3 マイクロフォン系による 3 次元音源定位と音声分離 —理論的考察とシミュレーション*

岡田 修一**・佐藤 史尚**・森田 龍彌**

3-Dimensional Sound Localization and Voice Separation by 3-Microphone System —Theoretical Study and Simulation*

Shuuichi OKADA**, Fumitaka SATO** and Tatsuya MORITA**

The auditory system has flexible functions of voice recognition in noisy environment. This ability should be due to not only the linguistic function but also binaural sound localization.

Sound localization and voice separation based on fundamental 2-dimensional acoustical field model has been proposed formerly. However, the problem becomes more complicated according to increase of speakers.

In this paper, more realistic problem of 3-dimensional sound localization and voice separation is discussed theoretically.

Validity of the algorithm for solving the problem is confirmed by simulation analysis. That is, mixed voices of three persons which would be detected by the microphones are synthesized using voice data base. Then, the individual voice is separated after estimating presetting speaker locations on the basis of the algorithm.

Satisfactory results are obtained in this simulation analysis.

1. ま え が き

われわれ人間にとって視覚機能は、最も重要な感覚機能である。しかし、視覚機能の及ぶ範囲は比較的限られた領域であるため、体軀、頭部あるいは眼球を動かして、対象物に視野に合わせる必要がある。聴覚機能は、このような視覚機能の補助、あるいは発現の前段階として、重要な役割を果たしている。また、われわれの聴覚は、パーティ会場のような騒音中でも話者の言葉を聞き取ることができる機能をもっている。この聴覚系の優れた聴取能力には、言語中枢における会話の理解力が働いていると考えられるが、両耳による音源定位機能も重要な働きをしていると考えられる。

一方、情報処理システムやロボットは、人間の代行装置として開発され、人間のもつ優れた機能に接近すべく研究されてきた。すなわち、視覚機能の及ばない周辺領

域から発生するさまざまな音の位置関係を把握し、選択する聴覚の環境適応性は、情報処理システムやロボットにとっても重要な機能であるといえる。

このような音源定位と複数話者の音声分離のアルゴリズムについては、従来音場モデルに基づく方法など、すでにいくつか論文が発表されている^{1)~4)}。しかし、従来は音源位置が既知となっている状況での音声分離が扱われていた。そこで、筆者らは先に音声のスペクトルの差異に着目して音源位置を推定し、その位置情報を用いて音声を分離する方法を提案し、音声分離の可能条件および精度について報告した^{5)~7)}。

本研究では、従来の2マイクロフォンによる平面上の音源定位を、3マイクロフォンによるより現実的な3次元空間の音源定位に拡張し、3話者の音声分離についてシミュレーションによって検討する。

2. 音声分離法

2.1 音声分離の基本手順

音声分離は次の3段階を実行することによって遂行されるものである。

(1) 音場モデルに基づき、複数のマイクで採取した音

* 原稿受付 1992. 5. 20

** 大阪大学 工学部 Faculty of Engineering, Osaka University; Yamadaoka 2, Suita-city, Osaka 565, JAPAN

Key Words: sound localization, voice separation, acoustical field model, voice processing, parameter estimation for acoustical field.

声（マイク音）より、音源位置に関するパラメータを推定する、すなわち、音源定位を行う^{5),6)}。

- (2) マイク音に音場モデルより求めた逆伝達関数を掛けることにより、音声を分離する^{5),6)}。
- (3) 自由音場を仮定した上記の分離法では、現実の環境においては誤差を生じることは避けられない、そこで分離音声の評価を行い、推定誤差を減少させるようにパラメータを修正するフィードバックが(1)、(2)の補助として必要である^{6),7)}。

以上の各段階における基本的な問題点については、従来の2マイクロフォンによる2次元空間音声分離において検討した。

本論文では、3次元空間における上記(1)、(2)の問題に主眼において述べる。

2.2 音声分離の原理

自由音場において、点音源 j ($= 0, 1, 2, \dots, m-1$) から発生した信号 $u_j(t)$ をマイク i ($= 0, 1, 2, \dots, n-1$) で検出する場合、マイクに入力される音圧 $v_i(t)$ は、周波数領域において、連立方程式

$$\begin{aligned} V(\omega) &= G(\omega)U(\omega) \\ G_{ij} &= \left(\frac{K}{\tau_{ij}} \right) \exp(-j\omega\tau_{ij}) \end{aligned} \quad (1)$$

によって表わすことができる^{8),9)}。ここで、 $V(\omega)$ 、 $U(\omega)$ はそれぞれ $v_i(t)$ 、 $u_j(t)$ のフーリエ変換を要素とする縦ベクトル、 $G(\omega)$ は音場の伝達特性を表わす行列で、 G_{ij} はその要素である。また、 τ_{ij} は音波が音源 j からマイク i に達するまでの時間 [msec] であるが、距離の単位として、1 [msec] の間に音が伝搬する距離 [0.34 m] を用いれば、音源とマイク間の距離と見ても差し支えない。なお、 K は上記の時間-距離の変換係数、マイクの増幅率などを含めた係数である。したがって、音源数 m とマイク数 n が等しく、 $\det G \neq 0$ であれば、

$$U(\omega) = G(\omega)^{-1}V(\omega) \quad (2)$$

と表現できる。ここで V はマイクで検出した音で既知であるから、音場特性 G が既知、すなわち音源位置に対応するパラメータ τ_{ij} が推定できれば、音源信号を分離することができる。

3. 3次元空間音源定位

3.1 幾何学的考察

ここでは最も基本的な場合として、Fig. 1 (a) に示すように、3次元空間座標をとり、この空間にある三つの音源信号 $u_0(t)$ 、 $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$ を、Fig. 1 (b) に示す半径 r の円に内接する正三角形（辺長を $2a$ 、 $r^2 = a^2 + b^2$ とする）の頂点に配置された3個のマイク、

(a) Coordinate for the sound location

(b) Arrangement of three microphones

Fig. 1 Situation of sound localization

$$\begin{aligned} M_0 &= (0, 0, 2b), \quad M_1 = (a, 0, -b), \\ M_2 &= (-a, 0, -b) \end{aligned}$$

で検出する場合を想定する。

音源 j の位置 (x_j, y_j, z_j) に対する原点からの距離、方位角、仰角を (R_j, θ_j, ϕ_j) とすれば、

$$\begin{aligned} x_j &= \frac{R_j \tan \theta_j}{h_j}, \quad y_j = \frac{R_j}{h_j}, \quad z_j = \frac{R_j \tan \phi_j}{h_j} \\ h_j &= \sqrt{(1 + \tan^2 \theta_j + \tan^2 \phi_j)} \\ \tan \phi_j &= \frac{\tan \theta_j}{\cos \theta_j} \end{aligned} \quad (3)$$

となる。また、音源 j から各マイクまでの距離（音の伝達時間）は

$$\begin{aligned} \tau_{0j} &= \sqrt{R_j^2 + r^2 - 4bz_j} \\ \tau_{1j} &= \sqrt{R_j^2 + r^2 - 2ax_j + 2bz_j} \\ \tau_{2j} &= \sqrt{R_j^2 + r^2 + 2ax_j + 2bz_j} \\ b &= \frac{r}{2}, \quad r^2 = a^2 + b^2 \end{aligned} \quad (4)$$

となる。したがって、マイク音より τ_{0j} 、 τ_{1j} 、 τ_{2j} が推定

できれば、音源位置は

$$\begin{aligned}
 R_j &= \sqrt{\frac{\tau_{0j}^2 + \tau_{1j}^2 + \tau_{2j}^2}{3 - r^2}} \\
 \tan \theta_j &= \pm \frac{Q}{\sqrt{P^2 Q^2 - P^2 - Q^2}} \\
 \tan \phi_j &= \pm \frac{P \cos \theta}{\sqrt{P^2 Q^2 - P^2 - Q^2}} \\
 P &= \frac{2\sqrt{3} r R_j}{\tau_{2j}^2 - \tau_{1j}^2} \\
 Q &= \frac{6 r R_j}{(\tau_{1j}^2 - \tau_{0j}^2) + (\tau_{2j}^2 - \tau_{0j}^2)}
 \end{aligned} \quad (5)$$

と求めることができる。

なお、音源までの距離 R がマイク間隔 $2a$ に比べて充分大きい場合には、(4) 式より

$$\begin{aligned}
 \tau_{R0j} &= \tau_{0j} - R_j = -\frac{2b \tan \phi_j}{h_j} \\
 \tau_{R1j} &= \tau_{1j} - R_j = -\frac{a \tan \theta_j - b \tan \phi_j}{h_j} \\
 \tau_{R2j} &= \tau_{2j} - R_j = \frac{a \tan \theta_j + b \tan \phi_j}{h_j}
 \end{aligned}$$

と近似することができ、マイクまでの距離の差

$$\begin{aligned}
 \Delta \tau_{1j} &= \tau_{0j} - \tau_{1j} = \tau_{R0j} - \tau_{R1j} \\
 \Delta \tau_{2j} &= \tau_{0j} - \tau_{2j} = \tau_{R0j} - \tau_{R2j}
 \end{aligned} \quad (6)$$

を用いて

$$\begin{aligned}
 \tan \theta_j &= \pm \frac{\tau_b}{\sqrt{4a^2 - \tau_a^2 - \tau_b^2}} \\
 \tan \phi_j &= \pm \frac{\tau_a \cos \theta}{\sqrt{4a^2 - \tau_a^2 - \tau_b^2}} \\
 \tau_a &= \frac{\Delta \tau_{1j} + \Delta \tau_{2j}}{\sqrt{3}} \\
 \tau_b &= \Delta \tau_{1j} - \Delta \tau_{2j}
 \end{aligned} \quad (7)$$

と近似することができる。すなわち、伝達時間差 $\Delta \tau_{1j}$, $\Delta \tau_{2j}$ は方位角、仰角を推定するための重要なパラメータであることが分かる。また、(6) 式により距離 R_j は消去されていることが分かる。

3.2 伝達時間の推定法

3人の話者が同一のスペクトルパターンをもつ音声を発声する確率は低いと考えられる。したがって、各時刻におけるスペクトル U_0 , U_1 , U_2 について、いずれかのパワ U_j がほかの二つのパワより十分大きいような周波数（たとえばホルマント）が存在すると考えられる。いま、このような周波数 $\omega = 2\pi f$ に着目すれば、三つ

のマイクに入射する音 V_0 , V_1 , V_2 はそれぞれ

$$\begin{aligned}
 V_0(\omega) &= \left(\frac{K}{\tau_{0j}} \right) U_j(\omega) \exp(-j\phi_0) \\
 V_1(\omega) &= \left(\frac{K}{\tau_{1j}} \right) U_j(\omega) \exp(-j\phi_1) \\
 V_2(\omega) &= \left(\frac{K}{\tau_{2j}} \right) U_j(\omega) \exp(-j\phi_2)
 \end{aligned} \quad (8)$$

と近似できる。ただし実際の処理においては、どの音源であるか、この時点では分からない。

(8) 式において、たとえば V_0 を基準として、位相差と振幅比よりそれぞれ、伝搬時間の差と比

$$\Delta \tau_{1j} = \frac{\phi_0 - \phi_1}{\omega} + \frac{n}{f} \quad (9a)$$

$$\Delta \tau_{1j} = \tau_{0j} - \tau_{1j}, \quad \rho_{1j} = \frac{\tau_{0j}}{\tau_{1j}}$$

$$\Delta \tau_{2j} = \frac{\phi_0 - \phi_2}{\omega} + \frac{n}{f} \quad (9b)$$

$$\Delta \tau_{2j} = \tau_{0j} - \tau_{2j}, \quad \rho_{2j} = \frac{\tau_{0j}}{\tau_{2j}}$$

を求める。ここで、 $(\Delta \tau_{ij}, \rho_{ij})$, $i = 1, 2$ は、音源位置に対応したパラメータである。 $\Delta \tau_{ij}$ は不定項 n/f のとり方で一意に決めることができないが、 n は条件

$$\begin{aligned}
 |\Delta \tau_{ij}| &< 2a \\
 (\rho_{ij} - 1) \Delta \tau_{ij} &> 0
 \end{aligned} \quad (10)$$

を満たすように選ばなければならない。いま分析周波数の上限を f_m とすれば、(10) 式を満たす不定値 n は

$$|n| < 4af_m \quad (11)$$

を満たす数だけ存在し((9) 式で $n > 0$, $(\phi_0 - \phi_1)/\omega = -2a$ または、 $n < 0$, $(\phi_0 - \phi_1)/\omega = 2a$ とおく)、この内のただ一つが音源 j に対応するものである。すなわち分析周波数帯域は、音声帯域を包含することが望ましいが、マイク間隔 $2a$ を固定したままで、高周波数域まで広げると、偽の $\Delta \tau_{ij}$ が増加するという問題がある。この条件は2マイクによる2次元音源定位でも考慮されたものである。

一方、3次元音源定位では(9a), (9b) 式より、二組の τ_{0j} がそれぞれ

$$\begin{aligned}
 \tau_{0j} &= \frac{\rho_{1j} \Delta \tau_{1j}}{\rho_{1j} - 1} \\
 \tau_{0j} &= \frac{\rho_{2j} \Delta \tau_{2j}}{\rho_{2j} - 1}
 \end{aligned} \quad (12)$$

と求められる。この二つの値は本来等しいはずであるが、(8) 式が近似式であることと、音環境のさまざまな不確定性のため、現実には等しくならない。

そこで、これらの τ_{0j} がともに(10) 式の条件を満たすとき、この対から得られる τ_{0j} の平均値を、 τ_{0j} の推定

値とする。いまこれを τ_{0j}^* と表わすと、 τ_{0j}^* は τ_{0j} とは異なる値である。したがって、 τ_{0j}^* を (9a), (9b) 式の τ_{0j} として用いると、 $\Delta\tau_{1j}$, $\Delta\tau_{2j}$ の値が変わってしまう。3.1 で述べたように、 $\Delta\tau_{1j}$, $\Delta\tau_{2j}$ は音源の方位を決める重要なパラメータであり、この値が変わることは都合が悪い。そこで $\Delta\tau_{1j}$, $\Delta\tau_{2j}$ の値が変わらないように τ_{1j} , τ_{2j} の値を

$$\begin{aligned}\tau_{1j}^* &= \tau_{0j}^* - \Delta\tau_{1j} \\ \tau_{2j}^* &= \tau_{0j}^* - \Delta\tau_{2j}\end{aligned}\quad (13)$$

と補正する必要がある。以上の補正は 2 次元音源定位では考慮する必要がなかった処理である。

3.3 統計的処理

以上が音源定位法の概要であるが、現実の音声分離では下記のような問題に対処するための統計的処理が必要になる。

- (1) 推定の基礎となる (8) 式は近似式である。
- (2) (10) 式の条件を満たす不定値 n のうち、正しいものを選び出す必要がある。
- (3) いま処理の対象となっているデータがどの音源に由来するものであるか識別する必要がある。

そこで、3.2 で述べたような周波数分析を各時刻について行い、各周波数について (11) 式を満たすすべての $\Delta\tau_{1j}$, $\Delta\tau_{2j}$ に関するヒストグラムを作る。ヒストグラムにはそれぞれ 3 音源に対応する極大点が現れると期待される (Fig. 2 参照)。この極大点を値の大きいものから三つ選出し、これらの極大点に仮番号を与える。次にその後のマイク音から得られる $\Delta\tau_{1j}$, $\Delta\tau_{2j}$ 、あるいはヒストグラムに用いた個々の $\Delta\tau_{1j}$, $\Delta\tau_{2j}$ を用いて、(11) 式を満たす範囲で n の値を変えながら、三つの極大点のいずれに最も近いかを調べ、その番号をこの $\Delta\tau_{1j}$, $\Delta\tau_{2j}$ に対応する音源であると識別する。

以上の手順により、個々の $\Delta\tau_{1j}$, $\Delta\tau_{2j}$ が 3 音源に対応する三つのグループに分類されれば、グループごとに $\Delta\tau_{1j}$, $\Delta\tau_{2j}$ および付随する ρ_{1j} , ρ_{2j} のヒストグラムを作り、その極大値を与える ($\Delta\tau_{1j}$, ρ_{ij}) から (5) 式を用いて、音源の位置 (距離, 方位角, 仰角) を推定する (Fig. 3 参照)。

4. 音声分離

音源位置が推定できれば、(2) 式を用いて音声分離を行うことができるが、ここで注意すべき問題点がいくつかある。

音源が三つ以上ある場合、上記の $\Delta\tau_{1j}$, $\Delta\tau_{2j}$ に関するヒストグラムには、理論上、音源に対応する数の極大点が現れ、その極大点に基づいて音源位置を推定するこ

とができる。すなわち、複数音源について音源定位は可能である。しかし、(2) 式よりわかるように、マイクの個数以上の音声を分離することは困難である。一般化逆行列を用いて代表解を求める方法は考えられるが、正しく音声分離が行える保証はない。すなわち、音源定位と音声分離は異なった次元の問題である。

音声分離の処理では (2) 式に示すように、音場伝達関数の行列式を右辺分母として使用する必要があるが、3 次元音声分離ではこの分母が不安定根をもつ場合が多い。理論的には、この不安定根を持つ因数と等しい因数が分子にも現れ、両者が相殺して不安定根が消去される。しかし、現実の音源定位では誤差があるため、不安定根が消去されないで残ってしまうのである。そこで、制御システムの安定化の手法として知られている、不安定極の再配置法を適用して安定化を行った。すなわち分母について因数分解実行し、不安定根 (複素平面上の単位円外に位置するもの) があれば、偏角は不変のまま絶対値を減少させることにより、安定領域 (単位円内) に移動したのち、因数を展開して分母を再合成する方法である。なお、不安定因数を単純に除去する (1 に置き換える) と、分子の次数より分母の次数が低くなる場合があり都合が悪い。

また、(2) 式において伝達関数行列の要素は、 Z 変換では

$$G_{ij} = \frac{K}{\tau_{ij}} Z^{-\tau_{ij}} \quad (14)$$

と表わされる。ここで T_{ij} は τ_{ij} をサンプル周期で量子化した値である。(2) 式の逆行列の各要素は、この G_{ij} の積の和と差より成り、 G_{ij} の積は係数の積とむだ時間 τ_{ij} の和で表わされる。むだ時間は、データの移動で実現できる。ただし、時間は量子化されているため、小数部 e については

$$Z^{-e} = [(1-e) + e \times Z^{-1}] \quad (15)$$

のように補間をとる必要がある。現実には前後数サンプルの値から高次の補間をとる。

5. シミュレーション

以上の 3 次元音源定位法の動作確認のために、シミュレーションを行った。まず、音源位置を設定し、3 人の音声それぞれの音源位置で発声された場合を想定して、音声データベースの個人音声より、マイクで採取される音声を (1) 式を用いて合成する。このマイク音から上記の手法で正しく音源位置が推定できるかどうかを確かめた。なお、処理のパラメータには下記の値を用いた。

音声データのサンプリング周波数 8 [kHz]

音声長さ 1 [sec]
 マイク間隔 0.17 [m]
 分析周波数帯域 0.125~3.0 [kHz]
 位置設定条件 8種類 (Table 1 参照)

処理の経過例を Fig. 2, Fig. 3 に示す。Fig. 2 は音源位置を Table 1 の 1 のように設定した場合の $\Delta\tau_1$, $\Delta\tau_2$ のヒストグラムを微分フィルタによって極大点検出したものである。それぞれ三つの極大点が現れており、三つの音源に対応すると考えられる。つぎにこれら $\Delta\tau_1$, $\Delta\tau_2$ に関する極大点に対応関係を付け、それぞれの極大点の近傍のデータについて距離、方位角、仰角を計算し、ヒストグラムをとる。Fig. 3 は第2音についてのヒストグラムを微分フィルタで極値検出したもので、距離は 1.08 m, 方位角 -45° , 仰角 30° が音源位置であると判定できる。

同様の処理を8種類の位置設定条件について行い、Table 1 に示す結果を得た。距離の推定については誤差が大きいが、方位角、仰角は平均誤差 0.55° で求められており、正しく推定できたといえる。

距離の推定誤差が大きい理由は、(8) 式のように3音の混合したマイク音を単独音と近似しているところにある。また、音源推定には本質的に、(6) 式のように距離 R_j が消去され、各 τ_{ij} は R_j を不定項とする $\tau_{ij} = \tau_{Rij} + R_j$

(a) On the case of $\Delta\tau_1$

(b) On the case of $\Delta\tau_2$

Fig. 2 An example of peak detected histogram by a differential filter

Fig. 3 An example of peak detected histogram on sound location (R, θ, ϕ) by a differential filter

Table 1 Result of simulation on sound localization

Test No.	Source No.	Source location			Estimated location		
		R	θ	ϕ	R	θ	ϕ
1	1	1	-60	-30	0.23	-58.36	-30.23
	2	1	-45	30	1.08	-45.0	30.23
	3	1	60	5	0.89	59.77	4.21
2	1	1	0	0	0.17	-0.70	-0.70
	2	1	30	30	0.89	30.23	30.23
	3	1	-45	-15	0.22	-45.0	-14.77
3	1	1	-30	15	0.23	-31.64	14.77
	2	1	-30	-15	0.16	-30.23	-14.77
	3	1	60	0	0.83	59.77	0.70
4	1	1	45	30	0.30	45.00	30.23
	2	1	-45	30	0.33	-43.59	30.23
	3	1	0	-60	0.89	-0.70	-60.47
5	1	1	45	-30	0.48	45.0	-30.23
	2	1	5	45	0.88	4.92	45.0
	3	1	-45	-15	0.16	-44.30	-14.06
6	1	1	30	15	0.22	33.05	16.17
	2	1	-15	30	1.05	-15.47	30.23
	3	1	-45	-45	0.75	-45.00	-44.30
7	1	1	-5	30	1.02	-4.92	30.23
	2	1	5	5	0.13	4.92	5.63
	3	1	5	-30	0.53	4.92	-29.53
8	1	1	-30	15	0.16	-31.64	18.28
	2	1	-30	-15	0.19	-30.23	-14.77
	3	1	60	0	0.88	61.17	0.00

(a) Formant patterns of source 1

(b) Formant patterns of the separated voice

Fig. 4 An example of voice separation

(a) Formant patterns of source 3

(b) Formant patterns of the separated voice

Fig. 6 An example of voice separation

(a) Formant patterns of source 2

(b) Formant patterns of the separated voice

Fig. 5 An example of voice separation

として求められる傾向があることに起因する。

Table 1 のデータについて、音声分離を行った。その一例として試行番号 1 についての音声ホルマントパター

ンを Fig. 4~6 に示す。Fig. 4~6 の (a) は音源、(b) はその音源に対応する分離音声のホルマントパターンである。各図の横軸は時間、縦軸は周波数、ドットの大きさはホルマントの明瞭度を示す。分離音声のホルマントパターンでは、原音声に近いパターンが再生されている。また、音源が正確に推定できた第 2 音のみならず、第 1、第 3 音においてもホルマントパターンの特徴が再生されており、距離推定に誤差があっても音声分離が可能であるといえる。

6. あとがき

三つのマイクロフォンによる 3 次元 3 音源定位法について理論的考察を行い、この手法の有効性をシミュレーションにより確かめた。また 2 次元空間における音声分離では、表面に現れなかった問題点に対処する必要があることを示した。すなわち、音源定位においては各マイク対から得られるデータ間の対応関係を確認する必要がある。これについて本論文では、データのヒストグラムの極大点について対応関係を調べる方法をとった。一方、音声分離においては、逆伝達関数が不安定極をもつ場合が 2 次元の場合に比べて頻繁に生じる。この問題については極の再配置による安定化が有効であることを示した。

今後は現実の音環境において実験を行う必要がある。また、このような方法でマイクを増加していった場合、

どの程度の音源まで弁別可能か、またマイクアレイによる音環境認識の可能性など、今後研究する課題は多い。

参 考 文 献

- 1) 北守, 原田, 河原田: 混合音声聴き分けの聴神経パルス相互相関モデル; 電子情報通信学会論文誌, Vol. J 67-A, No. 3, pp. 182~189 (1984)
- 2) 黄, 大西, 杉江: 生体に示唆を得た音源定位システムー反響のある環境での単一音源定位ー; 電子情報通信学会論文誌, Vol. J 71-A, No. 10, pp. 1780~1789 (1988)
- 3) 柳田, 久下, 角所: 多点受音による話者分離; 電子情報通信学会技報, Vol. EA 77-52, pp. 47~51 (1978)
- 4) M. Yanagida, Y. Miyoshi, Y. Nomura and O. Kakusho: Application of the Least-Square Method to Source Sound Separation in Multi-Source Environment; Acoustica, Vol. 57, No. 3, pp. 158~167 (1985)
- 5) 森田, 沖本, 藤井: 音響場推定法による複数話者の音声分離; 電子情報通信学会技報, Vol. EA 88-68, pp. 13~20 (1989)
- 6) 森田: 音響パラメータ探索法による複数話者の音声分離; 電子情報通信学会論文誌, Vol. J 73-A, No. 10, pp. 1551~1557 (1990)
- 7) 森田: 最小自乗推定法による音声分離の改善; 計測自動制御学会学術講演会, Vol. JS 27-2, pp. 299~300 (1991)