

4 点検出信号のバイスペクトル解析による 定常不規則音源の 3 次元位置推定

平田 克己*¹

3D-localization of A Stationary Random Acoustic Source
by Bispectral Analyses of 4-point Detected Signals

Katsumi HIRATA

To develop the useful sound environmental recognition system, the method of 3D-localization of a sound source by using bispectral analysis of 4-Point detected signals is proposed. The method uses information about amplitude attenuation and propagation delay extracted from amplitude ratios and angles of auto- and cross-bispectra of detected signals. It is expected that using bispectral analysis affects less influence of Gaussian noise than using conventional power spectral one. In this paper, the basic principle of the method is mentioned first, and its validity and characteristics are considered from results of fundamental experiments assumed ideal circumstances.

KEYWORDS: 3D-localization, position, sound source, bispectra, 4-point detection

1. はじめに

有用な音環境認識システムの構築において、音源の位置を推定することは重要な問題である。我々人間は、ある音源から左右の耳に届いた信号の伝搬遅延時間や振幅の違いといった情報を用いて、その音源の位置を推定する能力を持っている。本研究はこのような音源定位機能を工学的にできるだけ簡便な方法で実現しようとするものである。

この種の問題に対しては、種々の手法が提案されているが、その多くは音声や単一正弦波のような確定的な信号を対象としており、観測雑音の影響についてもあまり考慮されていなかった^{1)~5)}。これまでに、パワースペクトル解析を用い、不規

則信号にも適用可能である音源位置推定法も提案してきたが、観測雑音に関しては各検出間で独立に加わるようなものを仮定としていた⁶⁾。したがって、音源とは別に騒音源があるような場合には、各検出点間で同一あるいは強い相関を持つ雑音に加わることとなり、無相関雑音を仮定していた上述の手法では対応できない可能性がある。

そこで著者は、理論的にガウス性雑音の影響を受けない 3 次統計量であるバイスペクトル解析を用いた位置推定手法を考案した。これによれば、ガウス性でさえあれば上述のように相関を持つ雑音が付加されるような状況にも適用出来ることが期待できる。

本論文ではまず提案手法の基本的原理を述べる。その後、反射のない理想的な環境下を想定して行

* 1 電気電子創造工学科 (Dept. of Innovative Electrical and Electronic Engineering), E-mail: hirata@oyama-ct.ac.jp

った基礎実験について述べ、その結果の検討を通して、本手法の妥当性と特徴を明らかにする。

2. 音源の位置推定原理

2. 1 検出系の配置と検出信号の定式化

本手法では、空間的に間隔をおいて固定設置した4検出点で、固定された単一の定常不規則音源からの音響信号を検出し、その自己および相互バイスペクトル解析により、音源の3次元位置を推定するものである。図1に音源と検出系の幾何学配置を示す。ここで、 P は音源、 M_i ($i = 1, 2, 3, 4$)は検出点を表している。 r_i は音源からそれぞれの検出点までの距離である。検出点は位置推定分解能を全方位に極力均等にするために、互いに等間隔になるように正四面体の頂点に配置する。その重心が原点になるように直角座標系を想定する。

音源 P から放射される定常不規則信号を $s(t)$ とすると、各検出点での検出信号 $x_i(t)$ は次式のように表せる。

$$x_i(t) = \frac{1}{r_i} s\left(t - \frac{r_i}{c}\right) + n_i(t), i = 1, 2, 3, 4. \quad (1)$$

ここで、 $n_i(t)$ は検出点で加わるガウス性加法雑音、 c は音速である。したがって、 $s(t)$ の自己バイスペクトルを $\Phi_{SSS}(f_1, f_2)$ とすると、検出信号 $x_i(t)$ の自己バイスペクトルは次式のようになる。

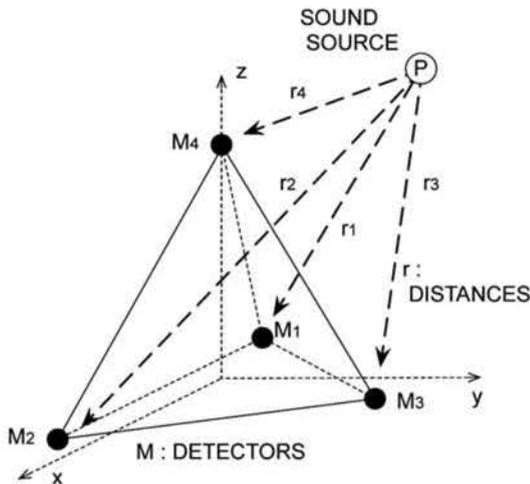


図1 音源と検出系の幾何学配置

$$\Phi_{x_i x_i x_i}(f_1, f_2) = \frac{1}{r_i^3} \Phi_{SSS}(f_1, f_2), \quad (2)$$

$$i = 1, 2, 3, 4.$$

一方、 $x_4(t)$ に対する $x_i(t)$ ($i = 1, 2, 3$)の相互バイスペクトルは次式のようになる。

$$\Phi_{x_i x_i x_4}(f_1, f_2) = \frac{1}{r_i^2 r_4} \Phi_{SSS}(f_1, f_2) e^{-\frac{j2\pi(f_1+f_2)(r_4-r_i)}{c}}, \quad (3)$$

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

ガウス性信号の3次以上の統計量（ここではバイスペクトル）は0になることから、式(2)および(3)には雑音 $n_i(t)$ の項はないことが分かる⁷⁾。

2. 2 情報抽出と位置推定

式(2), (3)より、検出信号の自己および相互バイスペクトルは音源放射信号の自己バイスペクトルが伝搬距離の3乗 (r_i^3 あるいは $r_i^2 r_4$) に反比例して減衰するとともに、さらに相互バイスペクトルには伝搬距離差 ($r_4 - r_i$) に比例した線形位相がかかっていることが分かる。これらのバイスペクトルの振幅比と位相から次式のような関係を導くことができる。

$$A_i(f_1, f_2) := \frac{|\Phi_{x_i x_i x_4}(f_1, f_2)|}{|\Phi_{x_i x_i x_i}(f_1, f_2)|} = \frac{r_i}{r_4}, \quad (4)$$

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

$$d_i(f_1, f_2) := \frac{1}{2\pi(f_1 + f_2)} \arg \left[\frac{\Phi_{x_i x_i x_4}(f_1, f_2)}{\Phi_{x_i x_i x_i}(f_1, f_2)} \right] = \frac{r_4 - r_i}{c}, i = 1, 2, 3. \quad (5)$$

式(4)と(5)に示す伝搬距離比 $A_i(f_1, f_2)$ と伝搬時間差 $d_i(f_1, f_2)$ を連立させて解くことにより、伝搬距離 r_i を得ることができる。これに検出系の幾何学配置を考慮すれば、音源の3次元位置を得る。これが本手法による音源の位置推定原理である。

放射信号が解析帯域全体に渡って自己バイスペクトルの値を持つような信号であれば、 $A_i(f_1, f_2)$ と $d_i(f_1, f_2)$ は周波数 f_1, f_2 によらず一定値を持つ

はずである。そこで、実際の情報抽出のときには、有意な値を持つ帯域 B_H で次式のようにそれぞれを平均すれば、精度良くそれらの情報を抽出できるものと考えられる。

$$\hat{A}_i = \frac{1}{B_H^2} \iint_{B_H} A_i(f_1, f_2) df_1 df_2, i = 1, 2, 3. \quad (6)$$

$$\hat{d}_i = \frac{1}{B_H^2} \iint_{B_H} d_i(f_1, f_2) df_1 df_2, i = 1, 2, 3. \quad (7)$$

3. 基礎実験

3.1 実験条件

提案手法の妥当性と特徴を明らかにするために、つぎのような基礎実験を行った。音源放射信号として直径約 50 mm の小型ファンから発生する異常音(モータの軸受に損傷があるものと思われる)を用い、4パターン想定した音源の3次元位置に応じた振幅減衰および時間遅延を施して、理想的な4点検出信号を作成した。このように作成した検出信号にガウス性白色雑音を様々な強度で付加して、音源の位置推定を行った。この実験は、理想的な環境下での本手法の妥当性を確認するとともに、雑音が位置推定精度に及ぼす影響を明らかにすることが目的である。表1に実験条件をまとめたものを示す。

表1 実験条件

音源位置 座標 (x, y, z) [m]	A	(0.50, 0.25, 1.10)
	B	(1.10, 0.54, 2.00)
	C	(0.00, 0.00, 1.50)
	D	(0.00, 0.00, 2.00)
検出信号の S/N 比	∞ , 20, 15, 10, 5 dB	
音源の仕様	直径約 50mm 小型ファン異常音	
検出点間隔	1.0 m	
標本化周波数	44.1 kHz	
解析帯域	0 ~ 22.05 kHz	
解析データ長	0.092 sec	
バイスペクトル推定法	FFTによる直接法	

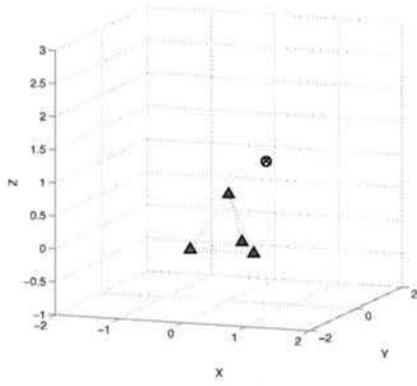
以上のような条件で、それぞれの音源位置および S/N 比について、それぞれ位置推定実験を 50 回行い、それによる位置推定値の統計的性質について評価した。

3.2 実験結果と考察

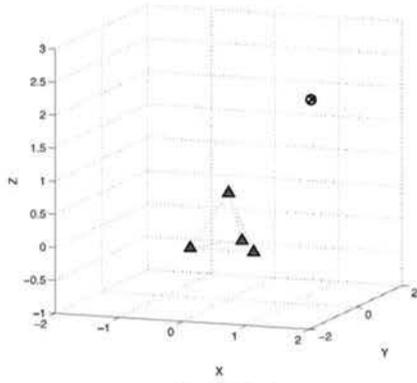
図2に S/N 比が ∞ 、すなわち雑音を付加しない場合の位置推定結果について、推定位置の分布図を示す。(a)~(d)はそれぞれ音源位置 A~D に対応しており、○印が真の音源位置を、×印が推定位置を、▲印が検出点をそれぞれ表している。いずれの位置の音源に対しても、50 回分の×印が○印のほぼ中央に重なって表示されていることから、偏りばらつきがほとんどなく、非常に良好に推定できていることが分かる。このことにより、理想的な環境下においては、本手法によるバイスペクトル解析により振幅比と時間差の情報を抽出でき、位置推定が可能であると言える。

つぎに、検出信号にガウス性白色雑音を付加した場合について評価する。図3に、実験結果の一例として、音源位置 A の場合について、S/N 比が (a)20dB, (b)15dB, (c)10dB, (d)5dB の場合の位置推定値の分布図を示す。S/N 比が悪くなると推定値のばらつきは大きくなるものの、いずれも真の音源位置を中心として分布していることが分かる。S/N 比が最も悪い 5 dB というのは雑音が大きく相当悪い状況であり、そのような環境下でもある程度の位置推定が可能であることを示している。

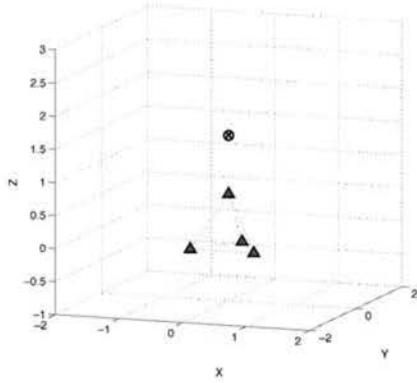
他の音源位置に対する推定値の分布図は割愛するが、表2に位置推定値の(a)偏りと(b)RMS (Root Mean Square) 誤差をまとめたものを示す。偏りとは 50 回分の位置推定値の平均値から真値を引いたものである。RMS 誤差とは偏り値に分散値を加えたものであり、推定値の平均誤差を表すものである。雑音がない場合 (S/N 比 ∞) は偏りもばらつきもほとんどなく、最大でも 2cm 弱の誤差で推定できていることが分かる。S/N 比が悪くなるにしたがって、音源の位置にかかわらず、特に RMS 誤差の増加が顕著である。このことは、付加雑音が位置推定値の局所化に悪影響を及ぼしていると解釈できる。一方、偏りは全体的には S/N 比の悪化に伴って大きくなる傾向はあるものの、数 cm ~ 数十 cm にとどまっている。したがって、例えば 1 回の推定に対して複数個の推定値を平均すれば、誤差を小さくすることができると考えられる。



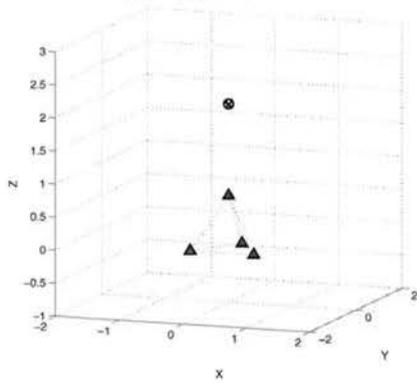
(a) 音源位置 A



(b) 音源位置 B

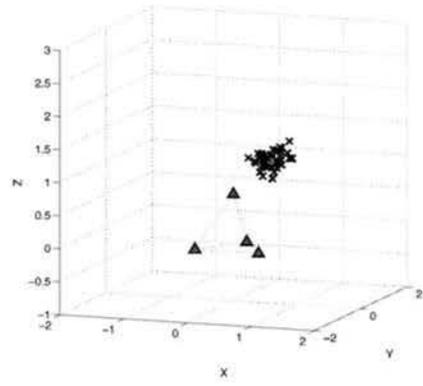


(c) 音源位置 C

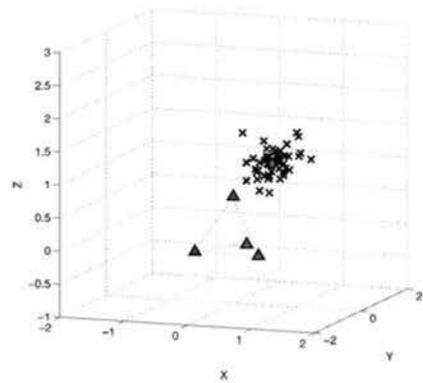


(d) 音源位置 D

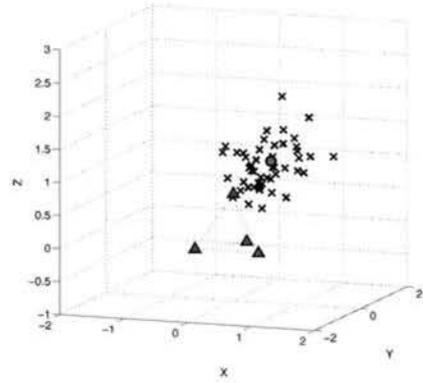
図2 位置推定値の分布 (付加雑音なし)



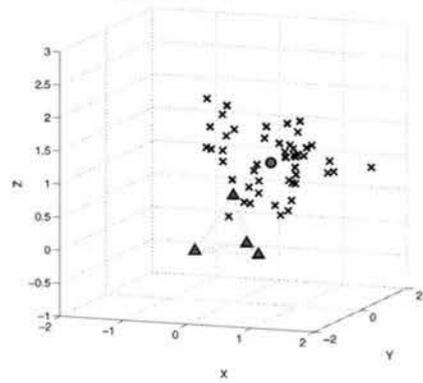
(a) S/N 比 : 20 dB



(b) S/N 比 : 15 dB



(c) S/N 比 : 10 dB



(d) S/N 比 : 5 dB

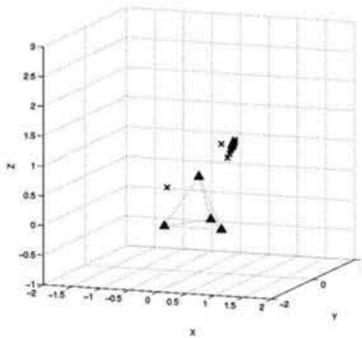
図3 位置推定値の分布 (音源位置 A)

表2 位置推定値の統計的性質
(a) 偏り [m]

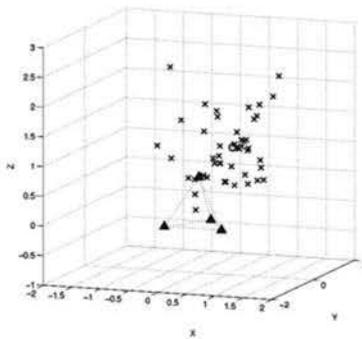
		音源位置			
		A	B	C	D
S/N比 [dB]	∞	0.0147	0.0180	0.0035	0.0088
	20	0.0229	0.0161	0.0264	0.0325
	15	0.0430	0.1036	0.0480	0.1163
	10	0.1019	0.4559	0.1543	0.0792
	5	0.0547	0.3967	0.2362	0.3184

(b) RMS 誤差 [m]

		音源位置			
		A	B	C	D
S/N比 [dB]	∞	0.0147	0.0180	0.0035	0.0088
	20	0.1869	0.2972	0.1837	0.1742
	15	0.2807	0.4278	0.1956	0.3212
	10	0.4947	0.7893	0.4076	0.4957
	5	0.7067	1.0849	0.8847	0.7565



(a) S/N 比 : ∞



(b) S/N 比 : 20 dB

図4 簡易推定による位置推定値の分布
(音源位置 A)

3. 3 簡易バイスペクトル解析による方法

バイスペクトルは2つの周波数(f_1, f_2)をパラメータとして持つ2次元情報である。そのため、計算量が大きく、処理時間が長くなったり、多くのメモリ領域を必要としたりする。実時間での音源位置推定の実現のためには、さらなる高速化が必要となることを考え、簡易的な処理による実現を検討する。

ここではその一例として、式(2)と(3)で示される自己および相互バイスペクトルの $f_1 = f_2$ なる成分のみを用いて情報抽出し、位置推定をする簡易バイスペクトル解析による方法について、その実験結果を報告する。図4がその簡易手法による位置推定値の分布図であり、(a)が付加雑音なし、(b)がS/N比20 dBの場合である。音源位置はいずれもAである。雑音がない時は、推定値が少しばらついてはいるもの、十分に位置推定ができていけると言える。S/N比が20 dBの時はばらつきが非常に大きくなっている。ただし、6 cm程度の偏りで推定できており、前述した数個の推定値を平均する処理を用いれば、用途によっては問題ないレベルであると考えている。

信号長にもよるが今回の実験条件下では、前節までで述べた方法に比べて、計算時間は1/100以下に、メモリの消費量は1/200程度に抑えることができた。

4. おわりに

不規則音源の3次元位置推定問題について、4点検出信号のバイスペクトル解析を用いた手法を提案し、基礎実験結果を通して手法の妥当性と特徴を明らかにした。その結果、付加雑音のない理想的な環境下において提案手法が妥当なものであることが確認できた。また、ガウス性の付加雑音が存在する場合においては、位置推定値のばらつきが大きくなることから、バイスペクトル推定や情報抽出の高精度化が課題であることが分かった。さらには、簡易バイスペクトル解析を用いることで、位置推定精度は落ちるが少ない計算量で実現可能であることが分かった。

今後は上述の課題に加えて、複数の音源が存在したり、反響があったりするような場合への適用について検討してゆく必要があると考える。

参考文献

- 1) Y.Yamasaki and T.Itow: Measurement of spatial information in sound fields by closely located four point microphone method, J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 10-2 (1989)
- 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) 岡田, 佐藤, 森田: 3マイクロフォン系による3次元音源定位と音源分離, システム制御情報学会論文誌, 6-3, 149/155 (1993)
- 4) 岡村, 島田, 穂刈: 任意配置された複数マイクによる単一話者位置推定, 電子情報通信学会論文誌, J80-A-11, 2054/1058 (1997)
- 5) 山崎: 境界要素法に遺伝的アルゴリズムを併用した音源位置同定の実験的検討, 日本音響学会誌, 54-6, 417/425 (1998)
- 6) 平田, 佐々木: 多点検出による近方場定常不規則音源の3次元位置推定法とその実験的評価, 計測自動制御学会論文集, 36-6, 467/472 (2000)
- 7) C. L. Nikias et al.: Higher-order Spectra Analysis, Prentice Hall (1993)

【受理年月日 2013年 9月27日】