

位相差スペクトルイメージによる 1 音源の 2 次元位置推定

日大生産工 ○霜山 竜一

11 はじめに

視覚障害者でも両耳聴によって、到来する音の方向や音源までの距離を、ある程度まで推定できることが知られている。このことは異なる 2 箇所の音圧に音源の 3 次元の空間情報が含まれることを意味する。筆者は、両耳聴で得た音圧から音源の 2 次元分布を把握する仕組みをコンピュータで模擬することにより、脳で聴空間を把握する聴覚情報処理の仕組みの一端を明らかにする研究を行っている。従来、人の聴覚では低い周波数の音を時間差で、高い周波数ではその強度差を用いて音の方向を求めているとされる。しかしマイクロホンを用いた実験によると音源が遠方にある場合には、音圧の強度差は小さすぎるため容易に検出できず、時間差も反響の影響を受けやすい。人の聴覚器官は確かに精巧である一方、頑健でもある。聴覚が様々な悪環境でも十分機能する点を考慮すれば、従来の定説は誤りである可能性がある。また実環境で動作するロボットに実装される聴覚システムは頑健で遠方の音源の位置を的確に検出できることが望ましい。両耳で距離を推定するための音の特徴に関して心理物理学実験による多くの提案がなされている[1]。Bronkhorst らは直接音と反射音のエネルギー比の距離推定における重要な役割について指摘している[2]。距離検出に関して高橋らは、残響音場内の 1 箇所で測定された音のインパルス応答から求めた最小位相成分の周波数特性に音源・受音点の比較的近距离

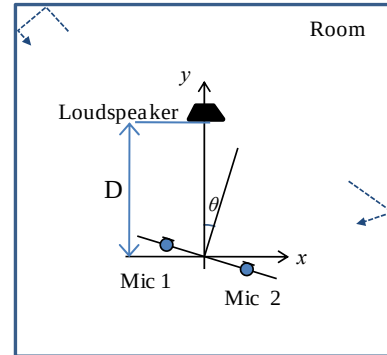


図 1 マイクロホンとスピーカの配置

(～1.6m)の情報が含まれることを指摘している[3]。筆者はこれまで、メンフクロウが水平方向の音源定位に用いるメカニズム[4]を周波数領域に適用したアルゴリズムで、反響のある室内で複数音源を定位できることを示した[5][6]。音圧の位相差の周波数特性(位相差スペクトル)を統計的に定量評価することで一対のマイクロホンだけで音源までの距離が推定可能なことを示した[7]。2 箇所の音圧を用いて遠方にある音源までの距離(～3m)をコンピュータで高精度に推定する試みは前例がない。

本研究では、2 系統の音響信号の同時収録装置を用いて、広帯域音源の水平方向と距離を求め 2 次元的な位置を推定した。音源までの距離と水平方向は音圧の位相差スペクトル分布を統計処理して求めた。1 台のスピーカの位置を変えて音源の 2 次元位置を推定した結果について報告する。

2 方向と距離の検出法

図 1 のように、室内の中央部に設置し

Distance estimation to a sound source using
phase difference spectrum images
Ryuichi SHIMOYAMA

た1対の無指向性マイクロホンから距離 D 離れた位置に音源を設置する。音源が y 軸上に位置する場合は ($\theta = 0$)、音源から両マイクロホンに到達する音（直接音）の伝搬距離は等しいため、位相差値はゼロであり、その値は距離 D や音の周波数に依存しない。実際には、音源から発生した音は周囲に広がり壁や天井、床などで反射した後、マイクロホンに到達する（反射音）。反射音では、音源から各マイクロホンまでの伝搬距離が異なるため位相差はゼロにはならない。マイクロホンは直接音と反射音の合成された音を検出するため、室内の音源から広帯域雑音を連続的に発生させた場合は音圧の位相差の周波数特性に連続性がみられず、位相差値はゼロ近傍でばらつく傾向がみられる。本研究では、この位相差スペクトルに含まれる情報を統計処理することで音源までの距離と水平方向を求め2次元位置を推定する。

音源の方向は CAVSPAC 法[6]を用いて求めた。すなわち図2に示す直接音の行路差と位相差をそれぞれ Δd 、 $\Delta \phi$ とおくと

$$\Delta \phi = \frac{\Delta d}{c} f \times 360 \text{ (deg.)} \quad (1)$$

ただし c は音速、 f は周波数である。

一般的に位相差は多義性といわれる性質を有する。すなわち

$$\Delta \phi \rightarrow \Delta \phi + 360n \quad (2)$$

ただし n は整数である。式(2)を式(1)に代入して変形すれば

$$\Delta d = \frac{c(\Delta \phi + 360n)}{360f} \quad (3)$$

が得られる。音源方向 θ はこの行路差から図2より幾何学的に求められる。式(3)は、音源の方向が多義的であることを示す。すなわち一位相差値について、整数 n の値に応じて複数の行路差 Δd 、(音の方向)が想定される。周波数に依存しない方向を真の方向とみなし

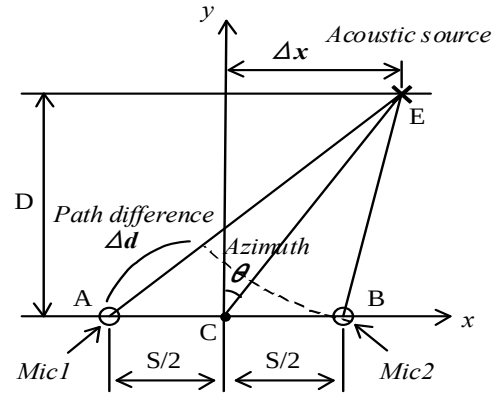


図2 音源方向と配置の幾何学的な関係

た。

音源までの距離については、位相差スペクトルのばらつきが距離に依存する特徴を利用して推定した。位相差スペクトルの周波数帯域幅 Δf に含まれる $2m+1$ 個の位相差値の標準偏差を、中心周波数 f_i を変えながら(4)、(5)式から求める。周波数 f_i における標準偏差 ρ_i は、

$$\rho_i = \sqrt{\frac{1}{2m+1} \sum_{j=i-m}^{i+m} (\phi_j - \bar{\phi}_i)^2} \quad (4)$$

$$\bar{\phi}_i = \frac{\sum_{j=i-m}^{i+m} \phi_j}{2m+1} \quad (5)$$

で与えられる。ここで ϕ_j は周波数 f_j における位相差、 $\bar{\phi}_i$ は帯域幅 Δf 内の位相差

の平均値である。上記操作によって標準偏差の周波数特性が得られる。周波数帯域 ($f_1 \sim f_2$) における平均値を音源までの距離に対応する特徴量とみなす。マイクロホンと音源間の距離や方向とこの特徴量の関係を実測して求め近似関数を算出する。測定された位相差スペクトルからこの近似関数を補間して音源までの距離が得られる。

3 実験結果

24 ビット分解能の A/D 変換ボード

(PCI-4474, N.I. 製) を装備した PC (GX280, DELL 製) で 2 系統の音響信号を同時収録した。室内の中央で一對のマイクロホン (Type 4190 Bruel&Kjaer 製) を水平方向に 20cm (= S) 離して配置した。 Δf は 0.8kHz ($m = 160$) である。サンプリング周波数は 24kHz でハニング窓を用い、1 フレームは 9600 個のデータを含む。標準偏差の周波数特性は 4kHz (f_1) から 11kHz (f_2) の周波数帯域で平均化した。

マイクロホンからの距離 1m, 方向が +47° ($= \theta$) の位置にスピーカを設置した場合の音源方向の推定結果を図 3 に示す。度数分布のピークは 47.5° であり、音源方向が高精度で推定できた。マイクロホンの正面 ($\theta = 0$) に設置したスピーカまでの距離と標準偏差の周波数特性の関係を図 4 に示す。多少の変動がみられるが概ね、周波数が高いほど標準偏差値は減少し、音源が離れるにつれ値は高くなる傾向がみられた。これは、音源が遠方にあるほど、様々な方向から到来する反響音が位相差値に顕著な影響を与えることを意味する。

Bronkhorst ら [2] が指摘したように直接音と反射音のエネルギー比による直接的な効果を表すものと考えられる。図 5 に示すように標準偏差の平均値と距離はほぼ比例した。音源が正面にある場合は、測定によって得られた標準偏差値の平均値から図 5 を補間して音源までの距離が求められる。しかし音源が正面にない場合にはその角度に応じて標準偏差値は上昇する。図 6 に音源の方向と標準偏差の平均値の関係を示す。スピーカまでの距離が 1m の場合に、平均値は角度 θ が 0~90° に対して約 40° 上昇し、平均値の上昇する割合は音源までの距離に依存することが分かった。距離 1m, 2m, 3m において角度 θ に対する平均値の上昇特性を測定により求め、このデータベースを用いて、音源の

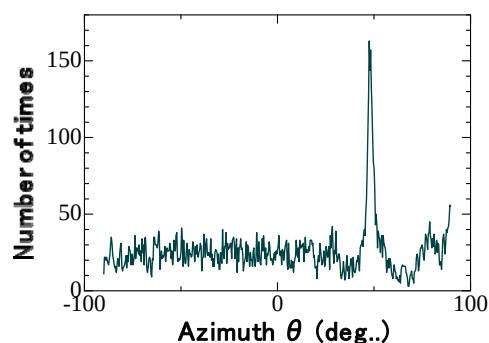


図 3 音源方向の度数分布(スピーカの方向 : 47°, 距離 : 1m)

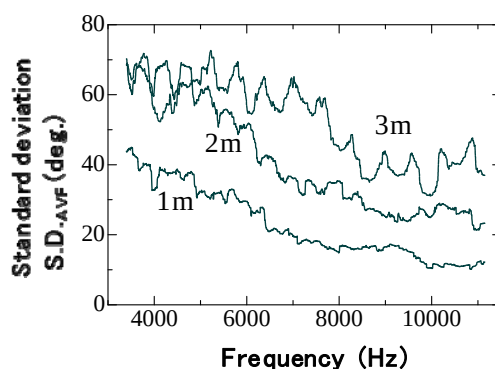


図 4 位相差スペクトルの標準偏差値の周波数特性($\theta=0$)

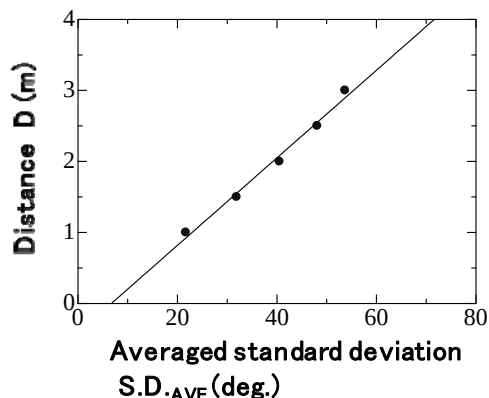


図 5 位相差スペクトルの標準偏差の平均値と音源までの距離の関係($\theta=0$)

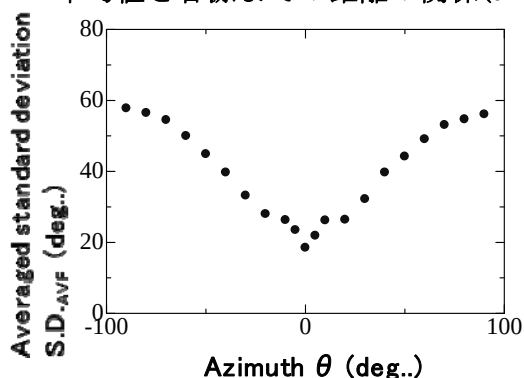


図 6 音源方向と標準偏差の平均値の関係

方向に応じて標準偏差の平均値の上昇分を補正し、図 5 の特性を補間して距離を推定した。

次にマイクロホンを固定し、スピーカの方
向と距離を変えて音源の 2 次元位置を
推定した結果を図 7 に示す。音源が遠ざか
り、横方向に移動する様子が確認できた。
方向が一定($\theta = +30^\circ$)で距離のみ変化する
場合の位置の誤差は最大で約 7cm である。
方向と距離の両方が変化する横移動の
推定位置は最大で約 45cm の誤差が生じた。

4. おわりに

2 系統の音響信号の同時収録装置を用い
て、広帯域音源の 2 次元的な位置を推定し
た。音源までの距離と水平方向を、同じ音
圧の位相差スペクトル分布を統計処理し
て求めた。1 台のスピーカ的位置を変えて
音源位置を推定した。その結果、(1)音源
が遠ざかり移動する様子を確認できた、
(2)方向と距離の両方の変化する横移動の
場合は音源位置の誤差が大きくなる傾向
がみられた。位相差スペクトルのばらつき
は室内の残響時間に依存するものと考え
られる。

今後は、上半身の人体モデルを用いて本
手法の有効性を確認する予定である。脳で
聴空間を把握する聴覚情報処理の仕組み
の一端を明らかにしたい。

謝辞 本研究は平成 21 年度に日本大学
学術研究助成(個人研究)を受けた。

[参考文献]

1) P. Zahorik, "Assessing auditory distance perception using virtual acoustics", J.Acoust.Soc.Am., 111 (4), 2002, p.p. 1832-1846.

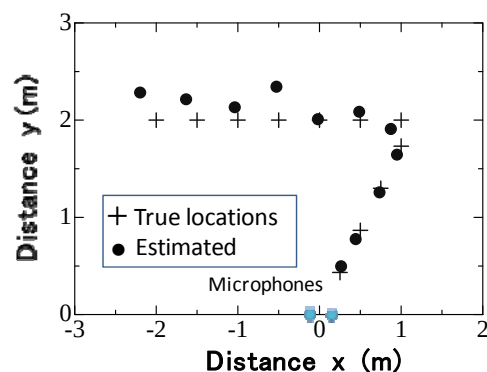


図 7 スピーカ位置と推定位置の比較
(2 次元)

2) A.W.Bronkhorst, T.Houtgast,
"Auditory distance perception in
rooms", Nature, 397 (6719), 1999,
p.p. 517-520.
3) 高橋, 東山, 山崎, "残響音場における
位相周波数特性と直接音領域", 電子情報
通信学会誌, A, J89-A, 4, 2006,
p.p.291-297.
4) M. Konishi, "Study of sound
localization by owls and its
relevance to humans," Comp.
Biochem. Physiol. A, 126, 2000,
p.p.459-469.
5) R. Shimoyama and K. Yamazaki,
"Multiple acoustic source
localization using ambiguous phase
differences under reverberative
conditions," Acoust. Sci. & Tech.,
25, 2004, p.p.446-456.
6) R. Shimoyama and K. Yamazaki,
"Computational acoustic vision by
solving phase ambiguity confusion"
Acoustical science and technology,
30(3), 2009, p.p.199-208.
7) 霜山, "位相差スペクトルイメージによ
る音源までの距離推定—音源が正面に位
置しない場合", 第 8 回情報科学技術フォ
ーラム講演論文集, H-60, 2009.