3点検出による近方場定常不規則音源の 3次元位置推定[†]

佐々木 公 男*・平 田 克 己**

3D-Localization of A Stationary Random Acoustic Source in Near-Field
by Using 3 Point-Detectors

Kimio SASAKI* and Katsumi HIRATA**

For the purpose of developing refined devices for environmental recognition in robotics, a practical method for 3D-localization of a stationary random acoustical source in near-field is proposed by newly introducing 3 fixed-detectors. By using two pairs of estimated auto- and cross-spectra of signals detected simultaneously at 3 fixed detectors, two sets of information about difference in propagation distances and the amplitude attenuation of wave propagation are derived in such a manner that the derivation is independent of the shape of power spectra of detected random signals so as to be applicable to any stationary random acoustical source and additive corrupting noises at detectors are cancelled out as completely as possible. Then, by combining these information with the geometric relation of signal detection, the source position in 3D-space is estimated. After the principle of the proposed 3D-localization and the required conditions being made clear, 3D-distribution area of the position estimate is theoretically evaluated as concentration ellipsoid, based on the sampling variations of estimated spectra, and a simple method of evaluating the 3D-distribution or localizable area with prescribed relative errors is derived from the maximum length of major axes of the ellipsoid. To show the effectiveness of the theoretical results and make clear the influence of the source range, SNR at detection and spatial distance between detectors on the final source distribution or localizable area, numerical analyses are carried out by changing them parametrically, the result of which illustrate the effectiveness as well as fundamental characteristics of the proposed method under practical circumstances.

Key Words: 3 point-detection, 3D-localization, stationary random acoustic source, spherical wave, expected source distribution area

1. はじめに

我々人間の聴覚は、パーティー会場や機械工場などのような騒音中でも対象音源の位置や音を聴きとる能力をもっている。この聴覚系の優れた聴取能力をロボットに持たせることができれば、有用なロボットの環境認識システムが構築できるものと考えられる。

このような音源の3次元定位に資する研究には、岡田等による3マイクロフォン系による3次元音源定位と音声分離¹⁾、安藤等による時空間勾配法に基づく3次元音源定位センサシ

ステム²⁾、などがある。これらは主として発話者の定位に応用されていることもあって、いずれも確定的信号を対象とし、応用上不可欠な観測雑音の影響が考慮されていない。そのため、騒音中での不規則音源定位への適用はきわめて困難なのである。

著者等は、検出器の付加的回転を伴う両耳聴取法による近方場定常不規則音源の3次元位置推定法を提案したが^{3), 4)}、ロボット系へ応用する場合には、マイクロフォンを固定し、各点で同時に信号を受信・解析する方が簡便である。

一般に、近方場において2点検出法で取得可能な情報は、音源・マイクロフォン間の2距離である⁵⁾。それゆえ、平面上の定位はできるが、3次元の定位はできない。

そこで本論文では、検出器を1個加え、計3個のマイクロフォンを固定して用いる、3点検出法を導入した近方場定常不規則音源の3次元位置推定法を提案し、その原理と種々の条件下での位置推定精度の理論数値解析の結果を報告する。

以下、提案手法の前提条件明確化の後、推定原理の定式化、推定値の統計的性質の理論的評価を行ない、これに基づき推

[†] 第36回計測自動制御学会学術講演会で発表(1997・7)

* 筑波大学構造工学系 つくば市天王台1-1-1

** 筑波大学大学院工学研究科 つくば市天王台1-1-1

* Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba, Tsukuba

** Doctoral Program of Engineering, University of Tsukuba, Tsukuba

(Received September 22, 1997)

(Revised April 23, 1998)

定値の分布領域を数値的に評価することによって、本手法の有効性を理論的に明らかにする。

2. 3次元位置推定原理

2.1 幾何学的配置と前提条件

本手法は、いわば3点測距法により音源の位置推定を行うものであり、以下対象音源は単一とする。Fig. 1に点音源Pと検出器の幾何学的配置を示す。直立水平面にX-Y座標をとり、音源Pから放射される Gauss 性定常不規則信号をX-Y平面上で原点を重心とする、一辺2dの正三角形の頂点 M_1, M_2, M_3 に配置した3検出器で受信する。その3つの受信信号から、y軸上 M_3 点で検出した信号を共有する、2組の2信号を自己および相互スペクトル解析した結果から、音源Pの極座標 (r_0, ϕ, θ) を、推定することが本研究の目的である。ここで、次の仮定を置く。

- ① 波動の伝搬は球面的である。
 - ② 信号受信時に加法的ノイズが重畳し、それらは相互に無相関な定常 Gauss 的で音源信号とは独立で平均値0、同一パワースペクトルを持つ。
 - ③ 音源信号とノイズのパワースペクトルはいずれも十分滑らかで、その最狭ピークの半値幅の逆数に比べて観測データ長は十分に長い。
- ②の Gauss 性の仮定とパワースペクトルの同一性は、必ずしも本質的ではないが実際の状況を反映したものであり、③はB-T法による高精度パワースペクトル推定の可能性を意味する。

上記仮定の下においては、各検出器における観測信号は、次式で表せる。

$$x_i(t) = \frac{1}{r_i} s(t - D_i) + n_i(t), \quad i = 1, 2, 3. \quad (1)$$

ここで $s(t)$ は音源信号、 $n_i(t)$ は観測加法ノイズであり、いずれも平均値0の定常正規信号で互いに無相関、つまり

$$E[s(t)] = 0, \quad E[n_i(t)] = 0,$$

$$E[s(t + \tau)n_i(t)] = 0,$$

$$E[n_i(t + \tau)n_j(t)] = 0,$$

Fig. 1 Geometry of signal detection

$$i, j = 1, 2, 3, \quad i \neq j, \quad (2)$$

とする。ここで $E[\cdot]$ は集合平均演算を表す。また、 r_i と D_i は、それぞれ音源と検出器間の距離および伝搬遅れ時間を表す。音速を c_0 とした場合、伝搬距離差 r_d は、

$$r_{d_i} = r_3 - r_i = c_0(D_3 - D_i), \quad i = 1, 2, \quad (3)$$

と表される。式(2)、(3)より、 $x_i(t)$ の自己パワースペクトルおよび相互パワースペクトルは、 $s(t)$ 、 $n(t)$ の自己パワースペクトル Φ_{ss} 、 Φ_{nn} を用いて、それぞれ次のように表される。

$$\Phi_{x_i x_i}(f) = \frac{1}{r_i^2} \Phi_{ss}(f) + \Phi_{nn}(f), \quad (4)$$

$$\Phi_{x_i x_j}(f) = \frac{1}{r_i r_j} \Phi_{ss}(f) \exp(-j2\pi f(D_i - D_j)), \quad (5)$$

$$i, j = 1, 2, 3.$$

以上のことを踏まえて、次に伝搬距離差と振幅減衰情報の抽出法と3次元位置推定法について述べる。

2.2 3次元位置推定原理

上述のように、音源信号と加法ノイズがいずれも平均値0の Gauss 性定常信号であり互いに無相関であるので、相互パワースペクトルがノイズの影響を受けずに精度良く推定できる。そこで、伝搬距離差 r_d は、相互パワースペクトルの位相の、周波数に対する傾きを用いて次式のように推定できる。

$$\hat{r}_{d_i}(f) = \hat{r}_3 - \hat{r}_i = \frac{c_0}{2\pi f} \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im} [\hat{\Phi}_{x_i x_3}(f)]}{\text{Re} [\hat{\Phi}_{x_i x_3}(f)]} \right\}. \quad (6)$$

仮定③から $\hat{\Phi}_{x_i x_3}(f)$ の位相は、周波数 f に関して滑らかに変化するが、実際に $\tan^{-1}\{\cdot\}$ の計算を行うと、 2π モードの値しか求まらない。そこで、必要に応じて位相のアンラップによりこれを周波数 f の周りで局所的に連結し、その傾きから伝搬距離差 r_{d_i} を推定する。

振幅減衰情報 B は、各受信信号の自己パワースペクトルの差を相互パワースペクトルの絶対値で規格化した、

$$\hat{B}_i(f) = \frac{\hat{\Phi}_{x_i x_i}(f) - \hat{\Phi}_{x_3 x_3}(f)}{|\hat{\Phi}_{x_3 x_3}(f)|} = \frac{\hat{r}_3^2 - \hat{r}_i^2}{\hat{r}_3 \hat{r}_i}, \quad (7)$$

によって抽出できる。この量は自己パワースペクトルの差を取り、加法ノイズのパワースペクトルを相殺し、相互パワースペクトルの絶対値で規格化しているため、結果的に伝搬距離 r_3 と r_i にのみ依存したものになる。それゆえ式(6)、(7)を連立して解けば、2組の距離 $\hat{r}_3$ 、 $\hat{r}_i$ ($i = 1, 2$)が求まる。そこで2組の $\hat{r}_3$ の算術平均を用いることにより、 r_3 に関してはさらに高精度の情報抽出が期待できる。

また、Fig. 1に示した幾何学的関係から次式が成立する。

$$r_1^2 + r_2^2 = 2r_0^2 + \frac{4\sqrt{3}}{3} r_0 d \sin \theta \sin \phi + \frac{8}{3} d^2, \quad (8)$$

$$r_1^2 - r_2^2 = 4r_0 d \sin \theta \cos \phi, \quad (9)$$

$$r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 = 3r_0^2 + 4d^2. \quad (10)$$

式(6)、(7)を連立して求めた $\hat{r}_1$ 、 $\hat{r}_2$ 、 $\hat{r}_3$ を式(8)~(10)に代入

し r_0, ϕ, θ について解けば、求める推定値 $\hat{r}_0, \hat{\phi}, \hat{\theta}$ は、

$$\hat{r}_0 = \frac{1}{3} \left\{ \frac{\hat{r}_{d1}^2 \hat{J}_1^2}{\hat{B}_1} + \frac{\hat{r}_{d2}^2 \hat{J}_2^2}{\hat{B}_2} - \hat{r}_3^2 - 4d^2 \right\}^{1/2}, \quad (11)$$

$$\hat{\phi} = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{3} \hat{J}_1 \hat{J}_2}{\hat{r}_{d2}^2 \hat{B}_1 \hat{J}_1 - \hat{r}_{d1}^2 \hat{B}_2 \hat{J}_2} \times \left(\hat{r}_0^2 + \frac{4}{3} d^2 - \hat{r}_3^2 \right) \right\}, \quad (12)$$

$$\hat{\theta} = \sin^{-1} \left[\frac{1}{4\hat{r}_0 d} \left\{ 3 \left(\hat{r}_0^2 + \frac{4}{3} d^2 - \hat{r}_3^2 \right)^2 + \left(\frac{\hat{r}_{d2}^2 \hat{B}_1 \hat{J}_2 - \hat{r}_{d1}^2 \hat{B}_2 \hat{J}_1}{\hat{B}_1 \hat{B}_2} \right)^2 \right\}^{1/2} \right], \quad (13)$$

となる。但し、

$$I_i = B_i^2 + 4 + 2\sqrt{B_i^2 + 4}, \\ J_i = \sqrt{B_i^2 + 4} + 2, \quad i = 1, 2. \quad (14)$$

以上が、単一周波数 f に近い波動を利用した3点検出法による3次元位置推定の基本原理であり、相互パワスペクトルを関連2信号の自己パワスペクトルの積のルートで正規化したコヒーレンス関数の絶対値が1に近い、信号対雑音比 (SNR) の良い周波数の選定により良好な推定が期待できる。

そこで、式 (6), (7) の代わりに、仮定③より受信信号のスペクトル間の線形従属性の強い、中心周波数 f_0 の帯域 $B_H = [f_l, f_h]$ にわたってこれらを積分した、

$$\hat{r}_{di}(f_0) = \frac{1}{B_H} \int_{f_l}^{f_h} \hat{r}_{di}(f) df, \quad (15)$$

$$\hat{B}_i(f_0) = \frac{1}{B_H} \int_{f_l}^{f_h} \hat{B}_i(f) df, \quad (16)$$

を用いればより高精度な推定が期待できる。

2.3 スペクトル推定値の統計的性質

B-T(Blackman-Tukey)法で推定される自己および相互パワスペクトルの1次、2次の統計的性質に関して、観測時間 T が $x_i(n), x_j(n)$ の相関時間に比べて十分に長い場合には、以下のような性質が知られている⁶⁾。

$$E[\hat{\Phi}_{x_i x_j}(f)] = \Phi_{x_i x_j}(f) + O(1/T), \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[\text{Re}[\hat{\Phi}_{x_i x_j}(f)]] \\ = C[\Phi_{x_i x_i}(f)\Phi_{x_j x_j}(f) + \text{Re}^2[\Phi_{x_i x_j}(f)] \\ - \text{Im}^2[\Phi_{x_i x_j}(f)]/2 + O(1/T)], \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[\text{Im}[\hat{\Phi}_{x_i x_j}(f)]] \\ = C[\Phi_{x_i x_i}(f)\Phi_{x_j x_j}(f) + \text{Im}^2[\Phi_{x_i x_j}(f)] \\ - \text{Re}^2[\Phi_{x_i x_j}(f)]/2 + O(1/T)], \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}[\text{Re}[\hat{\Phi}_{x_i x_j}(f)], \text{Im}[\hat{\Phi}_{x_i x_j}(f)]] \\ = C \text{Re}[\Phi_{x_i x_j}(f)] \text{Im}[\Phi_{x_i x_j}(f)] + O(1/T), \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}[\hat{\Phi}_{x_i x_i}(f), \hat{\Phi}_{x_j x_j}(f)] \\ = C|\Phi_{x_i x_j}(f)|^2 + O(1/T), \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}[\hat{\Phi}_{x_i x_i}(f), \text{Re}[\hat{\Phi}_{x_i x_j}(f)]] \\ = C \Phi_{x_i x_i}(f) \text{Re}[\Phi_{x_i x_j}(f)] + O(1/T), \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}[\hat{\Phi}_{x_i x_i}(f), \text{Im}[\hat{\Phi}_{x_i x_j}(f)]] \\ = C \Phi_{x_i x_i}(f) \text{Im}[\Phi_{x_i x_j}(f)] + O(1/T), \end{aligned} \quad (23)$$

但し、 $E[\cdot]$ は期待値、 $\text{Var}[\cdot]$ は分散、 $\text{Cov}[\cdot]$ は共分散を示す。 $\text{Re}[\cdot], \text{Im}[\cdot]$ は、それぞれ複素数の実部、虚部を表し、 C は平滑化ラグ窓のエネルギーと観測データ長の比で、

$$C = \frac{\int_{-1/2\Delta t}^{1/2\Delta t} |W(f)|^2 df}{T} = \frac{\Delta t \sum_{m=-M}^M w^2(m)}{T} \quad (24)$$

と表され、B-T法における推定値の変動を評価する際の基本的なパラメータである。

3. 推定精度の理論的解析

3.1 推定精度の理論的定式化

ここでは、まず伝搬距離差 r_d 、および振幅減衰情報 B の推定誤差を求め、その結果を用いて距離、方位の推定値 $\hat{r}_0, \hat{\phi}, \hat{\theta}$ の推定誤差を導く。その際、2.1で述べた仮定②、③からパワスペクトル推定値のバイアスは無視できる。

伝搬距離差の推定値 $\hat{r}_d$ は、式 (6) で表され、これを真値 r_d のまわりでテーラー展開し線形近似すると、

$$\delta \hat{r}_{di} = -\frac{c_0}{2\pi f} \frac{\text{Re}[\Phi_{3i}] \delta \text{Im}[\hat{\Phi}_{3i}] - \text{Im}[\Phi_{3i}] \delta \text{Re}[\hat{\Phi}_{3i}]}{|\Phi_{3i}|^2}, \quad (25)$$

となる。ここで $\delta \hat{A} = \hat{A} - A$ と定義する。式 (25) の集合平均をとれば、②、③の条件から相互パワスペクトル推定値 $\hat{\Phi}_{3i}$ のバイアスは無視でき、したがってその実部、虚部のバイアスも無視できるので、それらの真値からの偏差 $\delta \text{Im}[\hat{\Phi}_{3i}]$ 、 $\delta \text{Re}[\hat{\Phi}_{3i}]$ の集合平均は無視でき、その結果、 $\hat{r}_{di}$ のバイアスは無視できることになる。つまり、

$$E[\delta \hat{r}_{di}] \cong 0. \quad (26)$$

また、式 (25) を2乗したものの集合平均に、2.3で記した自己及び相互パワスペクトルの平滑化スペクトルの統計的性質を用いれば、

$$\text{Var}[\hat{r}_{di}] = C \left(\frac{c_0}{2\pi f} \right)^2 \frac{\Phi_{ii} \Phi_{33} - |\Phi_{3i}|^2}{2|\Phi_{3i}|^2}, \quad (27)$$

を得る。ここで、 C は平滑化窓のエネルギーとデータ長の比で決まる定数である。

また、振幅減衰情報の分散 $\text{Var}[\hat{B}_i(f)]$ 、さらに共分散 $\text{Cov}[\hat{r}_{di}, \hat{r}_{dj}]$ 、 $\text{Cov}[\hat{B}_i, \hat{B}_j]$ 、 $\text{Cov}[\hat{B}_i, \hat{r}_{di}]$ 、 $\text{Cov}[\hat{r}_{di}, \hat{B}_j]$ についても同様な操作を行なうことにより、次の式を得る。

$$\begin{aligned} \text{Var}[\hat{B}_i] = C \left[\frac{\Phi_{ii}^2 + \Phi_{33}^2 - 2|\Phi_{3i}|^2}{|\Phi_{3i}|^2} - \frac{3(\Phi_{ii} - \Phi_{33})^2}{2|\Phi_{3i}|^2} \right. \\ \left. + \frac{(\Phi_{ii} - \Phi_{33})^2 \Phi_{ii} \Phi_{33}}{2|\Phi_{3i}|^4} \right], \end{aligned} \quad (28)$$

$$\text{cov}[\hat{r}_{di}, \hat{r}_{dj}] = \left(\frac{c_0}{2\pi f} \right)^2 \frac{C}{2|\Phi_{3i}|^2 |\Phi_{3j}|^2}$$

$$\begin{aligned} & \times \{ \text{Re}[\Phi_{3i}] \text{Re}[\Phi_{3j}] (\Phi_{33} \text{Re}[\Phi_{ij}] - \text{Re}[\Phi_{3j} \Phi_{3i}]) \\ & - \text{Re}[\Phi_{3i}] \text{Im}[\Phi_{3j}] (\Phi_{33} \text{Im}[\Phi_{ij}] + \text{Im}[\Phi_{3j} \Phi_{3i}]) \\ & - \text{Im}[\Phi_{3i}] \text{Re}[\Phi_{3j}] (\Phi_{33} \text{Im}[\Phi_{ij}] + \text{Im}[\Phi_{3j} \Phi_{3i}]) \\ & + \text{Im}[\Phi_{3i}] \text{Im}[\Phi_{3j}] (\Phi_{33} \text{Re}[\Phi_{ij}] + \text{Re}[\Phi_{3j} \Phi_{3i}]) \}, \\ & \times \{ (r_i^2 + r_3^2) \text{SNR} + r_i^2 r_3^2 \}, \quad (34) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}[\hat{B}_i, \hat{B}_j] &= C \left[\frac{1}{|\Phi_{3i}| |\Phi_{3j}|} (|\Phi_{ij}|^2 - |\Phi_{3i}|^2 - |\Phi_{3j}|^2 + \Phi_{33}^2) \right. \\ & - \frac{\Phi_{22} - \Phi_{33}}{|\Phi_{3i}| |\Phi_{3j}|^3} \{ \text{Re}[\Phi_{3j}] \text{Re}[\Phi_{ij} \Phi_{3i}] \\ & + \text{Im}[\Phi_{3j}] \text{Im}[\Phi_{ij} \Phi_{3i}] - \Phi_{33} |\Phi_{3j}|^2 \} \\ & - \frac{\Phi_{ii} - \Phi_{33}}{|\Phi_{3j}| |\Phi_{3i}|^3} \{ \text{Re}[\Phi_{3i}] \text{Re}[\Phi_{ji} \Phi_{3j}] \\ & + \text{Im}[\Phi_{3i}] \text{Im}[\Phi_{ji} \Phi_{3j}] - \Phi_{33} |\Phi_{3i}|^2 \} \\ & + \frac{(\Phi_{ii} - \Phi_{33})(\Phi_{jj} - \Phi_{33})}{2 |\Phi_{3i}|^3 |\Phi_{3j}|^3} \\ & \times \left\{ \text{Re}[\Phi_{3i}] \text{Re}[\Phi_{3j}] (\Phi_{33} \text{Re}[\Phi_{ij}] + \text{Re}[\Phi_{3j} \Phi_{3i}]) \right. \\ & + \text{Re}[\Phi_{3i}] \text{Im}[\Phi_{3j}] (\Phi_{33} \text{Im}[\Phi_{ij}] + \text{Im}[\Phi_{3j} \Phi_{3i}]) \\ & + \text{Im}[\Phi_{3i}] \text{Re}[\Phi_{3j}] (\Phi_{33} \text{Im}[\Phi_{ij}] + \text{Im}[\Phi_{3j} \Phi_{3i}]) \\ & \left. \left. + \text{Im}[\Phi_{3i}] \text{Im}[\Phi_{3j}] (\Phi_{33} \text{Re}[\Phi_{ij}] - \text{Re}[\Phi_{3j} \Phi_{3i}]) \right\} \right], \quad (30) \end{aligned}$$

$$\text{Cov}[\hat{B}_i, \hat{r}_{d_i}] = 0, \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}[\hat{r}_{d_i}, \hat{B}_j] &= -C \frac{c_0}{2\pi f} \\ & \times \left[\frac{1}{|\Phi_{3i}|^2 |\Phi_{3j}|} (\text{Re}[\Phi_{3i}] \text{Im}[\Phi_{ji} \Phi_{3j}] \right. \\ & - \text{Im}[\Phi_{3i}] \text{Re}[\Phi_{ji} \Phi_{3j}]) \\ & - \frac{\Phi_{jj} - \Phi_{33}}{2 |\Phi_{3i}|^2 |\Phi_{3j}|^3} \{ \Phi_{33} \text{Im}[\Phi_{ij}] \text{Re}[\Phi_{3i} \Phi_{3j}] \\ & + \Phi_{33} \text{Re}[\Phi_{ij}] (\text{Re}[\Phi_{3i}] \text{Im}[\Phi_{3j}] \\ & - \text{Im}[\Phi_{3i}] \text{Re}[\Phi_{3j}]) \\ & + \text{Im}[\Phi_{3j} \Phi_{3i}] \text{Re}[\Phi_{3i} \Phi_{3j}] \\ & \left. - \text{Re}[\Phi_{3j} \Phi_{3i}] \text{Im}[\Phi_{3i} \Phi_{3j}] \} \right], \quad (32) \end{aligned}$$

以上のように導出した式 (27)~(32) の分散・共分散に式 (4), (5) の自己および相互パワースペクトル, ならびに幾何学的関係式 (8)~(10) を代入すれば, 以下の評価式を得る.

$$\text{Var}[\hat{r}_{d_i}] = C \left(\frac{c_0}{2\pi f} \right)^2 \frac{(r_i^2 + r_3^2) \cdot \text{SNR} + r_i^2 r_3^2}{2 \text{SNR}^2}, \quad (33)$$

$$\text{Var}[\hat{B}_i] = \frac{C (r_i^2 + r_3^2)^2}{2 r_i^2 r_3^2 \text{SNR}^2}$$

$$\text{Cov}[\hat{r}_{d_i}, \hat{r}_{d_j}] = C \left(\frac{c_0}{2\pi f} \right)^2 \frac{r_3^2}{2 \text{SNR}}, \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}[\hat{B}_i, \hat{B}_j] &= C \left[\frac{r_i(r_3^2 - r_j^2)}{r_j r_3^2} + \frac{r_j(r_3^2 - r_i^2)}{r_i r_3^2} \right. \\ & + \frac{r_i r_j}{r_3^2} - \frac{r_3^2}{r_i r_j} + \frac{1}{\text{SNR}} \left(\frac{r_i(r_3^2 - r_i^2)}{r_j} + \right. \\ & \left. \left. \frac{r_j(r_3^2 - r_j^2)}{r_i} + 2 r_i r_j \right) \right. \\ & + \frac{r_i r_j r_3^2}{\text{SNR}^2} + \frac{(r_3^2 - r_i^2)(r_3^2 - r_j^2)}{2} \\ & \left. \times \left\{ \frac{2}{r_i r_j r_3^2} + \frac{1}{\text{SNR} r_i r_j} \right\} \right], \quad (36) \end{aligned}$$

$$\text{Cov}[\hat{r}_{d_i}, \hat{B}_j] = 0. \quad (37)$$

但し, $i, j = 1, 2$

これらの式を用いて距離 r_0 , および方位 ϕ, θ の推定値の分散, 共分散を評価する. まず, 式 (11) で得られた距離の推定値 $\hat{r}_0$ を線形近似すると, 真値からの偏差は,

$$\delta \hat{r}_0 = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial r_0}{\partial B_i} \delta \hat{B}_i + \frac{\partial r_0}{\partial r_{d_i}} \delta \hat{r}_{d_i} \right). \quad (38)$$

但し,

$$\begin{aligned} \frac{\partial r_0}{\partial B_i} &= \frac{1}{3r_0} \left\{ - \frac{r_{d_i}}{B_i^2 \sqrt{B_i^2 + 4}} \right. \\ & \left. \times \left(\sqrt{B_i^2 + 4} + 2 \right) \right\} \left(r_i + \frac{r_3}{2} \right), \quad (39) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial r_0}{\partial r_{d_i}} = \frac{1}{3r_0} \frac{r_1}{2r_{d_i}} (2r_i + r_3), \quad (40)$$

となる. よって $\hat{r}_0$ の分散は, 次のように評価される.

$$\begin{aligned} \text{Var}[\hat{r}_0] &= \left(\frac{\partial r_0}{\partial B_1} \right)^2 \text{Var}[\hat{B}_1] + \left(\frac{\partial r_0}{\partial B_2} \right)^2 \text{Var}[\hat{B}_2] \\ & + \left(\frac{\partial r_0}{\partial r_{d_1}} \right)^2 \text{Var}[\hat{r}_{d_1}] + \left(\frac{\partial r_0}{\partial r_{d_2}} \right)^2 \text{Var}[\hat{r}_{d_2}] \\ & + 2 \frac{\partial r_0}{\partial B_1} \frac{\partial r_0}{\partial B_2} \text{Cov}[\hat{B}_1, \hat{B}_2] \\ & + 2 \frac{\partial r_0}{\partial r_{d_1}} \frac{\partial r_0}{\partial r_{d_2}} \text{Cov}[\hat{r}_{d_1}, \hat{r}_{d_2}]. \quad (41) \end{aligned}$$

方位 ϕ, θ についても同様に計算すれば, 次のようになる.

$$\begin{aligned} \text{Var}[\hat{\phi}] &= \left(\frac{\partial \phi}{\partial B_1} \right)^2 \text{Var}[\hat{B}_1] + \left(\frac{\partial \phi}{\partial B_2} \right)^2 \text{Var}[\hat{B}_2] \\ & + \left(\frac{\partial \phi}{\partial r_{d_1}} \right)^2 \text{Var}[\hat{r}_{d_1}] + \left(\frac{\partial \phi}{\partial r_{d_2}} \right)^2 \text{Var}[\hat{r}_{d_2}] \\ & + 2 \frac{\partial \phi}{\partial B_1} \frac{\partial \phi}{\partial B_2} \text{Cov}[\hat{B}_1, \hat{B}_2] \\ & + 2 \frac{\partial \phi}{\partial r_{d_1}} \frac{\partial \phi}{\partial r_{d_2}} \text{Cov}[\hat{r}_{d_1}, \hat{r}_{d_2}], \quad (42) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Var}[\hat{\theta}] &= \left(\frac{\partial \theta}{\partial B_1}\right)^2 \text{Var}[\hat{B}_1] + \left(\frac{\partial \theta}{\partial B_2}\right)^2 \text{Var}[\hat{B}_2] \\
&+ \left(\frac{\partial \theta}{\partial r_{d_1}}\right)^2 \text{Var}[\hat{r}_{d_1}] + \left(\frac{\partial \theta}{\partial r_{d_2}}\right)^2 \text{Var}[\hat{r}_{d_2}] \\
&+ 2 \frac{\partial \theta}{\partial B_1} \frac{\partial \theta}{\partial B_2} \text{Cov}[\hat{B}_1, \hat{B}_2] \\
&+ 2 \frac{\partial \theta}{\partial r_{d_1}} \frac{\partial \theta}{\partial r_{d_2}} \text{Cov}[\hat{r}_{d_1}, \hat{r}_{d_2}], \quad (43)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Cov}[\hat{r}_0, \hat{\phi}] &= \frac{\partial r_0}{\partial B_1} \frac{\partial \phi}{\partial B_1} \text{Var}[\hat{B}_1] \\
&+ \frac{\partial r_0}{\partial B_2} \frac{\partial \phi}{\partial B_2} \text{Var}[\hat{B}_2] + \frac{\partial r_0}{\partial r_{d_1}} \frac{\partial \phi}{\partial r_{d_1}} \text{Var}[\hat{r}_{d_1}] \\
&+ \frac{\partial r_0}{\partial r_{d_2}} \frac{\partial \phi}{\partial r_{d_2}} \text{Var}[\hat{r}_{d_2}] + \frac{\partial r_0}{\partial B_1} \frac{\partial \phi}{\partial B_2} \text{Cov}[\hat{B}_1, \hat{B}_2] \\
&+ \frac{\partial r_0}{\partial B_2} \frac{\partial \phi}{\partial B_1} \text{Cov}[\hat{B}_1, \hat{B}_2] \\
&+ \frac{\partial r_0}{\partial r_{d_1}} \frac{\partial \phi}{\partial r_{d_2}} \text{Cov}[\hat{r}_{d_1}, \hat{r}_{d_2}] \\
&+ \frac{\partial r_0}{\partial r_{d_2}} \frac{\partial \phi}{\partial r_{d_1}} \text{Cov}[\hat{r}_{d_1}, \hat{r}_{d_2}], \quad (44)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Cov}[\hat{r}_0, \hat{\theta}] &= \frac{\partial r_0}{\partial B_1} \frac{\partial \theta}{\partial B_1} \text{Var}[\hat{B}_1] \\
&+ \frac{\partial r_0}{\partial B_2} \frac{\partial \theta}{\partial B_2} \text{Var}[\hat{B}_2] + \frac{\partial r_0}{\partial r_{d_1}} \frac{\partial \theta}{\partial r_{d_1}} \text{Var}[\hat{r}_{d_1}] \\
&+ \frac{\partial r_0}{\partial r_{d_2}} \frac{\partial \theta}{\partial r_{d_2}} \text{Var}[\hat{r}_{d_2}] + \frac{\partial r_0}{\partial B_1} \frac{\partial \theta}{\partial B_2} \text{Cov}[\hat{B}_1, \hat{B}_2] \\
&+ \frac{\partial r_0}{\partial B_2} \frac{\partial \theta}{\partial B_1} \text{Cov}[\hat{B}_1, \hat{B}_2] \\
&+ \frac{\partial r_0}{\partial r_{d_1}} \frac{\partial \theta}{\partial r_{d_2}} \text{Cov}[\hat{r}_{d_1}, \hat{r}_{d_2}] \\
&+ \frac{\partial r_0}{\partial r_{d_2}} \frac{\partial \theta}{\partial r_{d_1}} \text{Cov}[\hat{r}_{d_1}, \hat{r}_{d_2}], \quad (45)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Cov}[\hat{\phi}, \hat{\theta}] &= \frac{\partial \phi}{\partial B_1} \frac{\partial \theta}{\partial B_1} \text{Var}[\hat{B}_1] \\
&+ \frac{\partial \phi}{\partial B_2} \frac{\partial \theta}{\partial B_2} \text{Var}[\hat{B}_2] + \frac{\partial \phi}{\partial r_{d_1}} \frac{\partial \theta}{\partial r_{d_1}} \text{Var}[\hat{r}_{d_1}] \\
&+ \frac{\partial \phi}{\partial r_{d_2}} \frac{\partial \theta}{\partial r_{d_2}} \text{Var}[\hat{r}_{d_2}] + \frac{\partial \phi}{\partial B_1} \frac{\partial \theta}{\partial B_2} \text{Cov}[\hat{B}_1, \hat{B}_2] \\
&+ \frac{\partial \phi}{\partial B_2} \frac{\partial \theta}{\partial B_1} \text{Cov}[\hat{B}_1, \hat{B}_2] \\
&+ \frac{\partial \phi}{\partial r_{d_1}} \frac{\partial \theta}{\partial r_{d_2}} \text{Cov}[\hat{r}_{d_1}, \hat{r}_{d_2}] \\
&+ \frac{\partial \phi}{\partial r_{d_2}} \frac{\partial \theta}{\partial r_{d_1}} \text{Cov}[\hat{r}_{d_1}, \hat{r}_{d_2}]. \quad (46)
\end{aligned}$$

但し,

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \theta}{\partial B_i} &= -\frac{3r_i}{2\sqrt{3}r_0 d \cos \theta} I_i \times \left\{ r_i \left(\sin \phi + \frac{\sqrt{3}}{3} \cos \phi \right) \right. \\
&\quad \left. - \left(2r_0 \sin \phi + \frac{2\sqrt{3}}{3} d \sin \theta \right) \frac{2r_i + r_3}{6r_0} \right\}, \quad (47)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \theta}{\partial r_{d_i}} &= \frac{3r_i}{2\sqrt{3}r_{d_i}r_0 d \cos \theta} \times \left\{ r_i \left(\sin \phi + \frac{\sqrt{3}}{3} \cos \phi \right) \right. \\
&\quad \left. - \left(2r_0 \sin \phi + \frac{2\sqrt{3}}{3} d \sin \theta \right) \frac{2r_i + r_3}{6r_0} \right\}, \quad (48)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \phi}{\partial B_i} &= -\frac{3r_i}{2\sqrt{3}r_0 d \sin \theta} I_i \times \\
&\quad \left\{ r_i \left(\cos \phi - \frac{\sqrt{3}}{3} \sin \phi \right) - \frac{(2r_i + r_3) \cos \phi}{3} \right\}, \quad (49)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \phi}{\partial r_{d_i}} &= \frac{3r_i}{2\sqrt{3}r_{d_i}r_0 d \sin \theta} \times \\
&\quad \left\{ r_i \left(\cos \phi - \frac{\sqrt{3}}{3} \sin \phi \right) - \frac{(2r_i + r_3) \cos \phi}{3} \right\}. \quad (50)
\end{aligned}$$

ここで,

$$I_i = \frac{\sqrt{B_i^2 + 4} + 2}{B_i^2 \sqrt{B_i^2 + 4}}. \quad (51)$$

3.2 推定精度の理論的評価

式(39)~(51)が r_0, ϕ, θ の推定誤差を理論的に評価する上での基本式である。これらは、いずれも式(33)~(37)で与えられる $\hat{r}_{d_i}, \hat{B}_j$ の分散、共分散の線形結合であり、後者の各パラメータに関する依存性から、全般的にSNRが良く周波数が高いほど、また、平滑化窓パラメータ C が小さいほど高精度の推定が可能であり、これらがこの手法において重要な意味を持つパラメータであることが推測できる。

また、これらの式は、 r_0 が遠距離になるにつれて $r_i (i = 1, 2, 3)$ が大きくなると共に、それらの比が1に近くなるので $\hat{B}_i$ が0に近づく。それ故 $r_0 \rightarrow \infty$ の極限では $\hat{r}_{d_i}, \hat{B}_i$ の分散・共分散が無限大に発散することに起因し $\hat{r}_0, \hat{\phi}, \hat{\theta}$ の分散・共分散も発散してしまう。結局、遠方場では振幅減衰の情報が失われてしまい、距離推定の意味が消失することを示している。遠方場を対象とする場合は、信号の伝搬時間差のみを推定すれば、第1章で述べた従来の方法と同様、方位推定は可能である。検出器の間隔 d については、分母に多く現れているので、 $d \rightarrow 0$ でそれぞれの分散・共分散が無限大に発散する。それゆえ、実際の配置では、検出器間隔の制限の範囲内で、極力大きく離して配置させる必要がある。

以上のように音源位置の推定値と各パラメータとの関連性の詳細な検討は、式の構造が複雑なため、きわめて困難である。そこで次章では、ここまで導出した理論式をもとにして行なった、計算機による数値解析結果について述べる。

4. 数値解析結果

この章では、まず極座標下での推定値 $(\hat{r}_0, \hat{\phi}, \hat{\theta})$ の分布領域を、直交座標 (x, y, z) の3次元領域で表現する。そのため、2.1節の仮定②で述べた推定値の正規性と、3.1節の線形評

価に着目して、与えられた確率のもとで真値が存在する確率集中楕円体による評価をする。

4.1 解析方法

計算の便宜上、位置推定値 $\hat{\mathbf{r}} = (\hat{r}_0, \hat{\phi}, \hat{\theta})^T$ を極座標から直交座標 $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})^T$ に変換する。変換行列を H とすると、位置推定誤差は

$$\mathbf{x}_\varepsilon = H\mathbf{r}_\varepsilon, \quad (52)$$

となる。ここで、 $\mathbf{x}_\varepsilon = (\hat{x} - x_0, \hat{y} - y_0, \hat{z} - z_0)^T$, $\mathbf{r}_\varepsilon = (\hat{r}_0 - r_0, \hat{\phi} - \phi_0, \hat{\theta} - \theta_0)^T$ であり、 H は次式で与えられる。

$$H = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \phi & r_0 \cos \theta \cos \phi & -r_0 \sin \theta \sin \phi \\ \sin \theta \sin \phi & r_0 \cos \theta \sin \phi & -r_0 \sin \theta \cos \phi \\ \cos \theta & -r_0 \sin \theta & 0 \end{bmatrix}. \quad (53)$$

仮定より $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ は、 (x_0, y_0, z_0) の不偏推定量で、正規分布に従うものと考えられるので、その確率密度関数は、

$$P_\varepsilon(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) = (|2\pi|^{3/2} |\Lambda_\varepsilon|^{1/2})^{-1} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \mathbf{x}_\varepsilon^T \Lambda_\varepsilon^{-1} \mathbf{x}_\varepsilon \right\}, \quad (54)$$

で与えられる。但し、 Λ_ε は直交座標系における位置推定誤差ベクトル $\mathbf{x}_\varepsilon$ の共分散行列であり、

$$\Lambda_\varepsilon \equiv \begin{bmatrix} \text{Var}[\hat{x}] & \text{Cov}[\hat{x}, \hat{y}] & \text{Cov}[\hat{x}, \hat{z}] \\ \text{Cov}[\hat{x}, \hat{y}] & \text{Var}[\hat{y}] & \text{Cov}[\hat{y}, \hat{z}] \\ \text{Cov}[\hat{x}, \hat{z}] & \text{Cov}[\hat{y}, \hat{z}] & \text{Var}[\hat{z}] \end{bmatrix}, \quad (55)$$

と定義され、極座標系のもとでの位置推定誤差 $\mathbf{r}_\varepsilon$ の共分散行列 R_ε とは次の関係にある。

$$\Lambda_\varepsilon = H R_\varepsilon H^T \quad (56)$$

このとき、式 (54) の指数部の 2 次形式が一定値 Q 以下になる領域は楕円体となる。その軸の向きは、式 (55) で定義した共分散行列 Λ_ε の固有ベクトル v_k ($k=1, 2, 3$) と一致し、固有値を λ_k とすれば軸の長さは、 $\sqrt{\lambda_k Q}$ となる。

また、 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ が楕円体の内部にある確率 P は、次式で与えられる⁷⁾。

$$P = 2 \int_0^{\sqrt{Q}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} dx - \frac{2\sqrt{Q}}{\sqrt{2\pi}} e^{-Q/2}. \quad (57)$$

推定値の正規性と線形近似が成立する限り、確率 P で推定値が真値のまわりに分布する 3 次元領域が式 (55) で定義した共分散行列 Λ_ε の固有値分析により簡潔に求まる。

以上が 3 次元空間内での厳密な議論であるが、より簡単な指標で推定値の分布領域を評価したい場合には、例えば最大固有値によって求まる集中楕円体の長軸の長さ、というスカラー指標のみに着目することによってさらに簡便にこれを行なうことが可能である。具体的には、得られた集中楕円体の長軸の 1/2 を、音源までの距離で規格化したものが一定の相対誤差、例えば 30% 以下となる領域、つまり

$$\frac{1}{2} \frac{\sqrt{\lambda_{\max} Q}}{r_0} \leq 0.3, \quad (58)$$

なる領域などを採用する。これについても数値解析によって調べてみる。

4.2 解析結果

本解析では、まず、広い範囲の集中楕円体のおおまかな分布性状を把握するため、Table 1(a) のように、SNR、検出器間隔 $2d$ をパラメータとして、方位 ϕ を $0 \sim 90^\circ$ 、また、 θ を $15 \sim 75^\circ$ の範囲に渡ってそれぞれ 15° 単位で変化させた。

Table 1 Parameters in numerical analyses
(a) Concentration ellipsoid

θ	15, 30, 45, 60, 75 [$^\circ$]
ϕ	0, 15, 45, 60, 75, 90 [$^\circ$]
r_0	1.0, 2.0, 3.0 [m]
SNR	30, 40, 50 [dB]
$2d$	0.2, 0.5, 1.0 [m]

(b) Localizable area

θ	1~90 [$^\circ$]
ϕ	0, 15, 45, 60, 75, 90 [$^\circ$]
SNR	30, 40, 50 [dB]
$2d$	0.2, 0.5, 1.0 [m]

Fig. 2 Example of concentration ellipsoids where parameters are fixed as SNR:40dB, r_0 :1m, $2d$:1m
(continued)

Fig. 2 Example of concentration ellipsoids where parameters are fixed as SNR:40dB, r_0 :1m, $2d$:1m

Fig. 3 Concentration ellipsoids when SNR is changed with the others being fixed as r_0 :1m, $2d$:1m, ϕ :45deg (continued)

Fig. 3 Concentration ellipsoids when SNR is changed with the others being fixed as SNR:40dB, r_0 :1m, $2d$:1m

Fig. 4 Concentration ellipsoids when the sound source range r_0 is changed with the others being fixed as SNR:50dB, $2d$:1m, ϕ :45deg

またスペクトル推定においては、解析帯域 10kHz、サンプリング周波数 30kHz、見本時系列のデータ点数 2048 を想定し、Bohman の窓 ($C=0.0264$) を使用した。これらの条件で、まず単一周波数 1kHz の音源に対する推定値のばらつきを示す確率集中楕円体を示し、推定誤差の評価を行なう。ここで確率パラメータ Q は 4 とし、式 (57) より確率は、約 74% となる。次に、式 (58) で提案した簡便な 1 次元の評価指標に基づき、指定した最大相対誤差以下で音源の定位可能領域を導出するため、Table 1(b) に示すように θ を、 1° 単位で $1^\circ \sim$

Fig. 5 Concentration ellipsoids when distance $2d$ between detectors is changed with the others being fixed as SNR:50dB, r_0 :1m, ϕ :45deg

90°まで細かく変化させて数値的に検討した。

Fig. 2 は、 r_0 が1.0m, SNRが40dB, $2d$ が1.0mの場合の確率集中楕円体で音源の方位 ϕ , θ によって比較したものである。全体的に θ が小さい時、つまり音源が z 軸に近いとき、推定精度が悪くなっている。これは、本手法では、全ての検出器を、 z 軸上の点から等距離にあるX-Y平面上に配置しており、 $\theta \rightarrow 0$ の時、2組の伝搬距離差 $\hat{r}_{d_i}(f)$ と振幅減衰の情報 $\hat{B}_i(f)$ がいずれも0に近付き、式(6), (7)の独立性が失われてしまう。これらの独立性を前提として求めた音源の極座標パラメータの推定式(11)~(13)は、いずれも0に近い値での割算を含むので、標本変動の影響を大きく受け易くなり、その結果、推定精度が劣化するものと考えられる。このことは、 r_0 , ϕ , θ の r_{d_i} および B_i に関する偏微係数の算出式(39), (40), (47)~(51)と、これらを用いた分散, 共分散の算出式(41)~(46)からも理論的に予測されることである。また、 ϕ が30°の時、その精度は明らかに期待できるものではないのでこの図からは省いた。この場合、Fig. 1から分かるように、音源は検出器2, 3の2等分面上にあるので、これらの間の距離 r_2 と r_3 が等しく、 $\hat{r}_{d_2}(f)$, $\hat{B}_2(f)$ がともに0になり、上記と同様の理由により推定値の分散, 共分散が発散

Fig. 6 Examples of localizable areas where SNR and the distance $2d$ between detectors are changed parametrically in (a) and (b), respectively

してしまうためである。

Fig. 3 は、検出器の間隔・音源までの距離を共に一定にし、SNRが(a)30dB, (b)40dB, (c)50dBのそれぞれの場合を示したものである。SNRが良いほど楕円体は極度に小さくなり、精度が良くなるのがわかる。つまりSNRは、本手法において重要なパラメータであるということになる。**Fig. 4** は、音源までの距離 r_0 のみを(a)1m, (b)2m, (c)3m、と変化したもので、音源が遠いほど楕円体は、距離方向に長くなっているのがわかる。近いほど距離分解能は、良くなっている。また、**Fig. 5** では、検出器の間隔 $2d$ のみを(a)0.2m, (b)0.5m, (c)1m、と変えて比較したもので、前章の理論的解析でも述べたように、間隔の広いほうが推定精度は確実に良くなっていることが知れる。

次に、式(58)で提案した簡便な1次元の評価指標に基づき、導出した音源定位可能領域についての検討結果を示す。**Fig. 6** は、SNRと検出器の間隔($2d$)を変えた場合の結果の比較である。ここで、横軸は音源のX-Y平面への射影距離である。この図より、SNR向上により推定精度が良くなっているのが明らかである。例えばSNRが30dBから40dBになると、定位可能領域は約1.5倍に、50dBになると約2~3倍に拡大している。また、検出器の間隔を広くとると、定位できる領域はそれに比例して、広がっている。

ここで、これらの結果の意味を考えてみる。式(58)の指

標は、言わば、集中楕円体に外接する最小の球面の半径という、1次元の指標で集中楕円体の広がりやを簡便に評価し、最悪の場合でも位置推定値が相対誤差30%以下に収まることを要求するものである。Fig.2~Fig.5の結果を見ると、集中楕円体の広がりやが相対的に大きい場合には、いずれの楕円も相当偏平になっている。それゆえ、最大相対誤差を30%に設定してはいるが、実際の相対誤差は、それよりずっと少ないものと考えられる。

以上の評価結果より、提案手法では高SNRでのスペクトル情報の抽出が、基本的に重要な役割を果たすことが知れた。2.2節でもふれたように、高SNRな周波数成分の利用、あるいはそのような帯域での平均的な情報抽出、更には高次スペクトル解析の利用などによって、高SNRな情報抽出ができるものと考えられる。

5. 結 論

3点検出法による近方場音源の3次元位置推定に関して、従来より利用されてきた伝搬距離差の情報に加えて、振幅減衰の情報を利用した3次元位置の推定法を提案し、その有効性と特徴を明らかにするために理論・数値解析を行い、次のような結果を得た。

- ① 観測雑音の存在する一般的条件下で観測時系列の自己および相互パワースペクトルの情報から観測ノイズの影響を相殺した形で抽出した伝搬距離差と波動の振幅減衰の情報より音源の3次元位置を推定する方法を提案した。
- ② 利用パワースペクトルの統計的変動の評価結果に基づき、位置推定ベクトルのバイアスと共分散行列を評価するとともに、位置推定値が指定した確率の下で分布する領域を確率集中楕円体として、理論的に評価した。
- ③ 最終的な推定値が検出SNR、検出器間隔、音源の距離と方位の各パラメータによってどのように変動するかを、理論的に考察するとともに、確率集中楕円体の視覚化を通じて数値解析的に明確化した。
- ④ 音源の位置推定ベクトルの共分散行列の固有値から定まる確率集中楕円体の長軸を指標として、簡便に音源位置推定値の相対誤差を評価する方法を考案した。
- ⑤ 与えられた確率の下で音源の位置推定値が分布する領域を、指定した検出SNR、検出器間隔、相対誤差の範囲内で、定位可能な音源分布領域として導出した。

以上のような結果を得たが、この手法は、パワースペクトルに始まる高次スペクトル解析によっても、即実践可能である。このような統計量の利用によれば、Gauss性の雑音の影響を受けないため、SNRが高い状態(50dBなど)と同様の精度が期待できる。また、検出器を配置させた平面と、垂直な方向での推定精度が悪くなることがわかったが、これは、3点検出法では、検出器を平面的に配置させるため、伝搬距離差および振幅減衰差が、極めて小さくなるためである。検出器を設置する実質上のスペースに制約が無いなら、 z 軸上に検出器をもう1つ加え、4点検出とすることにより、信号を空間

的にとらえることが可能となる。このことにより、結果的に上記の難点は解消されるものと考えられる。今後、このような改良を加えれば、本手法は十分に実用可能なものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 岡田, 佐藤, 森田: 3マイクロフォン系による3次元音源定位と音声分離, システム制御情報学会論文誌, **6-3**, 149/155 (1993)
- 2) 安藤, 篠田, 小川, 光山: 時空間勾配法に基づく3次元音源定位センサシステム, 計測自動制御学会論文集, **29-5**, 520/528 (1993)
- 3) 佐々木公男: 検出器の付加的回転を伴う両耳聴取法による近音場定常不規則音源の3次元位置推定, SICE93, 304 M-2, 665/666 (1993)
- 4) K.Sasaki & K.Uchino: 3D-Biaural Localization of A Stationary Random Acoustical Source in Near-Field by Using Amplitude Attenuation of Wave Propagation and An Additional Rotation of Detectors, Proc. of the 26th ISCIE Int. Symp. on Stochastic Systems Theory and It's Applications, 161/166 (Institute of Systems, Control and Information Engineers, 1995)
- 5) K.Sasaki & K.Hirasawa: Biaural Localization of A Stationary Planer Random Acoustical of Wave Propagation, Proc. of the 25th ISCIE Int. Symp. on Stochastic Systems and It's Applications, 75/80 (Institute of Systems, Control and Information Engineers, 1994)
- 6) G. M. Jenkins & D. G. Watts: Modern Spectral Estimation Theory and It's Applications, 412/428, Holden-Day (1968)
- 7) H. L. Van Trees: Detection, Estimation and Modulation Theory Part I, 79, John-Wiley (1968)

[著 者 紹 介]

佐々木 公 男 (正会員)

1968年東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年同大学精密工学研究所助手。81年筑波大学構造工学系講師を経て、現在同大学同学系助教授。非正規性不規則信号の解析・合成; 波動応用計測, 受動音響映像系の開発, デジタル信号処理と機能パターン計測などの研究に従事。工学博士。システム制御情報学会, 日本音響学会などの会員。

平 田 克 己 (学生会員)

1997年筑波大学第三学群工学システム学類卒業。同年同大学院理工学研究科進学, 現在に至る。不規則音源の位置推定に関する研究に従事。