

○飯田一博, 石井要次 (千葉工大)

1 再考の動機

Iida *et al.* [1] は HRTF(Head-Related Transfer Function)の振幅スペクトルからノッチとピークを抽出し, その一部を組合せて再構成する parametric HRTF(pHRTF)を提案した. さらに, 受聴者の耳介形状からノッチ周波数を推定し, 推定周波数に最も近い best-matching HRTF (bmHRTF)をデータベースから選出する方法も提案している[2]. これらの正中面音像定位精度については, 以下のようにまとめられる.

- 1) すべてのノッチとピークで再構成した pHRTF(all)は実測 HRTF(mHRTF)と同等の定位精度を有する.
- 2) 第1,2ノッチと第1ピークで再構成した pHRTF (N1N2P1)は mHRTF とほぼ同等の定位精度を有する.
- 3) N1N2 周波数の推定値から選定した bmHRTF は mHRTF とほぼ同等の定位精度を有する.
- 4) しかし, pHRTF(N1N2P1)と bmHRTF のいずれについても, 一部の被験者では上方(90°)において定位精度が低い.

また, 上方の HRTF のノッチとピークの構成には次のような特徴がある.

- 5) 前後方向と比べてそれらの数が少なく, N1N2P1P2P3 だけである.

本稿では, 4) に示した pHRTF(N1N2P1)および bmHRTF の弱点を改善する方法を検討する. 5) より, P2 もしくは P2P3 を追加すればよいと考えられるが, 2つの疑問が生じる.

- ① P2P3 周波数は P1 と同様に上昇角に依存せずほぼ一定である. P1 は N1N2 を検出するリファレンス情報として利用されていると解釈できるが[1], 同じ理由でさらに P2P3 も必要となるのか.
- ② なぜ上方においてのみ定位精度が低下するのか.

これらの疑問を解く鍵として, P2 は 7-11 kHz 付近にあり[3], 上方の方向決定帯域[4]

とほぼ一致することが挙げられる. しかし, 狭帯域信号で生じる方向決定帯域を広帯域信号の音像定位に拡張して解釈することについては疑問が残る.

そこで, N1N2P1 に P2 を加えることによる上方の定位精度の改善効果を音像定位実験により検証した.

2 実験方法

実験は防音室で行った. 暗騒音レベルは 19.5dBa である. 白色雑音(200-17000 Hz)に HRTF を畳み込み, ヘッドホンから提示した.

HRTF は被験者本人の mHRTF および pHRTF(N1N2P1, N1N2P1+P2)の3種類であり, 目標方向は上半球正中面 7 方向(0°-180°, 30°間隔)である. pHRTF は被験者本人の mHRTF から N1N2P1P2 を抽出し, 周波数軸上で再構成することにより作成した(Fig.1).

ヘッドホンは, Møller *et al.* [5]が FEC とみなせるとした K1000 (AKG)および, ほぼ FEC とみなせるとした DT990 (Byerdynamic)の2種類を用いた. K1000 では実験直前にヘッドホンから外耳道入口までの伝達関数を測定し, その逆特性を刺激に畳込んだ[1,2].

提示音圧レベルは被験者の左右外耳道入口において 63dB SPL で, 提示時間は 1.2 s である. 回答方法はマッピング法である.

被験者は 20 代学生 5 名(男性 4 名, 女性 1 名)である. 被験者は各刺激について 10 回ずつ回答した.

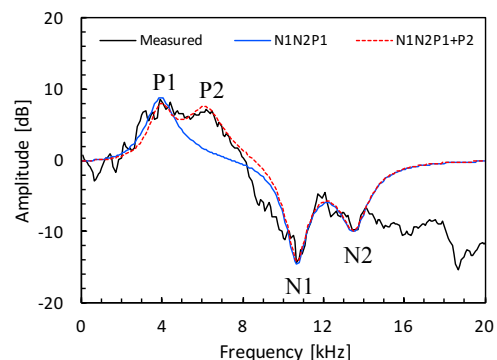


Fig. 1 Examples of measured and parametric HRTFs for rising angle of 90°.

* Parametric HRTF revisited – improvement of sound image control accuracy of upper direction by N1, N2, P1, and P2 –, by IIDA, Kazuhiro and ISHII, Yohji (Chiba Inst. Tech.)

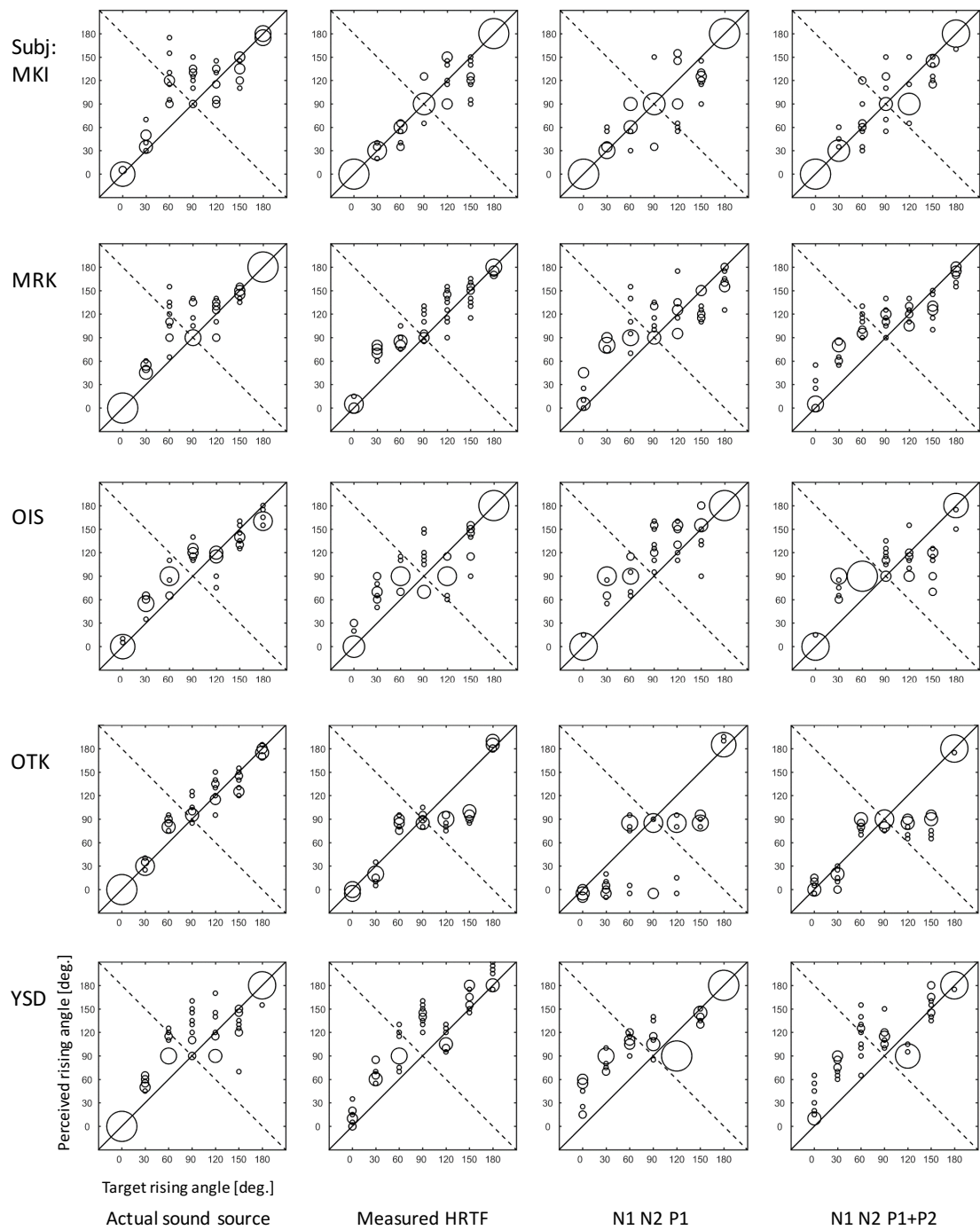


Fig. 2 Responses to actual sound source, mHRTF, pHRTF(N1N2P1), and pHRTF(N1N2P1+P2), presented by FEC headphones (K1000, AKG).

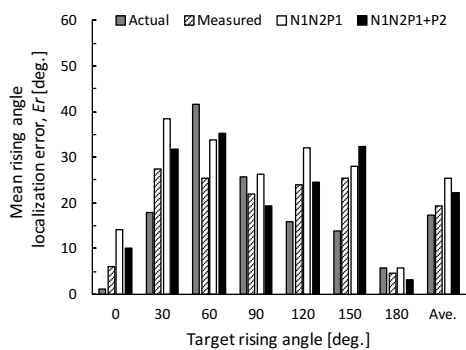


Fig. 3 Mean rising angle localization error, E_r .

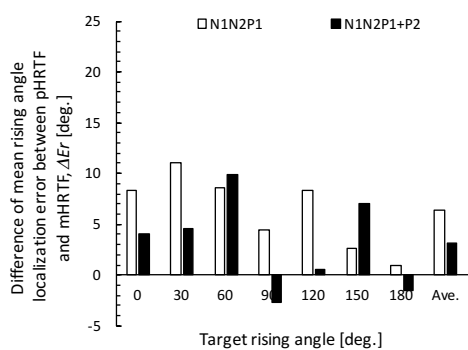


Fig. 4 Difference of mean rising angle localization error between pHRTF and mHRTF, ΔE_r .

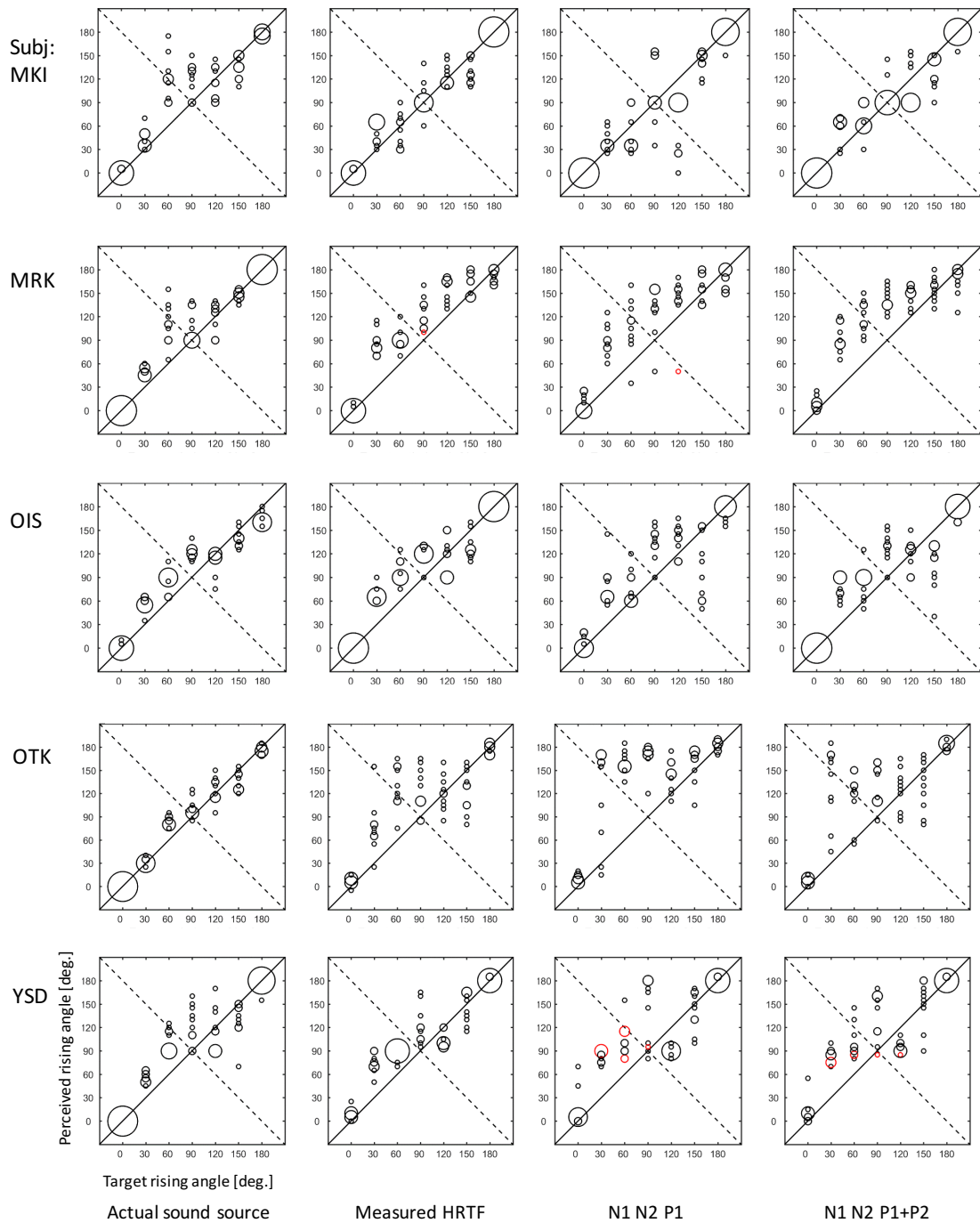


Fig. 5 Responses to actual sound source, mHRTF, pHRTF(N1N2P1), and pHRTF(N1N2P1+P2), presented by quasi-FEC headphones (DT990, Byerdynamic). Red circle denotes inside-of-head localization.

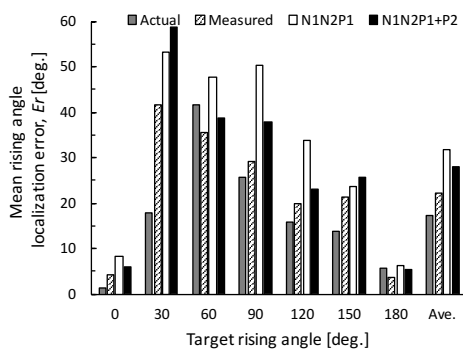


Fig. 6 Mean rising angle localization error, E_r .

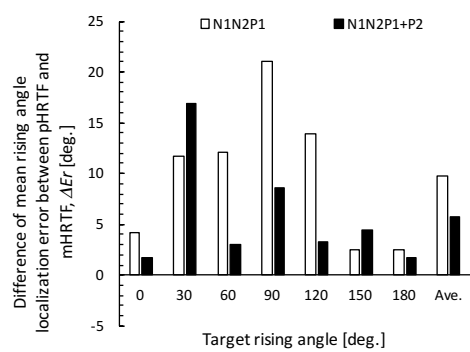


Fig. 7 Difference of mean rising angle localization error between pHRTF and mHRTF, ΔE_r .

3 実験結果

3.1 FEC ヘッドホンで提示した場合

A. 回答分布

各被験者の回答分布を Fig.2 に示す。まず、無響室で別途行った実音源に対する音像定位実験結果(左端列)をみると、被験者 OTK を除き逆 S 字カーブを描き、 $30^\circ, 60^\circ$ ではやや上方に、 90° ではやや後方に回答する傾向がある。

mHRTF では MKI と OTK を除いて実音源と同様の傾向がみられる。MKI では逆 S 字カーブを描かず、対角線上に分布した。OTK は $60^\circ-120^\circ$ において 90° 付近に回答した。

N1N2P1 の回答分布は、従来の知見通り[1]、概ね mHRTF と同様である。ただし、 $60^\circ-120^\circ$ においては第 1 章の 4) に示した問題が生じ、MKI ではばらつきが増大し、OTK では前方への回答がみられた。

N1N2P1+P2 では N1N2P1 と同様の回答分布であるが、 $90^\circ, 120^\circ$ においては定位精度が向上し、OTK の前方への回答はなくなった。ただし、OIS は 150° で上方に回答する傾向がみられた。

B. 平均上昇角定位誤差

全被験者の回答から求めた平均上昇角定位誤差 Er を Fig. 3 に示す。ここで、 Er は目標方向と回答方向の上昇角の差の絶対値の平均と定義する。さらに Fig.4 に pHRTF と mHRTF の Er の差 ΔEr を示す。

N1N2P1+P2 の Er は、N1N2P1 と比較して $60^\circ, 150^\circ$ を除いて減少し、 $90^\circ, 120^\circ$ では mHRTF と同程度となった。 $0^\circ, 180^\circ$ では N1N2P1 でも Er は小さいが、さらに減少し 10° 以下となった。 $60^\circ, 150^\circ$ では N1N2P1 より 1.3° および 4.3° 増加した。N1N2P1+P2 の ΔEr はすべての方向で 10° 以下となった。

3.2 準 FEC ヘッドホンで提示した場合

A. 回答分布

各被験者の回答分布を Fig.5 に示す。mHRTF では OTK を除き、実音源と同様の回答分布であった。OTK は 30° では $30^\circ-150^\circ$ に、 $60^\circ-150^\circ$ では $80^\circ-160^\circ$ に回答した。

N1N2P1 の回答分布は mHRTF と比較してばらつきが大きい傾向がある。特に、MKI の $90^\circ, 120^\circ$ 、OIS の 150° のばらつきが増大した。OTK は $30^\circ-90^\circ$ で後方に回答した。

N1N2P1+P2 では N1N2P1 と同様の回答分布

であるが、MKI の $60^\circ-120^\circ$ 、OTK の $60^\circ, 90^\circ$ において定位精度向上の傾向がみられた。

なお、MRK の mHRTF と N1N2P1、YSD の N1N2P1 と N1N2P1+P2 では、一部で頭内定位が生じた。

B. 平均上昇角定位誤差

全被験者の回答から求めた Er および ΔEr を Fig. 6,7 に示す。N1N2P1+P2 の Er は、N1N2P1 と比較して、 30° および 150° を除いて減少し、 $60^\circ-120^\circ$ では約 10° 減少した。また、 $0^\circ, 180^\circ$ の Er は P2 の有無にかかわらず 10° 以下であった。 $30^\circ, 150^\circ$ では、N1N2P1 より 5.3° および 2.1° 増加した。N1N2P1+P2 の ΔEr は 30° を除くすべての方向で 10° 以下となった。

4 まとめ

本稿では、従来提案した最小構成 parametric HRTF、すなわち pHRTF(N1N2P1)の上方音像定位精度の向上を目的として、P2 を加えた pHRTF(N1N2P1+P2)を提案した。上半球正中面 7 方向の音像定位実験を行い、P2 を加える効果として次のことを示した。

- 1) FEC ヘッドホンから提示した場合、平均上昇角定位誤差は 60° および 150° を除いて減少し、 $90^\circ, 120^\circ$ では実測 HRTF と同程度となった。 $0^\circ, 180^\circ$ では誤差は 10° 以下に減少した。
- 2) FEC に準じるヘッドホンから提示した場合、平均上昇角定位誤差は 30° および 150° を除いて減少し、特に $60^\circ-120^\circ$ では約 10° 減少した。 $0^\circ, 180^\circ$ では P2 の有無にかかわらず誤差は 10° 以下であった。

以上より、N1N2P1 に P2 を加えることによって上方の定位精度が向上すると言える。

謝辞

本研究の一部は科研費(基盤研究(A)15H01790)により実施した。

参考文献

- [1] Iida *et al.*, Applied Acoustics, 68, 835–850, 2007.
- [2] Iida *et al.*, J. Acoust. Soc. Am. 136(1), 317–333, 2014.
- [3] 千勝他, 音講論(秋), 797–798, 2014.
- [4] Blauert, ACUSTICA, 22, 206–213, 1969/70.
- [5] Møller *et al.*, J. Audio Eng. Soc. 43, 203–217, 1995.