

音像定位制御システム設計のための定位位置推定法

A Method for Estimating the Direction of Sound Image Localization for Designing a Virtual Sound Image Localization Control System

太田 佳樹, 小幡 健作

Yoshiki Ohta, Kensaku Obata

要旨 試聴位置周辺の音圧分布から音像位置を予測する手法を開発した。実験では、位相差だけをつけたバンドノイズを2つのスピーカで再生した。音像の定位位置と試聴位置周辺の音圧分布との関係を調べた。その結果、音像定位方向が音圧レベルの線形結合で記述できることが分かった。線形結合式は、定位角を高い精度で予測できる。予測した定位角は位相差と一対一に対応付けられているため、本手法は定位制御システムの設計に有効である。

Summary We developed a method for estimating the direction of a sound image from the sound pressure distribution around a listening position. In the experiment, band noises that only differ in phase were produced from two Loudspeakers. We then examined the relation between the subjective direction of the sound image localization and the objective sound pressure distribution around a listening position. We found that an azimuth of localization can be expressed as a linear combination of sound pressure levels around a listening position. Our method can be used to estimate the azimuth with a high degree of accuracy and to associate the phase difference with the azimuth. Therefore, it can be used to design a virtual sound image localization control system.

キーワード : サラウンド, 音像定位

1. まえがき

デジタル放送やDVDによって、サラウンドコンテンツが普及し始めている。しかし、家庭では、スペース確保の点で、後方にスピーカを置くことは難しい。そのため、サラウンドコンテンツを前方に置かれたスピーカだけで再生する技術が生まれてくることが期待されている。

従来から、頭部伝達関数を用いた仮想音像定位技術がある。人の頭部や、体の形状は人に違ってさまざまである。そのため、大半の人に有効な頭部伝達関数を得ることは難しい。また、クロストークキャンセル量が十分に取れないなどの、実使用上での課題が未解決なままである。

我々は、実際の再生環境でも、制御効果の下がらないバーチャルサラウンド技術の開発をめざしている。音像定位の音響心理的なキューの発見と、そのキュー

のみを制御するシステムの実現という両面から検討を進めている。音像定位のキューに関する議論は数多い。一方で、そのキューを使って、システム化を目指した音像定位研究は少ない。

本稿では、再生音場の音圧分布から音像定位の方向を推定する方法を提案する。その推定法は、2つのスピーカに入力する音響信号間の位相差のみで音像定位を制御するシステムを前提とする。2つのスピーカで創られるファントム音像の定位方向を主観評価実験によって得た。その評価結果と、対応する音場の音圧分布との関連性から、定位方向の予測式を導いた。

2. 基礎検討

まず、2つのスピーカで再生される信号間の位相差と音像定位の関連について調べるために簡易実験を行った。

2.1 実験内容

実験で使用したスピーカレイアウトを図1に示す。無響室にて、被験者の前方に、左右対称にスピーカを置く。入力信号としては1/3オクターブの帯域幅を持つバンドノイズを使用する。左スピーカからは、そのノイズを直接再生する。一方、右スピーカからは、そのノイズに遅延をかけ、-3dBだけ減衰させて再生する。右スピーカのdelayは0～2.5msecの範囲で、0.1msec刻みで変化させた。よって、1つの帯域あたり26種類の刺激音を作成した。

実験では、それら26刺激音のうち2つを一对にして、ランダムな順序で再生する。このとき被験者に、どちらがより左方向から聴こえるかを回答してもらう(一対比較法)。ここでの被験者は1名とした。

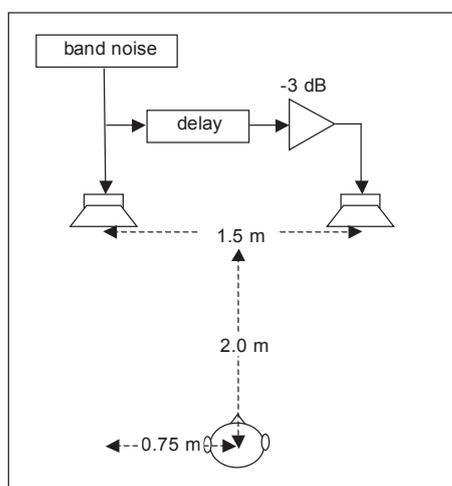


Figure 1 Layout of loudspeakers

図1 スピーカレイアウト

2.2 実験結果

バンドノイズの中心周波数が500Hzのときの主観評価結果を図2に、1kHzの結果を図3に示す。参考のために、ダミーヘッドを使用して、被験者と同位置で測定した両耳間レベル差(ILD)を各図に併記しておく。実線が主観評価結果を、破線がILDを示している。より左に聴こえると回答された回数(評点)を主観評価結果として縦軸にプロットしている。その評点が高いほど、より左方向から音が聴こえることを示している。

2つの帯域の実験結果から、定位の方向と両耳間レベル差の相関が高いことが分かった。1kHzの結果は、定位方向がdelayに対して周期性を持つことと、第一周期内に最も左に定位するdelayがあることを示している。

一方、500Hzの結果では、一つのピークのみを含

むため、delayによる定位変化の第1周期のみを観測していると判断できる。

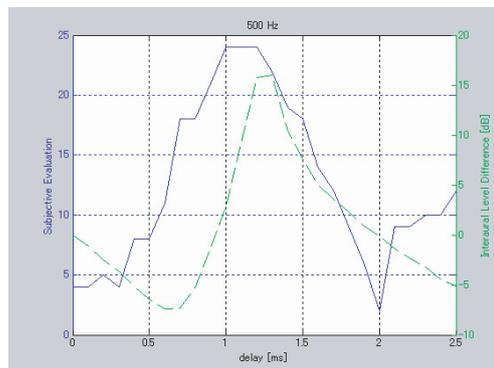


Figure 2 Results from subjective evaluation (500 Hz)

図2 主観評価結果 (500Hz)

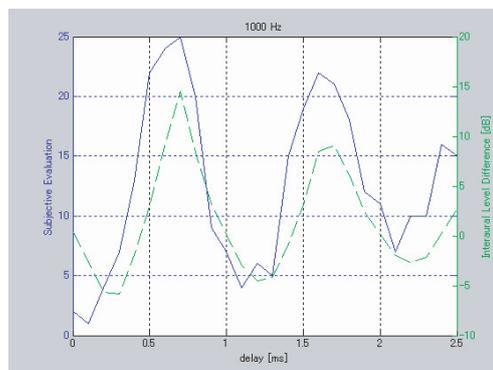


Figure 3 Results from subjective evaluation (1 kHz)

図3 主観評価結果 (1kHz)

3. 主観評価実験

前章の実験では、一対比較法を使用したため、得られた評点は定位方向の順序を示すに過ぎない。そこで、次に、定位方向を角度で定量化する実験を行った。

3.1 実験内容

実験では、図4で示す操作パネルを持つGUIを用いた。このツールでは、聴いた音が水平面上のどこに定位しているかを、マウスクリックで入力できる。△はスピーカを、○は被験者が座っている場所を示している。被験者がマウスクリックした点が×で表示され、その2次元座標がPC内に取り込まれる仕組みになっている。

7名の被験者に無響室にて水平面上の定位位置を評価してもらった。スピーカレイアウトは図1に示したものと同一とした。帯域ごとに、delayをランダムに

変えながら、刺激音を提示した。各 delay に相当する刺激音は計 3 回提示される。バンドノイズとして、中心周波数は 250Hz から 2kHz で 1/3 オクターブ幅のものを用いた。

この実験では、定位変化の第 1 周期を観測することを旨とするため、delay として、位相で $0 \sim 2\pi$ [radians] に相当する値を用いた。 $0 \sim 2\pi$ を 20 等分割し、各帯域あたり、21 刺激音を使用した。

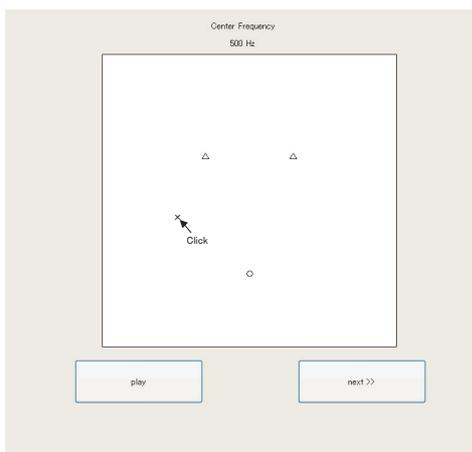


Figure 4 Operational panel of GUI

図 4 GUI の操作パネル

3.2 実験結果

各帯域で位相を固定したとき、21 (=7 名 × 3 回) 点の座標が得られる。これら 21 座標データの重心を求め、その帯域と位相に対応する平均座標を算出した。平均座標と被験者の座標から、定位角 (θ) を算出した。 θ は図 5 のように、真正面を 0 度、左方向に + の値、右方向には - の値と定義した。例えば、

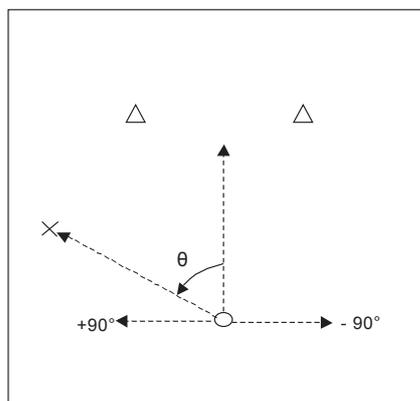


Figure 5 Definition of azimuths, θ

図 5 定位角 θ の定義

真左に定位した場合には + 90 度となる。

定位実験結果をまとめたものを図 6 に示す。グレースケールで定位角 θ を示し、左真横 90 度で真っ白になる。横軸は周波数 [Hz]、縦軸は位相 [radians] を示す。例えば、250Hz では位相が π で、2kHz では 2π 付近で最も左に定位する。周波数が高くなるにつれて、最も白くなるときの位相も大きくなっていく。また、各周波数で、白い山が 1 箇所ずつ現れる。そのため、この結果が定位角の第一周期を捉えていることが分かる。

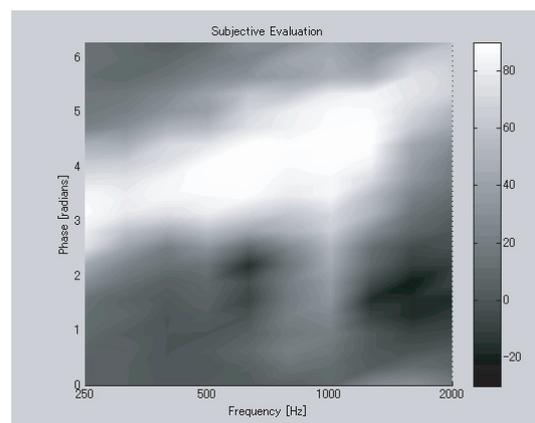


Figure 6 Results from localization experiment

図 6 定位実験結果

4. 定位方向予測手法

前章の主観評価実験で得られた定位角を計算機で予測する手法について説明する。

4.1 準備

被験者のリスニング位置周辺の音圧分布から、定位角を推定する式を導出する。まず、その音圧分布を知るために、図 7 で示す横 1 列、5cm 間隔に置かれた 11 本のマイクを使って、各スピーカからのインパルス応答を測定した。これら計 22 本のインパルス応答を使用して、図 1 の再生条件下での、11 点における音圧分布を計算機で算出する。

4.2 定式化

バンドノイズの中心周波数と、右スピーカの delay が固定されているとする (図 1)。このとき、図 7 の Mic1 で得られた信号 x が、インパルス応答を用いて計算できる。その x の RMS 値を Mic1 での音圧レベル L_{p1} と定義する (式 (1))。

$$L_{p1} = 20 \cdot \log_{10} \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (1)$$

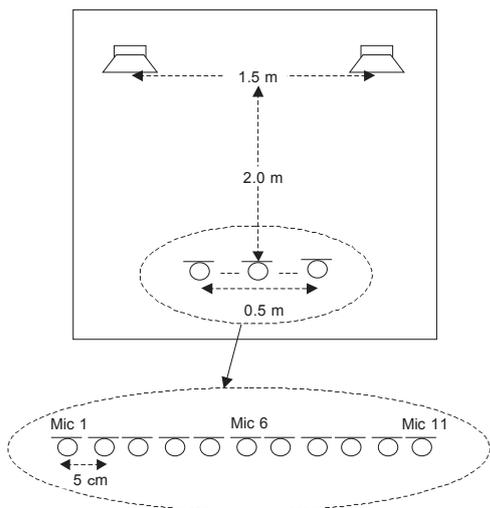


Figure 7 Layout of microphones

図7 マイクレイアウト

ここで、 N はバンドノイズの系列長を示す。同様に、他の 10 点についても音圧レベルを算出する。得られた音圧レベルベクトル $L=[L_{p1} \dots L_{p11}]$ の、最小値を L_{\min} [dB] とする。 L_{\min} によって最小値 0[dB] に正規化されたベクトル L' を得る (式 (2))

$$L'=[L'_{p1} \dots L'_{p11}]=[L_{p1} \dots L_{p11}]-L_{\min} \quad (2)$$

このベクトル L' は中心周波数と位相が決まると、22本のインパルス応答から一意に算出され、 L' と主観実験の定位角が一対一に対応付けられる。その対応関係が、式 (3) のような線形結合で記述できると仮定する。中心周波数 f ごとに、重回帰分析することによって、回帰係数 ($a_i(f)$, $c(f)$) が求められる。

$$\theta(f) = \sum_{i=1}^{11} (a_i(f) \cdot L'_{pi}(f)) + c(f) \quad (3)$$

この回帰係数は帯域ごとに異なる値を持つ。算出された回帰係数 $a_1(f) \sim a_{11}(f)$ を図 8 に定数項 $c(f)$ を図 9 に示す。図 8 の横軸は 11 本のマイクの X 座標 [cm]、縦軸に周波数 [Hz]、そして係数をグレースケールで示した。白で示されている係数ほど、定位角が大きくなることに寄与する。一方、定数項 $c(f)$ はマイク位置には依存しないため、帯域ごとにプロットした。

1kHz 周辺で、定数項 $c(f)$ が大きくなることは、定位角が 90° 付近に定位する位相の範囲が広いことと関連があると推測できる。

4.3 実験結果

得られた回帰係数を用いて、定位角を近似した結

果を図 10 に示す。図 6 と図 10 を比較することで、大まかな傾向が近似できることが分かった。

また、5 種類の測定領域幅で、回帰係数を算出して近似結果の比較を行った。左右対称な測定領域で、その幅を 10cm から 50cm とした。例えば、幅 10cm は、Mic5 ~ 7 を、幅 30cm は Mic3 ~ 9 を使用する。測

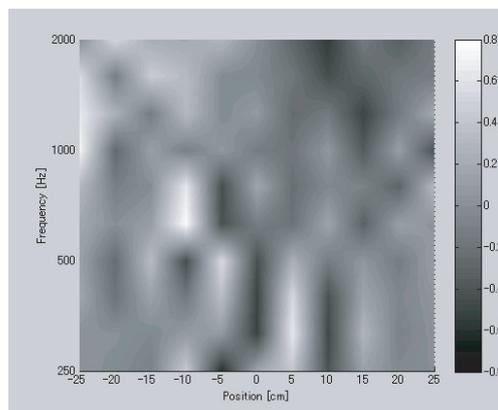


Figure 8 Regression coefficients, $a(f)$

図8 回帰係数 $a(f)$

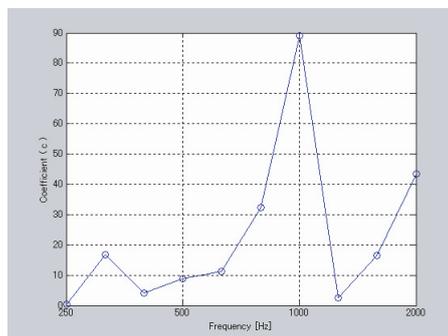


Figure 9 Constant coefficients, $c(f)$

図9 定数項 $c(f)$

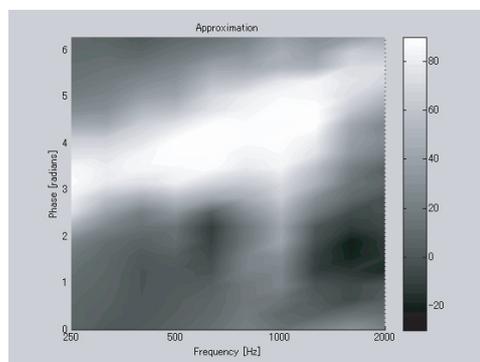


Figure 10 Approximated azimuths

図10 定位角の近似結果

定幅に対応したマイク群で得られた音圧ベクトル L (式(2)) から回帰係数を算出する。測定幅を変化させたときの平均近似誤差を図 11 に示す。誤差 5 度以下の近似精度を得るには 40cm 以上の測定幅が必要である。

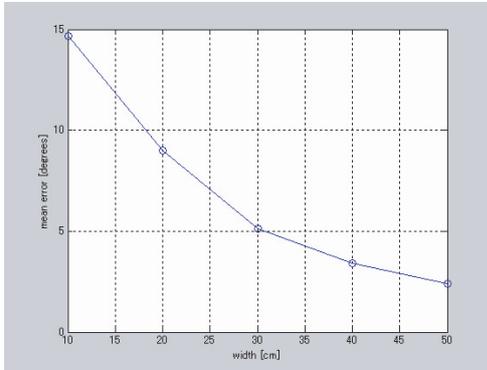


図 11 平均近似誤差

Figure 11 Average error in approximations

5. まとめ

2つのスピーカ間の位相差による音像定位技術を評価する手法について検討した。GUIを使用した主観評価実験によって、各帯域での位相差と音像定位位置の関係を明らかにした。また、音像定位位置と、リスナ近傍における音圧分布の関係を調べた。その結果、定位角が音圧分布の線形結合で近似できることが分かった。リスナの両耳軸方向で 40cm 幅以上の音圧分布を用いることで、近似式による定位角の近似誤差が 5 度以下にできた。

提案法は、2つのスピーカで生成される音圧分布から定位方向を簡便な演算で予測できる。予測された定位方向と、スピーカ間の位相差は一対一に対応している。そのため、任意の方向に定位するシステムを設計したいときは、計算機上で、予測結果を参照しながら位相をチューニングしていけばよい。個人に依存する頭部伝達関数では実現困難であった、汎用性の高いシステム設計が可能になる。今後は、さまざまな条件下で、このアイデアの実用性を検証していく。

参考文献

- (1) Y. Ohta, K. Obata: "A Method for Estimating the Direction of Sound Image Localization for Designing a Virtual Sound Image Localization Control System", 123rd AES Convention (2007/10)
- (2) 小幡, 太田: "前方 2 つのスピーカによるサラウンド再生システム", 日本バーチャルリアリティ学会 第 12 回大会 (2007/9)

筆者紹介

太田 佳樹 (おおた よしき)

技術開発本部 モバイルシステム開発センター サウンド技術開発部。車載音場制御技術の開発に従事。

小幡 健作 (おばた けんさく)

技術開発本部 モバイルシステム開発センター サウンド技術開発部。デジタル音響信号処理技術の開発に従事。