

球面上非対称 2ch アレイによる全方位音源定位

小野 順貴[†] 深町聡一郎^{††} 西本 卓也[†] 嵯峨山茂樹[†]

[†] 東京大学 大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻 東京都文京区本郷 7-3-1

^{††} 東京大学 工学部 計数工学科 東京都文京区本郷 7-3-1

E-mail: †{onono,s-fukamachi,nishi,sagayama}@hil.t.u-tokyo.ac.jp

あらまし 本研究では、2 個のマイクロホンで 360 度の全方向の音源を定位可能な定位システムとして、球面上非対称配置 2ch アレイについて報告する。通常、自由空間におかれた 2 個のマイクロホンでは、その対称性から、マイクロホンを結ぶ直線に関して対称な位置の音源を区別することができないが、本システムでは球面上にマイクロホンを非対称に配置することによってこの対称性を崩し、球の回折によって生じた周波数特性を頭部伝達関数のように利用し、定位を実現する。本稿では、非対称配置による全方向定位可能性について論じた後、最尤法による定位アルゴリズム、音声信号を対象としたマイクロホン配置の最適化について述べ、実際に試作したシステムによる実験結果について報告する。

キーワード 音源定位, 非対称, 頭部伝達関数, 球

Sound Source Localization for Whole Direction by Asymmetrically Arrayed 2ch Microphones on Sphere

Nobutaka ONO[†], Soichiro FUKAMACHI^{††}, Takuya NISHIMOTO[†], and Shigeki SAGAYAMA[†]

[†] Department of Information Technology and Computing, Grad. School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

^{††} Department of Mathematical Engineering and Information Physics, School of Engineering, The University of Tokyo

E-mail: †{onono,s-fukamachi,nishi,sagayama}@hil.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract In this paper, we report asymmetrically arrayed 2ch microphones on sphere, which has a capability to localize a sound source in any (360°) direction. Generally, 2ch microphones arrayed in a free space cannot distinguish sources on the symmetry directions about the line between the microphones because of the symmetry. While in our system, asymmetry arrangement on the sphere corrupts the symmetry and the localization is realized by using the frequency characteristic originated from diffraction of the sphere like HRTF. In this paper, we investigate the potential of source localization for the whole direction by our asymmetric array, describe the localization algorithm by ML estimation, and report the fabricated system through the optimization of microphone arrangement for speech, and experimental results in the real environments.

Key words sound source localization, asymmetry, HRTF, sphere

1. はじめに

音源定位とは、到来する音響信号からその音源の方向や距離を推定することであり、周囲の音環境の把握や音源分離の前処理に重要な機能である。通常、マイクロホンを用いた音源定位は、自由空間に無指向性の音圧型マイクロホンをアレイ状に並べ、到来する音波の空間情報を取得することにより行われる。一般に 2 個のマイクロホンを並べただけでは、その対称性から、

マイクロホンを結ぶ直線に関して対称な位置の音源を区別することができない。よって 2 次元的な音源方向や距離を含めた 3 次元的な定位を行なうためには、3 個、4 個、ないしはそれ以上のマイクロホンが必要となる [1] [2]。

一方、人間をはじめとした多くの生物は、唯 2 つの耳により、あらゆる方向から到来する音信号を定位している。このような生物の聴覚器を模倣し、耳介や頭部を模倣した物体の周波数特性をより積極的に利用することで、少ないマイクロホン、あ

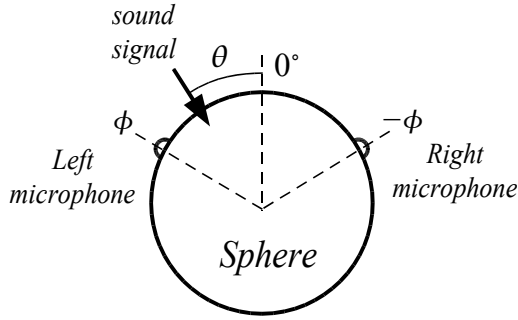


図1 マイクロホンの配置と座標系

るいは音響センサにより、広い範囲の音源定位を可能にする研究が様々行なわれている [3] [4] [5] [6] [7] [8]。特に 2ch アレイは、多くの計算機がもつ標準的な音響入力で処理可能であり、音源定位や、定位に基づく音源分離 [9] [10] の適用を容易にする利点がある。

本研究の目的は、2ch のマイクロホンで前後判断を含めた 360 度の音源定位を実現することにある。では、そのために必要最小限の構成とは何であろうか。人間の聴覚系では耳介や頭部による回折に起因する頭部伝達関数が大きな役割を果たしている [11] が、そもそも、2 個のマイクロホンで前後判断ができない理由がその対称性にあるのだとすれば、複雑な耳介は必ずしも必要はなく、音波を回折させる、前後に非対称な構造があれば十分とも考えられる。そこで本研究では、球にマイクロホンを非対称配置した構成による 360 度音源定位について検討した。球は、平面波回折の解析解が古くから知られているため周波数特性の実測などが不要であり、これまでも球面上多 ch アレイを利用した音源定位などが提案されている [12]。Handzel らも、マイクロホンを装着した球の微小回転を利用した定位システム [13] の枠組の中で非対称配置に触れているが、白色雑音を用いた簡単な実験に留まっていた。本稿では、非対称配置による音源定位の理論と全方位定位可能性の検討、音声を対象としたシミュレーション実験、実システムを用いた定位実験とその結果について論じる。

2. 非対称球面配置 2ch アレイによる全方位定位の理論

2.1 球面配置 2ch アレイの問題設定

自由空間に配置された 2 個のマイクロホンでは、その対称性から前後方向の区別を行うことができない。マイクロホンを球面に配置したとしても、対極の 2 点に対称配置した場合には同様の問題が発生する。そこで本研究では、図 1 のように 2 個のマイクロホンを球面の赤道上の $\pm\phi$ の角度に非対称に配置し、同一水平面内の θ 方向から到来する音波を定位することを考える。 $(\phi = 90^\circ$ の場合は対称配置に対応する。)

左右 2 個のマイクロホンで観測された信号の Fourier 変換をそれぞれ $M_L(\omega)$ 、 $M_R(\omega)$ で表すと、これらの観測信号は

$$\mathbf{M}(\omega) = S(\omega)\mathbf{H}(\omega, \theta) + \mathbf{N}(\omega) \quad (1)$$

と表される。ここで $\mathbf{M}(\omega) = (M_L(\omega), M_R(\omega))^T$ 、 $S(\omega)$ は音源信号、 \mathbf{N} は観測雑音を表わす。また、 $\mathbf{H}(\omega, \theta) =$

$(H_L(\omega, \theta), H_R(\omega, \theta))^T$ は、球の中心を規準とした、音源から各マイクロホンへの伝達周波数特性であり、音源方向に依存した複素ベクトルである。ここで、1) 球面非対称配置の場合、 $\mathbf{M}(\omega)$ から θ を求めることは可能か否か、2) 観測誤差が含まれる場合にどのようにして θ を推定するか、が解くべき問題となる。

2.2 球による音波の回折

平面波入射に対する球の回折については理論式が知られており、球上の点における音圧 $p(\omega, \psi)$ は、Legendre 関数 $P_n(x)$ と球 Hankel 関数 $h_n(x)$ を用いて

$$p(\omega, \psi) = D(\omega, \psi) p_0(\omega) \quad (2)$$

$$D(\omega, \psi) = \frac{1}{ka} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{j^{(n+1)}(2n+1)P_n(\cos \psi)}{ka h_{n+1}^{(2)}(ka) - nh_n^{(2)}(ka)} \quad (3)$$

と表される [14]。ここで、 p_0 は球が無いと仮定した場合の、球中心にあたる点での音圧、 a は球の半径、 $k = \omega/c$ で c は音速、 ψ は球中心からみた球上の点と音源方向との間の角度である。また、 D を回折係数と呼ぶ。よって、音源から球面上に配置された各マイクロホンへの伝達周波数特性は、この回折係数 D を用いて次のように表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(\omega, \theta) &= (H_L(\omega, \theta) \ H_R(\omega, \theta))^t \\ &= (D(\omega, \theta - \phi) \ D(\omega, \theta + \phi))^t \end{aligned} \quad (4)$$

2.3 全方位定位可能性の検証

式 (1) の観測モデルにおいて、たとえ観測雑音 $\mathbf{N}(\omega)$ が 0 であったとしても、式 (1) には未知の音源信号 $S(\omega)$ が含まれるため、 $H_L(\omega, \theta)$ 、 $H_R(\omega, \theta)$ を直接観測することはできない。よって音源定位においては、これらの比である両チャンネル間伝達関数 (Inter-channel Transfer Function; ITF) :

$$\text{ITF}(\omega, \theta) = \frac{H_L(\omega, \theta)}{H_R(\omega, \theta)} = \frac{D(\omega, \theta - \phi)}{D(\omega, \theta + \phi)} \quad (5)$$

が重要であり、音源定位が曖昧なく行えるためには、ITF が θ と 1 対 1 の対応関係をもつ必要がある。2ch アレイの場合に音源定位の手がかりとして用いられる観測信号間の振幅比と位相差 [15] は、ITF の絶対値と位相に相当する。

まず図 2 に、球の半径を 85mm、 $\phi = 50^\circ$ とした場合の、ITF の絶対値と位相を示す。耳介が存在しなくても、球の回折のみで両チャンネル間に振幅比が生じており、特に 1kHz(球の直径に対してほぼ 1/2 波長)の周波数より高い帯域で、特定の方向に対して大きな振幅比が生じていることがわかる。

次に ITF と音源方向の関係を確認するため、対称配置 ($\phi = 90^\circ$) と非対称配置の一例 ($\phi = 50^\circ$) に対し、1, 2, 3kHz の周波数で、音源方向をパラメータとした ITF の複素平面上での軌跡を図 3 に示す。対称配置の場合は前後に対応する音源方向で ITF が完全に重なり、これらを区別することはできないが、非対称配置の場合にはほとんどの方向で軌跡は重ならず、定位可能な条件を満たしていることがわかる。ただし、高い周波数になるほど、軌跡が重なる方向が増えてくるため、この曖昧性を解消するためには、複数の帯域の情報を統合する

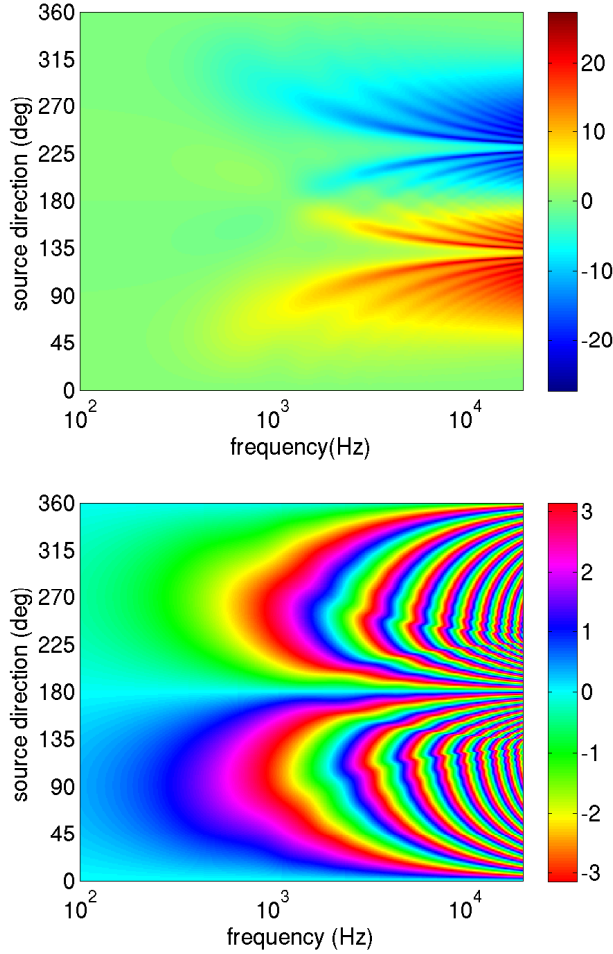


図2 球面非対称配置 (球半径 85mm, $\phi = 50^\circ$ の場合) における両チャンネル間振幅比 [dB](上図) と位相差 [rad](下図)

必要があることが示唆される。また、正面 ($\theta = 0^\circ$) と真後ろ ($\theta = 180^\circ$) では常に ITF = 1 で重なり、このシステムでは原理的に定位できないことに注意する。

3. 最尤法に基づく定位アルゴリズム

実際の観測信号には観測誤差 $N(\omega)$ が含まれるため、観測信号 $M(\omega)$ の複素比から強度比、位相差、もしくは ITF を求めたとしても、図 2 や図 3 に示したような理論値とは一致しない。このような場合に、観測データからパラメータを推定する合理的な手法の一つは、観測誤差を確率的に扱い最尤法を用いることである。観測モデルである式 (1) において、観測雑音 $N(\omega)$ が共分散行列 $V(\omega)$ をもつ複素ガウス分布に従うと仮定すると、対数尤度は、

$$\log p(\mathbf{M}(\omega); S(\omega), \theta) = -\frac{1}{2} \log(2\pi |\det V(\omega)|) - \frac{1}{2} (\mathbf{M}(\omega) - S(\omega)\mathbf{H}(\omega, \theta))^h V(\omega)^{-1} (\mathbf{M}(\omega) - S(\omega)\mathbf{H}(\omega, \theta)) \quad (6)$$

と表わされる。これは未知の音源信号 $S(\omega)$ を含んでいるが、これを最尤値：

$$S_{ML}(\omega) = \frac{\mathbf{H}(\omega)^h V(\omega)^{-1} \mathbf{M}(\omega)}{\mathbf{H}(\omega)^h V(\omega)^{-1} \mathbf{H}(\omega)} \quad (7)$$

で置き換えることにより、音源方向 θ に対する尤度モデル：

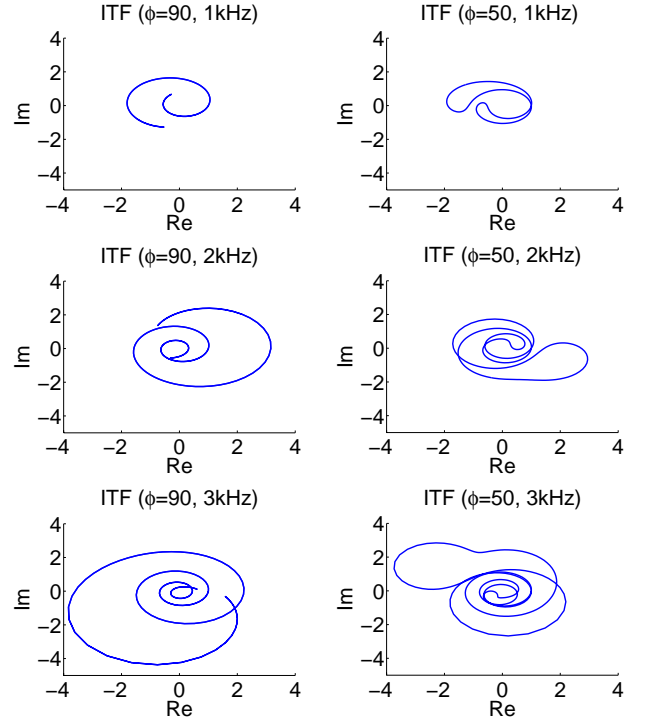


図3 対称配置 ($\phi = 90^\circ$) (左段) と非対称配置 ($\phi = 50^\circ$) (右段) の場合の、音源方向をパラメータとした ITF の複素軌跡。球半径は 85mm

$$LL(\mathbf{M}(\omega); \theta) = -\frac{1}{2} (\mathbf{M}(\omega)^h V(\omega)^{-1} \mathbf{M}(\omega)) + \frac{1}{2} \cdot \frac{|\mathbf{H}(\omega)^h V(\omega)^{-1} \mathbf{M}(\omega)|^2}{\mathbf{H}(\omega)^h V(\omega)^{-1} \mathbf{H}(\omega)} \quad (8)$$

を得る。ただし観測信号に依存しない定数項は省略した。また、左右の観測雑音の大きさが等しいと仮定すれば、これらの共分散行列 $V(\omega)$ は、

$$V(\omega) = \sigma^2(\omega) \begin{pmatrix} 1 & \eta(\omega) \\ \eta(\omega) & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

と表わされる。ここで $\sigma(\omega)^2$ が雑音パワー、 $\eta(\omega)$ は左右の観測雑音の相関を表わす定数であり、 $\eta(\omega) = 0$ とすれば、左右独立な雑音を仮定したことに相当する。

図 4 に、球半径 85mm、音源方向 60° 、マイクロホン角度 50° の条件で、いくつかの周波数での対数尤度 $LL(\mathbf{M}(\omega); \theta)$ と、全周波数での対数尤度和 $\sum_{\omega} LL(\mathbf{M}(\omega); \theta)$ を示す。各周波数においては対数尤度関数は多峰性であり、周波数、方向によっては、真の音源方向以外にも高いピークを示しているが、全周波数での対数尤度和は、多峰性ではあるものの、最大値が正しい音源方向に現れている。よって、周波数方向の情報をこのような形で統合すれば、前後判断を含めた定位が可能であることが示唆される。

4. 音源定位シミュレーション実験

4.1 時間周波数毎の定位

予備的な検討として、時間周波数毎の尤度最大方向が低雑音環境下でどの程度真の音源方向に一致するかを確認するためのシミュレーション実験を行った。音声信号をサンプリング周波数 16kHz の音源信号とし、フレーム長 1024 サンプル (64ms)、

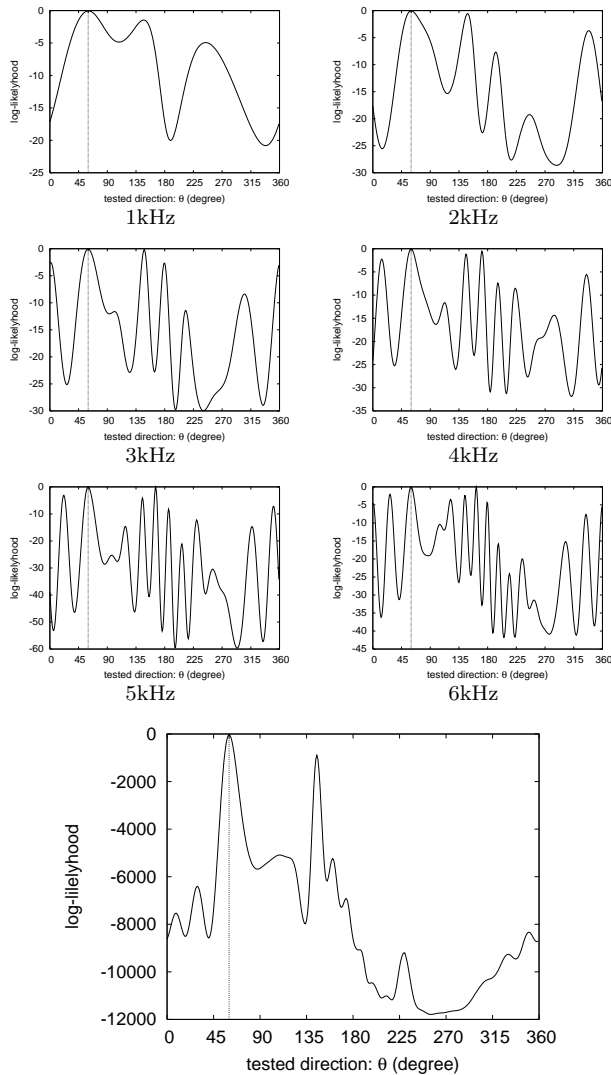


図4 1kHz~6kHzにおける対数尤度 $LL(M(\omega); \theta)$ (上図) と全周波数の対数尤度和 $\sum_{\omega} LL(M(\omega); \theta)$ (下図)

シフト幅 512 サンプル (32ms) で Hamming 窓を用いた短時間 Fourier 変換により時間周波数分解を行なった。この条件は以降の実験でも同様である。球の直径は 85mm, マイクロホン位置は $\phi = 50^\circ$, 音源方向は $\theta = 45^\circ$ とし, 観測雑音として左右に独立な白色雑音を加え, SN 比を 10dB とした。各フレームに対して周波数ごとに対数尤度最大を与える θ_0 を求め, 30 フレーム分を重ねがきしたものを図 5 に示す。ただし意味のない結果を除くため, 信号パワー ($|M_L|^2 + |M_R|^2$) がある閾値より小さい点は除外してある。多くの場合, 推定音源方向が正しい方向の周りに集まっているが, 高い周波数帯域で定位に失敗している点も見られる。これは図 3 で示した通り, 高い周波数帯域において, ITF が異なる方向に対し同一の値をとる場合があることの影響と思われる。

4.2 時間フレーム毎の定位

前述のような時間周波数成分毎の定位に生じうる曖昧性を除くため, 1 フレーム内で音源は 1 つと仮定し, 毎フレームで全周波数の対数尤度和を用いた定位について検討した。結果を図

6 に示す。全周波数の情報を統合したことにより, ほとんどの方向を正しく定位できていることがわかる。音源方向が 0° と 180° に近い点で前後の混乱が生じているのは, 周波数にかかわらずこの 2 点でも $ITF=1$ となるからである。

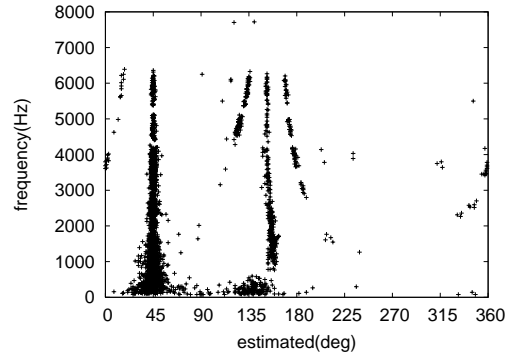


図5 45°の音源方向に対する時間周波数毎の定位結果の散布図

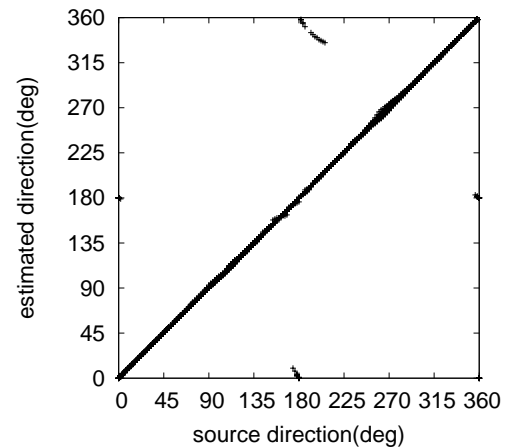


図6 音源方向と全周波数情報を統合した定位シミュレーション結果の関係 (SN 比 10dB)

5. 実システムを用いた定位実験

5.1 マイクロホン配置の最適化

実システムの試作にあたっては, マイクロホン位置を決定する必要がある。一般に, マイクロホンが対称配置 ($\phi = 90^\circ$) に近いほど前後判断が難しくなり, マイクロホン同士が近づく ($\phi \rightarrow 0^\circ$) ほど, 観測信号間の差の情報が小さくなり定位自体が難しくなる。この中間にある考えられる最適なマイクロホン配置角度を求めたいが, 定位精度は音源のパワースペクトルや SN 比など様々な要因に依存するため, ここではこれをシミュレーション実験により求めることとした。音源信号は音声とし, 左右独立な白色雑音を観測信号に加えた。全周波数の対数尤度和を最大とする方向が, 音源方向から $\pm 5^\circ$ 以内であれば正解として, マイクロホン配置 ϕ と定位正解率の平均との関係を調べた。パラメータは実際の試作を想定し, 球の半径 30mm, SN 比 = 10dB, 0dB の場合に, $\theta = 0^\circ \sim 360^\circ$ でシミュレーションを行った。本実験でも前節と同様, 観測信号のパワーが小さく意味のないフレームの結果は除いてある。

結果を図 7 に示す。定位正解率は, $\phi = 0^\circ$ と $\phi = 90^\circ$ で低

く、 $40^\circ \sim 70^\circ$ の間ではほぼ一様に高い。拡大図でわかるように、この範囲で急峻なピークはみられず、正解率の細かい変動はもデータに依存して変わるものと考えられるが、今回はこの実験結果に従い、最適配置として $\phi = 46^\circ$ を用いた。

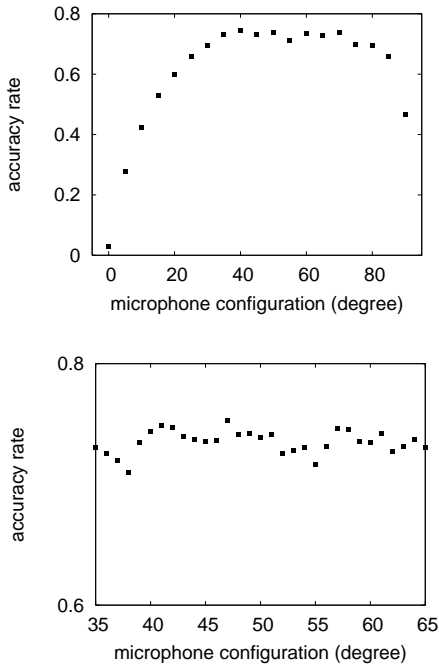


図 7 マイクロホンの配置角度に対する定位正解率の変化 (上図) と配置角度 $35^\circ \sim 65^\circ$ の範囲の拡大図 (下図)

5.2 実システムの試作

実システムに使用するマイクロホンは、サイズが小さく、無指向性であるものが望ましい。今回は、エレクトレット型のマイクロホン (AT805F; Audio Technica) を 2 個使用した。球としては、半径 30mm の木製のものを用い、マイクロホンを配置するため、1 つの大円を赤道と定め、赤道上 $\pm 46^\circ$ の角度でマイクロホン大の貫通穴をあけ、マイクロホンを通して固定した。また南極に相当する位置には三脚用のねじを取り付け、球全体を小型三脚に固定した。図 8 に試作したシステムの写真を示す。信号はマイクアンプ (AT-MA2; Audio Technica) を介して、計算機の標準ステレオ入力に接続可能な構成としている。

5.3 定位実験の条件

図 9 に示すように、1m 離れた音源から音声信号を出力し、球面上非対称 2ch アレイにより集音した信号を用いて定位を行なった。実験環境は通常研究室環境であり、換気扇や計算機のファン、HDD 音などの環境雑音が存在している。音源方向は、 0° から 180° まで 30° 間隔とし、球を音源に対して相対的に回転させることにより音源方向を制御した。また、対数尤度の計算には式 (8) を用い、式 (9) の雑音モデルとしては、全周波数に対して、雑音パワー一定 ($\sigma^2(\omega) = C$)、左右独立 ($\eta(\omega) = 0$)、という最も簡単なものを用いた。

5.4 定位実験の結果

各音源方向に対し、フレーム毎に全周波数の対数尤度和から定位した結果を図 10 に示す。おおむね定位できているが、前後判断の誤りも含まれていることがわかる。誤りの割合として



図 8 試作した実システムの写真

は 2 割程度であった。また定位結果が、実際の音源方向よりも前 (0°) または後ろ (180°) に偏移している傾向がみられ、特に 90° 方向の音源に対して顕著である。

まず前後判断の誤りに関しては、観測雑音の影響と考えられるため、定位を 1 フレーム毎から 10 フレーム毎として、再定位を行なった。具体的には、10 フレーム分の全周波数の対数尤度を全て加算し、その最大を与える音源方向を定位結果とした。結果を図 11 に示す。前後判断の誤りはこれにより改善されているものの、定位結果が前後に偏移する傾向は改善されていない。

考えられる要因の 1 つは、雑音モデルとして左右独立を仮定したことである。実際に観測される雑音は周囲から到来する音響信号であり、これは一般に周波数とマイクロホン間距離に依存した相関をもつ。相関がある雑音を相関がないモデルで解釈しようとする、雑音の相関分は信号成分と解釈され、最も左右で相関のある方向である正面、もしくは真後ろに定位結果が偏移する可能性がある。これを考慮するため、左右独立な雑音に加え、拡散音場の理論 [16] [17] を参考に、3 次元的なあらゆる方向から等しい確率で雑音到来すると考え、左右の雑音相関 (式 (9) 中の $\eta(\omega)$) を見積もって、再び定位結果を求めた結果が図 12 である。定位結果が前後に偏移する傾向が改善され、ほぼ 9 割程度の定位結果を得ることができた。

6. 結論

本研究では球の回折を利用し、球面上に非対称配置した 2ch のマイクロホンによって 360° の全方位を定位するシステムについて論じた。シミュレーションによるマイクロホン配置の検討を通じて実システムを試作し、実環境での実験においても、前後判断を含めた定位が可能である見通しを得た。実験の最後で述べた雑音モデルに関して、今後、より詳細に検討し、またシステムの実時間化についても検討していきたいと考えている。

文 献

- [1] S. Araki, H. Sawada, R. Mukai, and S. Makino, "DOA es-

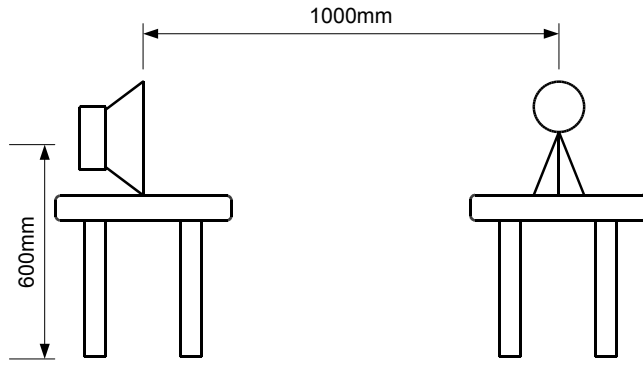


図 9 実験系のセットアップ

timation for multiple sparse sources with normalized observation vector clustering,” ICASSP2006, pp. V-33 - V-36, 2006.

- [2] 安藤, 篠田, 小川, 光山, “時空間勾配法に基づく 3 次元音源定位システム,” 計測自動制御学会論文集, vol.29, no.5, pp.520-528, 1993.
- [3] N. Ono, Y. Zaitzu, T. Nomiyama, A. Kimachi, and S. Ando, “Biomimicry Sound Source Localization with Fishbone,” 電気学会論文誌, vol.121-E, no.6, pp.313-319, 2001.
- [4] N. Ono and S. Ando, “Sound Source Localization Sensor with Mimicking Barn Owls,” Proc. Transducers’01, vol.2, pp.1654-1657, Munich, 2001.
- [5] N. Ono, A. Saito, and S. Ando, “Bio-mimicry Sound Source Localization with Gimbal Diaphragm,” 電気学会論文誌, vol.123-E, no.3, pp.92-97, 2003.
- [6] H. Nakashima, Y. Chisaki, T. Usagawa and M. Ebata, “Frequency domain binaural model based on interaural phase and level differences,” Acoust. Science & Technology, vol. 24, no. 4, pp. 172-178, 2003.
- [7] 河野, 中島, 菅木, 宇佐川, “両耳間位相差およびレベル差を用いた複数音源の方位角・仰角推定手法の検討,” 聴覚研究会資料, vol. 36, no. 6, pp. 547-552, Aug. 2006.
- [8] 西野, 井上, 伊藤, 武田, “両耳間音圧差の包絡を用いたガウス分布モデルに基づく音源方向推定,” 日本音響学会誌, 63 巻, 1 号, pp. 3-12, 2007.
- [9] O. Yilmaz and S. Rickard: “Blind Separation of Speech Mixtures via Time-Frequency Masking,” IEEE Trans. Signal Processing, vol. 52, no. 7, pp 1830-1847, 2004.
- [10] 和泉, 亀岡, 小野, 嵯峨山, “音声スパース性に基づく 2chBSS への EM アルゴリズムの適用,” 電気音響研究会資料, vol. 106, EA2006-96, pp.43-48, Dec. 2006.
- [11] J. Blauert, Spatial Hearing, MIT Press, Cambridge, MA, 1983.
- [12] 福留, “球バツフル埋込みマイクロホンとその回折情報を利用した音源の方向及びスペクトル推定,” 日本音響学会誌, 44 巻, 4 号, pp. 272-281, 1988.
- [13] A. A. Handzel and P. S. Krishnaprasad, “Biomimetic Sound-Source Localization,” IEEE Sensors Journal, vol. 2, no. 6, pp. 607-616, Dec. 2002.
- [14] 早坂, 吉川, 音響振動論, 丸善, 東京, 1974.
- [15] 渡邊, 阿曾, 小澤, 岩谷, 鈴木, “音像定位のスペクトラルキュー - 身体特徴量に基づく両耳間レベル差の予測 (第 2 報) -,” 2006 年秋季音響学会講演論文集, pp. 471-472, 2006.
- [16] R. K. Cook, R. V. Waterhouse, R. D. Berendt, S. Edelmann and M. C. Thompson, “Measurement of correlation coefficients in reverberant sound fields,” JASA, vol. 27, no. 6, pp. 1072-1077, 1955.
- [17] I. A. McCowan, H. Boursard, “Microphone Array Post-Filter Based on Noise Field Coherence,” IEEE Trans. on Speech and Audio Processing, vol. 11, no. 6, pp. 709-716, 2003.

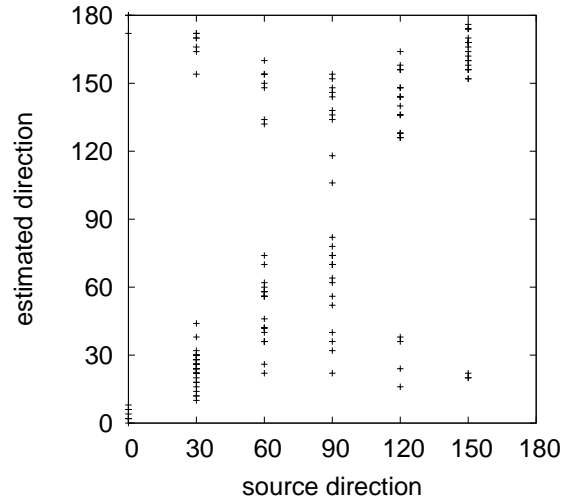


図 10 実環境における定位結果 1 (左右独立な誤差モデルを用いた 1 フレーム毎定位の場合)

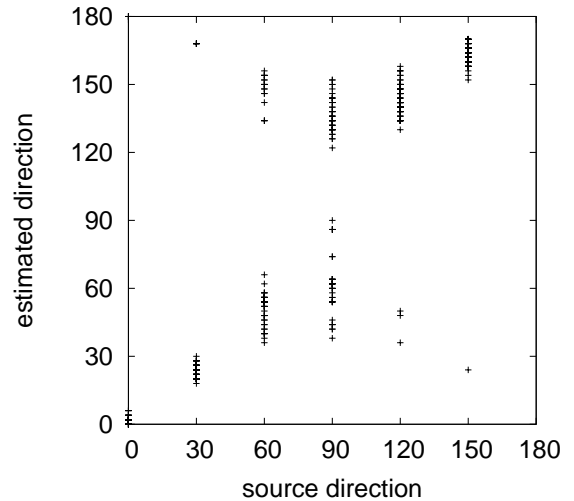


図 11 実環境における定位結果 2 (左右独立な誤差モデルを用いた 10 フレーム毎定位の場合)

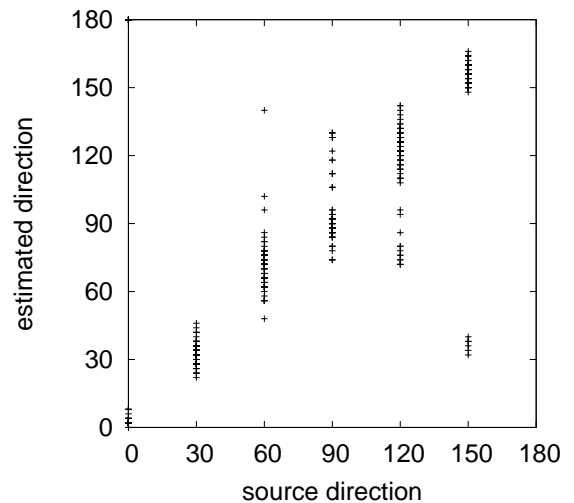


図 12 実環境における定位結果 3 (左右で相関のある誤差モデルを用いた 10 フレーム毎定位の場合)