

動けよ、さらば定位されん*

○ 平原達也（富山県立大学・工学部）、森川大輔（JAIST）

1 はじめに

実世界では、私たちは頭の前方を視て動きながら音を聴いて外界の様子を解釈し、災いなるものを避け幸いもたらすものに向う。聴覚は、左右の耳に届いた音波から何処で音が鳴っているかを「計算」するが、視覚の情報はこの計算の過程でバイアスを与え、音像の位置は視えるモノに引きよせられる。平衡感覚や運動感覚の情報も聴覚の計算の過程にバイアスを与えるが、視覚の腹話術効果と比べると、重要視されていないように思われる。本稿では、多感覚情報処理の一つである、音像定位における頭部運動の効果に関するいくつかの実験結果をまとめて述べる。

2 音像定位と頭部運動の研究の系譜

頭部を動かしながら受聴すると音の定位の前後誤りや頭内定位が減ることは、75年前のWallachの論文^[1]以来いくつもの報告がある。我国においても1976年の朝日らの報告^[2]、1989年の川浦らの論文^[3]以来、音像定位における頭部運動の影響についての報告がいくつもある。また、頭部回転運動、視覚的自己運動情報、直線等加速度自己運動が、音の知覚空間を歪ませることも知られている^[4-6]。さらに、頭部運動中の音像の最小弁別角度は静止時よりも大きいという報告もある^[7]。

一方、音像の動きが音を定位しやすくすることも、Wallach以来知られている。我国においても、1993年に伊東らの音像の動きが正中面の定位を向上させるという報告^[8]をはじめ、いくつかの報告がある。

Blauertは*Spatial Hearing* (1996)の中で、Thurlowの結果^[9]を引用して、音像定位における頭部運動の効果について詳しく記述している。一方、*空間音響学* (2010)には少し記述があるが、*音響科学* (1939)はもちろんのこと、*聴覚と音響心理* (1978)や*空間音響* (1986)には、音像定位における頭部運動の影響についての記述は無い。

3 静的バイノーラル信号再生の制約

バイノーラル方式は、実頭や擬似頭の両耳に置いたマイクロホンで収録、あるいは両耳の頭部伝達関数(HRTF)をモノ信号に畳みこんだ2チャンネルの音響信号(バイノーラル信号)を、左右二つのイヤホンで受聴者に呈示する方式である。バイノーラル信号は、通常、信号収録時の「頭」も再生時の「頭」も動かさない静的バイノーラル信号である。

静的バイノーラル信号を再生すると、音像の再生空間が歪むことが多い。前方にあるはずの音が頭内や頭部近傍や後方から聴こえたり、後方にあるはずの音が前方や頭部近傍から聴こえたり、呈示した方向からずこしずれた方向から聴こえたりする。Møllerらは、静的バイノーラル信号を再生したときの空間的な歪を無くすためには、バイノーラル信号の再生系と収録系を音響的に厳密にすればよいと言う^[10]。すなわち、(1) FEC (Free air Equivalent Coupling to the ear) であり、かつ、(2) 実耳装着時の周波数特性が平坦なイヤホンを使用し、(3) 受聴者本人の正確なHRTFを使用する必要がある、と言う。

これらは厄介な制約条件である。まず、完全なFEC特性を持つイヤホンは無い。AKGのK1000のような良好なFEC特性を持つイヤホンは、耳の傍にラウドスピーカを置いた完全開放型のイヤホンで、2~3 kHzの音響クロストークは-30 dB程度しか確保されない^[11]。次に、イヤホン応答特性の逆フィルタは容易に設計できるが、実耳装着時のイヤホン応答特性を測ることは容易ではない。また、長時間に渡ってイヤホンの装着状態を保つことも容易ではない。さらに、受聴者の正確なHRTFを測定することもそう容易ではない^[12]。特に、長時間に及ぶHRTF測定中に頭部が動いてしまうので、その対処が必要である。

つまり、バイノーラル再生方式は、音響的に完璧ではない状態で利用せざるを得ない。

* *Move, and you shall localize.*

by HIRAHARA Tatsuya (Toyama Prefectural University), MORIKAWA Daisuke (JAIST)

4 音響的に完璧なイヤホンは必要か？

再生系の制約条件の可否を確認するために、受聴者本人の HRTF を用いて合成したバイノーラル信号を、3種類のイヤホンで再生して音像定位実験を行った^[13]。イヤホンは耳覆い型 (HDA200)、挿入型 (MDR-EX90SL)、およびイントラコンカ型 (MX 500) で、それらの実耳応答特性を Fig.1 に、FEC の指標である PDR (Pressure Division Ratio) 特性を Fig.2 に示す。これらは、前述した音響条件を満たしていない。

刺激音は持続時間 3 秒の白色雑音に HRTF を畳みこんだバイノーラル信号で、頭部運動条件では、時々刻々と受聴者の頭部回転角度に応じた HRTF が畳みこまれた動的バイノーラル信号となる。呈示音圧レベルは 80 dB、呈示角度は水平面も正中面も 30° 間隔とした。受聴者は音像の水平角あるいは仰角を、頭内・頭外定位を区別して 30 度毎に強制選択した。実験条件は、イヤホン実耳応答の平坦化の有無と、受聴中の頭部回転運動を許すか許さないかを組合せた 4 条件である。

各実験条件の頭外定位正答率—音像が頭外定位し、かつ呈示角度を正しく回答した割合—を Fig. 3 に示す。いずれのイヤホンを用いても、水平面でも正中面でも、イヤホンの実耳応答を平坦化するよりも頭部を動かす方が頭外定位正答率を上げる効果は大きかった。特に、正中面の頭外定位正答率は、頭部回転運動を許すことにより劇的に高くなった。

これらの結果は、頭部運動を反映した動的バイノーラル信号を用いると、音響的な制約条件を満たさないイヤホンを用いても空間的な歪みが少ない音像を再生できることを示す。

5 正確な頭部伝達関数は必要か？

収録系の制約条件の可否を確認するために、Fig.4 に示すステレオマイク、耳介のない単純ダミーヘッド、受聴者のダミーヘッドで収録した 2 チャンネル信号を用いて音像定位実験を行った^[14]。両耳間時間差 (ITD) はどの信号にも含まれるが、両耳間音圧差 (ILD) はステレオマイクで収録した信号には含まれないし、スペクトルの特徴は個人のダミーヘッドで収録した信号にしか含まれない。

各「頭」を受聴者の頭部回転運動に追従回転するテレヘッドに載せ、スピーカから呈示

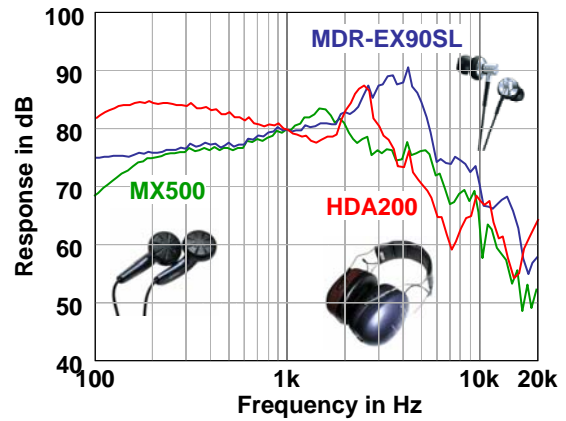


Fig.1 3種のイヤホンの実耳応答特性

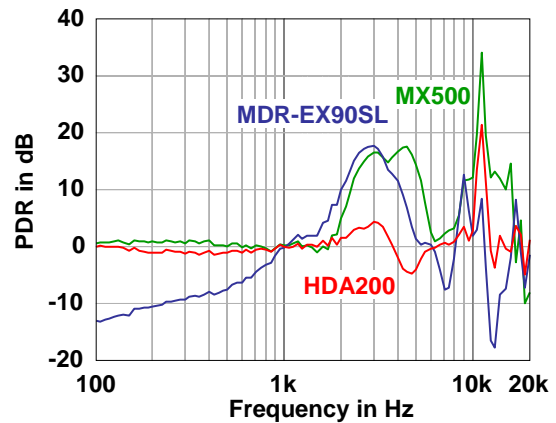


Fig.2 3種類のイヤホンのPDR特性

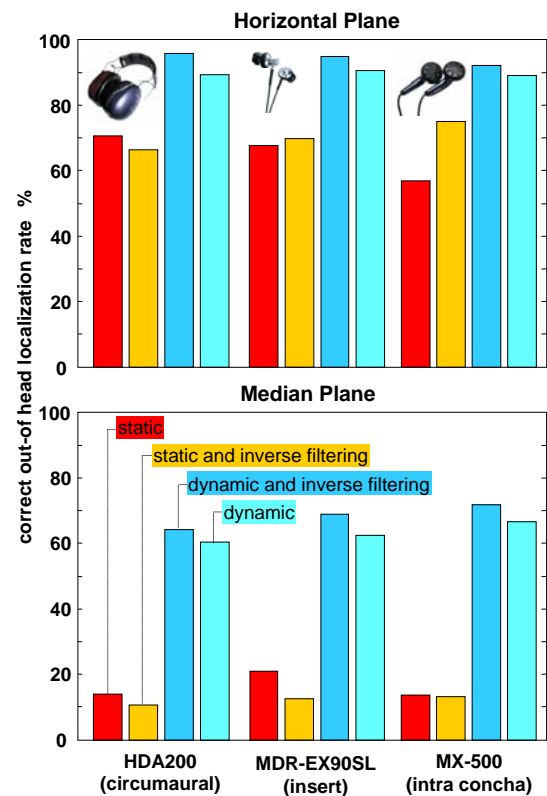


Fig.3 合成バイノーラル信号をイヤホンで再生した場合の頭外定位正答率

した白色雑音を收音した。それを、実耳応答を平坦化していないHDA200を介して受聴者に70 dBで呈示した。受聴者は30度ごとの強制選択で音像の定位結果を回答した。別途、受聴者がスピーカアレイの中心に座して、帯域制限雑音を実耳で受聴する実験も行った^[15]。

各条件の頭外定位正答率を Fig. 5 に示す。ステレオマイクと単純ダミーヘッドを用いた頭部静止条件では、水平面では前後誤りと頭内定位が多発し、正中面の定位はほぼできなかった。しかし、頭部を回すと、水平面の前後誤りと頭内定位は無くなり、頭外定位正答率はステレオマイクで65%、単純ダミーヘッドで78%になった。正中面でも、頭部を回すと定位がある程度可能になり、単純ダミーヘッドの正中面の頭外定位正答率は66%になった。個人のダミーヘッドや実耳で受聴した場合、水平面での頭部運動の効果は僅かだが、正中面での効果は大きかった。なお、実耳で受聴した場合でも、頭部静止条件では、正中面の頭外定位正答率は75%しかない。

帯域雑音を実耳で受聴した場合、HRTFは完全だが、刺激音に方向知覚の手がかりを十分に含まれないために、頭部静止条件では音像定位しにくい。しかし、頭部運動条件では動的な手がかりを利用できるので、水平面でも正中面でも音像定位しやすくなる (Fig.6)。

これらの結果は、頭部運動を反映した動的バイノーラル信号を用いると、正確なHRTFを用いなくても、空間的な歪みが少ない音像を再生できることを示す。

6 頭部運動の正確な追従は必要か？

動的バイノーラル信号は頭部運動を正確に追従したものである必要があるかどうかを検証するために、テレヘッドの頭部運動追従速度を変えて收音したバイノーラル信号を用いた音像定位実験を行った^[16,17]。

テレヘッドに他人のダミーヘッドを載せて、受聴者の頭部回転角速度のP倍で追従させ、スピーカから呈示した白色雑音を收音した。それを、実耳応答を平坦化していないHDA200を介して受聴者に70 dBで呈示した。実験は、P=0の頭部静止、P=0.5, 0.1の変速追従、P=1の頭部運動、の各条件で行った。

各条件の頭外定位正答率を Fig. 7 に示す。P=0.5と0.1の変速追従条件でも、静止条件

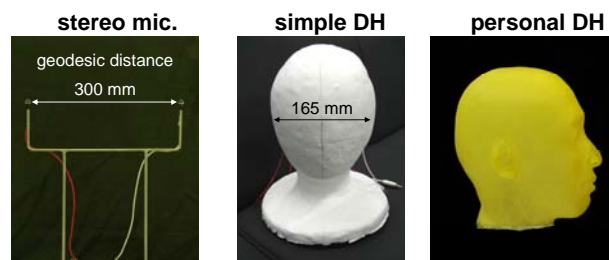


Fig.4 收音に用いたステレオマイクとダミーヘッド

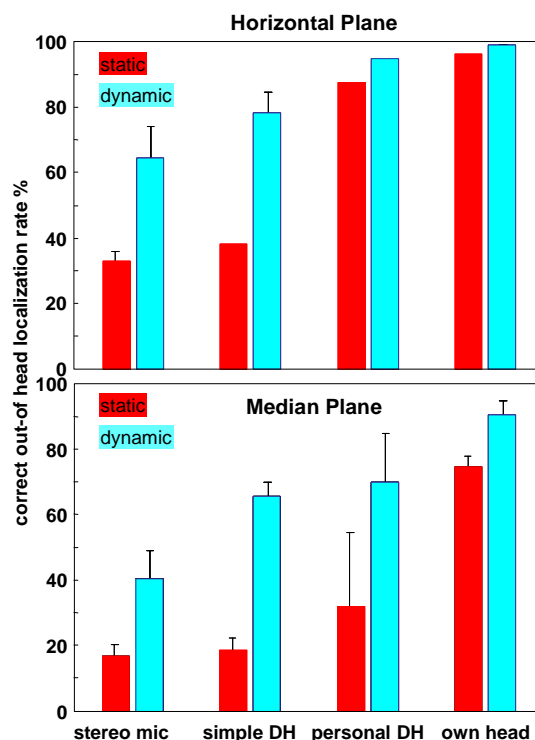


Fig.5 さまざまな「頭」で收音したバイノーラル信号をイヤホン (HDA200) で再生した場合と、実耳受聴した場合の頭外定位正答率

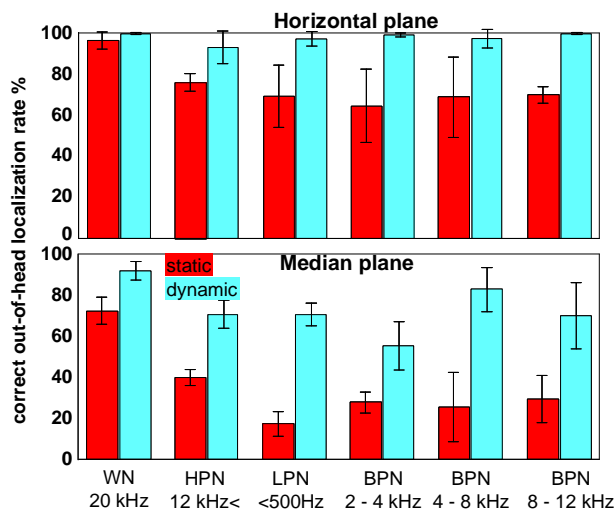


Fig.6 帯域雑音を実耳受聴した場合の水平面と正中面の頭外定位正答率

に比べて有意に前後誤りが減少し、頭外定位正答率は約78%と約72%であった。P=0.1では、受聴者は頭部運動追従を明確には知覚しなかった。この結果は、池田らによる正中面についての同様の実験結果^[18]と一致する。

これらの結果は、受聴者の頭部運動を反映する動的バイノーラル信号を用いると、頭部運動を正確に追従しなくても、空間的な歪みが少ない音像を再生できることを示す。

7 頭部運動の追従は必要か？

動的バイノーラル信号は頭部運動にとまなう必要があるかどうかを確認するために、テレヘッドを手腕、あるいは他人の頭部運動で制御して収録したバイノーラル信号を用いた音像定位実験を行った^[17,19,20]。

テレヘッドに他人のダミーヘッドを載せ、受聴者の頭部回転運動、手腕によるハンドル回転、記録した他人の頭部回転運動データに追従させ、スピーカから呈示した白色雑音を収録し、実耳応答を平坦化していないHDA200を介して受聴者に70 dBで呈示した。

各条件の頭外定位正答率を Fig. 8 に示す。ハンドル操作や他人の運動データにテレヘッドを追従させる条件では、受聴者は頭部を静止させている。そのため、再生音像は動き回るが、受聴者は音の鳴っている方向を判断できる。ハンドル操作条件の頭外定位正答率は、頭部静止条件と運動データ追従条件に比べて有意に高く、頭部運動条件とは有意差が無かった。受聴者の自発的な運動の追従ではない運動データ追従条件の頭外定位正答率は、ハンドル操作条件より有意に低かった。

これらの結果は、頭部運動ではなくても、受聴者の自発的な運動に追従した動的バイノーラル信号を用いると、空間的な歪みが少ない音像を再生できることを示唆する。

8 まとめ

静的バイノーラル信号の「正しい」再生には厳しい音響的制約が課せられるが、受聴者の自発的な運動を反映した動的バイノーラル信号を用いれば、収録・再生系が音響的制約を満たさなくても、空間的な歪みが少ない音像を再生できる。このような聴覚と平衡感覚と運動感覚の多感覚情報処理の神経機構など、その仕組みの解明は今後の課題である。

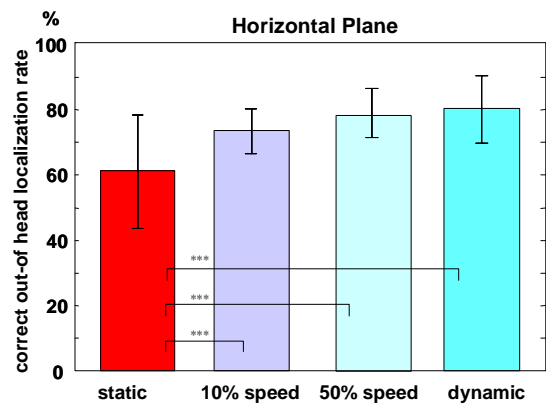


Fig. 7 頭部運動の追従速度を変えた実験結果

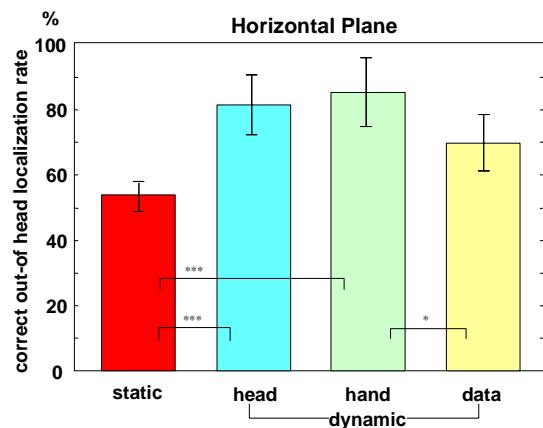


Fig. 8 何に追従させるかを変えた実験結果

謝辞

本研究の一部は科研費(22300061, 25330203)による。

参考文献

- [1] H. Wallach, J.A.S.A. 10, 270-274, 1939.
- [2] 朝日, 松岡, 聴覚研資料 H37-1-3, 12-17, 1976.
- [3] 川浦, *et al.*, 音響学会誌 45(10), 756-766, 1989.
- [4] J. Cooper *et al.*, *Exp. Brain Res.*, 191, 209-219, 2008.
- [5] J. Leung, *et al.*, *PNAS*, 105(17), 6492-6497, 2008.
- [6] 古根, *et al.*, 聴覚研資料 40(8), 689-692, 2010.
- [7] 大場, *et al.*, 音講論, 597-598, 2013.03.
- [8] 伊東, *et al.*, 信学技報 EA 93(281), 17-24, 1993.
- [9] W. Thurlow, *et al.*, J.A.S.A. 42(2), 480-488, 1967.
- [10] H. Møller, *et al.*, *J. Aud. Eng. Soc.* 43, 203-217, 1995.
- [11] 平原, *et al.*, 音響学会誌 66(2), 45-55, 2010.
- [12] 平原, *et al.*, *Fundam. Review* 2(4), 68-85, 2009.
- [13] 平原, *et al.*, 音講論, 511-512, 2008.09.
- [14] T. Hirahara, *et al.*, *Proc. InterNoise*, Osaka, 2011.
- [15] D. Morikawa, *et al.*, *AST*. 34(1), 56-58, 2013.
- [16] 平原, *et al.*, 音講論, 581-582, 2012. 09.
- [17] T. Hirahara, *et al.*, *POMA* 19, 050130, 2013.
- [18] 池田, *et al.*, 聴覚研資料 40(8), 683-687, 2010.
- [19] 吉崎, *et al.*, *VR 学会論文誌* 17, 327-331, 2012.
- [20] 吉崎, *et al.*, 信学論 D J96-D(3), 630-635, 2013.