マイクアレイのメインローブモデルを用いた点音源検出手法

佐々木 洋 子^{*1*2} 加賀美 聡^{*1*2} 溝 口 博^{*1*2}

Point Sound Source Detection using the Main-Lobe Model of a Microphone Array

Yoko Sasaki^{*1*2}, Satoshi Kagami^{*1*2} and Hiroshi Mizoguchi^{*1*2}

This paper proposes a sound source localization method which is robust for multiple sound sources and sound pressure difference. We propose the Main-Lobe Fitting algorithm using the directional pattern of a microphone array to reduce localization error in reverberant environments and noisy conditions such as a robot moving. The localization method is a post process of beam forming and it filters out reflected or interfered signals by selecting spectra which are fitted with the main-lobe model. We implemented the method on our 32ch microphone array mounted on a mobile robot, and evaluated the performance in different conditions. The experimental results show that the system provides accurate and robust sound localization for multiple different sound sources during robot motion.

Key Words: Microphone Array, Beam Forming, Sound Source Localization, Point Source Detection, Main-lobe Model

1. は じ め に

近年, ロボットに搭載した複数のマイクにより, 周囲の音源位置を推定する音源定位や, 混合音から目的音を分離する音源分離の研究が多数報告されている [1]. 実環境下でロボットが周囲の音源を定位・分離する機能は, 音声認識や環境変化の初期知覚に役立つ. この中で音源定位は, ロボットが注意を向ける方向を選択したり, 呼びかけや物音に気づいて動作を変更するなど, 人のいる環境下でロボットが安全に行動するための重要な要素技術である. また定位情報は音源分離や分離音の認識にも役立つ. 移動ロボットが環境音を理解するためには, 同時に複数の音源を扱えること, 音源ごとの音圧差や距離差に対応して広い範囲を扱えること, 反射や干渉を受けた音に対処することが望まれる. 例えば家庭などの屋内を想定すると, 周囲 10 [m] 前後の音までとらえられれば有用である.

しかし音は環境変化の影響を受けやすく, 音源数の増加や, 音源までの距離が長い場合, また反射や残響のある環境において, 音源定位の性能は大きく低下する. 特に移動ロボットでは, 音源とマイクとの距離は刻々と変化し, 音源ごとの音圧変化やロボット自身からの雑音等, 非正常な要素が多い. 音源自体も時間方向の変化が大きい信号である. 広範囲を動く移動ロボットへ適用するためには, 変化する環境条件下で広範囲の音を扱う

ことが大きな課題である.

これまでに, 音声認識を目的としてロボットに装着したマイクによる音源定位システムが多数提案されているが, この問題を明示的に扱った研究例は報告されていない. 従来手法として, 人間の耳と同様に 2 本のマイクを用いた両耳聴の研究があるが, 複数音源の定位や, 動きながら認識に必要な分離性能を得るのはまだ難しい. 一方で実用性の観点から素子数を増やしたマイクアレイのロボットへの実装例 [2] ~ [4] が多数報告されている. 代表的な音源定位手法として, 遅延和ビームフォーミング (Delay and Sum Beam Forming, DSBF) [5] は計算が単純で多く採用されている. ただし定位性能の向上には多数のマイクを必要とし, 高精度な定位性能が得にくい, といった弱点がある [6]. 適応型ビームフォーマの一つである MUSIC (Multiple Signal Classification) [7] は, 固有値展開を多用しており計算量が多い一方で, 比較的少数の素子で高精度な音源定位が可能であり注目されている手法である [8] [9].

DSBF や MUSIC をはじめとする数十 [ms] ごとの各瞬間での音源定位技術とともに, 過去の定位履歴から定位のあいまい性を補い, 音源を追跡する手法が提案されている. 動的環境下での音源定位について, Valin らは, 8 チャンネルのマイクアレイを用いて移動ロボットによる複数音源の定位, 移動音の追跡 [10] を実現している. パーティクルフィルタによる音源追跡から各瞬間に生じる誤検出を除外しているが, 音源間の音圧差 (距離差) や音源数の増加については述べていない. また事前に部屋内の各位置で観測した音源定位結果を蓄積した静的な雑音源の分布を用いることで, 移動ロボットが対象音源をとらえやすい場所を選択する方法 [11] なども報告されている.

原稿受付 2007 年 12 月 14 日

^{*1}東京理科大学理工学研究科

^{*2}産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター

^{*1}Tokyo University of Science

^{*2}Digital Human Research Center, AIST

■ 本論文は学術性で評価されました.

別のアプローチとして、カメラやレーザ距離センサなど、マイク以外のセンサとの情報統合による研究例がある。カメラによる顔追跡を利用した話者定位 [12] や、パーティクルフィルタを用いて視覚情報と音情報を統合した音源追跡 [13] などが報告されている。これらは視覚情報を併用することで音情報のあいまい性を解消している。また中臺ら [14] は、ロボット搭載型マイクアレイと環境に配置したマイクアレイを統合することで、音源までの距離増加に伴うあいまい性を解消している。

ロボットの音源検出機能を向上させるためには、上述のように音源定位の後段処理によって頑健性を高めるアプローチとともに、各瞬間での音源定位性能を向上させることが重要である。筆者らはこれまでに、DSBF の性能を向上させる、低サイドローブ配置マイクアレイを開発し、DSBF の後に周波数帯域選択 (Frequency Band Selection, FBS) を用いた複数音源の検出機能を構築してきた [15]。この手法では、反射の影響は小さく直接音が最も強いこと、また音源ごとの周波数成分は独立であることを仮定していた。この仮定のため音源数が増えるにつれて精度が低下する。また指向性に幅を持つビームフォーミングでは、反射によるピークが実際より大きく観測され、また近接した音源の影響でピークシフトが生じる可能性があり、環境中の反射や他音源の干渉を考慮することが大きな課題であった。

そこで、これらの問題点へ対処するために点音源に対するマイクアレイのメインローブモデルを定義し、ビームフォーミングの後段処理として周波数ごとにメインローブモデルとの適合判定 (Main-Lobe Fitting, MLF) を行う手法を提案する。提案手法は、ビームフォーミングで得られる空間スペクトルから点音源と判定された周波数成分のみを抽出して定位を行うことで、実環境下でのより頑健な音源定位を実現する。反射や残響の影響を低減させるという目的に対しては、Griffith-Jim 型適応アレイに代表される適応型ビームフォーミング [16] や、サイドローブ最小ビームフォーミング [17] など、観測信号に基づきフィルタの特性を適応的に更新する手法があげられる。一方提案法は、マイクの幾何配置から得られるモデルのみを使用するため、移動ロボットのような刻々と環境条件が変化する環境下での有用性が期待できる。

2. メインローブモデルを用いた音源定位手法

本章では、DSBF で得られる点音源に対する感度分布を定義し (2.1, 2.2 節)、メインローブ部分をモデルとした点音源の抽出手法について述べる。まず DSBF およびメインローブモデルの算出を定義し (2.1, 2.2 節)、単一周波数でのメインローブの適合判定方法を説明する (2.3 節)。次に一般の音源に対するメインローブモデルを用いた音源定位法について説明する (2.4 節)。以下では、サイドローブはメインローブと比較して十分小さく、メインローブの両端に極小値があると仮定する。低サイドローブマイクアレイの実現可能性については次章で述べる。

2.1 遅延とビームフォーミング (DSBF)

各チャンネルの信号出力が同位相となるように、入力信号に遅延を与えて加算することで目的方向 (以下、焦点) の音を強調させる。Fig. 1 のように、空間中においたマイクアレイの中心を原点として焦点 C の座標を (r, θ, ϕ) と極座標で表すと、 i

Fig. 1 DSBF on spherical coordinate system

Fig. 2 Spatial spectrum and main-lobe model

番目のマイクに与える遅延 $\tau_i(r, \theta, \phi)$ は式 (1) となる。

$$\tau_i(r, \theta, \phi) = \frac{r - L_i(r, \theta, \phi)}{V_s} \quad (1)$$

ただし、 V_s は音速、 L_i は焦点から i 番目のマイク ($i = 1, 2, \dots, M$) までの距離を表す。また、音の伝播モデルは球面波とする。 i 番目のマイクへの時刻 t の入力信号を $x_i(t)$ とすると、素子数 M のマイクアレイで得られる焦点 C への DSBF 出力 $s_c(t)$ は次式で表される。

$$s_c(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i(t + \tau_i) \quad (2)$$

2.2 点音源に対する DSBF 時のメインローブモデル

空間内で焦点 C をスキャンさせることで、音の感度分布を示す空間スペクトルが得られる。本稿では、マイクアレイ中心からの距離 r および仰角 ϕ は固定値とし、方位角 θ のみの音源定位を行う。 r に関しては、アレイ直径より十分大きな円周上の点に焦点をとる。スキャンさせる円周の半径は、音源距離による空間スペクトルの形状変化が小さく、遠方音場と近似できる距離 [18] とする。ここで近接音場とみなせる範囲内では焦点をスキャンさせる円周の径によって空間スペクトルの形状が異なるため、複数の同心円上に焦点をスキャンさせることで音源の距離を推定可能である。

r と ϕ を固定したため、これ以降式 (1) の遅延を $\tau_i(\theta)$ 、焦点-マイク間距離を $L_i(\theta)$ と表す。Fig. 2(a) に本稿での焦点スキャンの模式図を示す。ここで $\theta = \theta_0$ においた一つの点音源を考え、この音源の時刻 t での信号を $y(t)$ とおくと i 番目のマイク入力 $x_i(t) = y(t - L_i(\theta_0)/V_s)$ となる。また、スキャンさせる焦点を音源からの離角 (音源方向と焦点方向のなす角) $\delta (= \theta - \theta_0)$ の関数と考え、 C_δ とおくと、式 (2) より焦点 C_δ で観測される DSBF 出力 $q_\delta(t)$ は式 (3) で表される。

$$q_\delta(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y\left(t + \tau_i(\theta_0 - \delta) - \frac{L_i(\theta_0)}{V_s}\right) \quad (3)$$

ただし、メインローブの形状が音源方向によって異なる場合は

$q_\delta(t)$ は δ および θ の関数になる．ここで $q_\delta(t)$ の短区間フーリエ変換から得られる振幅スペクトルを $Q_\delta(\omega)$ とすると， $Q_\delta(\omega)$ は点音源に対して得られる周波数 ω での空間スペクトルを示す[†]．観測される空間スペクトルのピーク形状はマイクレイの指向特性により決まる．本稿では θ によらず指向特性が等しいと仮定し，式 (4) でメインローブモデルを定義する．焦点スキンの方位により指向特性が異なる場合 $model$ は ω, δ, θ の関数になる．

$$model(\omega, \delta) = \frac{Q_\delta(\omega)}{Q_0(\omega)} \quad (\varphi_m < \delta < \varphi_p) \quad (4)$$

ただし φ_m, φ_p は，Fig. 2 (b) に図示したようにメインローブモデルの両端を示し，それぞれ $\delta < 0, 0 < \delta$ の範囲で対象音源方向に最も近い空間スペクトルの極小値をとる角度とする．本稿では $(\varphi_p - \varphi_m)$ をメインローブ幅^{††}と定義する．

Fig. 2 (b) にメインローブモデルの模式図を示す．横軸が音源からの離角，縦軸が振幅スペクトルとなっており，メインローブモデル $model(\omega, \delta)$ は対象音源からの離角と振幅スペクトルの減衰割合の関係を表す．

2.3 メインローブモデル適合判定 (Main-Lobe Fitting, MLF)

観測された空間スペクトルのピークに対し，式 (4) で求めたメインローブモデルを当てはめ，適合度の判定を行う．

これ以降，任意の周波数 ω について論じる．まず，個々の音源の番号をマイクレイに到達する音圧が大きい順に $n (n = 0, 1, 2, \dots)$ とし ($n+1$ が音源数)，観測された空間スペクトルを $P(\omega, \theta)$ とする． $P(\omega, \theta)$ の極大値を大きい順にとり， 0 番目の音源方向 $\theta = \theta_0$ のスペクトルを P_0 とおくと， P_0 は対象音源の振幅スペクトル $S_0(\omega)$ と他音源からの漏洩 $l_n(\omega) (n = 1, 2, \dots)$ ，および背景雑音 $BN(\omega)$ の和として，式 (5) で表される．

$$P_0(\omega) = S_0(\omega) + \{l_1(\omega) + l_2(\omega) + \dots\} + BN(\omega) \quad (5)$$

また，対象音源のスペクトル $S_0(\omega)$ を用いて，空間スペクトル中の対象音源成分 $E_0(\omega, \theta)$ は式 (6) と表現できる．

$$E_0(\omega, \theta) = \begin{cases} model(\omega, \theta - \theta_0) S_0(\omega) & \text{if } \varphi_m \leq \theta - \theta_0 \leq \varphi_p \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

ここで S_0 は一意に求まらないため，観測された空間スペクトルに対し S_0 を変化させて以下の方法で観測値に最も近い推定スペクトル $E_0(\omega, \theta)$ を決定する．このとき $(P_0 - S_0)$ は他音源からの漏洩と背景雑音の和であるため，この値が対象としていたメインローブ部分外の空間スペクトルより大きくなることはない．そこで， $(P_0 - E_0)$ が $(\theta - \theta_0) < \varphi_m, \varphi_p < (\theta - \theta_0)$ の範囲での $P(\theta)$ の最大値を上回る場合は，以下に示す適合判定の指標値によらず不適合とする．

観測された空間スペクトルから対象音源の推定スペクトル $E_0(\omega, \theta)$ を減算し，メインローブモデルとの適合判定を行う． θ_0 方向の音源成分を減算した空間スペクトル $A_0(\omega, \theta)$ は，式

(7) で表される．

$$A_0(\omega, \theta) = P(\omega, \theta) - E_0(\omega, \theta) \quad (7)$$

式 (5)~(7) の関係を Fig. 3 に図示する．

減算後のスペクトルに対し，最小二乗法で $A_0(\omega, \theta_0)$ を通る直線 $F_0(\omega, \theta)$ を求め，メインローブ幅内でこの直線との残差 (絶対誤差の平均) を用いてモデル適合の判定を行う．ここで，残差が閾値を上回りモデルと不適合と判断されたピークを除外し，以降，定位計算には用いない．モデルに適合した場合は，次のピークに対して同様にモデルの適合判定を行う．閾値を R_{th} として，モデル適合の判定式を次式に表す．

$$\frac{1}{k} \sum_{(\theta - \theta_0) = \varphi_m}^{\varphi_p} |A_0(\omega, \theta) - F_0(\omega, \theta)| < R_{th} P_0(\omega) \quad (8)$$

ここで k は角度 $\varphi_m \leq (\theta - \theta_0) \leq \varphi_p$ 間の焦点数を示す．また R_{th} は空間スペクトルの最大ピークに対する残差の割合 ($0 < R_{th} < 1$) を表す．Fig. 4 に MLF の模式図を示す．

観測された空間スペクトルに対し，最大ピークから MLF を行い，適合した場合は空間スペクトルからモデル分を減算し，次のピークに対して同様に適合判定を行う．ある周波数 ω の空間スペクトルに対する処理の流れを以下にまとめる．

Main-lobe Fitting Procedure

(1) 最大ピーク P_0 となる方向の音源成分 E_0 を推定

for ($j = 1 : J$) {

$S_0 = (1 - j/J) P_0$

E_0 を計算 対象音減算後のスペクトル A_0 を計算

A_0 と直線との残差 F_0 を計算 } (ただし J はループ回数)

残差最小となる E_0 を決定する．

(2) 推定スペクトル E_0 の適合判定

if ($P_0 - E_0$ がメインローブ部外の空間スペクトルより大きい，

Fig. 3 Observed spatial spectrum and estimated main-lobe

Fig. 4 Judgment of main-lobe fitting

[†]ここでは $Q_\delta(\omega)$ を振幅スペクトルとしたが，パワースペクトルを用いてもよい．その場合以降のスペクトルの次元もすべてパワースペクトルの次元となる．

^{††}一般的に用いる焦点利得値から，利得が半分になる角度の幅とは異なる．

Fig. 5 Directional localization process by MLF

または (1) で求めた残差が閾値より大きい)

不適合 $\Rightarrow$ end

else モデルに適合

減算後の空間スペクトル A_0 に対し (1) の処理へ戻る

(次のピーク P_1 となる方向の音源成分 E_1 を推定)

2.4 MLF を用いた音源定位

MLF により抽出された各周波数でのピークパワーを用いて音源方向を決定する．このとき扱う周波数の分解能はハードウェアのサンプリング周波数およびフーリエ変換に用いるデータ長に依存する．本手法は任意の分解能に適用可能であり，分解能が高いほど複数音源を同時に定位する効果が期待できるが，その分高い計算コストが必要になる．定位計算の流れを以下にまとめる．また Fig. 5 に音源定位の模式図を示す．

MLF Based Sound Localization Procedure

- (1) DSBF で周波数ごとの空間スペクトルを計算
- (2) 各周波数の空間スペクトルから MLF でモデル適合ピークを抽出
- (3) 抽出されたピークパワーの総和から音源定位

Fig. 5 左図は DSBF により得られる空間スペクトルの例であり，点線はモデルに適合するピークがない周波数成分，実線は適合するピークを持つ周波数成分を示している．Fig. 5 右図に示したモデルに適合したピークのピークパワー (Fig. 5 左図 * 点) の総和に対し，ピーク数およびピーク位置がそれぞれ，推定された音源数および音源方向となる．MLF で信頼度の高いピークのみを抽出することで，近接した複数音源に対して音源間に生じる偽ピークや，ピークが乱れた反射成分を除外し，高反射，高残響下での音源定位における誤検出を低減させる．また音圧差のある音源に対する検出率の向上が期待できる．

3. 低サイドローブマイクアレイ

提案手法を直径 330 [mm] の 32ch マイクアレイ [19] に実装した．車輪型ロボットに搭載したマイクアレイおよびマイク配置を Fig. 6 に示す．16 [bit]，16 [kHz] サンプリングで 32ch 同期したデータを取得可能である．4 章以降の実験では，すべて 16 [bit]，16 [kHz] サンプリングで 32ch すべてのデータを用いる．ただし，MUSIC の一部については比較のために最外周の 8ch のみを用いた音源定位も行った．

またシミュレーションおよび実測した DSBF 時の指向特性を Fig. 7 に示す．Fig. 7 (a) のビームフォーミングシミュレーションから求めた特性に対し，Fig. 7 (b) の実測した特性は -20 [dB] 以上ではよく一致している． -20 [dB] 以下での差は，ハードウェアの離散化によるもの，および残響等の影響であると考えられ

(a) Mobile robot with the array (b) Microphone arrangement

Fig. 6 Mobile robot with microphone array

Fig. 7 Directional pattern of simulation (left) and experimental measurement (right)

る．以下の実験では，シミュレーションから求めた， -20 [dB] 以上のメインローブ部分をモデルとして採用する．周波数ごとに，サイドローブの最大ゲインまで MLF によるピーク判定を行う．そのため，マイクアレイの特性によって，扱い可能な雑音に対する音圧差は異なる．任意の配置のマイクアレイについては，観測可能なメインローブゲインまでをモデルとすることで MLF を適用可能である．

4. MLF 基礎実験

構築したシステムを用いて，音源定位の評価実験を行った．以下の実験では，一回の計算に用いるデータ長を 2,048 点 (空間スペクトルの周波数分解能 7.8 [Hz]) とし，800 ~ 3,000 [Hz] の範囲でシミュレーションから作成したメインローブモデルを用いて，メインローブモデルの適合判定を行った．

4.2, 4.3 節の音源定位評価においては，MUSIC [7] および FBS [15] を用いて比較を行った．それぞれ MLF と同様に，800 ~ 3,000 [Hz] で事前にバンドパスフィルタをかけた信号を用い，この周波数帯での平均スペクトルから定位計算を行った．MUSIC では伝達関数および音源数の情報が必要であるが，本実験では伝達関数としてマイクの幾何配置から計算した値を採用し，音源数は様々な推定手法が提案されているが，本稿では真値を与えて計算した．

4.1 判定閾値と適合ピーク数

まず MLF の適合判定に用いる閾値 R_{th} の設定範囲と抽出ピークの関係を示す． $R_{th} = 0.03, 0.09, 0.14, 0.20$ とした場合の，音源の持つ周波数成分に対する適合ピーク数の割合および，適合ピーク方向の音源からの角度差をそれぞれ求めた．実験は無響室および，残響時間 (RT_{20}) 150 [ms]，騒音レベル (L_A) 35 [dB] の部屋 A の 2 箇所で行った．音源はスピーカ (YAMAHA MS101II) から出力した男声，女声単独の場合と，両方を 135 [deg] 間隔で同時に聞かせた場合の計 3 種類，距離はいずれも 2.0 [m] とした．以下の値はそれぞれ 15 [sec] 間の平

Table 1 Results of anechoic room

	detected peak ratio [%]			direction error [deg]		
R_{th}	female	male	both	female	male	both
0.03	76.2	72.7	66.0	2.7	1.1	2.3
0.09	79.8	86.9	77.3	4.0	3.2	3.2
0.14	84.6	89.9	83.7	4.6	3.4	4.5
0.20	85.5	91.5	83.7	5.4	4.3	4.5

Table 2 Results of room A

	detected peak ratio [%]			direction error [deg]		
R_{th}	female	male	both	female	male	both
0.03	37.1	36.9	34.2	5.2	5.0	5.3
0.09	57.4	58.4	56.8	6.1	6.7	6.8
0.14	70.2	74.7	69.3	9.8	7.9	8.9
0.20	76.4	79.8	75.8	11.8	10.5	12.1

均値を示す．ここで音源の持つ周波数を，元の音源のパワースペクトルの最大値に対し -6 [dB] 以上のスペクトルを持つ周波数と定義して適合ピークの割合を計算した．

各部屋の結果を Table 1, 2 にまとめる． R_{th} の値を大きくするほど適合するピーク数が増加する一方で，抽出されたピーク方向の音源からの誤差も大きくなっている．値は環境ごとに異なるが誤差と検出率とはトレードオフの関係になっており，目的や環境に応じて R_{th} を調整する必要がある．本稿では，部屋 A にて 7 [deg] 以下の誤差となる $R_{th} = 0.09$ を採用した．これ以降 4, 5 章の実験すべてに対して同じ値を用いる．干渉によって歪んだ空間スペクトルのピークは反射によるピークと比較してモデルに近い傾向があり，例えば $R_{th} = 0.2$ とすると，4.2 節 Fig. 8 (b) に示す干渉を受け 10 [deg] 程度ずれたピークはモデルに適合と判定される．

4.2 MLF による適合 / 不適合ピークの例

異なる条件下で MLF を行い，適合ピーク / 不適合ピークの例を示す．実験は，部屋 A および残響時間 (RT_{20}) 200 [ms]，騒音レベル (L_A) 44 [dB] の部屋 B の 2 箇所で行った．

部屋 A にて二つのスピーカから 1 [kHz] のサイン波を出力した場合の異なる時刻での 1 [kHz] の空間スペクトルを Fig. 8 に示す[†]．音源位置はマイクアレイの中心に対して 45 [deg] および 180 [deg] 方向，距離はいずれも 2.0 [m] である．グラフは，観測された 1 [kHz] の空間スペクトル (実線) と推定されたメインローブモデル (点線) および観測スペクトルからモデルを減算したスペクトル (破線) を表している．Fig. 8 (a) は， 44 [deg] および 180 [deg] に二つの音源を検出した例である．Fig. 8 (b) は， 188 [deg] の第一ピークに対して MLF でモデルと適合せず除外された例である．Fig. 8 (b) では観測されたスペクトルはモデルより細くなっており， 190 [deg] から 250 [deg] にかけて差が表れている．複数の音源が同一周波数成分を持つ場合，干渉によって音源方向以外にピークが発生することがあるが，MLF によって干渉を受けた成分を除外できることが分かる．

次に，MLF の結果，メインローブモデルと適合せず除外されたスペクトルの例を Fig. 9, 10 に示す．それぞれ，(a) に音源配置，(b) に空間スペクトルを示している．音源はいずれも 1 [kHz] のサイン波とした．Fig. 9 は，音源同士の間隔を 45 [deg] とした場合の 1 [kHz] の空間スペクトルである． $160 \sim 200$ [deg]

Fig. 8 Examples of MLF on 1 [kHz] spatial spectrum

Fig. 9 Example of rejected peak by MLF: wrong peak between close two peaks

Fig. 10 Example of MLF rejected peak: reflection from a wall

にかけてモデルとの差が表れており，また推定された他音源からの漏洩と背景雑音の和 (式 (5) の $P_0 - S_0$) が対象ピーク外の観測値より大きく，対象音源成分の推定値 (式 (5) の S_0) が不適切であることを示している．ビームフォーミングではメインローブ幅が広いため，近接音源間に偽ピークが生じているが， 124 [deg] 方向に観測された第一ピークは，メインローブ幅に対して音源間隔が狭いために生じた偽ピークであるが，モデルには適合せず MLF で除外された例である (観測可能な最小音源間隔は，周波数ごとに異なる)．

Fig. 10 は反射により生じたピークの例である．実験は部屋 B に行った．音源は $(2.5$ [m], 20 [deg]) の位置にあり，ロボットの後ろ (180 [deg] 方向) には，距離 1.5 [m] の位置に壁がある．Fig. 10 (b) に示した MLF の結果では， 18 [deg] に観測された第一ピークをモデルに適合するピークとして検出している一方で， 162 [deg] 方向に生じた第 2 ピークはメインローブの両端 ($90 \sim 120$, $200 \sim 230$ [deg]) でモデルと観測値との差が大きく，モデルに適合せず除外されている．ビームフォーミングではメインローブ幅が広いため，反射波が音源と比較して十分小さな音圧であっても広範囲の重ね合わせによって大きく観測され得るが MLF で除外でき，高反射，残響下において MLF が

[†] モデルと観測値とのずれを分かりやすく示すため，モデルは式 (5) の $(P_{\theta_n} - S_n)$ 分加算した値を表示した．Fig. 9, 10 についても同様である．

(a) MUSIC spectrum of Fig. 9 (b) MUSIC spectrum of Fig. 10

Fig. 11 MUSIC spectrums for rejected signal on MLF

有効であることが分かる。

Fig. 11 は、MLF で除外した Fig. 9, 10 と同じ時刻の MUSIC スペクトルを示している。MUSIC では急峻なピークが得られるため、Fig. 9 の実験と同一条件で行った Fig. 11 (a) では二つのピークを検出できており、近接した音源に対しては DSBF より優位であることが分かる。Fig. 10 の実験と同一条件で行った Fig. 11 (b) では 20 [deg] 方向の音源以外にも 132 [deg] に第 2 ピークがあり、DSBF 同様、反射の影響を受けている。

4.3 MLF によるピーク検出評価

次に、MLF の定量評価を行うために、周波数の異なるサイン波を合成した音源を用意し、音源に用いた周波数成分に対して MLF の評価を行った。なお音源には連続音を使用し、音が発生していない区間はない。評価には以下の二つの指標を用いる。

- ・適合ピークの検出率： 定位計算回数に対する、真値との誤差 ± 10 [deg] 以内で検出された適合ピークの割合。音源から届く信号のうちの程度の割合が歪みの少ない成分として MLF で検出されるかを示す。
- ・抽出ピークに含まれる誤検出率： 検出されたピーク総数に対する、音源位置の真値 ± 10 [deg] 以外の方角に検出されたピークの割合。音源定位精度に与える影響を示す。1 回の定位ごとに MLF で複数回ピーク検出を繰り返し、検出されたピークの総和から定位を行うため、適合ピークとして検出されたピーク数に対する割合を指標とした。

100%から適合ピークの検出率を引いた値が、音源で発生している MLF で検出できない割合を示す。また 100%から抽出ピークに含まれる誤検出率を引いた値が、抽出ピークのうち正しく検出されたピークの割合を示す。母数が異なるため適合ピークの検出率と抽出ピークに含まれる誤検出率の和は 100[%] ではない。

音源に用いる混合サイン波の周波数は、倍音の影響を避けるため倍数とならない任意の 9 種とし、また周波数帯域による違いを確認するため扱う周波数帯域全体に分布する組み合わせを選んだ。実験は、同一周波数成分を持つ二つの音源を (2.2 [m], 45 [deg]), (2.0 [m], 180 [deg]) においたものと、それぞれ独立な周波数成分を持つ三つの音源を (5.0 [m], 30 [deg]), (2.2 [m], 45 [deg]), (2.0 [m], 180 [deg]) においた場合の 2 種類である。それぞれの音源配置を Fig. 12 に示す。両条件とも 20 [sec] の入力 (20/0.128 = 156 回の計算) に対して評価を行った。各音源が含む周波数成分および、それぞれの適合ピークの検出率を Table 3, 4 にまとめる。括弧内は抽出ピークに含まれる誤検出率を示す。

Table 3 では二つの音源が同一周波数成分を持つため、Table

Fig. 12 Speaker arrangement

Table 3 MLF result for same 2 sound sources

speaker position	(2.2[m], 45[deg])		(2.0[m], 180[deg])	
	freq. [Hz]	detect [%] (error [%])	freq. [Hz]	detect [%] (error [%])
	800	10.1(0.0)	800	1.3(0.0)
	1000	39.2(0.0)	1000	41.8(0.0)
	1300	87.3(0.0)	1300	94.9(0.0)
	1700	12.7(16.5)	1700	46.8(16.5)
	1900	77.2(0.0)	1900	82.3(0.0)
	2100	75.9(0.0)	2100	7.6(0.0)
	2350	83.5(0.0)	2350	32.9(0.0)
	2570	20.3(0.0)	2570	50.6(0.0)
	2800	3.8(0.0)	2800	34.2(0.0)

Table 4 MLF result for independent 3 sound sources

speaker (2.2[m], 45[deg])		(5.0[m], 30[deg])		(2.0[m], 180[deg])	
freq. [Hz]	detect [%] (error [%])	freq. [Hz]	detect [%] (error [%])	freq. [Hz]	detect [%] (error [%])
800	13.9(0.0)	910	1.3(13.9)	850	88.6(0.0)
1000	0.0(0.0)	1220	74.7(0.0)	1090	100.0(0.0)
1300	100.0(0.0)	1550	1.3(0.0)	1410	97.5(0.0)
1700	48.1(0.0)	1770	100.0(0.0)	1630	67.1(0.0)
1900	100.0(0.0)	2030	40.5(0.0)	1860	100.0(0.0)
2100	82.3(0.0)	2220	92.4(0.0)	1970	97.5(0.0)
2350	72.2(0.0)	2410	100.0(0.0)	2160	96.2(0.0)
2570	70.9(0.0)	2690	59.5(0.0)	2290	74.7(0.0)
2800	64.6(0.0)	2880	51.9(0.0)	2500	100.0(0.0)

4 と比較して全体的に適合ピークの検出率が低くなっている。抽出ピークに含まれる誤検出率は 1,700 [Hz] を除いて 0% であり、干渉等の影響を除外できているといえる。1,700 [Hz] については 58 ~ 64 [deg] 方向に抽出ピークに含まれる誤検出が 9 回あった。音源の持つ周波数成分が非常に少ないため 1,700 [Hz] だけ特異的に見えるが、同一条件では近い周波数成分は似た傾向になると考えられる。Table 4 では、1 列目の 1,700 [Hz] と 3 列目の 1,630 [Hz] など音源同士が近い周波数成分をもつ場合や、1 列目の 1,000 [Hz] と 2 列目の 910 [Hz] のように近接した 2 音源の低周波数成分では適合ピークの検出率が低くなっている。また周波数ごとに適合ピークの検出率が変動しているが、周波数帯域や二つの実験の間に相関はない。本実験では位置を固定し定常波を音源としたため、それぞれの周波数成分が受ける干渉等の影響も定常となり、適合ピークの検出率の差として表れていると考えられる。

4.4 音源定位基礎実験

4.3 節の 2 種類の条件についての音源定位結果を FBS, MUSIC による結果と合わせて Table 5, 6 にまとめる。これ以降、音源定位の評価では、無音区間を除き発生した音源を誤差 ± 10 [deg] 以内で定位できた割合として検出率を用いる。MLF について、個々の周波数ではモデルに適合するピークは少ない

Table 5 Total localization result for same 2 sources

	(2.2[m], 45[deg])	(2.0[m], 180[deg])
	ave. direction[deg]	
MLF	39.9	173.9
FBS	43.2	177.9
MUSIC	42.0	178.0
	correct detection [%]	
MLF	94.9	100.0
FBS	55.1	100.0
MUSIC	100.0	100.0

Table 6 Total localization result for independent 3 sources

	(2.2[m], 45[deg])	(5.0[m], 30[deg])	(2.0[m], 180[deg])
	ave. direction[deg]		
MLF	41.6	30.3	177.6
FBS	41.8	32.5	177.6
MUSIC	42.0	31.4	177.1
	correct detection [%]		
MLF	100.0	100.0	100.0
FBS	94.9	37.2	100.0
MUSIC	100.0	13.0	98.7

一方で、800～3,000 [Hz] 全体から検出されたピーク群による音源定位の結果は、どちらの実験も 100% に近い検出率となっている。MLF で信頼度の高いピークのみを抽出することで、DSBF ベースの手法でも近接した音源や同一周波数成分を持つ音源を定位可能であることが分かる。ただし同一周波数の 2 音源のように抽出されるピークが少ない場合は定位角度誤差が大きい傾向がある。FBS については、同一周波数の音源に対して片方の検出率が低く、音源同士の周波数が独立であっても近接した音源に対する正答率が低い。MUSIC については、同一周波数の 2 音源をどちらも 100% 検出でき角度誤差も最も小さいが、近接した 2 音源で距離差が大きい場合の検出率が極端に低い。

5. 音源定位実験

距離差のある音源に対する定位精度、および移動中のロボットからの音源定位実験について述べる。前章同様、1 回の定位計算に用いるデータ長は 2,048 点 (128 [ms]) とし、800～3,000 [Hz] でバンドパスフィルタをかけた信号を用いる。また手法比較に用いた MUSIC および FBS の計算条件も前章と同様である。

5.1 距離変化に対する精度評価

ロボット、音源共に静止した状態で、音源までの距離を変化させて音源定位の評価を行った。実験環境は、前章の部屋 A で行った。音源には、あらかじめ接話マイクで録音した男声および女声の発話を用い、スピーカから再生した。男声音源を 135 [deg] 方向、距離 1.5 [m] に固定し、女声音源を 90 [deg] 方向、距離 1, 3, 5, 10 [m] の 4 箇所に变化させた。15 秒間の録音に対し、検出率および平均誤差を求めた。Fig. 13 に音源の配置図を示す。

Fig. 14 に、二つの音源それぞれの検出率を示す。Fig. 14 (a)、(b) とともに横軸は距離を変化させた女声音源からマイクアレイまでの距離を表す。比較のために MUSIC, FBS による結果も合わせて示す。MUSIC については、アレイの外周 8ch の入力による計算も行った。両音源とも、MLF, MUSIC, FBS, MUSIC (8ch) の順で検出率が低下している。Fig. 14 (a) の女声音源に

Fig. 13 Speaker arrangement for distant source localization

Fig. 14 Evaluation for distant sound source

ついて MLF を MUSIC と比較すると、3 [m] 以下ではほとんど差はないが、距離 10 [m] では、10% 差が生じている。ベースが同じビームフォーミングである FBS に対しては、距離差が大きくなるほど検出率に差が現れており、MLF で信頼度の高いピークのみを抽出することで音源間の音圧差に頑健になっていることが分かる。外周 8ch による MUSIC では、距離 3 [m] 以下では、32ch アレイによる FBS と変わらない検出性能が得られているが、距離 5 [m] 以上では急激に検出率が低下しており、MUSIC が近距離では有効である一方、距離差の拡大に弱いことが分かる。Fig. 14 (b) に示した距離 1.5 [m] に固定した男声音源については、他方の女声音源の距離が増加するにつれて、どの手法も検出率がやや増加しているが、大きな差はない。

5.2 移動中のロボットによる音源定位

移動中のロボットによる音源定位実験を行った。音源にはあらかじめ接話マイクで録音した男女五人の発話を用いた。5ch DVD Audio (44 [kHz] 16 [bit] サンプリング) を作成し、スピーカから再生した。録音データの冒頭には解析時に真値との同期を取るために 100 [ms] の 2.5 [kHz] サイン波を挿入しており、検出率の計算では発話と発話の間に生じる無音区間を除いている。ロボットの操作はジョイスティックによる手動操作とした。また音源方向の真値を得るために、モーションキャプチャシステム (MOCAP) を用いてロボットの軌跡を記録した。用いたシステムは MotionAnalysis の Eagle 10 台で、5 × 5 [m] の範囲を計測可能である。Fig. 15 に実験環境の写真を示す。残響時間 (RT_{20}) 170 [ms]、騒音レベル (L_A) 50 [dB] である。Fig. 15 (b) は 5 音源の実験における音源位置およびロボットの軌跡である。実験は音源数を 1～5 と変化させて計 5 回行い、それぞれ 40 [sec] 間ロボットを走行させながら音源定位を行った。各実験の音源位置は Fig. 15 (b) の音源 A～E を A のみから昇順に増加させた。

音源数 1～5 個に対するそれぞれの実験結果を Fig. 16 にまとめる。FBS は 2 音源以下では高い検出率を示しているが音源の増加に伴い検出率が低下している。また音源方向以外の誤検出が多い。MUSIC と MLF を比較すると、検出率は MLF がやや良い値を示しており音源数増加とともに差が現れている。誤

(a) Experimental setup

(b) Robot path

Fig. 15 Robot path and speaker arrangement

(a) Correct detection rate

(b) False detection rate

Fig. 16 Evaluation results of sound localization while moving

Fig. 17 MLF result while robot moving for 5 sources

検出率は3音源以下ではMUSICが最も低い。音源数を既知とするMUSICでは実際の数以上の音源を同時定位することがほとんどないのに対し、FBS、MLFでは音源数より多い数を定位することがあるためと考えられる。FBSと比較するとMLFの誤検出率は小さく、MLFの適用によってFBSで問題となっていた反射や干渉等による誤検出を除外できているといえる。

5音源に対するMLF、FBS、MUSICによる音源定位結果をFig. 17～19に示す。MOCAPで計測したロボットの移動軌跡から計算した音源方向の真値を5種類の線に、各手法で定位した音源方向を十字で示している。FBSでは反射や雑音による誤検出が多いことが分かる。特にFig. 18における10[sec]前後の音源C、E間(135[deg]付近)など、音源同士の間隔が30[deg]以下になると真値との誤差が大きい。またMUSICでは、誤検出はほとんどなく精度よく定位できている。MUSICをMLFと比較すると、10[sec]前後の音源Bや、25[sec]前後の音源Dなど、音源間の距離差がある際に遠い音源の検出率が低くなる傾向があり、これが検出率差の原因と考えられる。20～26[sec]の音源D付近の拡大図をFig. 20に示す。上段はスピーカDから出力した音声(同期信号を基にロボットに届いた時刻を算出)である。中段および下段はそれぞれ、MLFおよびMUSICによ

Fig. 18 FBS result while robot moving for 5 sources

Fig. 19 MUSIC result while robot moving for 5 sources

Fig. 20 Closeup of Fig. 17, 19: comparison between MLF and MUSIC for speaker D

る定位結果を示す。この区間で音源Dを定位した回数はMLFが24回、MUSICが13回とMUSICの検出率がMLFに比べ低いことが分かる。Fig. 15(b)に時刻20、26[sec]のロボット位置を×で示す。

ただし、32ch入力に対するMUSICは実時間処理をするには計算量が多く、実装のためには素子数を減らす、計算周期に合わせてデータを離散的に使うなどの工夫が必要である。

6. おわりに

本稿では、DSBF時のメインローブモデルを用いた環境変化に頑健な点音源検出手法を提案した。提案手法により、点音源からの直接音と反射や干渉の影響を受けた周波数成分を判別することで、反射、干渉のある環境下での弱い点音源の定位を実現している。DSBF時のメインローブモデルを用いて点音源を検出し、反射や他音源からの干渉を受けた周波数成分を除くこ

とで、環境変化に対する音源定位性能の劣化を防ぐことが可能である。4章の実験結果より、音源数や残響時間の異なる環境でも、検出したピークの角度誤差に大きな差はなく、シミュレーションから求めたメインローブモデルが信頼度の高いピークを検出するのに有効であることが分かる。また移動ロボットによる音源定位実験から、提案手法はFBSやMUSICと比較して、近接した複数音源や音源までの距離差の拡大に対して有効性が高いといえる。

提案手法は、反射や干渉の有無を判断し、信頼度の高い成分のみを定位計算に用いるというアプローチである。そのため、特により高残響の環境下では、自身の音の反射成分によって多くの成分が除外され、検出率が低下することが考えられる。反射、回折等の影響を考慮したビームモデルを持つことで、部屋の角からの回り込み等、ロボットから直接見えない音の検出が可能であると考えられる。回折音のモデル等、点音源モデル以外のモデルへのMLFの適用が今後の課題である。

参 考 文 献

- [1] J.-M. Valin: "Auditory System for a Mobile Robot," PhD thesis, Sherbrooke University, 2005.
- [2] I. Hara, F. Asano, H. Asoh, J. Ogata, N. Ichimura, Y. Kawai, F. Kanehiro, H. Hirukawa and K. Yamamoto: "Robust speech interface based on audio and video information fusion for humanoid HRP-2," Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems (IROS2004), pp.2404-2410, 2004.
- [3] M. Sato, A. Sugiyama and S. Ohnaka: "Near-field sound-source localization and adaptive noise cancellation in a personal robot, papero," Proceedings of the 22th Meeting of Special Interest Group on AI Challenges, pp.41-46, 2005.
- [4] 廣川潤子, 古賀敏之, 鈴木薫, 小川秀樹, 松日楽信人: "高性能聴覚機能を持つ聞き分けロボットの開発", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演論文集, pp.1A1-E16, 2006.
- [5] D.H. Johnson and D.E. Dugeon: Array Signal Processing: Concepts and Techniques. Prentice Hall, 1993.
- [6] 加賀美聡, 佐々木洋子: "移動ロボットからの複数音源の定位と分離のためのマイクアレイ評価", 計測と制御, vol.46, no.6, pp.453-459, 2007.
- [7] F. Asano, M. Goto, K. Itou and H. Asoh: "Real-time sound source localization and separation system and its application to automatic speech recognition," Proceedings of European Conference on Speech Communication and Technology (Eurospeech2001), pp.1013-1016, 2001.
- [8] 村瀬昌満, 中臺一博, 奥乃博: "パーティクルフィルタによる音源追跡の性能評価", 情報処理学会第68回全国大会予稿集, pp.5M-9, 2006.
- [9] S. Argentieri and P. Danes: "Broadband variations of the music high-resolution method for sound localization in robotics," Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS-2007), pp.2009-2014, 2007.
- [10] J.-M. Valin, F. Michaud and J. Rouat: "Robust localization and tracking of simultaneous moving sound sources using beamforming and particle filtering," Robotics and Autonomous Systems Journal, vol.55, pp.216-228, 2007.
- [11] E. Martinson and A. Xchultz: "Auditory evidence grids," Proceedings of 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems (IROS2006), pp.1140-1145, 2006.
- [12] H.-D. Kim, J.-S. Choi and M. Kim: "Speaker localization among multi-faces in noisy environment by audio-visual integration," Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Robots and Automation (ICRA2006), pp.1305-1310, 2006.
- [13] H. Asoh, I. Hara and F. Asano: "Tracking human speech events using a particle filter," Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, Signal Processing (ICASSP 2005), pp.MSP-P2.6, 2005.
- [14] K. Nakadai, H. Nakajima, M. Murase, S. Kaijiri, K. Yamada, Y. Hasegawa, H. Tsujino and H.G. Okuno: "Real-time tracking of multiple sound sources by integration of in-room and robot-embedded microphone arrays," Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS-2006), pp.852-859, 2006.
- [15] Y. Sasaki, S. Kagami and H. Mizoguchi: "Multiple sound source mapping for a mobile robot by self-motion triangulation," Proceedings of 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2006), pp.380-385, 2006.
- [16] L.J. Griffiths and C.W. Jim: "An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.30, no.1, pp.27-34, 1984.
- [17] 中島弘史: "ミニマックス規範に基づくサイドローブ最小ビームフォーミング", 日本音響学会誌, vol.63, no.7, pp.341-352, 2007.
- [18] R.A. Kennedy and T.D. Abhayapala: "Nearfield beamforming using radial reciprocity," IEEE Trans. on Signal Processing, vol.47, pp.33-40, 1999.
- [19] 佐々木洋子, 加賀美聡, 溝口博: "移動ロボット搭載用 32ch マイク ロホンアレイの設計と精度評価", 第24回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 1B19, 2006.

佐々木洋子 (Yoko Sasaki)

2007年東京理科大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程修了。同年、同大学同研究科同専攻博士課程進学。同年、日本学術振興会特別研究員。現在に至る。日本機械学会の会員。

(日本ロボット学会学生会員)

溝口 博 (Hiroshi Mizoguchi)

1985年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。同年株式会社東芝総合研究所(現:研究開発センター)入所。1994年東京大学先端科学技術研究センター, 1996年文部省短期在外研究員(ケンブリッジ大学), 1997年埼玉大学工学部情報システム工学科教授を経て, 2002年東京理科大学理工学部機械工学科教授。2003年産業技術研究所デジタルヒューマン研究センター客員研究員。情報処理学会, 計測自動制御学会, IEEEの会員。

(日本ロボット学会正会員)

加賀美聡 (Satoshi Kagami)

1997年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。博士(工学)。同年より日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「マイクロ・ソフトメカニクス統合体としての高度生体機能機械の研究」プロジェクトにより東京大学リサーチアソシエート。2001年産業技術総合研究所入所。デジタルヒューマン研究ラボの主任研究員。2003年改組によりデジタルヒューマン研究センター・ヒューマノイドインタラクションチームのチーム長。

(日本ロボット学会正会員)