MUSIC による近距離音源の 高分解能位置推定法に関する研究*

— センサ間の振幅・位相偏差とその補償処理が位置推定性能に及ぼす影響 —

畝田 道雄** 石川 憲一**

Study on High Resolvable Location Finding of Near Field Sound Source using MUSIC Algorithm
- Effect of Amplitude / Phase Deviations and its Compensated Preprocessing on Location Finding Characteristics -

Michio UNEDA and Ken-ichi ISHIKAWA

A MUSIC (Multiple Signal Classification) is super resolution and high accuracy measurement algorithm for location finding of the signal sources of the received signals using the array sensors. However, it is known that the location finding error remarkably increases when the array receiver has amplitude and phase deviations between sensors coming and estimating the signal sources from far field environment. This paper describes the MUSIC characteristics for the near field sound sources when the receiver has sensor deviations. And also, this paper investigates compensated preprocessing algorithm for estimating and decreasing sensor deviations. For confirming the algorithm characteristics, the computer and experimental simulation are done, and it is clear the MUSIC and preprocessing algorithm are enable to properly estimate the location of sound source and sensors deviations.

Key words: MUSIC, sound information, location finding, near field sound source, sensor deviations, compensated preprocessing algorithm

1. 緒 言

各種機械から発せられる振動や騒音を防止、抑制しようとする場合、その発生源の位置や発生周波数成分を測定することは、機械の正常・異常動作状況等を知るための診断指標として非常に重要な事柄であると考えられる¹⁾。加えて、近年、機械作業従事者に対する環境の改善に向けた様々な努力が図られ、特に作業の安全性を向上させることが重要視されている。そして、このためには騒音・音響や振動の発生源位置、並びに周波数成分を高精度に特定する技術が必要になり、各種の信号処理等への取り組みが報告されている²⁾³⁾。

この信号処理に関しては、現在までにアレー受信装置に適用する方法のうち、固有値解析法である MUSIC (Multiple Signal Classification) アルゴリズム⁴⁾⁵⁾を用いて、信号源の位置や角度を高分解能・高精度に推定する方法が検討されており、著者らによる一連の研究においても MUSIC の性能評価が行われている⁶⁾⁷⁾。さらに、近距離にある音響発生源（以下、近距離音源）の位置推定技術の開発研究が多くの研究者らによって盛んに進められている⁸⁾⁻¹⁶⁾。

ところで、MUSIC における受信信号の解析には、受信信号が有する振幅情報並びに位相情報を用いる。このとき、アレー受信装置を構成する各センサにおいて、通過する受信信号の振幅特性及び位相特性にセンサ固体間で偏差がある場合には、従来の遠方信号源を対象とした MUSIC による推定精度（特に、測角精度）は低下することが明らかとなっている¹⁷⁾⁻¹⁹⁾。このことから、本研究で検討する近距離音源の MUSIC による位置推定技術でも、その精度は低下すると考えられる。それ故、近距離音源の位置推定技術に MUSIC を適用する場合においても、全てのセ

Fig.1 Propagation model of the sound source k to the linear array receiver having M sensor

ンサには通過する信号の振幅特性並びに位相特性が完全に一致したものを用いる必要がある。しかしながら、使用するセンサの固体間誤差を無くすることは困難であることに加えて、現在までの近距離音源を対象とした研究においては、振幅・位相偏差の影響を取り扱うものは少ないと考えられる。

ここで、センサ間の振幅・位相偏差の影響を簡単に補償する場合、ある基準信号を受信する場合における振幅比や時間遅れを前もって計測しておき、それから補償値を導出することによって行うことができる。しかしながら、センサには個々が有する雑音（ノイズ）成分に加えて、アレー構成することによって初めて生じるシステム雑音等がある。また、受信機特性には僅かながらでも時間変動があると考えられることから、単に受信振幅や時間遅れから高精度に補償値を導出することは困難であると考えられる。

本論文では、近距離音源の位置推定技術として MUSIC の適用を念頭に、使用するセンサ間に振幅・位相偏差が存在する場合であっても、各偏差量を高精度に推定し補償するための前処理として、位置と発信周波数が既知である校正音源を用いて行

* 原稿受付 平成 16 年 1 月 9 日

** 正 会 員 金沢工業大学（石川郡野々市町扇が丘 7-1）

う方法に関し, Friedlander¹⁷⁾らの方法の一部を改良して検討する。そして, 振幅・位相偏差が近距離音源 MUSIC における位置推定精度に及ぼす影響を検討するとともに, たとえ偏差が有る場合であっても補償処理によって位置推定精度が改善される結果を計算機シミュレーション並びにモデル実験から検証するものである。なお, 本論文での方法は振幅・位相偏差の周波数依存性は無視し, ある特定の周波数成分のみを対象とする補償方法である。しかし, 現実には機械の診断を音によって行う場合, 機械動作状況から発すると予測される周波数はある程度予測の範囲内であると考えられることから, 本方法は有効であると考えられる。

2. センサ間の振幅・位相偏差とそれが位置推定精度に及ぼす影響

図 1 に示すように M 個のセンサを有するリニアアレー受信装置によって, 近距離に存在する音源の位置を推定する場合を考える。なお, 同図では音源が 1 個の場合を示しているが, ここでは議論を一般化するために, 音源が K 個ある場合を考える。このとき, センサ m (m は 1~ M の間の整数) が時刻 t で得る複素受信信号 $x_m(t)$ は,

$$x_m(t) = \sum_{k=1}^K s_k(t) e^{-j2\pi \frac{f_k}{c} \sqrt{(x_{sk}-x_m)^2 + (y_{sk}-y_m)^2}} + n_m(t) \quad (1)$$

として与えられる。ここで, $s_k(t)$, (x_{sk}, y_{sk}) , f_k はそれぞれ音源 k (k は 1~ K の間の整数) の振幅, 2 次元座標, 並びに発信周波数であり, c は伝搬速度である。また, (x_m, y_m) はセンサ m の X-Y 座標であり, $n_m(t)$ は平均 0, 分散 σ^2 の分布を示す白色ガウス雑音である。

式(1)で与えられるセンサ m の複素受信信号 $x_m(t)$ に関して, センサ 1 から M までの信号をまとめてベクトル $\mathbf{X}(t)$ で表すと,

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (2)$$

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \cdots \ x_M(t)]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{S}(t) = [s_1(t) \ s_2(t) \ \cdots \ s_K(t)]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(x_{s1}, y_{s1}) \ \mathbf{a}(x_{s2}, y_{s2}) \ \cdots \ \mathbf{a}(x_{sK}, y_{sK})] \quad (5)$$

$$\mathbf{N}(t) = [n_1(t) \ n_2(t) \ \cdots \ n_M(t)]^T \quad (6)$$

となる。添え字 T は転置を表す。また, $\mathbf{a}(x_{sk}, y_{sk})$ はモードベクトルと呼ばれる音源 k の位置, 発信周波数を与えるものであり

$$\mathbf{a}(x_{s,k}, y_{s,k}) = \begin{bmatrix} e^{-j2\pi \frac{f_k}{c} \sqrt{(x_{s,k}-x_1)^2 + (y_{s,k}-y_1)^2}} \\ e^{-j2\pi \frac{f_k}{c} \sqrt{(x_{s,k}-x_2)^2 + (y_{s,k}-y_2)^2}} \\ \vdots \\ e^{-j2\pi \frac{f_k}{c} \sqrt{(x_{s,k}-x_M)^2 + (y_{s,k}-y_M)^2}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

で与えられる。

このように近距離に存在する音源をモデル化することで, MUSIC による音源の高分解能位置推定を可能にする。ここで, MUSIC の評価関数 $P(x, y)$ は,

(a) Without variations matrix
(The interval of the contour line is 10 dB.)

(b) With variations matrix as shown in Table 2
(The interval of the contour line is 4 dB.)

Fig.2 Example results of location finding without/with the amplitude and phase variations matrix

Table 1 Main simulation conditions

Array receiver : Uniformly linear array
Number of array sensors : 4
Distance between sensors : $\lambda/2$
Snap shot : 4000
Frequency of source : 500Hz
Location of source : (200mm,1300mm)
Signal to noise ratio : 10dB

Table 2 Amplitude and phase variations matrix $\mathbf{V}$

Sensors	#1	#2	#3	#4
Amplitude	1	0.95	1.09	0.88
Phase(°)	0	8	-10	3

$$P(x, y) = \frac{1}{\|\mathbf{a}(x, y)^H \cdot \mathbf{E}\|} \quad (8)$$

で与えられる。添え字 H は複素共役転置である。 $\mathbf{E}$ は受信信号 $\mathbf{X}(t)$ から計算される相関行列を固有値解析して得られる雑音部分空間, $\mathbf{a}(x, y)$ はステアリングベクトルである。そして, 評価関数 $P(x, y)$ が極大となることが推定音源位置である。

MUSIC による近距離音源の位置推定技術における基本原理は, 音源と各センサ間の伝搬経路長差に起因したセンサ間での受信位相差を利用するものである。このことから, 受信アレーにおけるセンサ間の固体間偏差等の影響によって, センサ間に振

幅・位相偏差が存在すると、位置推定性能は低下する。現在までにおける MUSIC の検討は遠方信号源を対象としたものが一般的であり、そのような環境下での振幅・位相偏差の影響に関しては検討が行われている¹⁷⁾¹⁹⁾ものの、近距離に存在する音源に対して、センサ間の振幅・位相偏差が与える影響の報告はなされていない。そこで、本論文では、このような場合に焦点を当て、検討を行うものである。

センサ間の振幅・位相偏差に関して、Friedlander¹⁷⁾らの方法のようにセンサ m の受信信号にはセンサ 1 を基準として振幅偏差 p_m 、位相偏差 ϕ_m を含み、また、 p_m 及び ϕ_m は周波数特性を有しないと仮定して考える。このとき、このリニアアレーが受信する信号 $\mathbf{X}(t)$ は次式によって表すことができる。

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{V}\mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (9)$$

ここで、行列 $\mathbf{V}$ は振幅・位相偏差を表す偏差行列であり、

$$\mathbf{V} = \text{diag}[p_1 e^{-j\phi_1} \quad p_2 e^{-j\phi_2} \quad \dots \quad p_M e^{-j\phi_M}] \quad (10)$$

で表される対角行列である。図 2 は偏差行列 $\mathbf{V}$ が近距離音源 MUSIC の位置推定精度に及ぼす影響をシミュレーションした結果の一例である。同図(a)は振幅・位相偏差が存在しない場合（このとき、 $\mathbf{V}$ は単位行列として設定）、同図(b)は偏差が存在する場合である。なお、同図中の等高線は評価関数 $P(x, y)$ に対して最大値を基準 (= 0) とする dB で表示し、同図(a), (b)でそれぞれ 10, 4 dB 間隔で描かれたものであり、プロット (+) は正しい音源位置である。このときの基本計算条件は表 1 として、 $\mathbf{V}$ は表 2 のようにした。なお、ここでの $\mathbf{V}$ の値に関しては、著者による文献¹⁸⁾を参考にして与えた。この結果より、振幅・位相偏差が存在することで明らかに評価関数のピークは鈍くなっているとともに、位置推定精度は低下していることが分かる。このことから、MUSIC による近距離音源の位置推定を行う場合には、まずはセンサ間の振幅・位相偏差を推定し、補償することが必要であると言える。ここで、両図において X 軸方向に比較して Y 軸方向の推定分解能は低いことが分かる。これは、MUSIC による音源位置推定の特徴となる位相差の変化に起因するものであり、音源の軸方向の位置変化に対する位相変化量が大きい状況の方が MUSIC の分解能は高くなり、この条件下においては X 軸方向の変化の方が受信位相の変化に与える影響が大きいために、このような結果になったと考えられる。

図 3 は表 1 を基本条件として、振幅偏差並びに位相偏差のそれぞれが位置推定精度、並びに評価関数のピーク値に与える影響を検討した結果である。同図(a)が振幅偏差のみが有る場合、同図(b)は位相偏差のみが有る場合、同図(c)は振幅・位相偏差ともに有る場合である。なお、計算機シミュレーションにおける振幅偏差 p_m 、位相偏差 ϕ_m (単位: °) それぞれの与え方としては、

$$\begin{aligned} p_m &= 1 + p \cdot r_{mp} \\ \phi_m &= \phi \cdot r_{m\phi} \end{aligned} \quad (11)$$

とし、すべてのセンサがそれぞれの偏差を有する場合を取り扱った。なお、上式における r_{mp} 、 $r_{m\phi}$ に関しては、平均が 0 で分散が 1 の正規分布の形態をとる乱数であり、計算毎に発生させるものとした。すなわち、 p_m は平均 1、分散 p で与えられる正規分布の形態を示す乱数、 ϕ_m は平均 0、分散 ϕ で与えられる正規分布の形態を示す乱数を意味する。そして、毎回の計算で偏差の値を変更しつつ、各条件につき 100 回の計算を行い、得られた

(a) Effect of the amplitude variations

(b) Effect of the phase variations

(c) Effect of the amplitude and phase variations

Fig.3 Effect of the amplitude and phase variations on the location finding accuracy

結果の平均値を各プロットで表示した。また、同図中における ε_x 、 ε_y はそれぞれ X 軸方向、Y 軸方向の推定誤差であり、 ε は

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2} \quad (12)$$

で与えた。

同図(a)より、振幅偏差は位置推定精度に影響を与えない一方で、偏差量の増加に伴いピーク値は小さくなっていることが分かる。一方、同図(b)より位相偏差は位置推定精度、ピーク値ともに大きな影響を及ぼしていることが分かる。既述の通り、MUSIC ではセンサ間の受信位相差に基づいた位置推定を行うことから、位相偏差が位置推定精度に及ぼす影響は大きいと言える。また、同図(c)は同図(b)の計算条件に振幅偏差を追加した場合であるが、位置推定精度は同図(b)の結果と殆ど同じである。このことから、位置推定精度に位相偏差が及ぼす影響は大きく、また振幅偏差の影響は小さいと言える。しかしながら、振幅偏差が存在することによって評価関数のピーク値は小さくなり、

ピーク値の減少は評価関数のピーク探索を行う本位置推定方法にとって、特に受信信号の S/N が低い場合には推定精度に悪影響を与えることを意味する。このことから、振幅偏差並びに位相偏差とともに、その影響を無くするための補償処理が必要であると考えられる。また、いずれの結果でも、偏差量が Y 軸方向への推定誤差に及ぼす影響は大きい、それは前述した分解能に起因したものであると考えられる。

3. 振幅・位相偏差に対する補償処理と 性能検証に関する計算機シミュレーション

前章までのように、本研究で検討する近距離音源 MUSIC においてアレー受信装置を構成するセンサ間に振幅・位相偏差がある場合には、音源位置の推定精度は著しく低下することが明らかとなった。本章では、センサ間の振幅・位相偏差を補償し良好な位置推定精度をもたらすための方策を、Friedlander¹⁷⁾らの方法を改良し、それを近距離音源の場合に適用するとともに、校正用音源を用いることによって、より高精度に偏差量を推定する方法を検討する。

ここで、仮に式(9)で与えられる偏差行列 $\mathbf{V}$ を補償行列 $\mathbf{V}'$ と推定し、

$$\mathbf{X}'(t) = \mathbf{V}'^{-1} \mathbf{X}(t) \quad (13)$$

のような処理を行うことができれば、以後の解析には受信信号 $\mathbf{X}'(t)$ を用いることによって、良好な位置推定精度が得られると考えられる。なお、 $\mathbf{V}'$ は

$$\mathbf{V}' = \text{diag}[p_1' e^{-j\phi_1'} \quad p_2' e^{-j\phi_2'} \quad \dots \quad p_M' e^{-j\phi_M'}] \quad (14)$$

となる対角行列であり、 p_m' 並びに ϕ_m' はそれぞれセンサ m のセンサ 1 を基準とした振幅偏差、位相偏差の推定値である。

偏差行列 $\mathbf{V}$ を補償行列 $\mathbf{V}'$ として推定する場合、次のような繰り返し計算を行うことによって $\mathbf{V}'$ を得ることができる。すなわち、発信源位置 (x_{k_0}, y_{k_0}) 並びに発信周波数 f_{k_0} が既知となる K_0 個の校正用音源 ($k_0: 1 \sim K_0$) を用いて受信信号 $\mathbf{X}(t)$ をサンプリングする。そして、 $\mathbf{V}'_n \mathbf{X}(t)$ ($n=1$: 初期値、 $\mathbf{V}'_1$ は単位行列に設定) の固有値解析によって得られる雑音部分空間 $\mathbf{E}_n$ と、 (x_{k_0}, y_{k_0}) を用いて逆推定できる信号のモードベクトル $\mathbf{a}(x_{k_0}, y_{k_0})$ を次式のように用いる。

$$Z_n = \sum_{k_0=1}^{K_0} \|\mathbf{a}(x_{k_0}, y_{k_0}) \mathbf{E}_n\| \quad (15)$$

すなわち、MUSIC の原理に基づき、 Z_n を最小化できる $\mathbf{V}'_n$ を繰り返し計算によって推定するものである。つまり、 Z_n から

$$\mathbf{V}'_{n+1} = \text{diag} \left(\frac{Z_n^{-1} \mathbf{w}}{\mathbf{w}^T Z_n^{-1} \mathbf{w}} \right) \mathbf{V}'_n \quad (16)$$

$$(\cdot: \mathbf{w} = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T)$$

として、補償行列を $\mathbf{V}'_{n+1}$ に更新し、繰り返し計算を行うものである。なお、本繰り返し計算の収束条件としては、

$$\|\mathbf{V}'_{n+1} - \mathbf{V}'_n\|_F < \alpha \quad (17)$$

等と設定することができ、本論文では上式で $\alpha = 0.01$ としている。また、Friedlander¹⁷⁾らの方法では遠方信号を対象としており、加えて、校正用信号が無くとも $\mathbf{V}'$ を推定することが可能であることが示されているものの、実際には収束演算において局所解へ収束する可能性がある等の問題を生じることがあることから、

Table 3 Estimated amplitude and phase variations matrix $\mathbf{V}'$

Variations	Sensors	#1	#2	#3	#4
Amplitude		1	0.94628	1.0918	0.87928
Phase(°)		0	8.1829	-9.9938	3.1168

(a) Without compensated matrix
(The interval of the contour line is 4 dB.)

(b) With compensated matrix as shown in Table 3
(The interval of the contour line is 10 dB.)

Fig. 4 Results of location finding without/with the compensated matrix for the amplitude and phase variations

振幅・位相偏差量の高精度推定は難しいことが指摘されており¹⁹⁾、本論文で取り扱うように近距離音源を対象としたアレー受信装置の校正には、発信諸元が既知となる校正用音源を用いることが有効であると考えられる。

表 3 は表 1、表 2 の条件下で計算した図 2(b) に関して、表 1 に示した音源をその発信位置と周波数が既知である校正用音源として扱い、本補償処理を行った場合に推定された振幅・位相偏差量である。すなわち、 K_0 は 1 である。この結果より、表 2 のような振幅・位相偏差の各値に対して、ほぼ正確に補償値が推定されていることが分かる。

図 4 は音源の位置と周波数の他には表 1 に示したシミュレーションの条件と同一として、音源が $(100\text{mm}, 750\text{mm})$ の位置にあって、表 2 と同一の振幅・位相偏差が存在する場合に、上述までに示した $(200\text{mm}, 1,300\text{mm})$ からの音源の結果を校正値として (すなわち、表 3 の結果を補償値として用いて)、位置推定を行った際に得られた結果を示している。同図(a)が補償値を用いない場合、同図(b)が補償値を用いた場合である。このように、位置と周波数が既知となる一つの音源を校正用として用いてセ

Fig.5 Experimental setup at the location finding of the sound source

Table 4 Experimental conditions

Array receiver : Uniformly linear array
Number of array sensors : 2
Distance between sensors : 500mm
Snap shot : 4000
Frequency of sound source : 1000Hz
X-axis location of sound source
: 0mm, 20mm, 40mm, 60mm
Y-axis location of sound source : 1000mm

Table 5 Estimated amplitude and phase variations of sensor #2 for each value of x which shows the X-axis location of sound source

Value of x	0	20	40	60
Amplitude	1.3355	1.3064	1.2353	1.1438
Phase(°)	9.4928	8.9795	9.0680	10.4430

ンサ間の振幅・位相偏差を導出することで、その他から発信される音源の位置を正確に推定できるということが分かる。

4. 音源探索のモデル実験による本方法の性能検証

本章では、本研究で検討している近距離音源 MUSIC に関して、モデル実験による振幅・位相偏差の補償処理性能、並びに補償処理を併用した位置推定精度の評価を行った結果を述べる。実験に際しては、図 5(a)に示すように、CR 発信器によって生成される信号を音源としたスピーカから発生させた。そして、スピーカから発せられる信号を 2 つの騒音計（センサ）によって受信する場合を検討した。主な実験条件は表 4 に示すとおりである。特に、スピーカに関しては、図 5(b)で示すように、コンデンサマイクの中心線で 1,000mm 離れた場所を基準位置 ($x = 0\text{mm}$) として、そこから同図 X 軸方向に位置を 20 mm, 40 mm, 60 mm と 3 通りに変化させた。

ところで、本実験の実施における性能確認事項としては、

- (1) 補償行列の推定性能の確認：各信号 ($x = 0\text{mm}, 20\text{mm},$

(a) Without compensated matrix

(b) With compensated matrix

Fig.6 Experimental results at the location finding of the sound source without/with the compensated matrix in the confirmation matter of (2)

Fig.7 Simulation result without sensor deviations at S/N of 5 dB in conditions of table 4

40mm, 60mm) をそれぞれ校正用音源として用いた場合におけるセンサ間の振幅・位相偏差量の推定

- (2) 補償処理を併用した位置推定精度の評価： $x = 0\text{mm}$ の音源を校正用とした場合に導出したセンサ間の振幅・位相偏差量を補償行列として用いての他音源位置 ($x = 20\text{mm}, 40\text{mm}, 60\text{mm}$) の推定

とする。

表 5 は確認事項(1)に対する結果である。なお、いずれの結果もセンサ 1 を基準としたセンサ 2 の振幅偏差量、位相偏差量を示している。この結果より、校正用信号の位置が異なっても、センサ 2 の振幅・位相偏差の推定値はほぼ一定であることが分かる。このことから、本補償処理では、校正用音源の位置に影響を受けずにアレー受信装置におけるセンサ間の振幅・位相偏差を推定できると言える。

図 6 は確認事項(2)に対する結果である。なお、MUSIC 評価関数を計算する場合、信号の Y 軸座標は既知で、1 次元 (X 軸) 方向のみの掃引として行っている。また、最大値基準 (=0) とする dB 表示とした。同図(a)は補償行列を用いずに、受信信号をそのまま解析した結果、同図(b)は補償行列を用いて受信信号の前処理を行った後に解析した結果である。図中においてカッコ書きで記された値は、それぞれの x の条件下における位置推定

値である。加えて、表 4 の実験条件と同一として計算機シミュレーションを実施した結果を図 7 に示す。これらの結果より、補償行列による前処理無しでは、いずれの位置から発せられた音源に対しても、推定値は大きく離れているものの、補償行列を用いることで、音源位置を高分解能・高精度に推定し得ることが分かる。特に、図 4 によるシミュレーション結果でも示したように、一つの音源を用いて推定した補償行列を用いることで、他から発信される音源の位置を高精度に推定できていることが、実験結果からも確認できる。一方、図 7 のシミュレーション結果では、いずれの音源位置においても推定感度は殆ど変化が無いことに対して、図 6(b)の実験結果では、音源位置が基準位置 ($x=0\text{mm}$) から離れるにつれて感度が低下していることが分かる。このことは、補償値を導出するために用いた校正用音源の位置に起因するものであり、校正用音源の位置付近となる未知音源の位置は高感度に推定できるが、それから離れるにつれて感度は低下するという結果を示している。

5. 結 言

本研究では、MUSIC アルゴリズムを用いて音響発生源の位置を高分解能・高精度に推定することを検討しており、特に本技術を機械診断等における異常音発信箇所測定方法に適用することを目的としている。本論文では、MUSIC を実際に適用するために必要不可欠であるセンサ間の振幅・位相偏差に対する補償処理に関して検討するとともに、モデル実験によって本方法の有効性を検証した。ここでは、本論文で得られた結果を要約し、以下にまとめる。

- (1) 近距離音源に MUSIC を適用する際において、センサ間における振幅偏差並びに位相偏差が位置推定精度に及ぼす影響を検討した結果、特に位相偏差が位置推定精度に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。
- (2) 上記振幅・位相偏差に対して、校正用の基準音源を用いることによって、振幅・位相偏差量を推定する補償処理について検討し、計算機シミュレーションによって有効性を確認し得た。
- (3) 本補償処理を併用した近距離音源 MUSIC の性能評価をモデル実験を通じて行い、所望の性能を得ることができた。

参 考 文 献

- 1) 柴山秀雄, 王 輝: 診断におけるアレー信号処理について, 日本音響学会誌, **58**, 5 (2002) 295.
- 2) 豊田利夫, Chen P., 佐々木豊: 生産プラントの知的点検・診断ロボットに関する研究 (第 2 報) —異常音のスペクトルによる異常設備のファジイ探索法—, 精密工学会誌, **62**, 2 (1996) 205.
- 3) 貞本 晃, 村上芳則: 音波によるパイプのガス漏れ位置検知, 精密工学会誌, **65**, 12 (1999) 1713.
- 4) R.O.Schmidt: Multiple emitter location and signal parameter estimation, IEEE Trans. Antennas and Propagation, **34**, 3 (1986) 276.
- 5) 菊間信良: アレーアンテナによる適応信号処理, 科学技術出版, (1998) 269.
- 6) 畝田道雄, 石川憲一: 近距離にある音源の高分解能位置推定法に関する研究, 振動・音響新技術シンポジウム講演論文集, (2003) 107.
- 7) Michio Uneda, Ken-ichi Ishikawa: A proposal of the MUSIC algorithm for short-range signal sources and the application for the location finding, Proceedings of ATEM' 03, (2003) GSW0132.
- 8) 永田仁史, 安倍正人, 城戸健一: 多数センサによる音源位置の同定, 日本音響学会誌, **46**, 7 (1990) 531.
- 9) 永田仁史, 安倍正人, 城戸健一: 多数センサによる音源波形の推定, 日本音響学会誌, **47**, 4 (1991) 268.
- 10) 柴山秀雄: デジタル技術と騒音・振動の測定システム, 騒音制御, **24**, 5 (2000) 292.
- 11) 王 輝, 柴山秀雄, 三輪基敦, 福永一保, 石井 貢: MUSIC 法を用いた騒音源の到来方向推定について, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, (2000) 229.
- 12) J.W.Choi, Y.H.Kim: Spherical Beam-Forming and MUSIC Methods for the Estimation of Location and Strength of Spherical Sound Sources, Mechanical Systems and Signal Processing, **9**, 5 (1995) 569.
- 13) 中野振一郎, 王 輝, 柴山秀雄: 平面アレーを用いた MUSIC による騒音発生源の方向推定, 日本音響学会講演論文集, (2000) 493.
- 14) F.Asano, H.Asah, T.Matsui: Sound Source Localization and Separation in Near Field, IEICE Trans. Fundam., E83-A (2000) 2286.
- 15) 高田 博, P.F.Wang, P.Davies: 近距離音場ホログラフィー法に関する研究 (ARMA モデルによる基準信号の選択), 日本機械学会論文集 (C 編), **61**, 587 (1995) 366.
- 16) 長松昌男: 余分な空間領域周波数を用いた近距離音響ホログラフィ法の開発, 振動・音響新技術シンポジウム講演論文集, (2003) 103.
- 17) B.Friedlander, A.J.Weiss: Direction finding in the presence of mutual coupling, IEEE Trans. Antennas and Propagation, **39**, 3 (1991) 273.
- 18) 畝田道雄, 外園博一: 精密計測レーダ用大開口等価円形アレーアンテナによる高分解能測角処理のためのチャネル間の振幅・位相偏差補償, 電子情報通信学会論文誌 B, **J85-B**, 7 (2002) 1120.
- 19) 新井隆宏, 原 六蔵, 山田寛喜, 山口芳雄: 既知の波源を用いたスーパーレゾリューションアレー校正法について, 電子情報通信学会誌 B, **J86-B**, 3 (2003) 527.