

プロジェクト 1

反響のある実環境における、打撃音によるヘルスマニタリング技術

山崎 憲 (電気電子工学科)

霧山 竜一 (電気電子工学科)

1 はじめに

打音法は、物体表面を打撃した際に生じる音の違いを人が聞き分けて物体内部の状態を推定するもので、検査に人手と時間を要し、疲労や慣れにより検査精度が低下するなどの欠点がある。実環境では周囲の雑音や壁面による反響が測定に影響を与えるため、打音法を機械化するには打撃音のみを選択的に検出する必要がある。筆者らはこれまで、2CH マイクロホンで計測された音圧の位相差スペクトルの傾きを利用して、1 音源の方向を高精度に推定するアルゴリズムを提案した¹⁾。一方、音の波長がマイクロホン間隔より短い周波数で、複数方向から到来する音の位相差が同一となる、いわゆる“位相の多義性”により、位相差から得られた音源方向は曖昧になる。小西らは、メンブクロウを使った生理学実験から、位相多義性に起因する定位の曖昧さが解消されるメカニズムについて仮説を提案している²⁾。すなわち、両耳からの周期的な神経インパルスが到達する時間差に応じて、聴覚中枢にある一致検出細胞が発火し、複数の周波数で同時に発火する一致検出細胞の空間的な分布が音源方向を与える。

筆者らは、位相の多義性を考慮しなくても位相差から高精度の音源定位が可能であることを示した¹⁾。本報ではさらに位相多義性を想定し、それに伴う定位の曖昧さを解消する新たなアルゴリズムを用いて、反響のある室内で複数音源の定位を行った³⁾。小西らの方法を周波数領域の等価モデルで実証したものである。同アルゴリズムの応用例として、3CH のマイクロホンで計測された音圧の位相差から複数の点音源の方向を推定し、それらの 2 次元的空间的な分布を可視化する。また音源の空間的な分布を定量評価する方法を示す。コンクリート柱表面を打撃した際に発生する音の発生箇所を推定した結

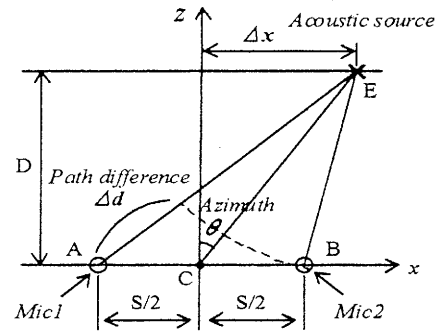


Fig.1 Source localization model

果を示す。

2 定式化

Fig.1 に示すように音源とマイクロホン(Mic1, Mic2)を配置する。2 個のマイクロホンで計測される直接音の行路差と位相差をそれぞれ Δd 、 $\Delta \phi$ とおくと

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

となる。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云われる性質を有する。

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

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

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

を得る。式(3)は、一つの位相差値について行路差 Δd が整数 n の値に応じて複数想定されるため、位相差から音源方向を求めると定位が曖昧なることを意味する。

式(4)の *error* を数値的に最小化する Δx を用いて、式(5)から音源方向 θ が求められる。

$$\text{error} = \left| \Delta d - \overline{AE} + \overline{BE} \right| \quad (4)$$

$$\theta = \frac{360}{2\pi} \arctan\left(\frac{\Delta x}{D}\right) \quad (^\circ) \quad (5)$$

音源とマイクロホン間の距離 D は一般に未知数であるが、式(5)の D には $D > 3S$ である任意の値を代入すればよい。この条件下で行路差と音源方向はほぼ一対一で対応する¹⁾。

3 推定アルゴリズム

Fig.2に示すように、マイクロホンMic1を共用した2対のマイクロホンをそれぞれ水平、垂直方向に配置する。マイクロホンの間隔は $20\text{cm}(=S)$ である。水平角と仰角について音源の方向 (θ, ω) を推定するアルゴリズムを Fig.3 に示す。水平方向のマイクロホン対で得られた音響信号のクロススペクトルを時間的に平均化する。式(3)において、周波数 f で計測された位相差 $\Delta\phi$ について、整数 n ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) に対する推定可能な全ての行路差 Δd_n を算出し、行路差に対応する音源方向 θ_n を幾何学的に求める。計測された全ての位相差について上記計算を行い推定された音源方向の周波数特性を求める。垂直方向についても同様の手続きを行う。水平、垂直の各マイクロホン対から、音源がそれぞれ複数の l 方向、 m 方向に推定される場合に、 $l \times m$ の全ての組み合わせで表される方向に点音源を2次元的に分布させる。音源の分布を定量的に求めるには、得られた音源推定方向の周波数特性から周波数軸に平行な直線成分をハフ変換を用いて抽出する。すなわち、 N 個の2次元データ (X_i, Y_i) ($i=1, 2, \dots, N$) に対して式(6)の変換を施す。

$$l = -X_i m + Y_i \quad (^\circ) \quad (6)$$

この場合、 X_i は周波数値、 Y_i は音源推定方向に対応する。周波数軸に平行な直線成分を求めるため $m = 0$ とし、 l について累積度数を求める。累積度数の比較的大きな方向を、求める音源方向とみなす。

3 結果

(2スピーカ方向推定)

コンクリート壁が露出する室内の中央で、マイクロホンから $1\text{m}(=D)$ 離れた位置に置かれた高音域用スピーカ ($\theta = 0^\circ, \omega = 0^\circ$) と低音域用スピーカ

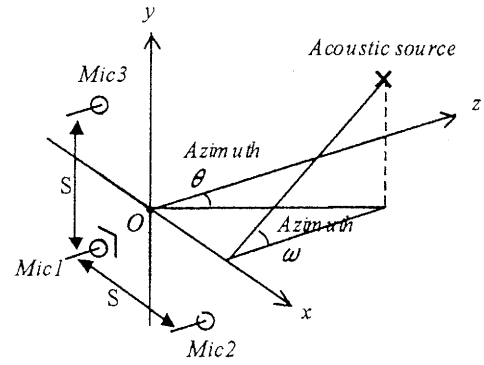


Fig.2 Configuration of microphones

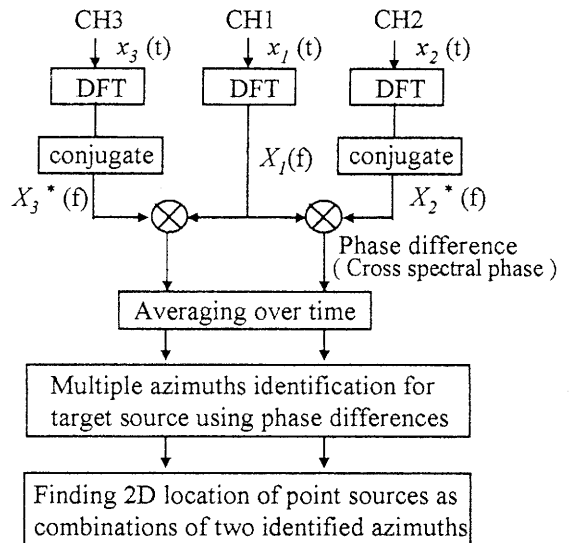


Fig.3 Algorithm on source localization

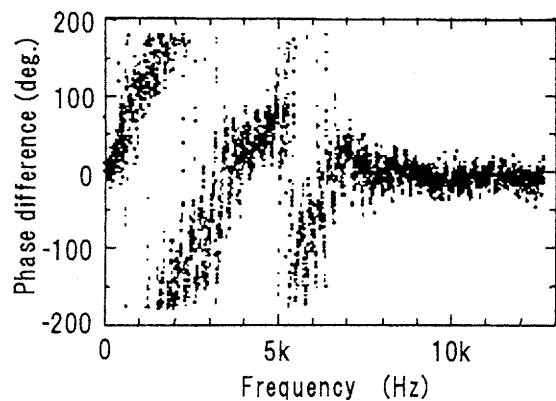


Fig.4 Measured phase difference spectrum

($\theta = +27^\circ, \omega = 0^\circ$) の水平方向 θ を同時に推定した。1フレーム 500ms のハニング窓を用い、オーバーラップ 75% で連続的に 10 回計測した位相差を平均化した。再生信号はホワイトノイズである。計測された位相差の周波数特性を Fig.4 に示す。位相差はデータの集まる部分が黒く帯状に分布しており、約

7kHz を境に低域では正、高域ではほぼゼロの傾きをもつ。推定された音源方向の周波数特性を Fig.5 に示す。位相差の多義性によって各周波数で複数の方向に推定値の集まる様子が分かる。5kHz 以下では約 $+30^\circ$ 、7kHz 以上では約 0° で周波数特性は周波数軸にほぼ平行である。周波数軸に平行な方向の度数分布を Fig.6 に示す。 $+0.4^\circ$ と $+28.1^\circ$ にみられる度数値のピークはそれぞれ高域用と低域用スピーカの方向に対応しているものと思われる。しかし他にも多くのピークがあり、スピーカの個数が不明である場合には、この分布から各ピークを音源と対応させることは難しい。度数分布は度数を積算する際の、角度の幅や周波数帯域に依存するものと考えられる。そこで、積算する角度の幅を変えて度数分布を繰り返し計算し、度数値の大きい方から 10 個までの方向を調べた (Fig.7)。 0° と $+30^\circ$ 付近の方向は積算する角度の幅に拘らず度数値の高いことが分かる。Fig.7 の分布について、さらに積算する角度幅に対して規格化度数分布を求め (Fig.8)、この分布を Fig.6 の音源方向の度数分布に反映させたものが Fig.9 である。つまり Fig.6 の分布から積算する角度の幅に依存しない音源方向のみを抽出している。閾値を 20 とすれば、閾値以上の値をとる角度の範囲はほぼ、 $-0.2^\circ \sim +0.7^\circ$ 、 $+23.2^\circ \sim +29.7^\circ$ となり、これらの範囲に周波数の異なる等価的な点音源の分布することが分かる。

(コンクリート壁の打撃音の方向推定)

室内にあるコンクリート柱(約 78cm 幅)の中央部表面を小型ハンマーで繰り返し打撃し、1.2m (= D)離れた位置で計測した音圧から音の発生箇所を推定した。音の立ち上がりでトリガをかけ、1 フレーム 500ms で 10 回計測した位相差を平均化した。推定された点音源の 2 次元的な分布を Fig.10 に示す。黒い背景全面に、点音源に相当する白い点の散乱の様子が分かる。打撃箇所($\theta=0^\circ$ 、 $\omega=0^\circ$)を含むやや広い範囲にわたり、周波数の異なる多くの点音源が集まり白くみえる。この白い箇所を中心として、周囲に位相差の多義性により生じた仮想的な点音源による線状のイメージがみられる。水平、垂直両方向の推定音源方向の度数分布から、音

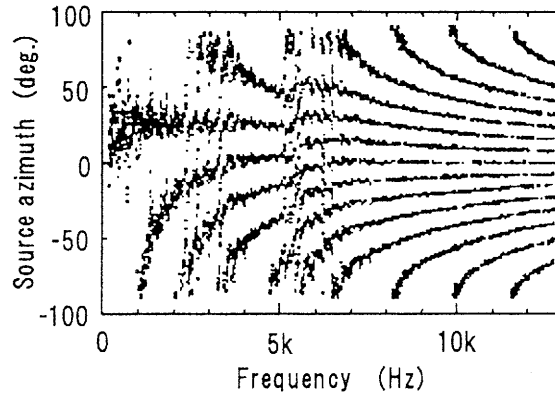


Fig.5 Multiple azimuths spectra identified from ambiguous phase differences

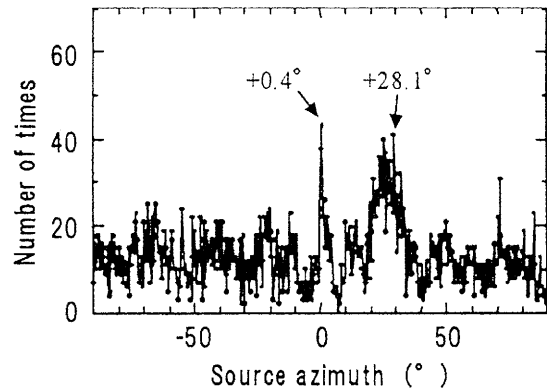


Fig.6 Number of times distribution on source azimuth

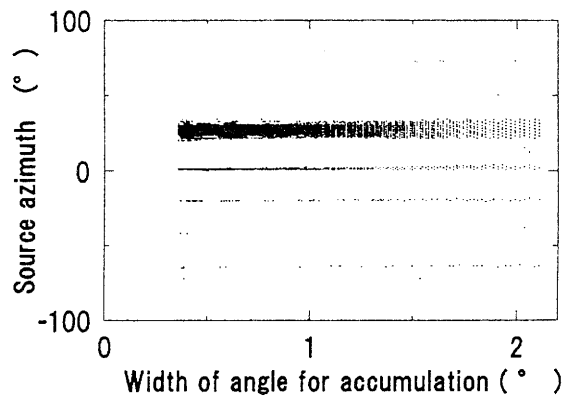


Fig.7 Top ten azimuths for various widths of accumulating angle

はほぼ、(a)水平方向に $-11.5^\circ \sim +0.6^\circ$ (約 26cm 幅)、(b)垂直方向に $-2.0^\circ \sim +2.7^\circ$ (約 10cm 幅)の範囲から発生していると考えられる。打撃箇所を変えると音の発生箇所も変わることを確認した。

4 おわりに

3CH のマイクロホンで計測された音圧の位相差から複数の点音源の方向を推定し、それらの 2 次元的な分布を可視化した。また音源の空間的な分布を定量評価する方法を示した。本アルゴリズムを反響のある室内における2個のスピーカの水平方向推定とコンクリート壁面を打撃した際の音の発生箇所推定に適用した。その結果、(1)高音域用スピーカは $-0.2^{\circ} \sim +0.7^{\circ}$ (真の方向: 0°), 低音域用スピーカは $+23.2^{\circ} \sim +29.7^{\circ}$ (真の方向: $+27^{\circ}$)の範囲に周波数の異なる等価的な点音源が分布し、(2)コンクリート壁面からは打撃箇所を含む比較的広い範囲(水平方向約 26cm 幅, 垂直方向 10cm 幅)から音の発生する様子を示した。また打撃位置に応じて音の発生箇所が変わることを確認した。

今後は、方向別に抽出された打撃音の音質評価や 2 次元の音源分布から仮想的な音源のみを消去する方法について検討する予定である。本法を FRP などの欠陥検出に応用することを考えている。

謝辞 本研究は文部省ハイテクリサーチ助成による研究の一環として行われた。

参考文献

- 1) R.Shimoyama and K.Yamazaki 「Acoustic source localization using phase difference spectrum images」 Acoust. Sci. & Tech., 24, 4 (2003) 161-171
- 2) M. Konishi 「Study of localization by owls and its relevance to humans」 Comparative Biochemistry and Physiology, Part A, (2000) 459-469
- 3) 霜山, 山崎「多義性を有する位相差を利用した室内音の方向推定」第22回日本シミュレーション学会大会発表論文集, (2003.6), 7-2, 225-228
- 4) 安居院、中嶋「画像情報処理」森北出版、(2000)

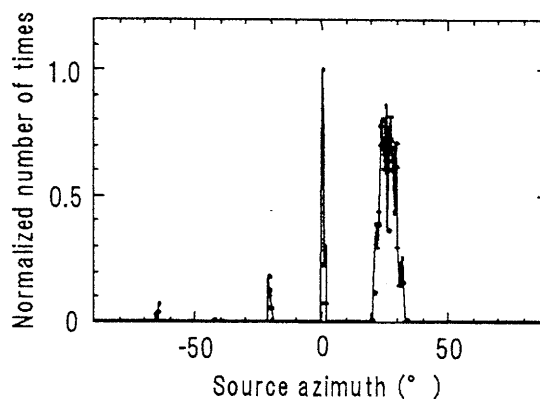


Fig.8 Filtering function on source azimuth having stable high number of times

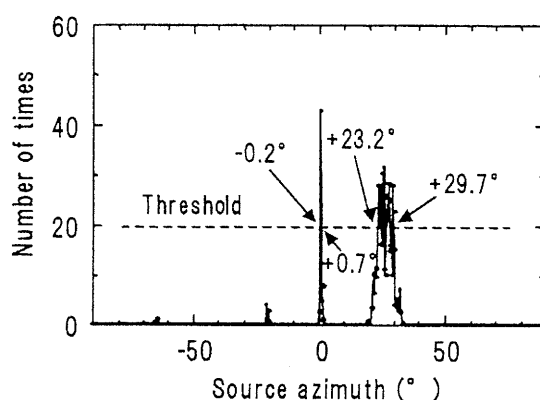


Fig.9 Modified number of times distribution on source azimuth

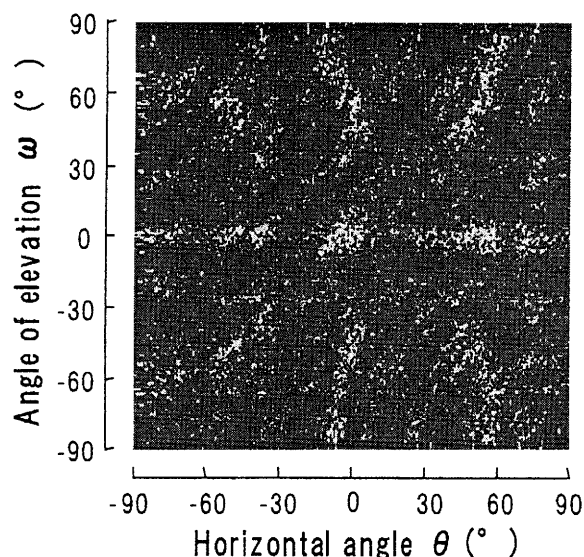


Fig.10 Acoustic source image of hammering sound on concrete wall