

相反法による頭部伝達関数の高速計測システム*

今井悠貴, ©森川大輔, 平原達也 (富山県立大)

1 はじめに

HRTF は、通常外耳道入口にマイクロホン
を、頭部の周囲にラウドスピーカを置き、ラ
ウドスピーカからマイクロホンまでの音響イン
パルス応答を求める直接法によって計測さ
れている。この直接法で複数の音源位置での
HRTF を測る場合、測定位置ごとの計測を繰
り返す必要があり、計測時間が長時間に及ぶ。
一方、ヘルムホルツの相反定理に基づいて、
スピーカとマイクロホンの位置を入れ替えて
音響インパルス応答を計測し、HRTF を求め
る相反法がある[1]。この相反法では、一度の
信号放射で多点の音響インパルス応答を同時
に計測できるため、HRTF の計測時間は短く
なる。

本報告では、我々が開発した相反法による
HRTF 高速計測システムとその評価、および
それを用いて計測した近接場の HRTF につい
て述べる。

2 HRTF 高速計測システム

HRTF 高速計測システムを Fig. 1 に示す。
計測システムは、Linux PC、AD・DA 変換器、
耳栓スピーカ、マイクアレイ、マイクプリア
ンプ等で構成されている[2]。AD・DA 変換器
(DASmini-E2000, COMEX) のサンプリング
周波数 F_s は 48 kHz、量子化ビットは 24 bit
とした。耳栓スピーカは、挿入型イヤホン
(HS-930i, CREATIVE) から取り出した超小型

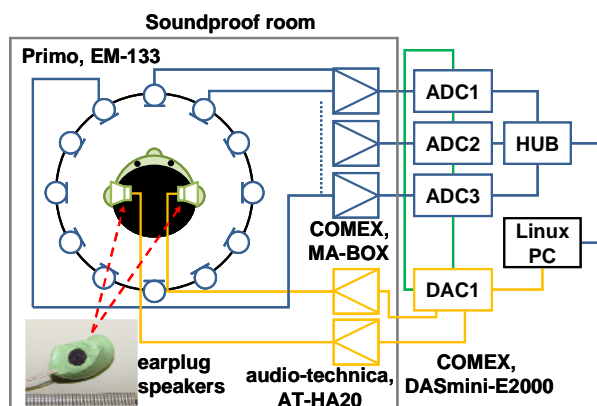


Fig.1 相反法 HRTF 計測システム

動電型スピーカユニット[3]をシリコーン印
象材に埋め込んだものである。マイクは小型
ECM (EM-133, Primo) を用いた。

両耳からマイクロホンまでの音響インパ
ルス応答 ir の計測には、65,535 点の OATSP 信
号[4]を用い、左右の耳栓スピーカから交互に
放射した。加算平均回数を 20 回とした場合、
両耳の ir の総計測時間は約 55 秒であった。

計測は暗騒音レベルが $L_A = 16.5$ dB の防音
室で行った。

3 信号処理

加算平均によって求めた ir から、室内の反
射音を除去するために、全方位で最も到達時
間の早い ir の最大値の 10 点前から、140 点
(約 3 ms) を矩形窓で切り出した。窓の立下り
部分は 63 点の余弦関数として。これらを左右
の耳で 512 点の ir とした[2]。

この ir には、耳栓スピーカや ECM 等の電
気音響系の特性が含まれている。そのため、
頭部中心位置に耳栓スピーカを置き、頭部が
無い場合の音響インパルス応答 ir_0 を同様の
方法で計測し、周波数領域で ir を ir_0 で除す
ることで、電気音響系の周波数特性をキャン
セルした。

4 計測結果

4.1 システムの評価

同じ実頭の HRTF を相反法と直接法で計測
した。相反法では、頭部中心から半径 1 m、
高さ 1.1 m の水平面円周上に 10° 間隔で 36
個の ECM を設置し、HRTF を計測した。直接
法では、相反法による計測システムの耳栓ス
ピーカの代わりにラウドスピーカ (Vifa,
MG10SD-0908) を、ECM の代わりに耳栓マイ
クロホンを用い、ラウドスピーカを 10° ず
つ動かすことで、HRTF を計測した。

距離 1 m で測った、両者の真正面の HRTF
の振幅スペクトルを Fig. 2 に示す。相反法で
は、約 500 Hz 以上の帯域の HRTF を計測す
ることができた。500 Hz 以上の帯域で両者を比

* Fast HRTF measurement system with reciprocal method,

by IMAI, Yuki, MORIKAWA, Daisuke and HIRAHARA, Tatsuya (Toyama Prefectural University).

較すると、その平均スペクトル距離は正面で 3.3 dB、全周で 4.3 dB であった。

4.2 近接場の HRTF

頭部中心から半径 0.22 m、の水平面円周上に 10° 間隔で 36 個の ECM を設置し、近接場の HRTF を計測した結果を Fig. 3 に示す。正面を 0°、左側を負、右側を正の角度として方位角を示している。半径 0.22 m では、音圧レベルが高くなることにより SN 比が向上するため、遠隔場より広帯域の HRTF が計測可能であった。

なお、近接場の HRTF を求める場合に ir_0 を用いると、両耳と頭部中心の位置が異なるため、距離減衰による誤差が含まれる。1 m 以上離れた遠隔場の HRTF を計測する場合には、この誤差は最大でも 1 dB だが、0.22 m では、距離減衰による誤差は最大で約 3 dB、両耳間音圧差は 6 dB 以上となる。そのため、 ir_0 の代わりに頭部が無い場合の両耳位置で求めた音響インパルス応答 ir_E を用いて、HRTF を求めた。 ir_0 を用いる場合には、 ir_0 を基準として各方位の HRTF の時間差が求められるが、 ir_E は方位によって伝播時間が異なる。そこで、各方位における ir_E が ir_0 と同じ伝播時間になるよう時間シフトした ir_E を用いた[5]。

5 考察

直接法での HRTF 計測では、計測時間が長くその間音源と受音点の位置関係を一定に保つことは困難である。その結果 HRTF には誤差が含まれる。一方、本システムでは、1 分以内で HRTF の計測が可能であるため、音源と受音点の位置関係を一定に保つことができる。TSP 信号の加算回数を減らすことにより、より短時間での計測も可能である。

また、直接法での HRTF の計測では、計測点の増加に比例して計測時間が長くなる。これに対して、相反法を用いた本システムでは、どれだけ計測点が多くなっても、計測時間は同じである。

さらに、頭部近傍に置いたラウドスピーカは点音源とみなせず、大きな反射物となるが、ECM は非常に小さいため、本システムでは近接場の HRTF も問題なく計測できる。

なお、本システムの唯一の欠点は、超小型動電型スピーカユニットを用いるために、低域の SN 比が低いことがある。しかし、計測

が困難な低域の |HRTF| は波長が十分に長く方位によらず 0 dB のため、HRTF は ITD を予測補完すれば問題なく利用できる[6]。また、金田らが提案するインパルス応答計測[7]等を利用することで解決できる可能性もある。

6 まとめ

相反法による HRTF の高速計測システムを構築し、直接法と同じ精度で 1 分以内に両耳の HRTF を計測できること、直接法での計測が困難な近接場の HRTF も問題なく計測できることを確認した。

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] Zotokin, *et al.*, J.Acoust. Soc. Am., 120(4), 2202-2215, 2006.
- [2] 今井 他, 信学技法 EA2012-72, 43-48, 2012.
- [3] 今井 他, 音響誌, 68(10), 513-519, 2012.
- [4] Y. Suzuki, *et al.*, J.Acoust. Soc. Am., 97(2), 1119-1123, 1995.
- [5] 今井 他, 音講論(秋), 579-580, 2012.
- [6] 森川 他, 音講論(秋), 577-578, 2012.
- [7] 北嶋 他, 音講論(秋), 767-768, 2012.

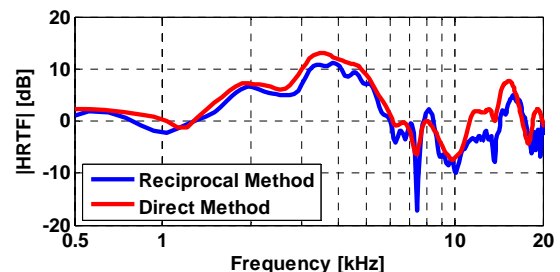


Fig.2 相反法と直接法で計測した正面 1 m の HRTF の比較

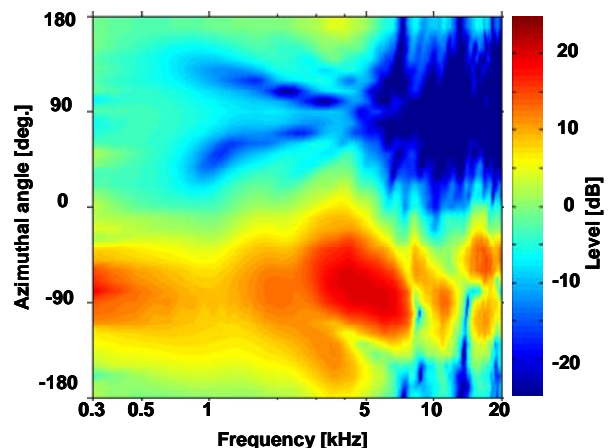


Fig.3 相反法で計測した水平面 0.22 m の HRTF のコンター図