汽笛音源の方向検出システムに関する研究

木村 隆一*・鈴木 三郎*・今枝 彬郎**

Research on Direction-detecting System of Horn-signal

Ryuichi KIMURA, Saburou SUZUKI and Yoshirou IMAEDA

Abstract

Horn-signal is very important information. If the direction of signal-source can be detected by the horn-signal generated from other ship, it would be very useful for the safety navigation. This paper describes the system detecting the signal direction automatically.

In this system, we consider a series of process of the sound sampling, data processing, direction detecting, as a sequential operation and examine algorithm which can quickly perform these processing by a personal computer. As a result, the detection takes time of 7 seconds each.

1. はじめに

船舶にとって汽笛信号は安全航行の面から大切な情報源である。前報⁽¹⁾では汽笛音源の方向検出に関して汽笛音の到達時間差から音源の方向を算出する手法を述べると共に実測データを用いた考察も行い、発生音源に対する方向の検出が可能であることを報告した。実際、その結果はかなり良好であるが、その音響信号処理並びに方向検出のための計算などは一連のシステムとしてとらえられていないため、結果の算出にかなりの時間を必要とし、さらにかんがりの部分で人の判断を要していた。しかし、音源の方向を検出するシステムには次のような点が強く望まれる。すなわち、音をサンプリングしてから方向の検出までに要する時間ができるだけ短いことと、システムの構成が比較的簡単なことである。以上の点を踏まえて我々はより実用的なシステムの検討を試みた。

2. 汽笛音方向検出の概要

他船の発した汽笛音を正三角形に配置した3本のマイクロホン (M_1, M_2, M_3) で收音し、汽笛音の到達時間差を検出することにより他船の存在する方向を算出する。このとき、 M_1, M_2, M_3 のマイクロホンは船上に設置することを考えておかねばならないのでそれぞれのマイクロホンの設置間隔はあまり大きくすることができない。そこで本実験ではこのマイクロホン間距離を12.85mとしている。さて、 M_1, M_2, M_3 のうちのある1つのマイクロホン M_1 を基準マイクロホンと決めると、この基準マイクロホンと他の2本のマイクロホン M_2, M_3 との間には汽笛音の到達時間差が2つ存在する。その内の1つ (基準マイクロホン M_1 と他の1本のマイクロホン M_2) の到達時間差から音源の位置は2本のマイクロホン位置から一定の距離差 (到達時間差に音速を乗じたもの) の双曲線上に存在することになる。同様にして残り M_1, M_3 の到達時間差から、もう1本の双曲線を求めることができる。以上述べたことが汽笛音から音源の位置を得るための基本的な考え方である。

近年、パーソナルコンピュータはソフトウェアの開発と相まってよく使われるようになってきた。そこでシステムの簡素化という観点から汽笛音源の方向検出にパーソナルコンピュータの利用を考えた。その時のアルゴリズムは大別するとつぎの4種類の処理過程で構成されることになる。

① 汽笛音のサンプリング ② 汽笛音の有無 ③ 到達時間差の検出 ④ 汽笛音源の方向算出

* 正会員 神戸商船大学 (〒658 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

** 正会員 徳島文理大学 (〒770 徳島市山城町西浜傍180)

それぞれの過程を簡単に述べると以下になる。①の過程ではマイクロホンで捉えられた汽笛音が電気信号に変換されたのち、パソコンにデータとして取り込まれる。②の過程ではこのデータに対して周波数分析がなされ、その結果より汽笛音の存在が調べられる。汽笛音の存在が確認されると、③の過程に移り、汽笛音の周波数を検知して汽笛音の3つの波形からそれぞれの到達時間差を検出する。④の過程ではこの時間差を用いて双曲線法により音源の存在する軌跡を算出してその方向検出を行う。

前報¹⁾ではこれらの処理を各過程ごとに分割して行っていたため多大の処理時間を要した。しかし、実用的なシステムを構築するにはこれらの処理は連続的になされなければならない。そこで本論文ではこのシステムの連続処理化の問題について検討を加えると共に実用的なシステムの構築を考えることにした。

3. 音響信号処理

音のサンプリングについて述べる。本実験では汽笛音を3本のマイクロホンで同時に取音するため、3信号（音波形）の入力を順次切り替えながらA/D変換を行っている。その時のサンプリングタイムは1信号あたり $195.3\mu\text{sec}$ で行ったのでサンプリング定理より 2.56kHz の音波形が取り込めることになる。変換されたデータはコンピュータ上のメモリに格納される。この結果、3本のマイクロホンで捉えた音のデータがメモリ上に順番に書き込まれていくわけであるが限られたメモリ数では無限にデータの書き込みを行うことができない。ここでは一定のメモリ領域を確保しておき、ここに新しいデータを古いデータの上からオーバーライトすることで、メモリ上に一定時間分の音波形を残している。具体的にはこのメモリ用に約 64kbyte 分の領域を用意したため、時間に換算して3信号分で約 2.1sec 間の音波形が確保されていることになる。

次に、この格納されたメモリ上のデータに汽笛音が存在するかどうかの判定をしなければならない。図1は汽笛が鳴ったときの模様を图示したものである。汽笛音は図中のaで示される部分でそのほかにも倍音や3倍音が出ていることも分かる。さて、図から明らかなように汽笛音は一定周波数の音であることが分かる。このことからここでは 0.1sec 間のデータを6回取り出して周波数分析を行い、 0.6sec 間同じ周波数の音が続いたとき汽笛音は存在していると判断することにした。その模様を具体的に示したものが図2の流れ図である。汽笛音が存在しないときはつねにA/D conv.→Memoryが繰り返されているが、もし汽

図1 汽笛の三次元図

図2 汽笛音の判定

笛音があると判定されたならば変換を直ちに停止してメモリ上の音波形を消去しないようにしている。なお、汽笛音の有無はそのメモリ上のデータを取り出してデータ処理を施したあと判定を行っているが、メモリ上には 2.1 sec 分のデータが存在しているため判定に要する時間を除いても十分に方向検出を行うために必要な汽笛音波形部分は残されている。

次に、そのメモリ上の3つの波形に対してフィルタリングを行って汽笛音の波形を抽出しなければならない。このときメモリに格納されている 2.1 sec 分のデータ全部を処理対象とする必要は無いが、少なくとも汽笛音の鳴り始め部分は含まれていなければならない。図3は音波形をフィルタリングして汽笛音を取り出し、その波形を表したものであるが、このときのバンドパスフィルタの中心周波数は前述の汽笛音の判定ルーチン(図2)のところで求まっているのでその値を利用できる。ところで、図3は3つの部分に分けて記しているが、その最初の部分は汽笛音が存在しないとき、次が汽笛音の鳴り始め部分、そして最後に汽笛音が連続して鳴っている部分を表している。

図3 フィルタリング後の汽笛音波形

さて、この中から汽笛の鳴り始め部分を含んだ音波形を取り出さなければならないが、前述したように汽笛音は 0.6 sec 間連続して同じ周波数の音が続いたときに汽笛音と判定しているので、0.6 sec 以前のデータから取り込めば汽笛音の鳴り始めの部分が含まれているはずである。そこで、少し余裕を持たせて 0.8 sec 前より判定された時間まで 0.8 sec 分(サンプリング点数では 4096 点になる)の取り込みを行うことにする。従って、図中の a 点で汽笛音の存在が確認されたならば、そこから 0.8 sec 前の b 点へ戻りそこから 0.8 sec 間のデータを処理対象とする。ところで、この 0.8 sec 間(4096 点)のデータの内、始めの方は汽笛の鳴り始めの波形部分が含まれており、後の方は汽笛音の安定した波形部分となっている。そこで、鳴り始めの波形部分ではマイクロホン M_1, M_2, M_3 の3波形間のずれ量(到達時間差)を検出するために用い、安定した後ろの波形部分はその検出を補助するための情報となる波形の周期、3波形間の位相差および振幅量を求めるために利用することが出来る。

図4はマイクロホン M_1, M_2 の波形を並べて記したものである。2本のマイクロホンへの汽笛音の到達時間差は M_1 (a 図)の基本波形と M_2 (b 図)の波形上の最も似かよった場所の時間的なずれ量 Δt で求めることができる。基本波形を N 点の数値群で表すことにして、 M_1 の $t=0$ (基本波形の左端)の値を $x_1(0)$ と記せば、基本波形は $x_1(0), x_1(1), \dots, x_1(N-1)$ で表されることになる。同様に M_2 の $t=0$ の値を $x_2(0)$ とすればその波形は $\dots, x_2(-1), x_2(0), x_2(1), \dots, x_2(N-1), x_2(N), \dots$ となる。さて、基本波形と M_2 の N 点分の波形が似ているかどうかの評価はつぎの(1)式で行っている。すなわち、式中の m を変えて Z の値が最小となったときを最もそれらの波形が似ているとする。

$$Z(m) = \sum_{n=0}^{N-1} |x_2(n+m) - x_1(n)| \quad (m = \dots, -1, 0, 1, \dots, p, \dots) \quad (1)$$

ここでサンプリング周波数を f とし、 $m=p$ で Z が最小となったとすれば到達時間差 Δt は p/f で表される。

(a) マイクロホン M_1 (b) マイクロホン M_2

図4 到達時間差の算出

図5 基本波形の抽出

従って、上述のようにすれば2本のマイクロホンへの到達時間差を求めることができることが分かったが、この処理を行うには上述の基本波形を計算機が抽出できるようになっていなければならない。その手法は図5を用いて以下に説明する。取り込んだ波形から鳴り始め部分を捉えるために図示したような判定レベルを設定しておく。そしてそのレベルを越えるまで最初の波形部分(a点)から比較していき、そのレベルを越えたとき(b点)、その前後の256点分の波形(c~d)をここでは基本波形とした。これで自動的に基本波形が決定されることになる。ここで考えておかねばならないことは汽笛音のサンプルごとに波形の振幅が異なることである。振幅が異なれば上記の判定レベルは意味をなさないのである。しかし、前述したように各振幅量は予め求められているので、振幅量のある一定の幅に規格化している。

さて、到達時間差を求めるには、(1)式の計算を実行すればよいのであるが基本波形を1点ずつ移動させていたのでは最小の $Z(m)$ を探し出すまでにかなりの計算時間を要することになる。つまり、基本波形が256点で構成されているので、1点分移動させるごとに基本波形と M_2 の波形との計算を256回繰り返さなければならない。そこで、さきに求めていた周期、2波形の位相差を用いて計算時間の短縮をはかることにした。すなわち、(1)式の計算を1サンプリングタイムごとに行うのではなく、周期ごとに行っても到達時間差を求めることができる。従って、 m は次式で与えられることになる。

$$m = T \times n + \phi \quad (T: \text{周期} \quad \phi: \text{位相差} \quad n: \dots, -1, 0, 1, \dots) \quad (2)$$

しかも、到達時間差の絶対値が最大になるのは2本のマイクの両延長線上に汽笛音源が存在する場合であるから、(1)式で示した m の範囲はこれを越えることはないのでその範囲だけを計算すればよいことになる。同様の手法でマイクロホン M_1, M_3 との間の到達時間差も求めることができる。

4. 角度差とシステム

前章で2組のマイクロホンへの到達時間差が2つ求まったので、汽笛音源の存在する軌跡は2本の双曲線で描くことができる。そして、その交点に音源の位置を求めることができるが、実際はマイクロホン間距離(12.85m)に比べ音源までの距離が非常に大きいため正しい位置で交点が結ばれることは難しい。そこで、図6に示すような角度差 θ_1, θ_2 で結果を評価することにした。同図のM点は3本のマイクロホンが設置されている計測点で、S点は汽笛を発した船の位置を表している。さて、角度差 θ_1, θ_2 はM点とS点を結ぶ線と軌跡 L_1, L_2 のなす角で与えられるが、軌跡は曲線であるため角度を計算するときはそれを直線で近似して行っている。同図の場合で、角度差は5.4度と12.6度であった。ところで、上述の双曲線システムは幾何学的な位置によっては誤差が大きくなる場所が存在する。つまり、音源が2本のマイクロホンの基線延長線上に近くなればなるほど誤差が大きくなり、基線延長線上では変位量が無限大になる性質があるのでそれを避けるため本研究のシステムでは基線延長線に沿うような双曲線が算出された場合、その双曲線は方向検出に用いないことにしている。図7を用いて具体的に説明するとつぎのようになる。図中のSの位置で汽笛が発せられたとき、基準マイクを M_1 として、 M_1, M_2 への到達時間差から距離差を求めると図中の $a-a'$ の様な双曲線が描かれる。これはマイクロホン M_1, M_2 の基線延長線上に近い双曲線であるので、この双曲線を用いて音源の存在位置は求めない。この判断基準は本システムの中では距離差で12m以上になったとき(双曲線を近似した直線と基線延長線とのなす角度が約20度

図6 音源の位置と双曲線、及び角度差の表し方

図7 音源と各マイク位置との関係

以下) 棄却するように設定している。棄却したあと、基準マイクを M_2 , あるいは M_3 に変更して、それぞれへの到達時間差から再度、音源位置を求める双曲線を描くと $b-b'$ のようになる。この双曲線は基線延長線から離れているので、この双曲線を新たに採用することにした。

図8はここまで述べてきたことを一連のシステムとして書き表したものである。同図を用いて本システムのデータ処理の流れを総合的に説明する。3本のマイクロホンで収音された汽笛音は常時メモリに格納される。そのメモリ内からデータを取り出し、汽笛音がその中に存在するかどうかを調べる。この時に調べるのはマイクロホン M_1

の信号だけについて実施する。汽笛音がなければいつまでもメモリのデータを調べにいくが、もしも汽笛音の存在が確認されたならば A/D 変換停止後、メモリより M_1, M_2, M_3 のデータを取り出し、それらにフィルタリングの処理を施して時間差を算出する。この時、音源位置の軌跡が基線延長線上に近くなるようであれば基本波形を他のマイクロホンの波形に変えて、つまり基準マイクを変更してもう1度、到達時間差を計算するようになっている。なお、基準マイクを変更しなくても良いときは方向検出の計算に移るようになっている。ちなみに計算時間は汽笛音の確認から方向検出まで6~7秒で検出処理を行うことができる。

図8 方向検出システム

5. 実験結果

実験は高松港に入出港する船舶を対象にM地点で収音した。この時の気象条件は午前8時で気温18度・湿度72%, 午前12時で気温20度・湿度56%, 午後4時で気温19度・湿度56%であった。また、風速は1日を通じて0~0.4 m/s のあまり風の無い状態であった。

図9(a)は汽笛音の方向検出を行って図に表したものである。これは入港してくる船が港外(S点)で汽笛を発した例で、計測点Mから船の位置Sまでの距離は981mであった。船の進行方向は図中に短い矢印で示した。なお、この船の汽笛音の基本周波数は130 Hz となっていた。到達時間差より求めた2本の双曲線は図中に1点鎖線と2点鎖線で示しているが、このサンプルの場合は結果を前章で説明した角度差で表現すると2.4度と-5.5度になった。次に、結果を分かりやすくするためにこの2つの角度差の平均値で汽笛音源の方向を表したものが図9(b)である。つまり、平均値である-1.55度を図中に矢印の直線で記したもので、その方向に汽笛を発した船が存在することを表している。このサンプルの場合、平均角度差(-1.55度)は小さくて非常に良好な結果となっている。図10は港内で発した例で、基本周波数260 Hz, 船までの距離918mであった。この結果を見てみると図9のサンプルと同じように汽笛音源の方向を示す矢印は船の存在する方向とほぼ一致している。ただし、

図9 実験結果 (音源までの距離981m)

図 10 実験結果（音源までの距離918m）

図 11 実験結果（音源までの距離680m）

各双曲線との角度差は -14 度と 12 度であり、図9と同じ精度の結果であるとは言えない。また、図11は、基本周波数 310 Hz 、船までの距離 680 m の例で、結果は角度差 $\theta_1=8.3$ 、 $\theta_2=7.8$ と2つの角度差が同程度の値で、平均角度差 8.05 度となり、少し、船の存在する方向と外れているように見える。図12は栈橋の付近で発したもので、基本周波数が 410 Hz 、船までの距離 420 m であった。このときの角度差は $\theta_1=1.1$ 、 $\theta_2=2.9$ で、平均角度差は 2.0 度となった。

図 12 実験結果（音源までの距離420m）

む す び

我々は音のサンプリングからデータ処理、汽笛音の存在の判定、音源方向の算出までを一連の総合的なものとして捉え、それらの処理を行えるシステムについて検討した。システムの有効性を調べるにあたっては、実際の船舶の汽笛音を用いて行った。その結果、サンプルで挙げたような範囲内であれば汽笛音源の方向を知ることが可能であるといえよう。そして、今回の目標とした汽笛音源方向検出のシステム化についても一応評価できるものとなっているが、まだ、サンプルによっては検出しにくいものやノイズを汽笛と誤認することなど多々あり、今後の改善点を多く残している。このような問題については更に検討を加えてより実用的なものへとシステムの完成を目指したい。

参 考 文 献

- (1) 木村隆一，鈴木三郎，大比賀直樹：“汽笛音源の方向検出に関する基礎的研究”，日本航海学会論文集，79，p. 83—90，昭和63年

質 疑 応 答

廣田直照（沖電気工業㈱）：3個のマイクは、実際利用時、両舷と中央になると思うが一直線にならないと音源方向にアンビギュウティがあり、前後の識別はつくのか？ 又、前方の汽笛のみでなく側方の霧笛等の方向検出に利用できるか？

木村隆一：汽笛を3つのマイクで収音してそれらのマイクへの到達時間差を求めています。さて、その内のある2つのマイクについてその到達時間差を考えると、本システムではどちらのマイクに先に汽笛が到達したかはそれぞれのデータが独立して記録されているため容易に判定がつき、その時間差は正負の値で与えられるこ

とになります。従ってそれらのマイクから求まる双曲線は1本に限定することができます。そしてもう1組のマイクから同様に双曲線を1本求めれば、それら2本の双曲線から汽笛音源の方向は定まり、船の前後の2カ所に汽笛音源が存在するということはありません。仮に、マイクを船の両舷と中央に配置させたときに船の側方（基線延長線上）で汽笛が発せられたとしても双曲線を求めるためのマイクの組合せはシステム内で変更されるようになっているのでそのような場合でも検出可能です。また、霧笛に対しても原理的には検出可能であると考えています。

飯島幸人（東京商船大学）：1) 汽笛音は多周波数成分を持つ雑音のようなものですが単一周波にうまく filtering できるでしょうか

2) もしできるとしたら位相比較により、より精度よく方位の決定が可能と思われる。

3) 精度の悪かった場合はどんな場合でしょうか

木村隆一：1) 汽笛音は図1に示すような特性を有していますのでフィルタリングによって抽出することは可能です。

2) 本システムは3章にも述べていますが時間差を求めるときに位相差による計算も行っています。

3) 汽笛音に近い周波数でかつ高い音圧の雑音が存在するような場合を含めて、到達時間差を求めるときに3章で説明した基本波形が取り出しにくいような汽笛音の場合には精度よく求めることが出来ません。