

位相差スペクトルによる音源までの距離推定

－音源の向きと推定距離の関係

日大生産工(院) ○櫻井 智章
日大生産工 霜山 竜一

1 はじめに

Bronkhorstらは心理物理学実験を通じ、直接音と反射音のエネルギー比が人の距離知覚に顕著な影響を与えることを示した¹⁾。室内で、両耳聴ヘッドトルソを用いて測定された音圧の位相差の周波数特性は、音源が遠いほどばらつきが大きい。著者らはこれまで、位相差の周波数特性のばらつきが直接音と反射音の比に依存するものと考え、ばらつきと音源までの距離の関係について調査してきた²⁾。しかし、位相差の周波数特性は測定される部屋の反響特性に依存することが予想される。本研究では、移動するロボットが未知の環境で未知の音の発生位置を推定する状況を想定して、音圧の位相差の周波数特性のばらつきと、部屋の大きさおよび同一の部屋における音源の向きの関係について検討した。

2 推定方法

両耳聴ヘッドトルソで検出された音圧の位相差スペクトルのばらつきを標準偏差値で表す。周波数帯域幅 Δf に含まれる $2m+1$ 個の位相差の標準偏差値を中心周波数 f_i を変えながら式(1)、(2)から求める。周波数 f_i における標準偏差 ρ_i は、

$$\rho_i = \sqrt{\frac{1}{2m+1} \sum_{j=i-m}^{i+m} (\varphi_j - \overline{\varphi_i})^2} \quad (1)$$

$$\overline{\varphi_i} = \frac{\sum_{j=i-m}^{i+m} \varphi_j}{2m+1} \quad (2)$$

で与えられる。ここで φ_i は周波数 f_i における位相差、 $\overline{\varphi_i}$ は帯域幅 Δf 内の位相差の平均値である。周波数帯域 ΔF で平均した標準偏差値とヘッドトルソと音源間距離の関係を実測する。この平均値を線形補間して音源までの距離を推定する。

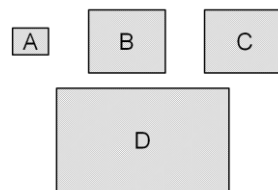


図1 各部屋の平面図 (1/1750縮尺)

表1 部屋の寸法と残響時間

測定環境	部屋の寸法 L[m] × W[m] × H[m]	残響時間 (RT60) [s]
A(実験室)	8×6×3(140[m ³])	0.4
B(講義室)	17×14×3(710[m ³])	0.4
C(講義室)	18×14×3(760[m ³])	0.4
D(体育館)	39×20×12(9600[m ³])	0.7

3 実験結果

室内中央部に両耳聴ヘッドトルソ (Brüel & Kjær, 4100-D) を設置し、XYステージの移動台に固定されたゴルフボール大のスピーカの位置をシーケンサ (日立, EH-150) で変え、ヘッドトルソとスピーカ間の距離を調整した。常にヘッドトルソの正面に配置したスピーカから広帯域雑音を発生させた。位相差は振幅に依存しないため他の音質の音でも同様の結果が得られると考えられる。24bit分解能のA/D変換ボード (NI, PCI-4474) を装備したワークステーション (DELL, GX280) で2系統の音圧波形を同時に収録した。サンプリング周波数は24[kHz]、各chの1フレームは4800個のデータを含む。ハニング窓を用いた。mlは250個、 Δf は1.25[kHz]、 ΔF は4~11[kHz]とした。

測定に使用した4部屋の平面図を図1に、それらの寸法と残響時間を表1に示す。部屋Aは実験室、部屋B、Cは机等を片側に寄せた講義室、部屋Dは体育館である。残響時間はシュレーダー積分 (RT60法) で求めた³⁾。体育館Dの残響時間は他の部屋の約2倍となった。繰り返し測定による再現

Distance Estimation to a Sound Source Using Phase Difference Spectrum Images
－Relation between Estimated Distances and Sound Souce Directions

Tomoaki SAKURAI and Ryuichi SHIMOYAMA

性を確認するために、音源とヘッドトルソの距離を変えながら、同一条件で繰り返し測定された位相差値間の差を求めた。繰り返し測定によるばらつき具合を示す標準偏差値と距離の関係を図2に示す。講義室B、体育館Dとも、標準偏差値は、距離にほぼ比例して上昇した。狭い部屋ほど位相差値は再現しないことが分かる。一方、広帯域で平均化した標準偏差値は位相差値より繰り返し測定によるばらつきは少ない。これは、音圧の位相値を直接評価するより、広帯域の標準偏差の平均値で評価した方が、再現性という点で有利であることを意味する。位相差値の周波数軸に沿うばらつきと音源とヘッドトルソ間の距離の関係を図3に示す。音源がヘッドトルソから離れるほど位相差値のばらつきは大きくなった。標準偏差値と距離はほぼ線形関係にあるがそれらの傾きは部屋により異なった。部屋の寸法が似た講義室BとCは同様の傾向を示したが、体育館Dでは、傾きが講義室B、Cより小さい。図3において、音源とヘッドトルソが1[m]離れている場合の位相差の標準偏差の平均値とその傾きの関係を図4に示す。標準偏差の平均値の傾きは最小二乗法で求めた。部屋Bについては音源とヘッドトルソの相対位置を保ったまま、音源の向きを変えた結果も示してある(0°, 45°, 135°, 180°)。距離1[m]では、標準偏差の平均値と距離に対する標準偏差の平均値の傾きはともに、部屋の容積が大きいほど小さくなる傾向がみられた。体育館Dのような広い空間では、周囲に障害物がなく、壁面と十分離れた位置で測定されるため、位相差値の再現性は比較的良好と考えられる。因みに、反響音のない無響室では標準偏差値、傾きともに零となる。講義室Bにおいて、音源の向きの違いにより、推定距離に距離1[m]では約1[cm]、距離2[m]では10[cm]程度の誤差が生じた。

4 あとがき

両耳聴ヘッドトルソを用いて、音圧の位相差の周波数特性のばらつきと、部屋の大きさおよび同一の部屋における音源の向きの関係を求めた。その結果、1) 狭い部屋ほど繰り返し測定による位相差値の再現性は劣ること。2) 距離1[m]では、標準偏差値と距離に対する標準偏差値の傾きはともに部屋の容積が大きいほど小さい。3) 講義室Bでは、音源の向きの違いによる推定距離の誤差は、距離1[m]では約1[cm]、2[m]では10[cm]程度になった。距離1[m]における位相差の標準偏差値が既知ならば、未知の環境であっても音源までの任意の距離が測定できる可能性がある。今後は、ロボット視覚との連携について検討する予定である。

「参考文献」

1) A. W. Bronkhorst & T. Houtgast

“Auditory distance perception in rooms.”
Nature, 397, 1999, pp517-520

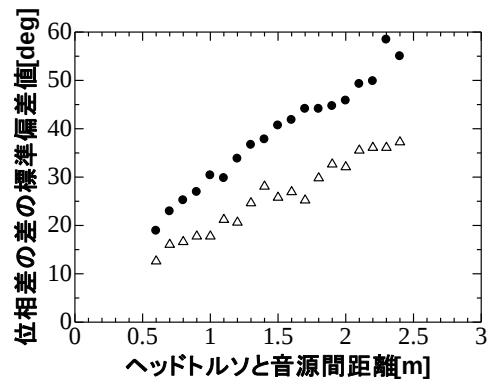


図2 ヘッドトルソと音源間距離と位相差の繰り返しによるばらつきの関係
(●:部屋B, △:部屋D)

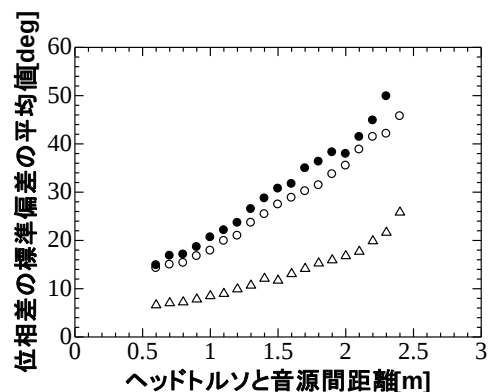


図3 ヘッドトルソと音源間距離と位相差の周波数軸に沿うばらつきの関係
(●:部屋B, ○:部屋C, △:部屋D)

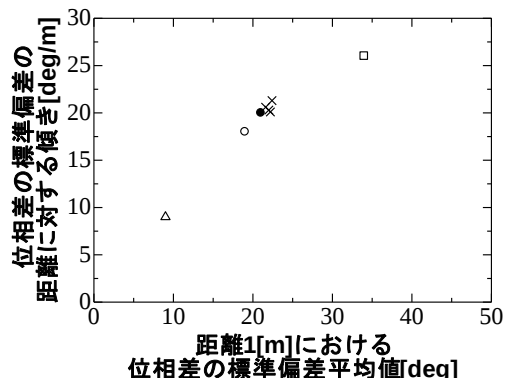


図4 距離1[m]における位相差の標準偏差値と距離に対する傾きの関係(□:部屋A, ●:部屋B, ○:部屋C, △:部屋D, ×:部屋Bにおける4方向)

- 2) 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.-” FIT2009 H-060, 2009, pp237-238.
- 3) M. R. Schroeder
“New method of measuring reverberation time.” J. Acoust. Soc. Am., 37, 3, 1965, pp409-412.