

バイノーラル信号による音像定位技術 —動的バイノーラル信号の効用—*

平原 達也^{*1}

1. はじめに

携帯音楽プレイヤーで再生した音楽をイヤホンで聴くと、全ての音は両耳にへばりつくか頭の中で鳴っている。CDをステレオ・スピーカで再生した音は頭の外から聴こえるが、音像は2つのスピーカの間にしか生じない。DVDのサウンドトラックを5.1chサラウンド・スピーカで再生した音は頭の外側を前後左右に飛び回るが、音像はぼやけている。しかし、私たちが実環境で聴いている生の音は、前後、左右、上下のあらゆる方向から聴こえてくる。これは、私たちの左右の耳に届いた音がわずかに異なり、そのわずかな差異から私たちの聴覚系が聴こえている音像の位置を計算しているからである。

このような立体音像を再生するひとつの技術がバイノーラル方式である。バイノーラル方式は、音源から両耳までの音響伝達特性である頭部伝達関数(HRTF: Head-Related Transfer Function)を含んだ左右2チャンネルのバイノーラル信号をイヤホンで再生する方式で^{1),2)}、トランスオーラル方式^{3)~5)}や波面合成方式^{6),7)}のような大規模で必ずしも安定ではない逆行列計算をすることなく、5.1chサラウンド方式のような擬似的ではない、“本物”の立体音像を再生できる。しかし、バイノーラル信号を用いて立体音像を再生する場合には、HRTFとバイノーラル信号再生系の音響的な正確さや厳密さが重要であるといわれており、それらをおろそかにすると再生される音像の空間が歪む。

ところが、これまでのバイノーラル信号の受聴実験は、その多くが頭部を動かさないという条件で行われてきている。すなわち、実音源の受聴実験では被験者に静止することを教示し、静止したダミーヘッドで収録したバイノーラル信号や時不変な

HRTFを利用して合成した静的バイノーラル信号を用いて受聴実験が行われている。しかし、実環境においてこのような静止状態で音を聴いていることは稀で、意識的であるかどうかは別にして常に私たちの体や頭部は動いている。私たちはいつも時間的に変化する動的バイノーラル音を聴き、育ってきている。そして、頭部運動が音像定位にポジティブな影響を与えることは、古くから知られている^{8)~12)}。

本稿では、バイノーラル信号を用いた立体音像再生技術について概説するとともに、受聴者の頭部運動に追従する動的バイノーラル信号を用いると、HRTFやバイノーラル信号再生系に要求される音響的な正確さや厳密さを緩和できることを示す。

2. 頭部伝達関数とバイノーラル信号

ある音源から左右の耳に届く音の違いは3つある(図-1)。まず、音源に近い側の耳には音は早く届く。左右の耳へ届く音の到達時間差を両耳間時間差(ITD: Interaural Time Difference)、あるいは両耳間位相差(IPD: Interaural Phase Difference)と呼ぶ。次に、音源に遠い側の耳には近い側の耳よりも小さな音が届く。左右の耳へ届く音の音圧レベル差を両耳間音圧差(ITD: Interaural Level Difference)と呼ぶ。さらに、左右の耳に届く音のスペクトルは同じではない。特定の波長の音波は肩や耳介の凹凸による反射によって打ち消されるし、高周波の音波は頭部によって遮られる。そのため左右の耳へ届く音のスペクトルには差が生じる。この差は両耳間スペクトル差(ISD: Interaural Spectral Difference)と呼ばれるべきものだが、あまり注目されていない。

これら3つの違いを全て内包するものが、音源から左右の耳までの音響伝達関数である頭部伝達関数(HRTF)である。図-2に示すように、HRTFは、位置 $P(r, \theta, \phi)$ にある音源から頭部がある場合の外耳道入口 E に置いたマイクロホンまでの音響伝達関数 $H_E(P, \omega)$ を、同じ位置にある音源から頭部が

* Sound Localization Technology with Binaural Signals — Efficacy of Dynamic Binaural Signals —

*1 Tatsuya Hirahara: Faculty of Engineering, Toyama Prefectural University (富山県立大学工学部)

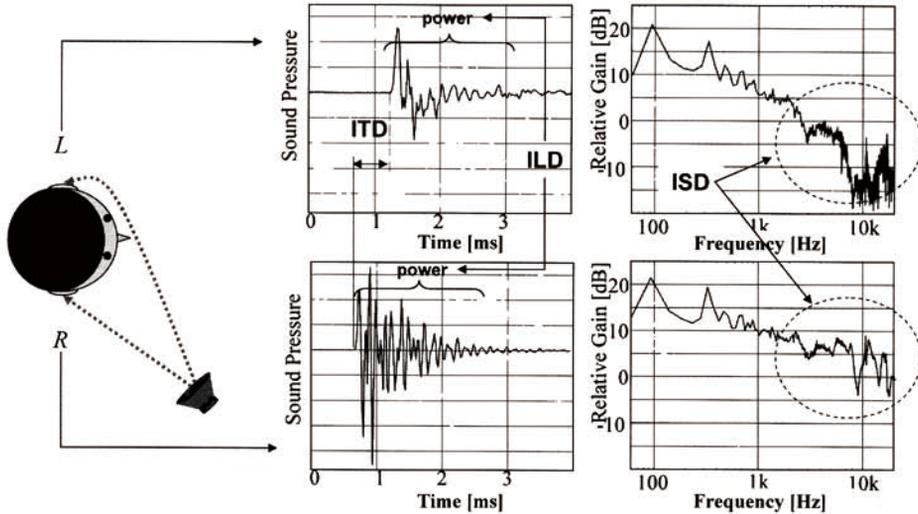


図-1 音源から左右の耳に届く音の違い

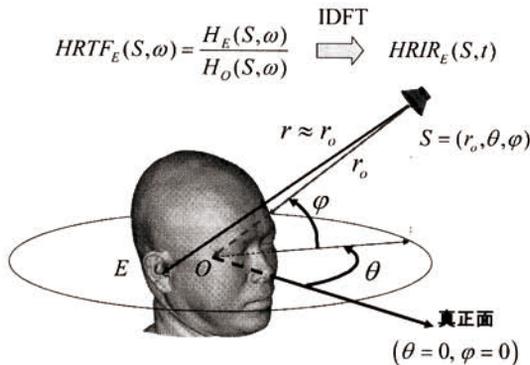


図-2 頭部伝達関数 (HRTF) と頭部インパルス応答 (HRIR)

無い場合の頭部中心位置 O に置いたマイクロホンまでの音響伝達関数 $H_o(P, \omega)$ で除した伝達関数 $H_E(P, \omega)/H_o(P, \omega)$ で与えられる。 H_E を H_o で除するのは計測システムの音響系と電気系の諸特性を相殺するためである。

HRTF 計測の基本は、音源となるラウドスピーカから頭部中心位置および外耳道入口においたマイクロホンまでの音響伝達関数を正確に測ることである。音波は媒質の圧力変化という物理的な現象であり、様々な物理量や物体の影響を受ける。マイクロホンは十分に感度が高く、それらの影響を検出できるために、音響計測は測定系の物理的な状態が正直に反映される。そのため、音響計測に際しては、周囲の反射物を除去することと音源と受音点の正確な相対位置を保持することが必須である。インター

ネット上にはいくつかの HRTF データベースが公開されているが、中には必ずしも適切に計測されていない HRTF もあるので、使用する場合は吟味が必要である。また、3次元頭部形状データから HRTF を高速に数値計算することもできるが、算出された HRTF の妥当性についても吟味が必要である。HRTF の諸問題については別の解説¹⁴⁾ を参考にされたい。

バイノーラル信号とは、音源から放射された音波を左右の耳に装着したマイクロホンで収録した 2 チャンネルの音響信号のことである (図-3)。周波数領域で考えると、このバイノーラル信号 $BNS_R(\omega)$ と $BNS_L(\omega)$ は音源信号 $S(\omega)$ に左右の頭部伝達関数 $HRTF_R(\omega)$ と $HRTF_L(\omega)$ をそれぞれ乗じることによって得られる。HRTF の帯域幅はサンプリング周波数に依存するが、十数 kHz までの帯域があれば十分である。一方、時間領域で考えると、バイノーラル信号 $bns_R(t)$ と $bns_L(t)$ は音源信号 $s(t)$ に左右の頭部インパルス応答 (HRIR: Head-Related Impulse Response) $HRIR_R(t)$ と $HRIR_L(t)$ をそれぞれ畳みこむことによって得られる。HRIR は HRTF を離散フーリエ逆変換した実関数のインパルス応答で、サンプリング周波数にもよるが 128~512 点程度の有効長のものが用いられることが多い。

3. バイノーラル信号に対する音響的な制約

理論的には、HRTF や HRIR を用いてバイノーラル信号を合成しそれを耳元で再生すれば立体的な

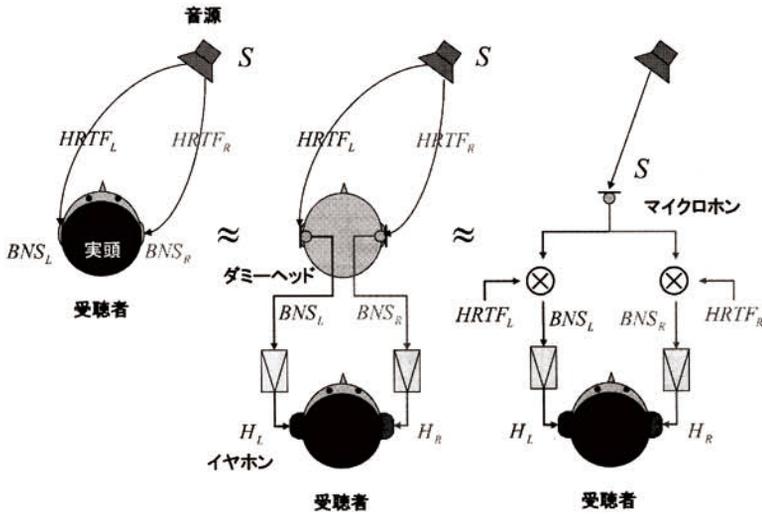


図-3 実耳で聴くバイノーラル信号(左), ダミーヘッドで収録するバイノーラル信号(中)と HRTF を用いて合成するバイノーラル信号(右)

音像が聴こえるはずである。ところが、頭部や耳介の形は個人ごとに異なるために HRTF も個人ごとに細部の形状が異なる。そのため、正しいバイノーラル信号を合成するためには、受聴者個人の精密な HRTF が不可欠であると言われている。しかし、この HRTF の測定には大がかりな計測システムと長い計測時間が必要なために、自分の HRTF データを持っている受聴者は稀である。市販のダミーヘッドで収録したバイノーラル信号や、インターネット上で公開されている他人の HRTF を畳みこんで合成したバイノーラル信号をイヤホンで聴くと、再生された音像空間は多くの場合歪む。例えば、前方から出したはずの音像が頭の中や、顔のすぐ近くや、後方から聴こえたりするし、斜め上や下から出したはずの音像の高さがあいまいであったり、真上から出したはずの音が頭の中から聴こえたりする。頭部形状の個人差によって生じる HRTF の個人差の解析や個人差を解消して代表的あるいは汎用的な HRTF の作成方法や選択方法^{15)~19)}などが探求されているが、決め手はまだ見いだされていない。

また、自分の精密な HRTF を用いて正しいバイノーラル信号をコンピュータ上で合成したとしても、それをバイノーラル音として再生する適切な電気音響変換器が不可欠である。この電気音響変換器、すなわちイヤホンの諸特性についても音響的な要請がある。Møller ら²⁰⁾によると、バイノーラル音を正しく再生するためには、イヤホンを装着したときに外耳道入り口から外側を見た音響インピーダ

スは、イヤホンを装着しないときのものと同じでなければならない。そして、このような条件を満たすイヤホンは FEC (Free air Equivalent Coupling to the ear) イヤホンと呼んでいる。これは、開放型あるいは小型スピーカを耳元に置くようなヘッドホンが必要ということであり、AKG の K-1000 や STAX のイヤスピーカなどがバイノーラル再生に好まれて使われている。また、イヤホンの周波数特性は平坦ではないので、それらの山や谷が HRTF に影響を及ぼさないように実耳応答特性を逆フィルタで補正することが必要と言われている。そして、イヤホン特性を適切に補正したり FEC 特性が優れたイヤホンを用いてバイノーラル音を正しく再生すると、再生される音像の空間的な歪みは低減する^{21)~24)}。

このように、バイノーラル信号を扱う場合には HRTF と再生系に対する音響的な厳密さが要求される、というのが定説である。ただし、ここでの「バイノーラル信号」は全て「静的バイノーラル信号」の「静的」を省略したものである。すなわち、頭部を静止した条件でバイノーラル信号を再生する場合には、上述したような音響的な要請を満たさないと思いどおりに立体音像が再生されない。ところが、受聴者の頭部を動かすことを許す動的バイノーラル信号を用いると、音響的な制約は緩くなる。

4. 動的聴覚ディスプレイ

HRTF を利用してバイノーラル信号を合成する聴覚ディスプレイ (VAD: Virtual Auditory Dis-

表-1 代表的な DVAD の特徴

	OS	Head tracker	Total system latency [ms]
DIVA ²⁵⁾	Unix, Linux	Ascension Motion Star	110~160
RTVAS ²⁶⁾	Linux	Intersense IS-900VWT	<7
SLAB ²⁷⁾	Windows	不明	6.1 (tracking delay を除く)
矢入らの DVAD ²⁸⁾	Linux	Polhemus FASTRAK	12.01
大谷らの DVAD ^{29),30)}	Windows	NEC/TOKIN MDP-A3U9S	50~60

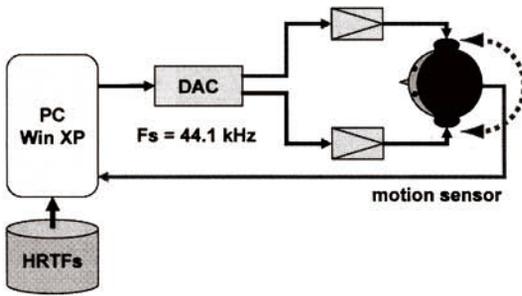


図-4 富山県立大で開発した動的聴覚ディスプレイ (DVAD) の構成

play) はさまざまなものがある。VAD は、HRTF/HRIR さえ用意できれば、PC 上の信号処理ソフトウェアとして比較的容易に実現できる。その中で、受聴者の頭部運動に追従して HRTF を切り替える動的聴覚ディスプレイ (DVAD: Dynamic Virtual Auditory Display) には表-1 のようなものがある^{25)~30)}。富山県立大学で開発した DVAD^{29),30)} は、PC (Windows XP)、USB オーディオインタフェース (Edirol, UA101)、ヘッドホン (Sennheiser, HDA 200)、角度センサ (NEC/Tokin, MDP-A3U9S) から構成されている (図-4)。PC は PentiumM 1.4 GHz を搭載するノート PC (IBM, ThinkPad X31) でも動作する。角度センサは USB 経由で PC に接続され、8 ms ごとに角度データは更新される。HRTF としては 10° ごとの実測値を補間した 1° ごとの HRTF を事前に用意した。実際に積みこむ HRIR は 512 点である。また、サンプリング周波数は 44.1 kHz、量子化精度は 16 bit、DA 変換器に音響信号を出力するオーディオインタフェースはマルチメディア拡張 API DirectSound を利用している。

DVAD で問題となる遅延時間は、角度センサからのデータ取りこみに要する時間も含めて、50 ms である。この値は Linux プラットフォーム上で開発された DVAD よりも大きい、ヒトの移動音像

の遅延時間の検知限である 80 ms よりも短く、音像定位に与える影響はほとんど無いと考える。

DVAD で問題となるのは、HRTF の切り替えに伴う雑音の発生である。これは、角度に応じて変化する HRIR すなわち FIR フィルタ係数を overlap-add 法を用いて積みこむことによって生じる。本システムでは 1° ごとの HRTF を用いているので、白色雑音のような広帯域信号を用いている限り、この切り替え雑音は検知されない³¹⁾。

5. テレヘッド

テレヘッド (TeleHead) というのは筆者の造語³²⁾で、受聴者の頭部運動に追従して静粛に実時間で運動するそっくりダミーヘッドである (図-5)。頭部運動に追従して動くダミーヘッドの両耳に設置した小型マイクロホンの出力を、ダミーヘッドから離れた場所でイヤホン再生すると、あたかも自分の頭がダミーヘッドの置かれた場所にあるかのように臨場感のある立体音場が再現される。なぜならば、ダミーヘッドという物理的実体が、一切の省略なしに実時間で動的な HRIR が積みこまれたバイノーラル信号を“計算”するからである。デジタル信号処理を用いる DVAD では、HRIR は 512 点としその後部はゼロとするとか、1 フレームの間は時不変と仮定するとか、ドップラー効果はわずかなので無視するとか、しばしば省略や仮定が暗黙の内に含まれている。

テレヘッドはこれまでに四号機まで製作されている。壱号機はダミーヘッドの形状再現精度が低く、ワイヤーとプーリーで 3 軸の姿勢制御をしたために機械系の応答特性が不十分で、追従遅延は 200 ms、動作時の騒音も 70 dB SPL と大きかった^{32),33)}。弐号機は石膏で型取りしたソフトシリコン製の精巧なダミーヘッドを用い、モータの配置と駆動力伝達方式を一新した。その結果、機構制御に伴う 120 ms の追従遅延はあるものの、動作時の騒音は聴感度の

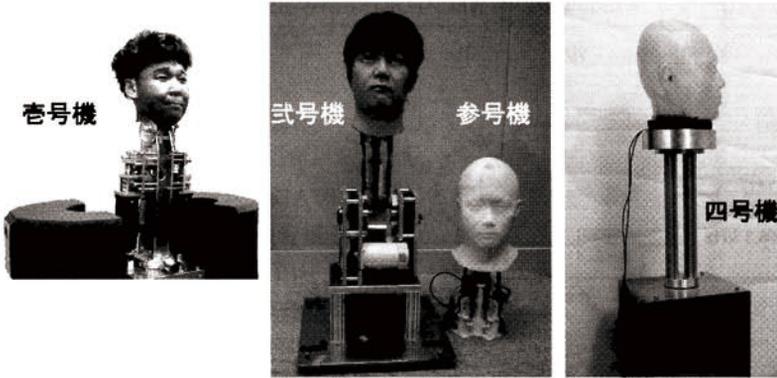
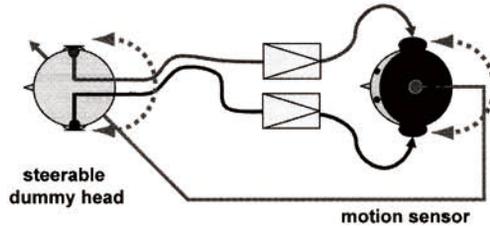


図-5 テレヘッドの原理と4種類のテレヘッド

高い1~4 kHzで24 dB SPL以下と、静粛かつ滑らかに頭部運動に追従させることができた^{34),35)}。参考機は多自由度超音波モータを利用したものだが、試作するに留まった³⁶⁾。四号機はMRIで計測した頭部の3次元形状から光造形装置で成形したエポキシ製の軽いダミーヘッドを回転させるもので、追従遅延は約100 msである。

6. 動的バイノーラル信号による音像定位

私たちは、上述したDVADやテレヘッドを用いて、さまざまな条件における音像定位実験を行い静的バイノーラル信号と動的バイノーラル信号を比較してきた^{14),37)}。その中から3つの実験結果を紹介する。

まず、DVADを使用して、実測した自分のHRTFを用いて合成したバイノーラル信号による水平面および正中面の音像定位実験結果の一例を図-6に示す。刺激音は、水平面の定位実験では水平面全周($\theta=0\sim 360^\circ$, $\varphi=0^\circ$)を 30° ごと、正中面の定位実験では真正面から真後ろ($\theta=0^\circ$, $\varphi=0\sim 180^\circ$)まで 30° ごとの位置のものを呈示した。被験者には音像の方向とともに、音像が頭外に出ているか頭内にあるかも同時に判断させた。実験には密閉型ヘッドホンHDA200 (Sennheiser) を使用したが、これはFECヘッドホンではないし、実耳応答特性も補正

していない。

静的バイノーラル信号を用いた場合、水平面定位では、正面の刺激は頭内定位するとともに前後誤りも生じたが水平角の定位誤りは少なかったのに対し、正中面定位では頭内定位が多く仰角の定位はあいまいであった。一方、動的バイノーラル信号を用いた場合、水平面定位では前後誤りは無くなり正面の頭内定位も激減した。また、正中面定位も頭頂($\varphi=90^\circ$)方向を除いて音像は頭外に定位し、定位誤りも減った。このように動的バイノーラル信号を用いると音像は頭外に出て方向もわかりやすくなるという状況は、他人のHRTFを使用した場合も同様であった。また、テレヘッドを用いて実音源の定位を行った場合もDVADと同様の結果であった。

次に、同じDVADを使用した音像定位実験を、タイプの異なるイヤホンを用いて行った結果を示す。図-8は、水平面および正中面の音像定位実験の結果から頭外定位正解率、すなわち音像が頭外に出てかつ正しい方位に定位された図-7の対角線上に載った黒丸の割合を算出し、3種類のイヤホンについて静的および動的バイノーラル信号を比較したものである。MDR-EX90SL (SONY) は挿入型イヤホン、MX500 (Sennheiser) はイントラコンカ型イヤホンで、いずれもFEC特性は理想とは程遠いし、実耳応答特性も補正していない。しかし、同図に示

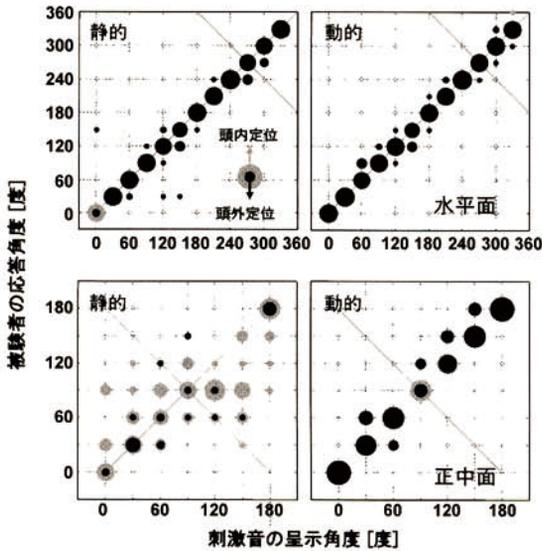


図-6 自分のHRTFを用いて合成したバイノーラル信号による水平面および正中面の音像定位実験結果の一例

されるように、水平面も正中面も動的バイノーラル信号を用いると頭外定位正解率は劇的に向上する。特に、正中面の刺激に対する改善は大きい。静的バイノーラル信号を用いた場合、イヤホンの実耳応答特性を補正しただけではこのように頭外定位正解率は改善されない。

最後に、テレヘッドを用いて行った極端な条件での音像定位実験の一例を紹介する。図-8は、ダミーヘッドを用いずに単なるステレオマイクで収録したバイノーラル信号による水平面音像定位の結果の一例である。具体的には、300 mm 離して2つの小型コンデンサマイクユニット (Panasonic, WM-62PC) を並べたステレオマイクをテレヘッドに装着し、水平面上に30°に並べたスピーカから出した白色雑音をステレオマイクで収録した信号を増幅してHDA200で呈示した。テレヘッドを受聴者の頭部運動に同期させず静止させた場合、つまり、ステレオマイクロホンで集音された静的バイノーラル信号を呈示した場合、音像は左右に偏って定位される。真正面と真後ろから出した音は頭内に定位し、前後誤りが大きい。これに対して、テレヘッドを受聴者の頭部運動に同期して回転させた動的バイノーラル信号を呈示した場合、前後誤りは無くなり定位誤りも激減した。

ステレオマイクの“HRTF”を計測したところ、実頭のHRTFに見られるような方位に依存した

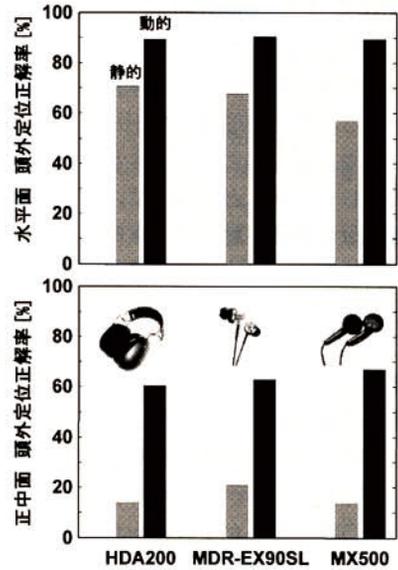


図-7 3種類のイヤホンの頭外定位正解率

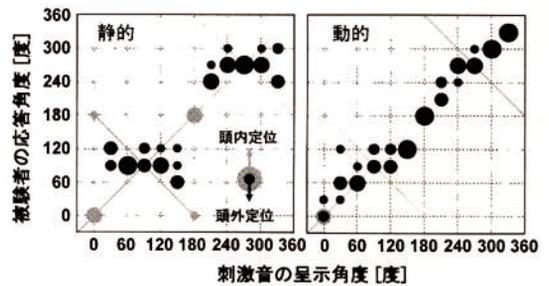


図-8 テレヘッドに装着したステレオマイクを用いた実音源に対する水平面音像定位実験結果の一例

HRTF スペクトルの山谷は認められず、ITDは最大で約900 μ s、ILDは最大で約6dBであった。ILDが0dBとなっていないのは、コンデンサマイクをテレヘッドに設置する治具の音響的な影響を完全に排除できなかったためである。いずれにせよ、ITDと不十分なILDとISDだけが含まれるバイノーラル信号であっても、頭部を動かすことによって、そこそこの水平面の頭外音像定位はできる。ただし、自発的に頭部を動かすことが必要で、他人が動かしているステレオマイクやダミーヘッドで収録した動的バイノーラル信号を聴くと再生される音像空間は大きく歪む³⁷⁾。

7. おわりに

受聴者の頭部運動を反映した時々刻々と変化するHRTFを含んだ動的バイノーラル信号を用いると、

静的バイノーラル信号の再生で要請されている HRTF と再生系に関する音響的な厳密性を軽んじて、空間的な歪みの少ない立体音像を効果的に再生できる。これは、眼球運動を止めると物は見えなくなることや、麻雀牌に彫りこまれた模様は指を動かすと盲牌しやすいことと同様に、身体運動によって生じる刺激の変化が動物の感覚情報処理において大きな役割を果たしているからと、現象的には納得できる。しかし、頭部運動を反映すると、なぜ音響的に正しくないバイノーラル信号を用いても再生される音像が頭外に正しく定位されやすくなるのか、という聴覚情報処理の仕組みはよくわからない。

フクロウ³⁸⁾ やコウモリ^{39),40)} では空間音響情報の神経情報処理の仕組みが明らかにされているが、音源定位能力の良し悪しが生死にかかわる彼らとそうでないヒトとでは事情が違う。ネコについてもある程度のことがわかっている^{41)~43)}。例えば、ITD と ILD を検出する上オリーヴ核複合体よりも下位にある蝸牛神経核背側核のニューロンの多くは、耳介を動かす筋肉や腱を引き伸ばす等の体性感覚刺激によってその反応が抑制される。哺乳類のほとんどは音の到来方向を確認するときに耳介を動かしており、耳介の動きに伴うスペクトル変化を補正して音源定位に役立てているのかもしれない。耳介を動かせないヒトの蝸牛神経核背側核は退化している⁴⁴⁾。

いずれにしても、ヒトの聴覚系における空間音響情報処理の仕組みについては未だに不明の点が多い。ヒトが情報の最終的な受け手である技術では、ヒトの情報処理の仕組みをうまく利用すれば、簡単に工学的な難題を解決することができることも多い。そういう意味でも、聴覚系が音像の立体的な位置の計算する過程で頭部運動がどのように関与しているか、その仕組みを解明することは重要である。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金 (18300042) による。また、本研究の推進には戸嶋巖樹博士、大谷真博士、および平原研究室学生諸子の協力を得た。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) H. Møller : Fundamentals of binaural technology, Applied Acoustics, Vol. 36, No. 3-4, pp. 171~218 (1992).
- 2) 福留公利 : バイノーラル制御技術の原理・歴史と現状, 日本音響学会誌, 61 巻 7 号, pp. 374~379 (2005).
- 3) 浜田晴夫 : 基準的収音・再生を目的とする Orthostereophonic System の構成, 日本音響学会誌, 39 巻 5 号, pp. 337~349 (1983).
- 4) M. Miyoshi, Y. Kaneda : Inverse filtering of room acoustics, IEEE Trans. ASSP, Vol. 36, No. 2, pp. 145~152 (1988).
- 5) 猿渡 洋, 立蔵洋介, 鹿野清宏 : M 出力 N 入力の一般的な制御問題とその解法, 日本音響学会誌, 61 巻 7 号, pp. 380~385 (2005).
- 6) 伊勢史郎 : キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式と逆システム理論に基づく音場制御の原理, 日本音響学会誌, 53 巻 9 号, pp. 706~713 (1997).
- 7) 及川靖広, 馬場貞如, 山崎芳男 : 人間の聴覚を考慮した波面合成法による音場制御と音場再現, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, 5 巻 3 号, pp. 919~926 (2000).
- 8) H. Wallach : On sound localization, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 10, No. 1, pp. 270~274 (1939).
- 9) H. Wallach : The role of head movements and vestibular and visual cues in sound localization, J. Exp. Psychol., Vol. 27, No. 4, pp. 339~368 (1940).
- 10) R. Thurlow, S. Runge : Effect of induced head movement in localization of direction of sound, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 42, No. 4, pp. 480~488 (1967).
- 11) 川浦淳一, 鈴木陽一, 浅野 太, 曾根敏夫 : 頭部伝達関数の模擬によるヘッドホン再生音像の定位, 日本音響学会誌, 45 巻 10 号, pp. 756~766 (1989).
- 12) S. Perrett, W. Noble : The effect of head rotations on vertical plane sound localization, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 102, No. 4, pp. 2325~2332 (1997).
- 13) F. Wightman, D. Kistler : Resolution of front-back ambiguity in spatial hearing by listener and source movement, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 105, No. 5, pp. 2841~2853 (1999).
- 14) 平原達也, 大谷 真, 戸嶋巖樹 : 頭部伝達関数の計測とバイノーラル再生にかかわる諸問題, Fundamentals Review, 2 巻 4 号, pp. 68~85 (2009).
- 15) 西野隆典, 中井勇祐, 武田一哉, 板倉文忠 : 重回帰分析に基づく頭部伝達関数の推定, 電子情報通信学会論文誌, J84-A 巻 3 号, pp. 260~268 (2001).
- 16) 西塔宏二, 岩谷幸雄, 鈴木陽一 : 定位感に基づいて勝ち抜き選択された HRTF による音像定位, FIT2005 講演論文集, pp. 381~383 (2005).
- 17) 飯田一博, 中村一啓 : 正中面の頭部伝達関数の非個人化に関する一考察, 日本音響学会講演論文集, pp. 297~298 (Sept. 2000).
- 18) 松井健太郎, 安藤彰男 : ICA を用いた個人性頭部伝達関数の推定に関する検討, 日本音響学会講演論文集, pp. 605~606 (Sept. 2008).
- 19) T. Nishino, N. Inoue, K. Takeda, F. Itakura : Estimation of HRTFs on the horizontal plane using physical features, Applied Acoustics, Vol. 68, No. 8, pp. 897~908 (2007).
- 20) H. Møller, D. Hammershøi, C. Jensen, M. Sørensen :

- Transfer characteristics of headphones measured on human ears, *J. Audio. Eng. Soc.*, Vol. 43, No. 4, pp. 203~217 (1995).
- 21) 小澤賢司, 金澤永治, 鈴木陽一: ヘッドホンを用いたバイノーラル再生における個人性補正の効果, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 5巻3号, pp. 949~956 (2000).
 - 22) 渋谷亮輔, 岩谷幸雄, 鈴木陽一: ヘッドホンにおける個人性を加味したFEC特性の検証, *信学技報 EA 2003-60*, pp. 21~26 (2003).
 - 23) 岩谷幸雄: バイノーラル収録・再生における課題—ヘッドホンの自由空間等価特性の影響—, *日本音響学会誌*, 61巻7号, pp. 386~391 (2005).
 - 24) 飯田一博, 松田潤一, 村瀬敦信, 森本政之: ヘッドホン3D音響再生における外耳道伝達関数補正の効果, *日本音響学会講演論文集*, pp. 561~562 (Sept. 2002).
 - 25) T. Looki: Physically based Auralization — Design, Implementation and Evaluation, Doctoral dissertation in Helisinki University of Technology (2002).
 - 26) J. Scarpaci, H. Colburn, J. White: A system for real-time virtual auditory space, in *Proc. 11th International Conference on Auditory Display (ICAD 2005)*, pp. 241~246 (2005).
 - 27) E. Wenzel, J. Miller, J. Abel: Sound Lab: A real-time, software-based system for the study of spatial hearing, *Audio Engineering Society 108th Convention, Pre-print*, 5140 (2002).
 - 28) 矢入 聡, 岩谷幸雄, 鈴木陽一: 頭部運動感応型ソフトウェア聴覚ディスプレイの開発, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 11巻3号, pp. 437~446 (2006).
 - 29) 大谷 真, 平原達也: Windows上で動作する動的聴覚ディスプレイ, *日本音響学会講演論文集*, pp. 711~712 (Mar. 2007).
 - 30) 大谷 真, 平原達也, 伊勢史郎: 汎空間型動的聴覚ディスプレイ, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 12巻4号, pp. 453~460 (2007).
 - 31) M. Otani, T. Hirahara: Auditory artifacts due to switching head-related transfer functions of a dynamic virtual auditory display, *IEICE Trans.*, Vol. E91-A, No. 6, pp. 1320~1328 (2008).
 - 32) 平原達也, 戸嶋巖樹, 植松 尚: 頭部の3次元運動に追従するダミーヘッドシステム—テレヘッド (Tele-Head)—, *人工知能学会研究会資料 SIG-Challenge-0216-8*, pp. 45~52 (2002).
 - 33) 戸嶋巖樹, 植松 尚, 青木茂明, 平原達也: 頭部運動を再現するダミーヘッド: テレヘッド, *日本音響学会誌*, 61巻4号, pp. 197~207 (2005).
 - 34) 戸嶋巖樹, 青木茂明, 平原達也: 頭部運動を再現する改良型ダミーヘッドシステム—テレヘッドII—, *日本音響学会誌*, 62巻3号, pp. 244~254 (2006).
 - 35) I. Tushima, S. Aoki, T. Hirahara: Sound localization using an acoustical telepresence robot: TeleHead II, *Presence*, Vol. 17, No. 4, pp. 365~375 (2008).
 - 36) H. Kawano, H. Ando, T. Hirahara, C. Yun, S. Ueha: Application of a multi-DOF ultrasonic servomotor in an auditory tele-existence robot, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, No. 5, pp. 790~800 (2005).
 - 37) 平原達也, 大谷 真: 頭部伝達関数と音像定位を巡る諸問題, *日本音響学会講演論文集*, pp. 1477~1480 (2009.03).
 - 38) 小西正一: フクロウの音源定位の脳機能, *科学*, 60巻1号, pp. 18~28 (1990).
 - 39) 菅乃武男: 聴覚野の機能的構成, *生体の科学*, 31巻6号, pp. 466~473 (1980).
 - 40) A.N. Popper, R.R. Fay Eds.: *Hearing by Bats* (Springer-verlag, New York, 1995).
 - 41) E. Young, K. Davis: Circuitry and functions of the dorsal cochlear nucleus, in *Integrative Functions in the Mammalian Auditory Pathway*, D. Oertel, R.R. Fay and A.N. Popper Eds. (Springer-verlag, New York, 2002), pp. 160~206.
 - 42) T. Yin: Neural mechanisms of encoding binaural localization cues in the auditory brainstem, in *Integrative Functions in the Mammalian Auditory Pathway*, D. Oertel, R.R. Fay and A.N. Popper Eds. (Springer-verlag, New York, 2002), pp. 99~159.
 - 43) 平原達也, 古川茂人: 聴覚の生理学, 内川恵二編, *講座 感覚・知覚の科学 3, 聴覚・触覚・前庭感覚* (朝倉書店, 東京, 2008), pp. 1~63.
 - 44) J. Moore: The human auditory brain stem: A comparative view, *Hearing Research*, Vol. 29, No. 1, pp. 1~32 (1987).