航走体放射雑音からの航跡標定に関する シミュレーション試験

正員 倉野重光 (防衛庁技術研究本部)

The Simulation Analysis to tract down the Running Locus of the Underwater
Vehicle by the Radiated Noise

Shigemitsu Kurano, Member

(Technical Research and Development Institute, Japan Defense Agency)

Up to this time, there are two kinds of the passive ranging system. One thing is the seabed mounted transponders method and another is the float buoy ranging method. Both methods use the vessel-mounted pinger system. But when we need to estimate the running ability of the underwater vehicle easily and economically, we can't use the expensive vessel-mounted pinger system. So we must tract down the running locus of the underwater vehicle from the radiated noise of the vehicle.

In this study, we investigated the new passive ranging system which located the moving target. Then we computed the time-delay difference based on the output of a cross-correlter between two radiated noise signals received by the acoustic sensors and we solved three-dimensional equations for the acoustic velocity and these sensor's coordinates positions to tract down the running locus of the underwater vehicle.

In this paper, we verified an algorithm for the new passive ranging system by a simulation analysis, in which the radiated noise, the velocity and advance direction of the underwater vehicle are assumed.

The simulation analysis cleared the effectiveness of an algorithm of the new passive ranging system to determine the accurate position of the underwater vehicle.

キーワード: レンジングシステム, 水中航走体, 水中放射雑音, ハイドロホン

Keywords: ranging system, Underwater Vehicle, radiated noise, hydrophone.

1 緒論

従来から、パッシブレンジングシステムには、センサー海底固定方式と浮遊ブイ方式が有るが¹⁾、両方式とも一定の周波数音を発信するピンガーを目標航走体に取り付けたピンガー方式を採用している。しかし、船舶や水中航走体の運動性能を容易に且つ安価に評価するためには、艤装工事を必要とするピンガー音ではなく船舶や水中航走体の水中放射雑音から航走軌跡を標定する必要がある。そこで、著者らは、その方法として、海中に設置した複数の音響センサーで同時刻に放射雑音を受波し、その相互相関処理から各センサーへの到達時間差 τ を求め航走体の航跡を標定する方法

^{2) 3) 4)} を検討した。

この方法の問題点は、予め航走体の初期位置を測定せねばならないこと及び雑音の放射開始絶対時間をセンサー受波データと同期させて記録せねばならないことである。しかし、実海面における航走体の運動性能評価試験では、航走体から計測システムに航走初期位置と雑音放射開始絶対時間を伝達することは難しく、この方式の評価試験への適用を困難にしている。

そこで、著者は、航走体の初期位置と雑音の放射開始絶対時間が未知であることを前提として、複数の音響センサーで同時刻に受波した放射雑音受波信号をサンプル信号に分割し、その相互相関処理により算出さ

れる到達時間差と「航走体位置が時間的に滑らかに変化する。」と仮定した第2階差による位置変動量の式に最小二乗法を適用することによって、航走体の航跡標定を行う方法を提案した。

本論文は、新方式のアルゴリズムを評価するためコンピュータによるシミュレーション試験を実施した結果について報告するものである。すなわち、コンピュータ上の試験海面（深度方向がZ軸）の三次元座標において、音響センサーの位置と航走体の航走速度及び進行方向を仮定し、その時の目標航走体の水中放射雑音をコンピュータにより模擬した。その結果、模擬水中放射雑音データから十分な精度で航走体の航跡を標定することが出来た。

ただし、実際の海面における性能評価試験で問題となる、実放射雑音からのS/N 比の高いトラッキング信号の抽出方法とドップラー補正法については、海上試験により収集した放射雑音を用いて、次の論文で詳細に報告する予定である。

2. 航走体の航跡標定の基本原理

<2.1> 航走体の位置標定方程式

図1に示すパッシブレレンジングシステムにおいて、水中を航走する航走体の位置 $P(x, y, z)$ と海底に設置した複数の音響センサーの位置 $S_1(x_1, y_1, z_1), S_2(x_2, y_2, z_2), S_3(x_3, y_3, z_3) \dots S_n(x_n, y_n, z_n)$ の関係はレンジをRとすると、次式によって表される²⁾。

$(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 = R_1^2 \dots (1)$

$(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2 = R_2^2 \dots (2)$

$(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2 = R_3^2 \dots (3)$

⋮

$(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2 + (z-z_n)^2 = R_n^2 \dots (4)$

ここで、航走体放射雑音の計測結果から各センサーまでの到達時間差τが求められたとすると、水中の音波伝搬速度をWとして到達時間差τとレンジRの関係は、次式が成り立つ。

$R_i - R_j = \tau_{ij} W \dots (5)$

三次元方程式を解くために図1に示す音響センサーと航走体の位置関係に、ニュートンラプソン法を適用し航走体の収束初期位置を $F_{ij}(x, y, z)$ と置くと、次式が得られる。

$F_{ij}(x, y, z) = R_i - R_j - \tau_{ij} W$ として
 $dF_{ij}(k) = ((x-x_i)/R_i - (x-x_j)/R_j)dx(k) + ((y-y_i)/R_i - (y-y_j)/R_j)dy(k) + ((z-z_i)/R_i - (z-z_j)/R_j)dz(k) \dots (6)$

ここで、

図1 パッシブレレンジングシステム概要図
Fig.1.The concept of the passive ranging system.

図2 二つの音響センサー受信波形 $x_1(t)$ と $x_2(t)$
Fig.2.Two different waveforms which were measured by the acoustic sensors, S_1, S_2 .

$A_{ij} = (x-x_i)/R_i - (x-x_j)/R_j$
 $B_{ij} = (y-y_i)/R_i - (y-y_j)/R_j \dots (7)$
 $C_{ij} = (z-z_i)/R_i - (z-z_j)/R_j$

(7)式をマトリックスで表示すると

$[dF(k)] = [A_{ij} \ B_{ij} \ C_{ij}] \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} \dots (8)$

これを $F = M \cdot dP$ とする。

dPは、収束計算における航走体の3次元位置変動量

$F = [dF(k)] \dots (9)$

$M = [A_{ij} \ B_{ij} \ C_{ij}] \dots (10)$

$dP = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} \dots (11)$

ここで、(11)式からdPをもとめるために、両辺に転置行列'Mをかける。

$'MF = 'MMdP$ より
 $dP = ('MM)^{-1} ('MF) \dots (12)$

(12)式より到達時間差から航走体の位置 $P(x, y, z)$ が求

められる。到達時間差 τ_{ij} と方程式解法の詳細については、付録において説明する。

＜2.2＞ 航走体放射雑音の到達時間差の検出原理

パッシブレンジングシステムで航走体の水中放射雑音から航走軌跡を標定するためには、＜2.1＞の(5)式で説明した放射雑音の各音響センサーまでの到達時間差 τ_{ij} を求める必要がある。すなわち、二つの音響センサーで受信された波形の一方が時間軸上でずれていれば、まったく同じ発音源から放出された音響波形でも、重ねて一致するとは限らない。このような場合、片方の波形の遅れ時間、すなわちラグを変えながらその重なり程度を調べると、類似度を遅れ時間の関数とすることにより、波形の相互相関性を知ることができる。さらに、遅れ時間差から目標の位置を推定することも可能となる⁷⁾⁸⁾。図2に目標からの放射雑音を二つの音響センサーで受信した波形と遅れ時間を示す。

＜2.2.1＞ 航走体放射雑音の相互相関

高速で水中を航走するUUV(Unmanned Undersea Vehicle)等の水中航走体からの放射雑音を水中に設置した二つの音響センサーで受信した場合を考える。この場合、二つの受信波形 $x_1(t)$ と $x_2(t)$ の振幅が異なるならば、それぞれパワーが等しくなるように振幅を正規化することによって、その違いを無視することにする。すなわち、振幅だけが異なる二つの波形は、片方を線型増幅するかまたは、線型減衰することによって一致するならば、同じ波形と見なすことにする⁹⁾。受信波形 $x_1(t)$ と $x_2(t)$ の相互相関関数 $E_{x_1x_2}(\tau)$ と相互相関係数 $C_{x_1x_2}(\tau)$ は次式で定義される¹⁰⁾。

$$E_{x_1x_2}(\tau) = \overline{x_1(t)x_2(t+\tau)} \quad \dots\dots(13)$$

$$C_{x_1x_2}(\tau) = \overline{x_1(t)x_2(t+\tau)} / \sqrt{\overline{x_1^2}} \sqrt{\overline{x_2^2}} \quad (14)$$

相互相関関数のFFT処理後のクロススペクトルを $K_{x_1x_2}(\omega)$ とすると、次式が成り立つ

$$E_{x_1x_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} K_{x_1x_2}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (15)$$

ただし、目標航走体の運動に伴い、音響センサーの受信する放射雑音に生ずるドップラー効果の影響は、本研究での航走体速度及び放射雑音周波数の範囲では非常に小さいことから無視した。

3. シミュレーションによる試験方法

シミュレーションによる試験方法は、試験条件の設定と理論式による目標航走体の位置標定からなる。

＜3.1＞ シミュレーションにおける試験条件

(1) 音響センサーの数と位置の設定

本シミュレーション試験において設定した音響センサーの数と位置は、次のとおりである。

音響センサー数は、6台で各音響センサーの位置は、次のとおり。

$S_1(0, 0, 0)$. $S_2(600, 0, 0)$. $S_3(0, 400, 0)$. $S_4(600, 400, 0)$. $S_5(-20, -20, -400)$. $S_6(640, -20, -400)$ とする。

ただし、三次元座標軸の原点は、水面下10mの位置とした。

(2) 目標航走体の進行方向と航走速度の設定

本研究では、問題を単純化するために、目標航走体は直線運動をするものとして、その進行方向を第1段階から第4段階まで4段階変化するものとした。

したがって、方向変化は、「く」字型の不連続変化を3回行う。航走速度は、第1段階が23.7kt、第2段階が20.4kt、第3段階が24.5kt、第4段階が26.9ktとした。

図3にX-Y平面上の各音響センサーの位置及び目標航走体の進行方向と航走速度を、図4にX-Z平面上の各音響センサーの位置及び目標航走体の進行方向と速度を示す。

図3 航走体の進行方向と音響センサーの位置 (X-Y平面図)
Fig.3. The advance direction of the underwater vehicle and the sensor's coordinate positions, (X-Y plane).

図4 航走体の進行方向と音響センサーの位置 (X-Z平面図)
Fig.4. The advance direction of the underwater vehicle and the sensor's coordinate positions, (X-Z plane).

(3) 目標航走体の模擬放射雑音の設定

従来の研究によれば^{(4) (11)} 目標航走体の模擬放射雑音は、船舶の発電機等の振動により船殻の鋼板が振動する場合、船殻の形状と材質によって決まる固有の振動数があり、その値によって水中放射雑音の中の最もエネルギーの大きな周波数帯域が決まる。その最もエネルギーが大きな放射雑音の周波数帯域は100Hz 以下にある。したがって、本研究では、その信号特性に近似した模擬信号を用いた。すなわち、周波数：60Hz正弦波を航走体が放射しながら航走するものとして放射雑音を模擬した。

目標航走体の模擬放射雑音は、周波数：60Hz正弦波音波伝搬速度：1500m/s とした。海水の深度方向の温度変化による音波伝搬への影響は本研究の対象とする測定レンジの長さが最大でも 1km以下であることから試験区域は均一音場と見なし無視できる。よって、音波の減衰係数を 10^{-2} dB/yd とした⁽¹²⁾。

図5に目標航走体模擬放射雑音生波形を示す。

図5 目標航走体模擬放射雑音波形
Fig.5. The model radiated noise waveform of the underwater vehicle.

<3.2> 理論式からの目標航走体の航跡標定試験

理論式による目標航走体の航跡標定は、航走体放射雑音の各音響センサーまでの到達時間差 τ の検出が基本となる。その検出手順図を図6に示す。

以下に、目標航走体の航跡標定手順を説明する。

- ① 6台の音響センサー S_1 から S_6 により目標航走体の航走放射雑音を計測する。
- ② 計測された航走体放射雑音の任意の計測時間 t における各音響センサーまでの到達時間差を相互相関処理(13)式から算出する。
- ③ 計測時間 t での放射雑音の各音響センサーまでの到達時間差 τ を(5)式に代入し、(1)～(4)式から、スラントレンジ R_1 から R_6 を求めて目標航走体の位置を算出する。
- ④ 全計測時間について①～③の処理を繰り返し、目標航走体の全航跡を標定する。

4. シミュレーション試験結果及び考察

<4.1> 目標航走体放射雑音計測結果

目標航走体が図5に示した模擬放射雑音を発生しながら図3及び図4に示す航走方向と速度で航走した場合に

合に<3.1>(1)に設置条件を示した各音響センサー S_1 から S_6 で計測した目標航走体放射雑音の波形を図7に示す。図7の結果は、計測時間180秒、縦軸は模擬放射雑音源波形の振幅を1とした相対値を示す。そこで、音響センサー S_1 から S_4 までは、海面下10mの位置にあると仮定し、波浪や音響の海面反射の影響は無いものとする。 S_5 から S_6 までは、海面下400mに設置したと仮定したので、それぞれに目標航走体の通過に伴う特徴ある波形形状を示している。

図6 模擬放射雑音の各音響センサーへの到達時間差と航跡標定手順
Fig.6. The detecting process of the time-delay difference for the model radiated noises and the running locus tracking of the underwater vehicle.

図7 音響センサーによる航走体模擬放射雑音受信波形
Fig.7. The radiated noise waveforms measured by the acoustic sensors. ($S_1 \sim S_6$).

<4.2> 相互相関処理による到達時間差検出結果

図7に示した目標航走体放射雑音計測結果から各音響センサーまでの放射雑音の到達時間差 τ を求めた結果の一例を図8及び9に示す。図8は、航走時間180秒間の音響センサー S_2 と S_6 までの目標航走体放射雑音の到達時間差であり、横軸は計測時間(秒)、縦軸は到達時間差(秒)である。図8中の色の濃淡は、相関係数の大きさを表す。また、図中に各計測時間における相関係数の最大値を結んだ線を黒の実線で示した。この実線上の計測時間における各到達時間差から目標航走体の位置を標定することが出来る。検出された実線上の到達時間差には、多少のバラツキが見られるが全体的には、各音響センサー間の到達時間差に良好な相関関係が見られることが分かる。図9は、音響センサー S_3 と S_6 までの目標航走体放射雑音の到達時間差である。この音響センサー間の相互相関処理による到達時間差の検出結果においても同様に良好な相関関係が得られた。同様に音響センサー S_1 から S_6 の内の2台の全組み合わせ ${}_6C_2$ 、 $6 \times 5 / 2 = 15$ 組について、到達時間差を求めた。その結果、いずれの組み合わせについても同様に良好な相関関係が見られた。

<4.3> 目標航走体放射雑音からの航跡標定結果

図8及び9に一例を示した目標航走体放射雑音の各音響センサーまでの到達時間差 τ についての15組の検出結果から目標航走体の航跡標定を行った。その結果を図10と11に示す。図10は目標航走体の航跡標定結果をX-Y平面図に表示したものである。その標定結果は、航走速度が24.5ktの第3段階では誤差が多少大きくなっている。これは、X-Z平面における旋回半径が大きいためによるものと思われる。23.7ktの第1段階、20.4ktの第2段階、26.9ktの第4段階では精度良く標定されている。

図11は、航跡標定結果をX-Z平面図に表示したものである。その標定結果は、航走速度が24.5ktの第3段階では誤差が多少大きくなっているが全体的には航跡は十分な精度で標定されている。

図10 目標航走体の航走軌跡標定結果 (X-Y平面図)
Fig.10. Simulated result of the running locus tracking of the underwater vehicle, (X-Y plane).

図8 音響センサー S_2 と S_6 間の放射雑音到達時間差検出結果
Fig.8. The detecting result of the time-delay difference for the model radiated noises by two acoustic sensors, S_2 , S_6 .

図9 音響センサー S_3 と S_6 間の放射雑音到達時間差検出結果
Fig.9. The detecting result of the time-delay difference for the model radiated noises by two acoustic sensors, S_3 , S_6 .

5. 結論

本研究において、コンピュータシミュレーションにより著者が提案するパッシブレンジングシステムの目標航走体航跡標定アルゴリズムの検証を行った。すなわち、目標航走体の模擬放射雑音を任意の位置に設置した複数の音響センサーで同時刻に計測し、その

図11 目標航走体の航走軌跡標定結果 (X-Z平面図)
Fig.11. Simulated result of the running locus tracking of the underwater vehicle, (X-Z plane).

音響信号の相互相関処理から、各音響センサーまでの到達時間差 τ を検出することによって、目標航走体の航跡を標定する方法について検討を行った。

その結果、次の事実が明らかになった。

目標航走体が60Hzの正弦波模擬雑音を放射しながら航走すると仮定し、試験海面の任意の位置に設置した6台の音響センサーで目標航走体の模擬放射雑音を計測し、その相互相関処理から、各音響センサーまでの到達時間差 τ を検出した結果、航走速度が変化しても精度良く、目標航走体の航跡が標定され、本研究のパッシブレンジングシステムの航跡標定アルゴリズムの有用性が検証された。

(平成11年12月6日、平成13年9月10日再受付)

文 献

(1) P. J. Enoch, "Performance Comparison of a Fixed and Portable Acoustic Signature Rang", Undersea Defence Technology Conference Proceedings pp. 576-577, 1995.
(2) P. H. Wilne, "Underwater Acoustic Positioning Systems", chapter. 5, Gulf Publish Company, 1983.
(3) Y. T. Chan, F. L. Jardine, "Target Localization and Tracking From Doppler-Shift Measurements", IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 15, no. 3, July 1990.
(4) 倉野雪光, "パッシブレンジングによる航走体放射からの到達時間差検出法" 平成11年度電気学会電子・情報・システム部門大会論文集, PP512~530.
(5) P. W. Schultheiss, "Estimation of Differential Doppler Shifts" J. Acoust. Soc. Am. vol. 66, no. 5, Nov 1979, pp. 1412-1419.
(6) W. B. Adams, J. P. Kuhn, W. P. Whyland, "Correlator Compensation Requirements for Passive Time-Delay Estimation with Moving Source or Receivers", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. 28, no. 2, pp. 158-168, April 1980
(7) E. R. Robinson, A. H. Quazi, "Effect of Sound-Speed Profile on Differential Time-Delay Estimation", J. Acoust. Soc. Am. vol. 77, no. 3, pp 1086-1090, March 1985.
(8) A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, "Digital Signal Processing", Prentice-Hall.
(9) D. F. Elliott, "Handbook of Digital Signal Processing Engineering Applications", Academic Press.
(10) 日野幹雄, 「スペクトル解析」, pp. 53, 朝倉書店
(11) R. J. ユーリック, 「水中音響の原理」, pp. 316-339, 共立出版
(12) 海洋音響研究会, 「海洋音響－基礎と応用－」, pp. 58-60, 1984
(13) 中川徹, 小柳義夫, 「最小二乗法による実験データ解析」, pp. 95-105, 東京大学出版会

付 録

1. 航跡標定手順及び方程式の解法

報告の中で使用する記号の定義は次のとおりである。

- $P(k)$: 航走体の kdt 時の3次元位置 ($k=1, 2, 3 \cdots N$)
 $dP(k)$: 航走体の kdt 時の3次元位置変動量
 S_i : 音響センサー S_i の位置
 R_i : 航走体と音響センサー S_i の距離 (=レンジ)
 $f(t)$: 航走体放射雑音信号
 $x(t)$: 音響センサーの航走体放射雑音受波信号
 W : 水中音波伝搬速度 [m/s]
 c : 水中音波減衰係数 [dB/m]
$$(x(t) = (R_i)^c f(t))$$

- Δt : サンプル間隔 (例, 0.001sec)
 m : サンプル数
 n : 音響センサーの数
 M : 音響センサーのペア数 ($= {}_n C_2$)
 ${}_n C_2$: n 個の内の2個の組合せ ($= n(n-1)/2$)
 $X(t)$: ドップラー補正後の音響センサーの航走体放射雑音受波信号
 $X(t)'$: 航走体放射雑音受波のFFT処理信号
 $\chi(t)$: 受波信号 $X(t)$ のサンプル信号
$$(x(t) = \chi_1(1dt) + \chi_2(2dt) + \cdots + \chi_i(idt) + \cdots + \chi_N(Ndt) = \chi_k(kdt))$$

 N : 受波信号内のサンプル信号の数
 dt : 受波信号の周波数分析間隔 (例, 1 sec)
 T : 全放射雑音計測時間 ($T=N \times dt=m \times \Delta t$)
 C_{ij} : $X_i(t)$ と $X_j(t)$ の相互相関係数
 Δd_{ij} : 相対相互相関係数
 Δw_{ij} : Δd_{ij} と $\Delta d_{ij(i+1)}$ の相関ズレ幅
 τ_{ij} : 到達時間差 ($\tau = \tau' + B_{ij}/W$)
 τ'_{ij} : 仮定到達時間差
 $\Delta \tau'_{ij}$: 仮定到達時間差変動量
 B_{ij} : 未知バイアス
 ΔB_{ij} : 未知バイアス変動量
 α : フィルターの重み
 $F(x, y, z)$: 航走体の収束初期位置
 k : 変数 ($k=1, 2, 3 \cdots (i-1), i, (i+1), \cdots N$)
 a : 変数 ($k=1, 2, 3 \cdots m$)

航跡標定手順及び方程式の解法を以下に示す。

本研究においては、始めに音響センサー受波信号 $x_n(t)$ の最初の i 個のサンプル信号 $\chi_{n1}(dt)$, $\chi_{n2}(dt) \cdots \chi_{ni}(dt)$ (例: $i=30$) を用いて、航走体の初期位置 $P(0)$ から idt 時間後の航走体位置 $P(i)$ までの dt 毎の点列航跡と未知バイアス B を計算する。

次に、求められた予期位置 $P(0)$ を含む航跡から、全放射雑音計測時間 T における到達時間差 τ を用いて航走体の位置 $P(N)$ までの点列航跡を求める。その原理を手順に従って、以下に説明する。

- (1) 全計測時間 T における航走体放射雑音 $f(t)$ を n 台の音響センサー S_n により計測する。
(2) 計測された受波信号 $x_n(t)$ は、航走体の任意に設定した初期位置を $P(x_0, y_0, z_0)$ ($= P(0)$), 全音響センサーの位置を $S_n(x_n, y_n, z_n)$ とすると、時刻 t でのレンジ $R_i(t) = |P(t) - S_i|$ において、航走体が発した放射雑音 $f(t)$ は、時刻 $(t + R_i(t)/W)$ で、音波の減衰係数を c (dB/m) と

すると、音響センサー S_i に届く、波形は、

$(R_i(t)) \circ f(t)$ となる。

ここで、 $t = t_1, t_2, \dots$ に対しては、

$(t_1 + R_i(t_1)/W), (R_i(t_1)) \circ f(t_1)$

$(t_2 + R_i(t_2)/W), (R_i(t_2)) \circ f(t_2)$

・

となる。この波形を改めてサンプリング間隔 Δt で分割しなおして、受波器の受信波としたものが受信信号 $x_i(t_1), x_i(t_2), x_i(t_3) \dots x_i(t_m)$ である。

- (3) n 台の音響センサーの内、各 2 台の組み合わせに対し、受信信号 $x_i(t), x_j(t)$ を読み込み、 A/D 変換する。

- (4) 受信信号 $x_i(t), x_j(t)$ を周波数分析間隔 dt 時間毎に N 個のサンプル信号 $\chi_{ik}(kdt), \chi_{jk}(kdt)$ に分割し FFT 処理する。

即ち計測時間 t は離散化されて $t = k \cdot dt$ ($k=1, 2, 3 \dots (i-1), i, (i+1), \dots N$) となる。

- (5) 航走雑音周波数帯域の上限値と下限値の値をバンドパスフィルター処理器に入力する。

- (6) 航走雑音周波数帯域の上限値 f_{min} Hz と下限値 f_{max} Hz の範囲で(4)で処理され記憶装置に収録された時間一周波数信号の全部についてバンドパスフィルター処理をする。

- (7) バンドパスフィルター処理された波形信号についてドップラー現象による時間伸縮率を求めて、ドップラー補正を行う。(文献 3 参照)

ただし、目標航走体の運動に伴い、音響センサーが受信する放射雑音に生ずるドップラー現象の影響は、本研究での航走体速度及び放射雑音周波数の範囲では非常に小さいことから無視した。

- (8) 3 台以上の受波器の内の各 2 台の組み合わせにおいて、各該ドップラー補正された 2 台の音響センサー S_i と S_j のサンプル信号 $\chi_{ik}(kdt), \chi_{jk}(kdt)$ を FFT 処理した後の時間一周波数サンプル信号 $\chi_{ik}(kdt)'$ と $\chi_{jk}(kdt)'$ のクロススペクトルから受信波形 $x_i(t)$ と $x_j(t)$ の相互相関係数 $C_{ij}(\tau)$ を(15)式より dt 時間毎に N 個算出する¹⁰⁾。

- (9) 相互相関係数を相対値 Δd_{ij} で表示する。

$\Delta d_{ij} = \text{real}(C_{ij}) / \text{real}(C_{ijn_{max}})$

ただし、 $\text{real}(C_{ijn_{max}})$ は $C_{ijk}(kdt)$ の実数部の最大値

- (10) 本研究では航走体放射雑音からの航跡標定装置及び方法は、トリガー機能が無いことを前提としているので音響センサーの受信信号上の計測開始同期絶

対時間 t_0 が未知であることから航走体の初期位置 $P(0)$ は、未知数となる。したがって、航走体初期位置 $P(0)$ を任意に仮定した未知の初期値とする。

- (11) 最初に仮定到達時間差 τ' を算出する。その算出方法を次に示す。

相対相互相関係数 Δd_{ij1} 信号を読み込んで、放射雑音計測開始時間 t_0 での音響センサー S_i と

S_j の航走体放射雑音到達時間差を 0 とし、サンプル信号 $\chi_{i1}(1dt)$ と $\chi_{j1}(1dt)$ について一番目の相

対相互相関係数 Δd_{ij1} を求める。次に $\chi_{i2}(2dt)$ と $\chi_{j2}(2dt)$ について 2 番目の相対相互相関係数

Δd_{ij2} を計算し、更に、 Δd_{ij1} と Δd_{ij2} のズレ幅 Δw_{ij1} を求める。同様に、2 番目の相対相互

相関係数 Δd_{ij2} と 3 番目の相対相互相関係数 Δd_{ij3} の相関からズレ幅 Δw_{ij2} 、さらに Δd_{ij3} と

Δd_{ij4} の相関からズレ幅 Δw_{ij3} 、これを順次、 Δd_{ij1} と $\Delta d_{ij(i+1)}$ のズレ幅 Δw_{ij1} まで算出

して仮定到達時間差曲線 $\tau'_{ij} = w_{ijk}(kdt)$ が求められる。ただし、ここでは $k=1, 2, \dots i$ まで。

- (12) 仮定到達時間差 τ' からレンジ R_i を求める方法について以下に説明する。

仮定到達時間差 τ'_{ij} は、 $n(n-1)/2$ 組のセンサーペア ${}_nC_2 = M_{ij}$ に対して求まる。

ここで、受信信号上の時間 t における仮定到達時間差 τ'_{ij} に未知バイアス B_{ij} を付加することによって、次式が成り立つ。

$$\frac{|R_i(t)| - |R_j(t)| - B_{ij}}{W} = \tau'_{ij}(t)$$

..... (付2)

ただし、 B_{ij} は、 t には依存しない定数とする。

ここで、時間的に密なサンプリングデータ(計測時間 t)にそのまま(付2)をあてはめるのは、計算時間の点から得策でなく、適当な受信信号分析間隔 dt 毎に航走体放射雑音受信信号を N 個のサンプル信号に分割し解析に用いる。即ち計測時間 t を離散化して、 $t = k \cdot dt$ ($k=1, 2, 3, \dots N$) とおき(付2)を書き直す。

$$|P(k) - S_i| - |P(k) - S_j| = \tau'_{ij}(k)W + B_{ij} \dots \dots \dots (付3)$$

ここで、航走体の進路上の位置 $P(k)$ は、微小時間 $(k-1)dt$ から $(k+1)dt$ 間に滑らかに変化するものと仮定すると次式が成り立つ。

$$\alpha(P(k-1) - 2P(k) + P(k+1)) = 0 \dots (付4)$$

航走体の位置 $P(k)$ を求めるために、(付3)(付4)式の $k=1, 2, \dots N$ について連立方程式を立てて解く。ここで、未知数 $P(k)$ と B_{ij} の数は、

$3N + {}_n C_2$ で、式の数 ${}_n C_2 N + 3(N - 2)$ となる。

$n = 3$ のとき、未知数の数は $3N + 3$ 、式の数 $3N + 3(N - 2) = 6(N - 1)$ である。

よって、 $N \geq 3$ ならば式の数 $\geq$ 未知数の数となり、(13)式から未知数が明らかとなる。

また、 $n = 4$ のときには、未知数の数は、 $3N + 6$ 、式の数 $6N + 3(k - 2)$ となる。よって、 N を大きく取る場合、(付4)を使わなくても式の数 $\geq$ 未知数の数より多くなり最小二乗法が適用できる。

(付3)式より次式が定義できる。

$$F_{ij}(k) = |R_i| - |R_j| - \tau_{ij}'(k)W - B_{ij} \quad \dots (付5)$$

(13) 航走体の位置変動量 $dP(k)$ と未知バイアス変動量 ΔB_{ij} を計算する。その方法を次に説明する。

(付4)式を次式に書き直す。

$$\begin{aligned} x(k) &= \alpha(x(k-1) - 2x(k) + x(k+1)) \\ y(k) &= \alpha(y(k-1) - 2y(k) + y(k+1)) \quad \dots (付6) \\ z(k) &= \alpha(z(k-1) - 2z(k) + z(k+1)) \end{aligned}$$

(付6)式を全微分する。

$$\begin{aligned} dx(k) &= \alpha dx(k-1) - 2\alpha dx(k) + \alpha dx(k+1) \\ dy(k) &= \alpha dy(k-1) - 2\alpha dy(k) + \alpha dy(k+1) \quad (付7) \\ dz(k) &= \alpha dz(k-1) - 2\alpha dz(k) + \alpha dz(k+1) \end{aligned}$$

(付6)式を全微分すると仮定到達時間差 τ' は、消去されて次式となる。

$$\begin{aligned} dF(k) &= \frac{(P(k) - S_i)dP(k)}{|P(k) - S_i|} - \frac{(P(k) - S_j)dP(k)}{|P(k) - S_j|} - \Delta B_{ij} \\ dF(k) &= ((x-x_i)/R_i - (x-x_j)/R_j) dx(k) \\ &\quad + ((y-y_i)/R_i - (y-y_j)/R_j) dy(k) \\ &\quad + ((z-z_i)/R_i - (z-z_j)/R_j) dz(k) \\ &\quad - \Delta B_{ij} \quad \dots (付8) \end{aligned}$$

ここで (付6)式と (付8)式を解く方法としてニュートンラプソン法による非線形最小二乗法を用い、 $dx(k), dy(k), dz(k)$ 及び ΔB_{ij} を決め航走体の位置 $P(k)$ を決定する。その方法を次に説明する。

(1)から(12)までの処理で求められた $dx(k), dy(k), dz(k)$ 及び ΔB_{ij} を基に、初期位置 P_0 について順次、(付9)式のごとく更新し求められる航走体の3次元位置変動量 dP が最小になるまで繰り返すことによって、 dP の最小値である航走体の初期位置 $P(0)$ を決定する。同様に $P(1)$ から idt 時間後の位置 $P(i)$ までを決定する。

$$\begin{aligned} x(k)_{a+1} &= x(k)_a + dx(k)_a \\ y(k)_{a+1} &= y(k)_a + dy(k)_a \quad \dots (付9) \\ z(k)_{a+1} &= z(k)_a + dz(k)_a \end{aligned}$$

ただし $k = 1, 2, 3, \dots, i$

$$a = 1, 2, 3, \dots, m$$

(14) 求められた航走体初期位置 $P(x_0, y_0, z_0)$ と真の到達時間差 τ 及び既に確定している $\Delta B_{ij} = 0$ より、航走体の $(i+1)dt$ 時間後の位置 $P(i+1)$ から $P(N)$ までの点列航跡を決定する方法を以下に説明する。

求められた航走体位置 $P(x_i, y_i, z_i)$ を $P(i)$ として、 $P(i+1) = 2P(i) - P(i-1)$ とする。

次に (付8)式より次式を得る。

$$dF(k) = A_{ij}dx + B_{ij}dy + C_{ij}dz \quad \dots (付10)$$

ここで、

$$\begin{aligned} A_{ij} &= (x-x_i)/R_i - (x-x_j)/R_j \\ B_{ij} &= (y-y_i)/R_i - (y-y_j)/R_j \\ C_{ij} &= (z-z_i)/R_i - (z-z_j)/R_j \end{aligned}$$

ここで、 $dF(k) = -F(k)$ であるから

$$\begin{bmatrix} dF(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ij} & B_{ij} & C_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} \quad (付11)$$

これを $F = M \cdot dP$ とする。

$$F = \begin{bmatrix} dF(k) \end{bmatrix} \quad \dots (付12)$$

$$M = \begin{bmatrix} A_{ij} & B_{ij} & C_{ij} \end{bmatrix} \quad \dots (付13)$$

$$dP = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} \quad \dots (付14)$$

(付14)式から dP をもとめるために、両辺に転置行列 ${}^tM$ をかける。

$${}^tMF = {}^tMMdP \text{ より}$$

$$dP = ({}^tMM)^{-1} ({}^tMF) \quad \dots (付15)$$

(15) 二乗平均残差 $(\sqrt{\sum dF(k)^2 / S_{ij}})$ を計算する。

(16) 残差が前回の残差と変わらなかつたら終了する。

(17) $M = \begin{bmatrix} A_{ij} & B_{ij} & C_{ij} \end{bmatrix}$ を計算する。

(18) $dP = ({}^tMM)^{-1} ({}^tMF)$ を計算する。

(19) $P(k)_{a+1} = P(k)_a + dP(k)_a$ とする。

(14)へ戻る。

(20) 残差が前回の残差と変わらなかつたら終了する。

倉野 重光

(正員) 1948年生。1977年東北大学大学院工学研究科資源工学専攻博士課程修了。

現在、防衛庁技術研究本部第5研究所主任研究官。水中武器及び水中音響に関する計測制御技術の研究に従事。工学博士、電気学会、日本音響学会、IEEE、各会員。