個の超音波受波器のみで環境

にある物体の位置を認識可能な、コウモリの反響定位をモデルとする環境認識方式を提案し、この方式に基づいて複数物体の位置情報を同時にコンピュータに認識させた結果について述べる。(5)

2. 障害物認識の原理

2.1 コウモリの反響定位

Fig.1に見られるように、ほとんどのコウモリが発する超音波定位音には、周波数が低い方に変化する下降FM成分が含まれる。動物行動学での報告によれば、この下降FM成分は、反響定位を行う上で重要な役割を持つと考えられている。(7, 8, 9, 10, 11)

J.A.Simmons は、コウモリが何等かの方法で標的からの反射波と自ら発した定位音との相互相関関数の包絡を求め、この包絡の極大値の位置から標的の位置を検出しているという仮説を提案している。(9, 10) この仮説によれば、コウモリの定位音は、パルス・レーダにおけるチャープ信号同様、時間(距離)分解能を高くする役割を持っていると思われる。さらに、大脳の聴覚野には、特定の遅延時間の反響音に対して選択的に感度がよいニューロンが存在することが知られており、遅れ時間を正確に計測する機構があると考えられる。(12, 13)

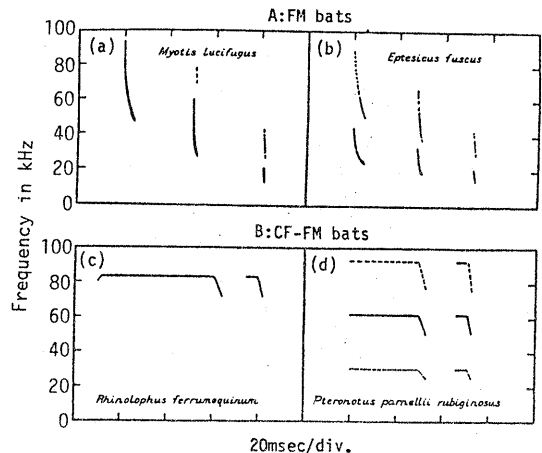


Fig.1 Sonagram of four bats' echolocating sounds.

このように、コウモリの反響定位機構はチャープ・レーダのシステムによく似た機構を持っているが、コウモリが1回の定位で広い空間を認識できるのに対して、チャープ・レーダでは、標的との距離しか測定できないため、空間を広く測定するためにはスキャニングを行う必要がある点が大きく異なっている。広く複数の標的が存在する場合、2つのセンサだけで、超音波の反響から、それぞれの標的位置を数学的に解析することは困難である。しかし、コウモリは、ヒトの聴覚においても見られるように、複数の反響音をいくつかの条件で分類し、整理することによって左右の耳からの反響音を対応させ、これから標的の空間分布を求めていると思われる。

2.2 物体位置の計算

Fig.2に示したような、点A, Bに超音波受波器が、点Pに物体がある状況を考える。ABの中点をOとして、 $\angle POB = \theta$ 、 $OA = OB = d$ 、 $OP = r$ とする。このとき、点Pにある物体からの反射波をP'A, P'Bの平面波で近似することにより、点Pから点A, Bまでの行路差は、

$$\lambda = 2d \cdot \cos \theta \quad (1)$$

となり、反射波が2つの超音波受波器に到達する時間が分かれば、簡単に物体の位置が計算できる。

反射波を平面波で近似することによって生じる誤差は、 $\Delta \lambda / \lambda$ で評価できる。ここで、

$$\Delta \lambda = 2d \cdot \cos \theta - (\overline{PA} - \overline{PB})$$

であるから、 $d/r \ll 1$ のとき

$$\Delta \lambda / \lambda \approx (1 - \cos^2 \theta) d^2 / r^2$$

となり、 $d/r \ll 1$ の条件では十分に平面波で近似できることが分かる。

従って、2つの超音波受波器間の反射波の到達時間差と音速が分かれば、(1)式より反射波の方向が分かる。さらに、発射した超音波パルスが戻って来るまでの時間から、障害物までの

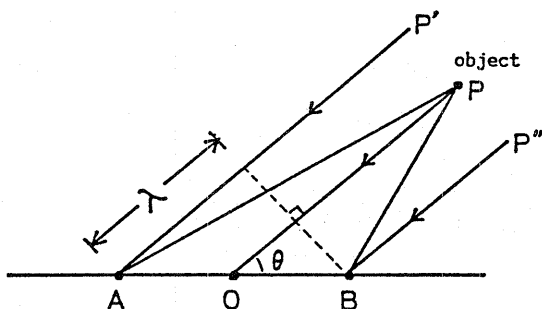


Fig.2 The geometrical positions of ultrasonic receivers A, B and object P.

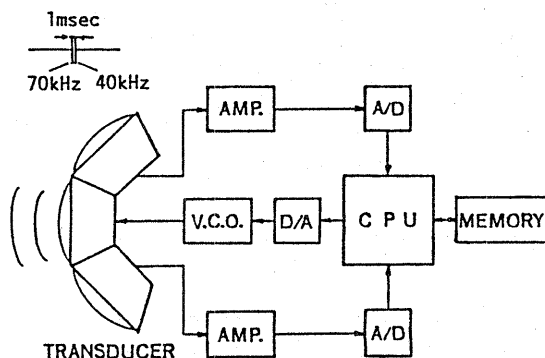


Fig.3 Block diagram of experimental system.

距離が分かる。これらにより、障害物の位置を求めることができる。

3. 実験装置

実験装置の概要をFig.3に示す。超音波の送受波器には、環境認識に有利なPVDF高分子圧電膜製の広帯域、広指向性(Fig.4)の超音波トランスデューサを用いた。トランスデューサは、送受波兼用でほぼ同じ特性になっており、Fig.5に示すように送波器の両側に受波器を配置した。

超音波受波器は有限の大きさを持っているので、Fig.2のように点で近似するためには、近似の正当性を確かめると共に、点で近似したときの受波器間の実効距離を測定する必要がある。Fig.6は、音速が347.3m/secの環境で、ある方向に超音波の音源を置き、受波器間の到達時間

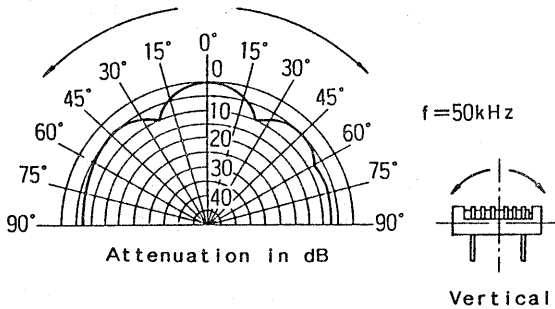
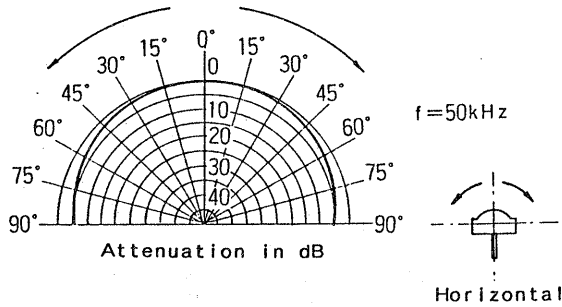


Fig.4 Horizontal and vertical directivity of ultrasonic transducer.

差を測定した結果で、縦軸は右側の受波器からみた到達時間の遅れ、横軸は音源を置いた方向を示す。測定の結果、超音波受波器間の実効距離を30.0mmとしたとき、受波器は十分に点で近似できることが分かった。

実験は、以下の手順で行った。

- 1) 超音波送波器素子から、コウモリの定位音を模擬した、幅が1msecで周波数が約70kHzから40kHzに変化するFM超音波パルスを発射する。
- 2) 物体からの反射波を2チャンネルの超音波受波器で受け、 $2.0\mu\text{sec}$ 間隔で8192点A/D変換して半導体メモリに書き込む。
- 3) 反射波と発射波の相互相関関数を作り、パルスの圧縮を行う。
- 4) 得られた相互相関関数の包絡線を求める。
- 5) 包絡線の極大値を求め、これから反射波の到達時間を求める。

こうして得られた反射波の到達時間から物体の位置を計算し、CRTに表示した。今回の実験では、超音波送波器を中心とした半径約3mの半円に囲まれる領域にある物体を対象にした。

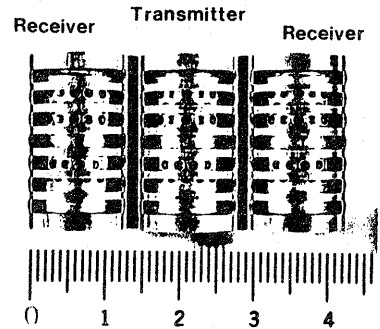


Fig.5 Photograph of the ultrasonic transducers.

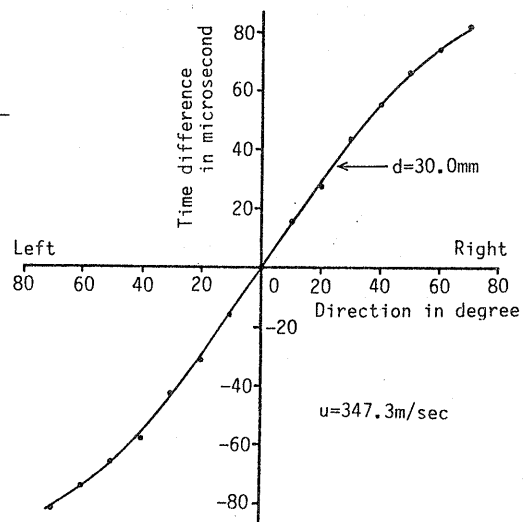


Fig.6 Arrival time difference between right and left receivers as a function of direction.

4. 結果と考察

標的として4本の円柱を置いた場合について、本方式で認識を行った結果を示す。円柱には、 $\phi 50\text{mm} \times 720\text{mm}$ 紙製(a)、 $\phi 30\text{mm} \times 700\text{mm}$ アクリル製(b,d)、 $\phi 5\text{mm} \times 700\text{mm}$ アクリル製(c)を使用した。Fig.7は反射波の原波形、Fig.8は発射波との相互相関関数をそれぞれ示している。図では、時刻を比較するために、左右の受波器の波形を交互に表示した。

Fig.9は、Fig.8の結果から求めた反射波の到達時間から標的の位置を計算し、表示したものである。Fig.9の×印は実際に標的(a,b,c,d)

を置いた位置を、●印は計算機が認識した標的の位置を示す。また、●印の大きさは反射波の強さに比例している。

今回の実験では、Fig.8の相互相関関数から反射波の遅延時間を求める方法として、相互相関関数の包絡線を求め、包絡線が極大値になる時刻までの時間を遅延時間とする方法をとった。しかし、この方法では、包絡線の山が平になっている場合には極大値として最初に傾きがゼロになる点を探るため、Fig.9にみられるように、実際の位置と認識した位置に差が生じることがある。

今回の実験は、標的が全て静止している状態で行ったが、実用的場面では標的が相対的に運動していることが多い。従って、標的の相対運動によって生じるドップラー効果の影響についても考察する必要がある。簡単な例として、1次元軸上を超音波送受波器に向かって速度 v で運動する標的を考える。音速を u とすると、標的に向かって発射された周波数 $\nu(t)$ の超音波定位音は、ドップラー効果によって周波数がおおよそ $\nu \cdot v / u$ だけ高い方にシフトして反射されてくる。従って、反射波と定位音の相互相関関数から標的までの距離を求めようとする、実際の位置より遠い位置になってしまう。

本実験装置では、 $u = 347\text{m/sec}$ としたとき、ドップラー効果による距離の誤差は、標的の速度が $40\text{km/h}(11.1\text{m/sec})$ では約 1.4cm 、 $100\text{km/h}(27.8\text{m/sec})$ でも約 3.5cm である。しかし、この程度の誤差は、実用上はあまり問題にはならないと思われる。

5. おわりに

コウモリの反響定位をモデルとして、2個の超音波受波器のみで、環境にある物体の位置の認識を試みた。その結果、複数の標的が存在する場合でも、それぞれの位置が認識でき、周辺視覚として有効であることが分かった。

今後は、極大値を求める処理を改善して認識精度を高めると共に、より複雑な環境の認識をする上で、聴覚で行っている処理をどの程度採

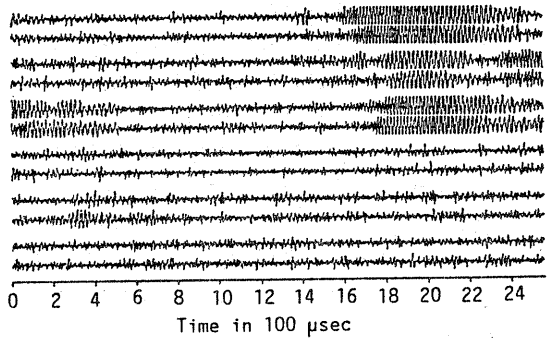


Fig.7 Waveforms of reflected ultrasound.

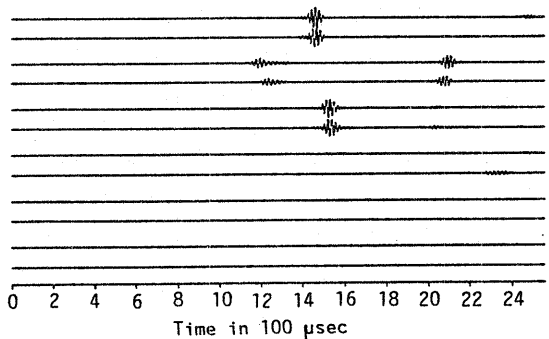


Fig.8 Waveforms of crosscorrelation function between reflected ultrasound and orientational ultrasound.

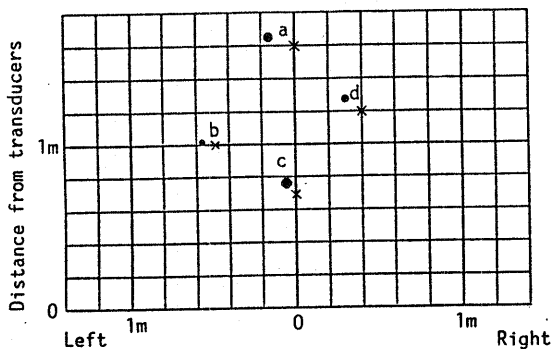


Fig.9 Recognized positions of obstacles.

り入れて行く必要があるかについて検討していく。

本研究を進めるに当たって有益なご助言を下された松下電子部品株式会社小西周平氏、大和田勝正氏に深謝します。

参考文献

- 1) 佐々木, 伊福部, "反響定位に有利な超音波定位音に関する検討," 第11回感覚代行シンポジウム講論集, pp41-44 (1985)
- 2) 佐々木, 伊福部, "反響定位における定位音の心理物理的解析," 音講論集, pp315-316 (1986,10)
- 3) 佐々木, 伊福部, "超音波による複数障害物の認識," 第12回感覚代行シンポジウム講論集, pp43-46 (1986)
- 4) 佐々木, 伊福部, "コウモリの反響定位をモデルとする障害物認知方式," 音響学会聴覚研資, H-87-7 (1987)
- 5) 佐々木, "超音波を利用した盲人用歩行補助器," 日本音響学会誌, 13, pp344-348 (1987)
- 6) 佐々木, 小西, 伊福部, "コウモリの反響定位を基礎とした超音波イメージング法の検討," 第4回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp325-328 (1986)
- 7) R.G.Busnel(ed.), *Animal Sonar Systems* (Plenum Press, New York, (1980)
- 8) 下沢, "レーダを用いる動物," 精密機会, 47, pp1088-1095 (1981)
- 9) J.A.Simmons and J.A.Verrnon, "Echolocation: Discrimination of targets by the bat, *Eptesicus fuscus*," *J.Exp.Zool.* 176 pp315-328 (1971)
- 10) J.A.Simmons, "The resolution of target range by echolocating bats," *J.Acoust. Soc.Am.* 54, pp157-173 (1973)
- 11) J.A.Simmons and R.A.Stein, "Acoustic imaging in bat sonar: echolocation signals and the evolution of echolocation," *J.Comp.Physiol.* 135, pp61-83 (1980)
- 12) W.A.Wimsatt(ed.), *Biology of bats: vol.2* (Academic Press, New York, 1970)
- 13) 菅, "脳における聴覚情報の表示," *自然* 5, pp26-41 (1979)