

低域が不完全なHRTFを補完する方法*

◎森川大輔, 今井悠貴, 平原達也 (富山県立大 工学部), 大谷真 (信州大 工学部)

1 はじめに

頭部伝達関数(HRTF)は、相反法によって高速に計測できる。しかし、計測に必要な外耳道に挿入できる超小型スピーカは、暗騒音レベルが高い低域で出力音圧レベルが低く、低域の HRTF を高い S/N で計測できない。そのため、相反法で測定した HRTF を用いてバイノーラル信号を合成するためには、低域の HRTF を推定補完する必要がある。

本報告では、相反法で計測した低域が不完全な HRTF の 1 kHz 以下を推定補完する方法を提案するとともに、その有効性を音像定位実験で確認した結果について述べる。

2 原理

2.1 時間差の推定

相反法で計測した低域が不完全な HRTF ($HRTF_{reci}$) の、1 kHz 以下の ITD (ITD_{reci}^{LPF}) を Kuhn によって提案された 1 kHz 以下の球の ITD (ITD_{Kuhn}^{LPF})^[1] を用いて推定する。ここで、 ITD_{Kuhn}^{LPF} は式(1)で求められ、 r は球の半径、 c は音速、 θ は音源の水平角である。

$$ITD_{Kuhn}^{LPF}(\theta) = 3 \frac{r}{c} \sin \theta \quad (1)$$

しかし、 $HRTF_{reci}$ を計測した被験者の頭部の半径は不明であり、頭部は完全な球でないため、 ITD_{Kuhn}^{LPF} をそのまま ITD_{reci}^{LPF} とすることはできない。そこで、頭部形状を 3 次元計測し境界要素法(BEM)^[2] を用いて計算した 7 名分の HRTF の 1 kHz 以下の ITD (ITD_{BEM}^{LPF}) と 1 kHz 以上の ITD (ITD_{BEM}^{HPF}) の関係から、 ITD_{Kuhn}^{LPF} と $HRTF_{reci}$ の 1 kHz 以上の ITD (ITD_{reci}^{HPF}) の関係を推定する。

ITD_{BEM}^{LPF} 、 ITD_{BEM}^{HPF} 、 ITD_{Kuhn}^{LPF} から、ITD の ±90° の平均値を求めると、 $ITD90_{BEM}^{LPF}$ - $ITD90_{BEM}^{HPF}$ と $ITD90_{BEM}^{LPF}$ - $ITD90_{Kuhn}^{LPF}$ の関係は、次式のように傾き a 、切片 b で表せる。

$$ITD90_{BEM}^{LPF} = \frac{ITD90_{Kuhn}^{LPF} - aITD90_{BEM}^{HPF} + b}{1 - a} \quad (2)$$

式(2)の $ITD90_{BEM}^{HPF}$ を $ITD90_{reci}^{HPF}$ に置き換えることで $ITD90_{reci}^{LPF}$ を求め、 $ITD90_{reci}^{LPF}$ と $ITD90_{Kuhn}^{LPF}$ の比から $ITD_{reci}^{LPF}(\theta)$ が次式により得られる。

$$ITD_{reci}^{LPF}(\theta) = \frac{ITD90_{reci}^{LPF}}{ITD90_{Kuhn}^{LPF}} ITD_{Kuhn}^{LPF}(\theta) \quad (3)$$

2.2 レベルの推定

1 kHz の波長はヒトの頭部の直径より大きく、1 kHz 以下の周波数では頭部による遮蔽の影響をほとんど受けないため、1 kHz 以下の $|HRTF_{reci}|$ は 0 dB とする。

2.3 HRTF の補完

低域を補完した HRTF ($HRTF_{est}$) の作成手順を Fig. 1 に示す。 $HRTF_{reci}$ の時間領域表現である左右のインパルス応答 $hrir_{left}(t)$ と $hrir_{right}(t)$ を HPF ($f_c = 1$ kHz, FIR) に通して $hrir_{left}^{HPF}(t)$ 、 $hrir_{right}^{HPF}(t)$ を得る。次に、 $hrir_{left}^{HPF}(t)$ 、 $hrir_{right}^{HPF}(t)$ から $ITD90_{reci}^{HPF}$ を求め、 $ITD90_{reci}^{LPF}$ を算出し、単位インパルス信号 $\delta(t)$ を ITD_{reci}^{LPF} だけ時間シフトした $ir_{left}(t)$ と $ir_{right}(t)$ を得る。そして、 $ir_{left}(t)$ 、 $ir_{right}(t)$ を LPF ($f_c = 1$ kHz, FIR) に通して $ir_{left}^{LPF}(t)$ と $ir_{right}^{LPF}(t)$ を得る。最後に、 $hrir_{left}^{HPF}(t)$ と $ir_{left}^{LPF}(t)$ 、 $hrir_{right}^{HPF}(t)$ と $ir_{right}^{LPF}(t)$ を加算し、 $HRTF_{est}$ に対応したインパルス応答を得る^[3]。

3 音像定位実験

3.1 実験システム

刺激音は、D/A 変換器(MOTU, 4PRE)から出力し、ヘッドホン(Sennheiser, HDA200)から呈示した。サンプリング周波数は 44.1 kHz とし

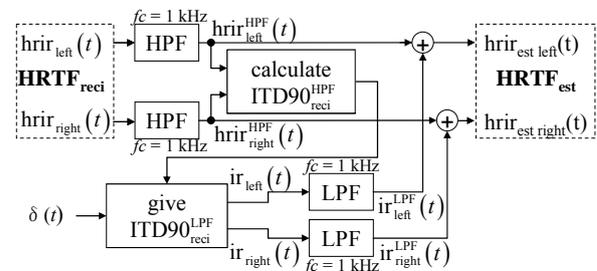


Fig. 1 $HRTF_{est}$ の作成手順

* Estimation method of head-related transfer function of which low frequency components are poor, by MORIKAWA Daisuke, IMAI Yuki, HIRAHARA Tatsuya (Toyama Prefectural University) and OTANI Makoto (Shinshu University).

た。刺激音の持続時間は3 s、ISIは7 s、正面の $HRTF_{est}$ を白色雑音に畳みこんだバイノーラル信号の音圧レベルを70 dB とし、刺激音には、 ITD_{reci}^{LPF} を x 倍 ($x=0, 0.5, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2$) して補完した7種の $HRTF$ を白色雑音に畳みこんだ合成バイノーラル信号を用いた。以下、 ITD_{reci}^{LPF} を x 倍にした $HRTF_{est}$ を $HRTF_{est}x$ と表す。

3.2 実験方法

7種類の $HRTF_{est}$ について、正面から45°間隔の水平面8方向を用いて合成した計56種類のバイノーラル信号を、1回ずつランダムに呈示し1セッションとした。被験者は4セッションの実験を行った。被験者には、音像位置を、8方位と3段階の距離（頭部表面、頭部近傍、遠方）あるいは頭内、に強制選択させた。また、音像が2つ聴こえた場合には高域音と低域音に分けて回答させた。実験は頭部を静止して受聴する頭部静止条件と、頭部を自由に回転して受聴し、刺激音が頭部回転に追従する頭部回転条件で行った。被験者は3名とした。

3.3 実験結果

Fig. 2 に、高域音と低域音の音像を分離定位した割合を示す。分離定位する割合は $HRTF_{est}0$ が最も高く、 $HRTF_{est}1.25$ が最も低かった。また、頭部静止条件より頭部回転条件の方が分離定位する割合は高かった。Fig. 3 に、音像を知覚した距離の割合を示す。頭内に定位する割合は $HRTF_{est}0.5$ が最も高く、遠方に定位する割合は $HRTF_{est}1.25$ 以上で高くなった。 $HRTF_{est}0.5$ より $HRTF_{est}0$ の頭内定位の割合が小さいのは、高域音と反対側の頭部表面に低域音を定位することが多かったためである。

4 考察

いずれの結果においても、低域の ITD を予測した ITD_{reci}^{LPF} で補完した $HRTF_{est}1$ より、 $HRTF_{est}1.25\sim 1.5$ の方が自然に頭外定位した。これは実際の ITD が1 kHz 以下でも周波数によって異なること^[1]に関係すると考えられる。

頭部静止条件よりも頭部回転条件で遠方に定位する割合が高くなったのは、頭部を動かすと音像定位がしやすくなるため、分離定位する割合が高くなったのは、音像定位がしやすくなることで、高域音と低域音の動きの

違いを知覚しやすくなったためと考えられる。

5 まとめ

相反法で計測した低域が不完全な $HRTF$ の1 kHz 以下を推定補完する方法を提案するとともに、その有効性を音像定位実験で確認した。その結果、1 kHz 以下の ITD を推定補完した ITD の1.5倍程度の長さにするにより、合成バイノーラル音の音像は自然に頭外定位することがわかった。

謝辞

本研究の一部は科研費(22300061)の助成を受けた。

参考文献

- [1] D.F. Kuhn, "Model for the interaural time differences in the azimuthal plane," J. Acoust. Soc. Am., 62(1), 157-167, 1977.
- [2] M. Otani, S. Ise, "Fast calculation system specialized for head-related transfer function based on boundary element method," J. Acoust. Soc. Am., 119(5), 2589-2598, 2006.
- [3] 森川, 平原, "低域の ITD 情報を操作したバイノーラル信号による水平面音像定位," 音講論(春), 917-918, 2012.

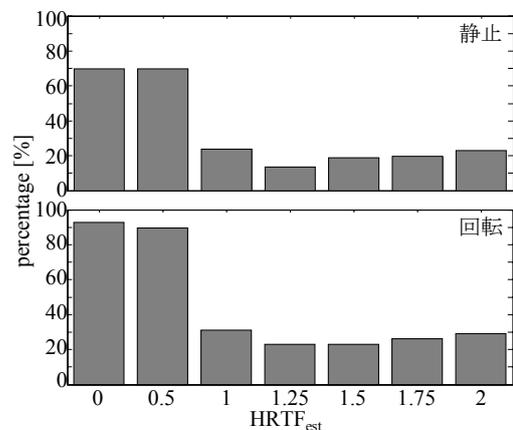


Fig. 2 音像を分離して定位した割合

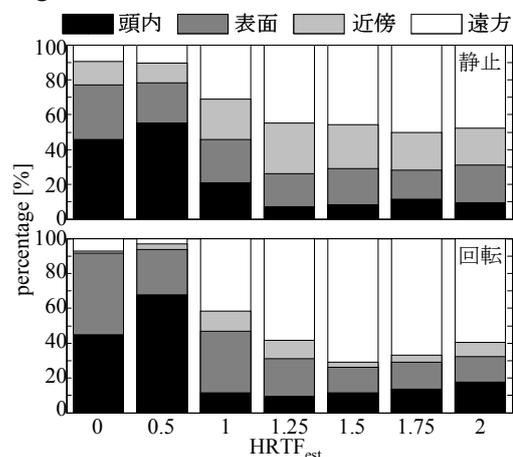


Fig. 3 音像距離の判定結果の割合