

超音波による移動物体識別のための基礎研究

水野 歩*・茂木 良平

A Study for Detecting a Moving Object by Using Ultrasound

Ayumu MIZUNO* and Ryouhei MOTEGI

(2005年11月30日受理)

We will develop devices to detect a moving object for visual impairment and blindness. So we have studied the basic behavior of ultrasound wave transmitted against and reflected from a moving object. First a pendulum was made as a moving object. Then we did an experiment in which ultrasound was irradiated against an object and reflection from it was received and recorded. The frequency of reflection wave was analyzed and Doppler shift in that frequency was confirmed.

1. 緒言

1.1 背景

視覚障害者の歩行に対する補助は点字ブロックや案内板点字などがあるが、点字ブロック上に障害物が存在したり、点字案内板の設置場所が分からないなどの問題がある。特に屋外では点字ブロックすら無いことが多く、視覚障害者の単独歩行は困難を伴う¹⁾。そのために白杖や盲導犬などの歩行補助具が存在するが、これらから入手できる情報は限られている²⁾。そこで、白杖や盲導犬からでは入手が困難な情報に対して、視覚障害者自身が環境に対して積極的に働きかけ、情報を入手するための様々なエレクトロニクスを活用した歩行補助具が開発された。それらの中で、国内ではソニックガイドやモーワットセンサ等が使用されている^{3,4)}。ソニックガイドは顔の高さに垂れ下がる木の枝や横から飛び出している看板等の検知に有効とされ、モーワットセンサは一時的に物を探したり、ゲートを探すのに有効とされている。これらのセンサは静止物体の検知に有効であると考えられる。一方、運動物体を識別するための研究として、コウモリのエコーロケーションを模擬したものがあるが⁵⁾、現状ではまだ研究例は少ない。本研究はこのような事情を考慮し、視覚障害者が移動物体を識別する際に有効な方法を見出すための基本的検討を行う。

1.2 研究内容

本研究は、視覚障害者のための視覚代行機器として、周辺に存在する障害物認知を支援する装置の開発を行う。その第一段階として移動物体に超音波を照射した際の受信波形を分析し、移動物体の識別や移動速度を解析するための基礎データの収集を行なう。まず基礎データ収集のために移動物体として振り子を製作した。そして、振り子に超音波を照射し、その反射超音波のドップラー効果による周波数シフト量であるドップラーシフトを可聴領域で確認することを目標とした。現在までに振り子のドップラーシフトを観測し、その反射波を周波数変換装置を用いて可聴領域に変換し、実際に耳で聞いてみる実験までを行なったので報告する。

2. 実験方法

実験装置の概要を図2.1に示す。超音波センサを振り子が運動する直線上の延長に設置し、センサの高さを反射体の位置に合わせた。また、振り子が鉛直となっている時はセンサと反射体との距離は約1.5mとした。実験は2つに大別される。一つはドップラーシフトを測定する実験、もう一つは受信した超音波を可聴領域に変換して観測する実験である。また、ドップラーシフトの測定は、二通りの速度で行った。図2.1はドップラーシフトを測定する際のもので、超音波を可聴領域に変換する場合は超音波送受信器と同じ位置に周波数変換装置を設置した。

* 秋田高専専攻科学生

まず、振り子の平均速度1.4m/sでのドップラースhiftの測定は反射体が30×30×280mm アルミアングルの場合と反射体であるアルミアングルに100×100×280mmのプラスチック板アングルの場合の二通り測定した。

次に、ドップラースhift量を観測していることを裏付けるために、平均速度を0.93m/sに変えた場合にシフト量がそれに対応して変化していることを確認する実験を試みた。反射体を100×100×280mmのプラスチックアングルとし、超音波センサの先端に長さ30mm、開口24mmのホーンを取り付けて測定した。

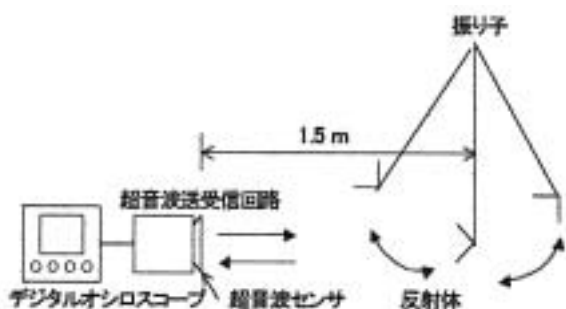


図2.1 実験装置の概要

また、図2.1に示す超音波送受信回路と同位置に周波数変換装置を設置し、反射体からの反射超音波を周波数変換装置を用いて可聴領域に変換し超音波のシフト量を実際に耳で聞いてみる実験をした。

3. 実験装置

3.1 振り子

製作した振り子の全体図を図3.1に示す。振り子を支える骨格部分は市販の鉄パイプを組み立てたものである。寸法は幅1m、奥行き2.8m、高さ1.4mである。

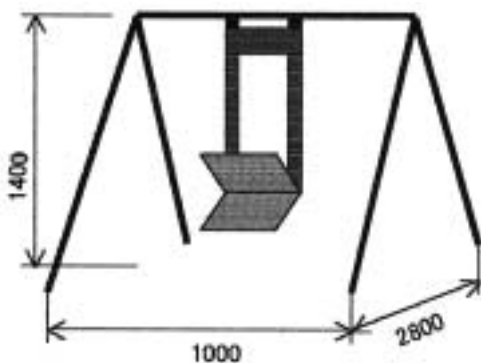


図3.1 振り子全体図

3.1.1 振り子の仕様

次節に記す超音波送受信センサの帯域幅が約1kHzであることを考慮し、反射超音波のドップラースhift F_d が±0.5kHz以内におさまるように振り子の最高速度を2m/s以内にした。ドップラースhiftは次式によって表される⁶⁾。

$$F_d = \frac{2V \cos \theta}{C} F_0 \quad (3.1)$$

ここで、 F_0 は超音波送信機から送信される超音波の周波数である。また、 V は反射ターゲットの移動速度で超音波センサに向かって来る方向を正とし、遠ざかっていく方向を負とする。 C は空気中の音速である。 θ は超音波ビームの方向と反射体の運動方向とのなす角であるが、今回はセンサを反射体の正面に配置したため、ほぼ0として差し支えない。

ここで、 C を15℃の音速である340m/sとする。また、超音波送受信センサの中心周波数が約40kHzなので F_0 は40kHzとする。式(3.1)より振り子最大速度が2m/sの場合のドップラースhift量を求める。

$$\therefore F_d \approx 0.47 [kHz]$$

表3.1 振り子の仕様

周期	2[S]
振り子長さ	1[m]
平均速度	1.4[m/s]
振り幅	±45[°]

以上より、振り子最大速度が2m/s以内であればドップラースhift量は±0.5kHz以内となる。よって振り子の平均速度を1.4m/sと決定した。これより、振り子の仕様を表3.1のように決定した。

3.1.2 振り子の製作

3.1.1で決定された仕様に基づき、振り子の製作を行なった。反射板をアルミアングルのコーナーリフレクタとした。これにより、図3.2に示すように振り子の振り幅が±45°以内であれば、反射波は超音波送受信器方向に反射し、測定が可能となる。アングルは30×30×280mmのものを使用した。

図3.3に製作した振り子形状を示す。図の③部分が反射体のコーナーリフレクタである。②部分は30×30mmアルミアングルである。また、①部分は加工の容易さと重量の軽さから木材を使用した。振り子上部にフックを装着し、骨組の梁に吊るした。支

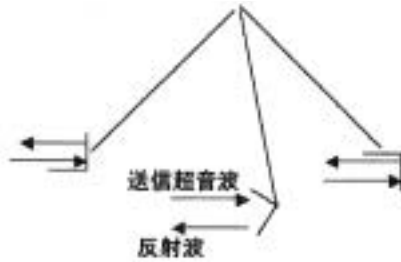


図3.2 コーナーリフレクタ

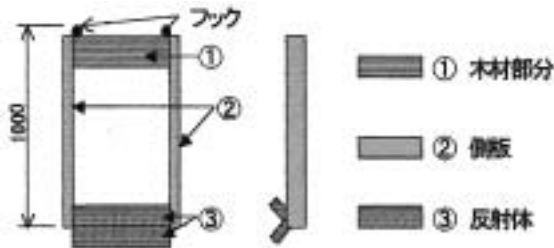


図3.3 振り子形状

点であるフックから反射体までの距離は1mとした。
 また、持続する振動を得るためにモータとクランクを使用した強制振動とし、振り子の支点に近い部分に連結した。これによりクランク装置のモータに加える電圧を変化させることで振り子の速度を変化させることも可能となった。

3.1.3 反射体の改良

反射体として30×30×280mm アルミアングルを使用しているが、この反射体では反射超音波の強度が小さくドップラーシフトの測定精度が劣化していると思われた。特に、振り子が両端部分にある場合は受信波形が極めて小さく、反射超音波を認識できなかった。受信波形を強くするために反射体を拡大させた。100×100×280mm のプラスチック板アングルのコーナーリフレクタとなるようにし、反射体の面積をアルミアングルの場合の約3倍にした。これにより測定精度が改善された。

3.2 超音波送受信器

超音波送受信器のブロック図を図3.4に示す。左が送信回路、右が受信回路である。センサは市販の開口16mm、周波数40kHzのものを使用した。また、反射超音波の受信波が約1msのパルス長であることから、センサの帯域幅は約1kHzである。また、超音波送信機からは、ほぼ65msの周期でパルス長0.33msの駆動パルスがセンサに印加されている。平均速度約1m/sの実験では周波数測定精度が不十分であった。センサの指向性が広いために反射体

以外にも超音波が照射され、不要な反射波を作り出している事が原因であると考え、センサ先端に長さ30mm、開口24mmのホーンを取り付け指向性を鋭くすることを試みた。

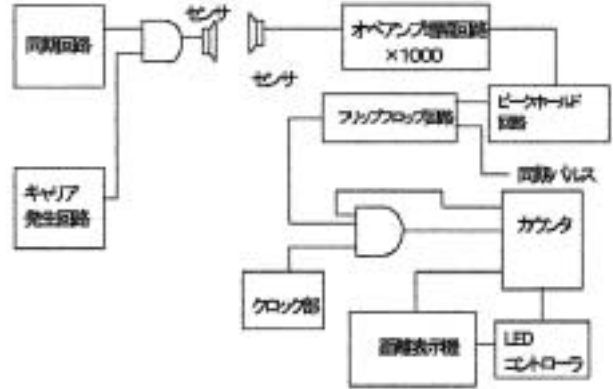


図3.4 超音波送受信回路

3.3 反射波の観測および周波数の解析方法

反射波はオシロスコープ (IWATSU DS-8824) で観測した。また、反射波のピーク周波数を同オシロスコープのFFT機能を利用し測定した。しかし、オシロスコープでは受信波中に存在するノイズも含めてFFT解析してしまうので反射波の正確なピーク周波数が読み取れないと考え、受信波をパソコンに取り込み、ノイズと思われる部分を0としてFFT解析を試みた。この場合のFFT解析には数式処理システム Mathematica (Wolfram Research 社) を使用した。

3.4 周波数変換装置

観測されたドップラーシフトの変化量を可聴領域に変換するために周波数変換装置のブロック図を図3.5に示す。

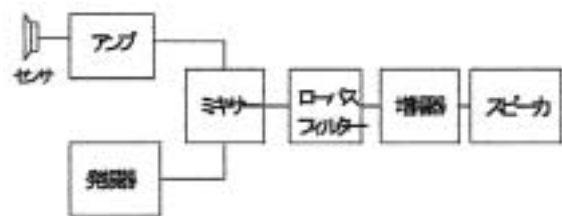


図3.5 周波数変換装置

4. 実験結果

4.1 実験1

実験1の実験条件を表4.1に示す。測定データ数

表4.1 実験条件 1

反射体	30×30×280mm アルミアングル
振り幅	±45°
平均速度	約1.48 [m/s]
ホーン	無

は50点とした。観測された受信波の波形とオシロスコープのFFT解析による受信周波数の変化をそれぞれ図4.1, 図4.2に示す。

図4.1の横軸は受信パルスの長さを示しており、1目盛が1msとなっている。図4.2の縦軸は受信超音波のピーク周波数 F_r , 横軸は反射超音波を受信するまでの時間を示している。

図4.2中の、楕円曲線は反射体が平均速度1.48 [m/s] で振動した場合に予想される反射波ピーク周波数 F_{r0} の理論曲線であり、次式で求めた。

$$F_{r0} = F_s \pm F_m \times \cos\phi \quad (4.1)$$

ここで、 F_s は反射体が静止しているときの反射波のピーク周波数、 F_m は反射波の周波数シフトの最大値で、反射体の移動速度2.0[m/s] の場合に相当する。このとき ϕ は±90°の範囲で変わるものとし、次式で表わされる。

$$\phi = \frac{\pi C}{4x_{\max}} (\tau - \tau_0) \quad (4.2)$$

τ は受信波の遅れ時間、 τ_0 は振り子が中間位置での遅れ時間、 x_{\max} は振り子の最大振幅であり、振り幅±45° の場合は $x_{\max} \approx 0.71$ [m] である。理論曲線の上側の曲線は振り子がセンサに近づいてくる場合のものであり、下側のカーブはセンサから遠ざかっていく場合のものである。

測定結果はややバラツキが大きかった。特に、振り子が運動方向を変える両端部分では、反射波が小さくバラツキが著しかったので測定を控えた。

測定結果の理論値からの標準偏差を次式で求めた。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \mu_i)^2} \quad (4.3)$$

ここで、 x_i は測定値、 μ_i は理論値、 n は測定回数である。その結果、振り子が接近してくるときの標準偏差は約0.14kHz、振り子が遠ざかっていくときの標準偏差は約0.15kHzとなった。ドップラーシフト量の最大が0.5kHz なのに対して標準偏差は約0.15kHz であり、±2σでは約0.6kHz となり、標準偏差はやや大きいと言わざるを得ない。

測定結果の標準偏差が大きい原因としてオシロスコープによるFFT解析はノイズを含んだまま解

析が行われてしまうことが考えられた。そこで、受信波をパソコンに取り込み、ノイズを除去した受信波である図4.3に対して Mathematica を使用してFFT解析した。結果を図4.4に示す。

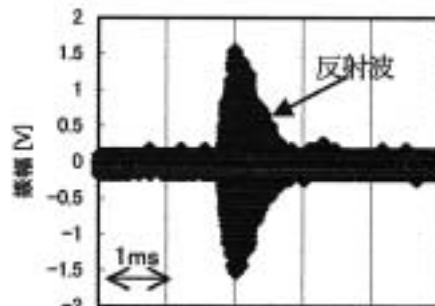


図4.1 受信波 (ノイズを含む)

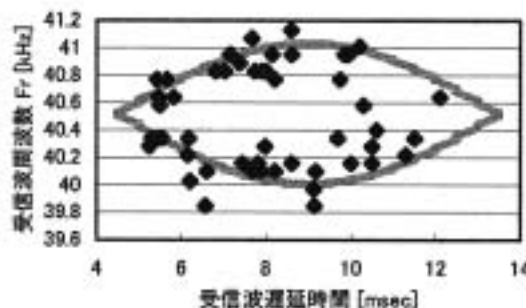


図4.2 オシロスコープ解析結果

ノイズを含んだ反射波を Mathematica を用いてFFT解析した結果を図4.5に示す。結果は、ノイズの影響を受けてバラツキが大きい。この場合の測定結果の理論値からの標準偏差は、振り子が近づいてくるときの約0.21kHz、振り子が遠ざかっていくときは約0.18kHzとなった。このことから受信波の中で反射波の存在しないところに存在するノイズが今回の測定精度に悪影響を及ぼしていると思われる。

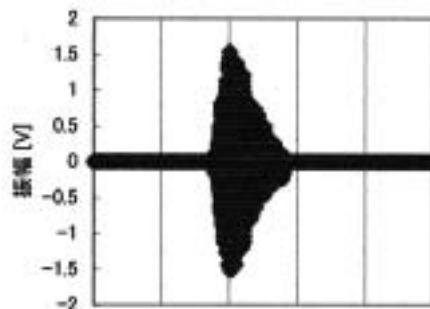


図4.3 ノイズを除去した受信波

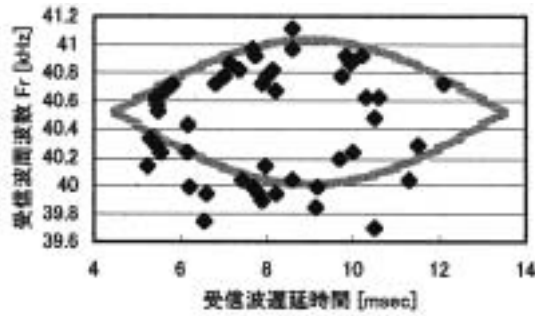


図4.4 Mathematica 解析結果

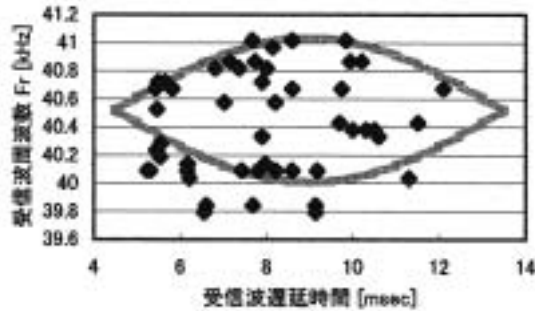


図4.5 Mathematica 解析結果 (ノイズ含む)

4.2 実験 2

実験 2 の実験条件を表4.2に示す。この実験は反射体をアルミングルからプラスチック板に変更し、反射面積を拡大した状態で測定した。その他の条件

表4.2 実験条件 2

反射体	100×100×280mm プラスチック板
振り幅	±45°
平均速度	1.48 [m/s]
ホーン	無

は実験 1 と同じである。測定データ数は50点とした。観測された反射波の波形とオシロスコープの FFT 解析による受信周波数の変化をそれぞれ図4.6, 図4.7に示す。反射体がプラスチック板の場合、アルミングルの場合と比較し、反射波の振幅が増加し、誤差も減少した。測定が困難だった静止部分のバラツキも減少した。測定結果の理論値からの標準偏差を求めたところ、振り子が近づいてくるときは約0.11kHz, 振り子が遠ざかっていくときは約0.07kHzとなった。反射体の面積を拡大したことにより、反射波の強度がノイズに対して相対的に増加し、FFT 解析の精度も向上した。

実験 1 と同様に、反射波をパソコンに取り込み、ノイズを除去した受信波を図4.8に示す。Mathematica を使用した FFT 解析結果を図4.9に

示す。この場合の測定結果の理論値からの標準偏差は、振り子が近づいてくるときは約0.11kHz, 振り子が遠ざかっていくときは約0.13kHzとなった。ただし、ノイズを含む波形について Mathematica で解析した場合の標準偏差は、それぞれ約0.16kHz と約0.21kHzとなった。

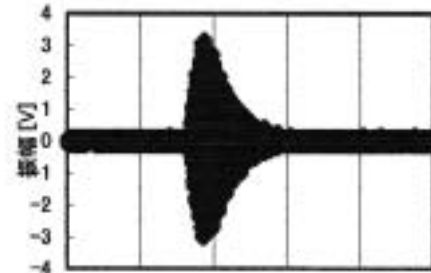


図4.6 受信波 (ノイズを含む)

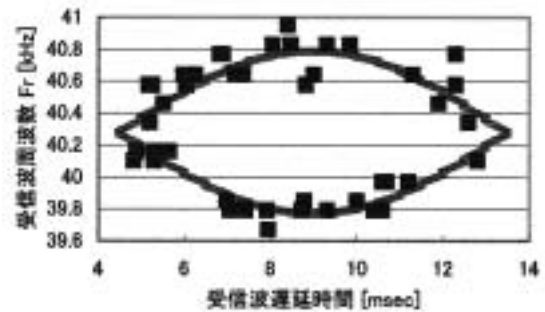


図4.7 オシロスコープ解析結果

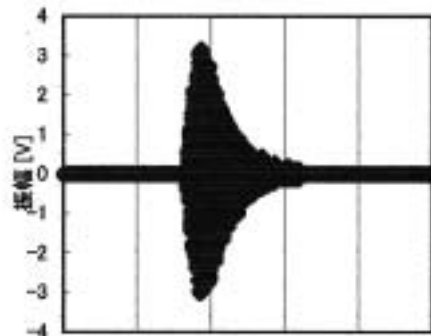


図4.8 ノイズを除去した受信波

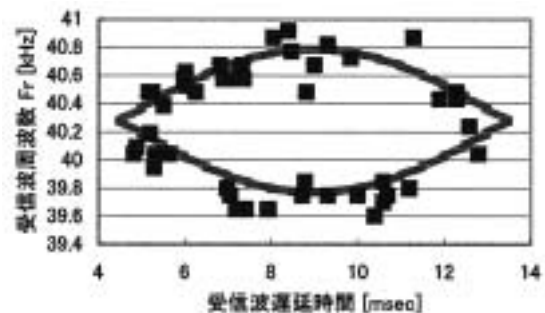


図4.9 Mathematica 解析結果

4.3 実験 3

表4.3 実験条件 3

反射体	100×100×280mm プラスチック板
振り幅	±30°
平均速度	0.93 [m/s]
ホーン	有

実験 3 として、振り子の速度を小さくした場合の実験を試みた。実験条件を表4.3に示す。この実験は反射体をプラスチック板とした。駆動モータの回転数を一定のままにしたので、反射体平均速度を0.93m/s にすることにより水平移動量が減少し、振り幅が±30°となった。受信波にノイズが目立ったので、超音波センサの指向性を鋭くし不要な反射波を削減するために超音波センサの先端にホーンを取り付けた⁷⁾。観測された受信波の波形とオシロスコープのFFT解析による結果をそれぞれ図4.10, 図4.11に示す。反射波は実験 1, 実験 2と比較してノイズが目立ち、複数の反射波が重なり形状が歪んでいる。また、ノイズの影響からかFFT解析の結果にも誤差が目立つ。理論値からの標準偏差を求めたところ、振り子が近づいてくるときは約0.14kHz, 振り子が遠ざかっていくときは約0.11kHzとなった。ノイズを除去した受信波を図4.12に、Mathematicaを使用したFFT解析結果を図4.13にそれぞれ示す。この場合の測定結果の理論値からの標準偏差は、振り子が近づいてくるときは約0.09kHz, 振り子が遠ざかっていくときは約0.1kHzとなった。実験 3では、反射波の直後に存在する不要波を除去したことがドップラーシフトの計算誤差を小さくしたと思われる。図4.11, 図4.13より、振り子の速度を変えた場合でもドップラーシフトは振り子がセンサに向かって来る場合は上昇し、センサから遠ざかる場合は減少し、平均速度に相当した変化であり、理論通りの結果が得られた。

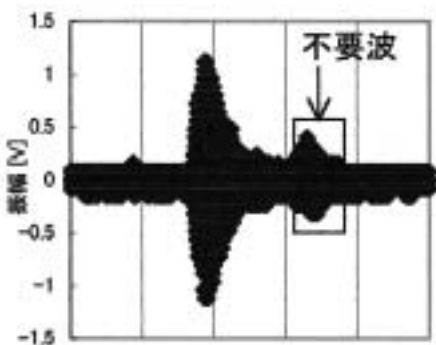


図4.10 受信波 (ノイズを含む)

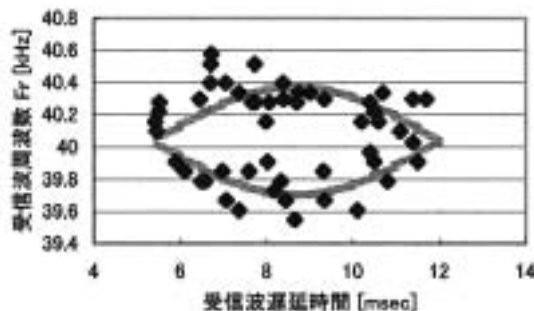


図4.11 オシロスコープ解析結果

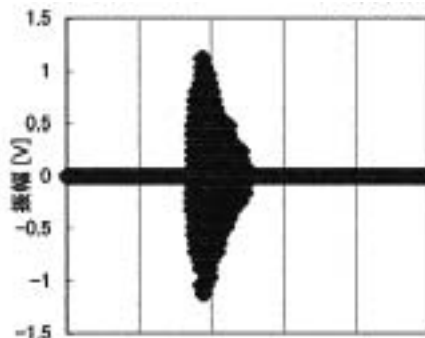


図4.12 ノイズを除去した受信波

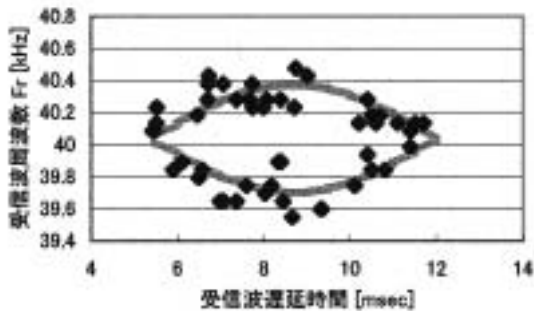


図4.13 Mathematica 解析結果

4.4 実験 4

実験 4 では受信超音波の周波数を可聴領域に変換して、実際に耳で聞いてみることを試みた。実験条件は実験 2 とほぼ同じであるが、超音波送受信回路の超音波センサの先端にホーンを取り付けて行なった。超音波送受信回路の隣に周波数変換装置を設置し、反射超音波をスピーカを通して可聴領域で観測した。しかし、結果は「ブ・ブ・ブ」という超音波パルスのパルス音が繰り返し聞こえてくるだけで反射波のドップラーシフト量を耳で確認する事ができなかった。そこで、超音波センサの位置や角度を変えて観測を繰り返したがドップラーシフト量の確認はできなかった。実際に耳で聞くためには、パルス長が短すぎると思われた。実験方法を大幅に変更する必要があると考えている。

5. 考察

5.1 反射体の変更について

反射体を30×30×100mmアルミアングルから100×100×280mmプラスチック板に変更したことによる影響を検討するために実験1, 実験2の理論値からの標準偏差を表5.1に示す。

表5.1 反射体による理論値からの標準偏差の比較

反射体	接近する場合	遠ざかる場合
アルミアングル	0.14 [kHz]	0.15 [kHz]
プラスチック板	0.11 [kHz]	0.07 [kHz]

理論値からの標準偏差はオシロスコープによりFFT解析したものを示す。表5.1から、反射体がプラスチック板の場合のほうが理論値からの標準偏差が小さいことがわかる。図4.2と図4.7を比較すると、プラスチック板の理論値からの標準偏差がアングルの場合のその半分以下になっている部分もある。また、反射体の面積を拡大したことにより、反射超音波のピーク周波数のばらつきを抑えることができ、測定が困難であった振り子の静止部分付近の測定が可能となった。

5.2 センサに取り付けたホーンの効果と影響

実験4において、不要な反射波を減少させるために、超音波センサの先端に長さ30mm、開口24mmのホーンを取り付けた。ホーンを取り付けた結果、センサの指向性は鋭くなり、測定結果にそれまで現れていたノイズが消失し、センサの指向性を向上させる目的は果たされた。しかし、新たなノイズが発生する問題が生じた。このノイズは反射波と重なり、反射波のピーク周波数のずれを起こした。このノイズの発生原因がセンサに取り付けたホーンである可能性は高い。ホーンによりセンサの指向性は鋭くなるが、同時に新たな問題を生じる可能性があることが分かった。よって、今後はホーンの有無による指向性パターン測定等、ノイズ発生の原因解明が必要だと考えられる。

5.3 周波数解析法の有効性に関する比較

今回は受信超音波のピーク周波数解析をオシロスコープによるFFT解析とMathematicaによるFFT解析の二通りの方法で実施した。実験1から実験3までの受信超音波について二通りの解析法で得られたデータの標準偏差を表5.2, 表5.3, 表5.4に示す。

表5.2 実験1での標準偏差

解析法	接近する場合	遠ざかる場合
オシロスコープ	0.14 [kHz]	0.15 [kHz]
Mathematica (ノイズ無)	0.21 [kHz]	0.18 [kHz]

表5.3 実験2での標準偏差

解析法	接近する場合	遠ざかる場合
オシロスコープ	0.11 [kHz]	0.07 [kHz]
Mathematica (ノイズ無)	0.11 [kHz]	0.13 [kHz]

表5.4 実験3での標準偏差

解析法	接近する場合	遠ざかる場合
オシロスコープ	0.14 [kHz]	0.11 [kHz]
Mathematica (ノイズ無)	0.09 [kHz]	0.1 [kHz]

表5.5 実験2での標準偏差(ノイズ有無による比較)

解析法	接近する場合	遠ざかる場合
Mathematica (ノイズ無)	0.11 [kHz]	0.13 [kHz]
Mathematica (ノイズ有)	0.16 [kHz]	0.21 [kHz]

実験1, 実験2ではオシロスコープによる解析データはMathematicaによる解析データと比べて標準偏差が小さい。しかし、実験3ではオシロスコープによる解析データがMathematicaによる解析データよりも標準偏差が大きい。これは実験3の受信波に原因があると考えられる。実験3の受信波にはノイズが多く、さらに不要波が反射波と重なっているため、オシロスコープによる解析ではピーク周波数がずれてしまったと考えられる。それに対し、MathematicaによるFFT解析では受信波をパソコンに取り込み不要波を除去しているためピーク周波数のずれを最小限に抑える事が出来たと考えられる。これより反射波の近傍に不要波が目立つ場合ではMathematicaによるFFT解析が有効であるが、それ以外ではオシロスコープによるFFT解析が有効だったと考えられる。

また、MathematicaによるFFT解析ではノイズの有無によって解析結果に変化があるのかを比較するためにMathematicaによる解析データの標準偏差を表5.5に示す。実験2ではノイズが無い方が標準偏差は小さいことが分かる。したがって、Mathematicaを用いてFFT解析を行う場合はノイズを除去することが有効だと思われる。

5.4 受信波の可聴領域への変換について

実験4において反射超音波を可聴領域に変換し、実際に耳で聞くことを試みたが、期待した結果が得られなかった。超音波送信機より発信されるパルス長が0.33msecと短いため、受信波を可聴領域に変換しても受信波の周波数シフト量を表現できなかったためと考えられる。超音波送信機より発信されるパルス長を現在よりも長くすることが有効であろうと考える。今後はパルスの長さを調整し、適切なパルス長を求めて再度実験を試みる予定である。

6. 結言

本研究は視覚障害者の歩行補助のため、身近に存在する障害物認知を補助する装置の開発を目的とし、移動物体の識別や移動速度を解析するための装置開発の基礎データを収集するために移動物体として振り子を製作し、その反射波のドップラーシフトの観測、シフト量の可聴領域変換・観測実験を行なった結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 振り子の実験では、反射体が超音波センサに接近して来る場合は周波数が上昇し、遠ざかっていく場合は周波数が下降し、また振り子の平均速度を小さくすると周波数シフトも対応して小さくなっておりほぼ理論通りの結果を示した。
- (2) 反射体を30×30×280mmアルミアングル、100×100×280mmプラスチック板アングルと交換したことにより、測定精度が向上した。これより反射体はできるだけ大きな面積を有することが精度向上のために望ましいと分かった。
- (3) 反射体以外で生じる反射波は測定の結果に与え

る影響が大きい。特に反射波と不要波が重なって観測される場合は誤差が大きく、注意が必要であることが分かった。

- (4) 反射超音波を可聴領域に変換して、耳で聞き取る実験では、反射超音波のドップラーシフトを確認する事が困難であった。超音波送受信機より発信されるパルス長が短いためと考えている。

参考文献

- 1) 卓郎, 伊藤啓二, 白鳥哲夫, 城口光也, 久良知國雄, 春日正男: 音声歩行案内システム, ヒューマンインタフェース, 82-7, (1999), p.35-36.
- 2) 清水豊: “歩行補助”, 視覚障害とその代行技術, 名古屋大学出版会, (1984), p.248-253.
- 3) 社団法人 日本音響学会: 音の福祉工学, コロナ社, (1997), p.200-207.
- 4) 佐藤泰正: 視覚障害学入門, 学芸図書株式会社, (1991), p.172-173.
- 5) Tohru Ifukube, Tadayuki Sasaki, Chen Peng: A Blind Mobility Aid Modeled After Echolocation of Bats, IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, 38-5, (1991), p.461-465.
- 6) R.C.Asher "Ultrasonic Sensors For Chemical and Process Plant" Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia 1997 pp237-247
- 7) 山本美明: 超音波基礎工学, 日刊工業新聞社, (1981), p.59.