

ヘッドホン再生による立体音響の定位誤判定を減らすための 頭部回転に合わせた頭部伝達関数変化模擬

A simulation of Head Related Transfer Function to reduce localization
misjudgment of stereophonic sound by the headphones reproduction

野尻 直生

Naoki Nojiri

法政大学情報科学部デジタルメディア学科

naoki.nojiri.3x@stu.hosei.ac.jp

Abstract

This article is spoken a technique to simulate a sound field of a speaker reproduction with headphones. This technique compensate for the dynamic change of the head related transfer function(HRTF) caused by a listener moving the head by digital signal processing. With only compensation of a static HRTF, when the sound source is presented near the median plane, a false judgment appears in the up and down and front and rear of the sound images. Therefore, a interaural time difference from the change of distance between the sound source and both ears during head rotation is calculated, and give it to the sound source along with a HRTF. The dynamic HRTF was inspected three points about lean and azimuth angle and three-dimensional head turn. The false judgment of the up and down of the sound image and front and rear of the sound image decreased by simulating a dynamic change in addition to a static HRTF, and the normal position in the head decreased. In addition, In three-dimensional simulation, false judgments decreased than two-dimensional simulation. Therefore, it became clear that movement of various head was necessary so that a person perceived the position of the sound source.

1 まえがき

ヘッドホン再生による立体的な音場の模擬を可能にするシステムを作成する。現在、VR(Virtual reality) 技術を基にしたコンテンツが普及し始めている。例えば、映画やゲームなどの娯楽や、航空機や医療現場のシミュレートなど教育用としても取り扱われている。VR 技術の目的は主に、没入感、臨場感をユーザに与えることである。立体的な映像によってその達成は可能であるが、立体的な音、特にユーザの視界に入っていない上下、左右、前後の音源位置の知覚が可能であれば、より没入感、臨場感をユーザに与えることができる。多方向からの音像定位を再現する手法としてサラウンド方式などの技術はあるが、両耳間の位相差や音圧差を用いることによる多チャンネルの再現が主であり、音像を頭外定位に対するアプローチがされていない。音像の頭外定位を模擬するためには、音源から鼓膜までの伝達情報を模擬したい音源に付与しなければならない。ここでは、頭部伝達関数を用いることで、ヘッドホン再生によ

る立体的な音場の模擬を目指す。

音像を頭外に定位させるためには頭部伝達関数が必要になる。これは、音がどのように頭を伝って鼓膜まで届くかの関数である。頭の形や耳介の形状によって起こる反射や回折は複雑であり、個人性もあるため頭部伝達関数を計算によって求めることは困難である。また、現時点では無響室内などの特殊な設備や装置が必要であり、測定にも長時間要するためユーザ本人の頭部伝達関数の測定は難しい。そのため、研究機関等のデータベースに残されている他人の頭やダミーヘッドで測定した伝達関数を代用し、音像定位などの実験が行われる研究もある [5]。そこで、本研究では西野らが測定した頭部伝達関数のデータベースを用いて模擬を行う。

頭部を静止しているときの静的な頭部伝達関数の模擬は上記で示したデータベースをそのまま用いることで可能である。しかし、頭部を静止させた状態の模擬では正確な音像定位の知覚が困難である。川浦らが発表した論文では、方位角の頭部回転に伴う両耳間遅延差を計算することによって音圧の制御を行い、音像の定位誤判定を減らしている [1]。静的な頭部伝達関数模擬で正中面内に定位誤判定と頭内定位感があるのは、両耳へ届く音に明確な音圧差がないことが原因である。前方と後方の頭部伝達関数の周波数特性には確かな差はあるが、それでは定位を区別する要素足り得ない。つまり、人が音像の定位をより正確に認識するためには頭の回転しているときの動的な頭部伝達関数の模擬が重要であると考えられる。頭部の回転に伴う両耳間の時間差や音圧差の変化がより定位の知覚に影響を与えるのである。そこで、本研究においては方位角と傾げの 3 次元的な頭部回転による両耳間の音圧差と遅延差が頭部伝達関数に与える影響を考察する。

2 ヘッドホン再生による立体的な音場模擬

2.1 静的な頭部伝達関数模擬

ここでは、ヘッドホン再生により、音像を頭外に定位させることを考える。任意の位置に置かれた音源から聴取者の左右の鼓膜面上に置かれたマイクロホンの出力端までの伝達関数を、それぞれ $H_L(j\omega)$ 、 $H_R(j\omega)$ とする。また、ヘッドホンを装着した聴取者の左右の変換器の入力端から、左右に置かれたマイクロホンの出力端までの伝達関数をそれぞれ $G_L(j\omega)$ 、 $G_R(j\omega)$ とする。ソース信号 $S(j\omega)$ を音源から発せられる音とすると、ヘッドホン再生による音像の頭外定位の模擬に用いる音源は次式で与えられる。

$$S_R(j\omega) = G_R^{-1}(j\omega) \cdot H_R(j\omega) \cdot S(j\omega) \quad (1)$$

ただし、 $G_L^{-1}(j\omega)$ と $G_R^{-1}(j\omega)$ はヘッドホン入力端から、左右の鼓膜面上のマイクロホンまでの伝達関数の逆特性である。ヘッドホン再生での立体的な音場の模擬のため、ヘッドホンの伝達関数の逆特性をあらかじめ含んだ音源を作成する必要がある。これによりヘッドホンの特性を打ち消すことが可能になる。

2.2 頭部回転に伴う頭部伝達関数の変化模擬

微小な頭部回転による頭部伝達関数の模擬を行うことによって、静的な頭部伝達関数の模擬と比べ音像の前後定位の誤判定と音像の上昇感が改善され、頭内定位感が減少したという結果が出ている。また、基の頭部伝達関数と頭部回転時の情報の不一致によっては誤判定が改善しないという結果も出たため、微小な頭部回転に伴う頭部伝達関数は静的な頭部伝達関数と同程度の重みを持つという結論であった [1]。

今回の目標は方位角、傾げ角の回転に伴う動的な頭部伝達関数の検証をする。頭を自由に回転させるときに、空間的に自然な音場の模擬を行うため、頭が微小な回転をしているときの音の変化の情報を付与することでその実現を目指す。

2.2.1 方位角の頭部回転に伴う頭部伝達関数の変化模擬

方位角の回転とは、頭部が水平面回転をしたときに伴う動的な頭部伝達関数である。頭を回転させると音源と両耳間の距離が変化する。そのことによって、両耳間の音圧差と遅延差に変化が生まれる。具体的には、音源の位置が前方か後方かで同方の頭部回転でも両耳の距離変位の正負が逆になる。つまり、両耳間の音圧差や遅延差の変化が音源位置が前方か後方によって逆になり、前後の誤判定が減るのである。

データベースにある方位角の任意の方向 θ_M の頭部伝達関数を $H_M(j\omega, \theta_M)$ とする。今この伝達関数 H_M は音源から外耳道入り口までの距離 l に依存しない項 $H_0(j\omega, \theta_M)$ と距離 l のみに依存する時間遅れ項 $\exp(-j\omega(l/c))$ をもちいて、

$$H_M(j\omega, \theta_M) = H_0(j\omega, \theta_M) \exp(-j\omega(l/c)) \quad (2)$$

と記述できる。頭部が微小に回転した時の伝達関数を模擬するためには、遅延時間項だけを模擬すればかなりの精度の模擬が行えることがわかっている [1]。また、頭は球体とみなしてよく、音源から左右の耳までの距離 l_L 、 l_R は頭の中心からの音源までの距離と角度、そして頭の半径から求める。そして、頭部回転角に対する両耳間の遅延時間差の変化率は聴取者の頭の直径、形状に関係するため個体差が大きいと思われるが、平均的な値を採用してもある程度の精度が期待できる。

2.2.2 傾げ角の頭部回転に伴う頭部伝達関数の変化模擬

先行研究の多くは、方位角の両耳間遅延差を模擬して前後誤判定を減らす試みをしている。そこで、仰角方向に注目して音像定位の上下の誤判定を減らすため、両耳間の遅延差を傾げの回転にも応用できるか考えてみる。傾げ回転とは前頭面内の回転である。両耳間の遅延差は両耳と音源の距離 l がわかればよいので、仰角傾げの回転に伴う頭部伝達関数は、方位角の頭部回転と面が異なるだけで同様の計算で模擬することが可能であることがいえる。よって、データベースにある傾げ角の任意の方向 θ_Q の頭部伝達関数を $H_Q(j\omega, \theta_Q)$ とすると、

$$H_Q(j\omega, \theta_Q) = H_0(j\omega, \theta_Q) \exp(-j\omega(l/c)) \quad (3)$$

と記述できる。前記したように、頭は球体として考えてよいので、方位角の回転時と同様に音源から頭の中心までの距離と角度、そして頭の半径を用いて音源から左右の耳までの距離を計算する。

仰角の仰ぎの頭部回転に伴う頭部伝達関数は両耳間遅延差の変化に影響を与えないため、ここでは考えないこととする。

3 評価実験用の3次元音響システム

正中面での音像定位、つまり仰角方向にある音像の前方と後方、上方と下方の定位誤判定を減らすため、頭を3次元的に回転させた状態での動的な頭部伝達関数の模擬を行う。これには、2節で述べた方位角の回転、仰角の傾げの両方に伴う動的な頭部伝達関数を組み合わせて行う必要がある。音源が(前方、上方)、(前方、下方)、(後方、上方)、(後方、下方)の各位置で場合分けを行わなければならない。例えば、音源が(後方、下方)にあるときは、方位角の微小な回転時には後方モードにして傾げ角の微小な回転時には下方モードにする必要がある。

データベース内の3次元空間の任意の方向 (θ_M, θ_G) の頭部伝達関数を $H(j\omega, \theta_M, \theta_G)$ とする。 θ_M 、 θ_G は方位角と仰角を表している。この伝達関数 H は音源から外耳道入り口までの距離 l に依存しない項 $H_0(j\omega, \theta_M, \theta_G)$ と距離 $l(\theta_M, \theta_G)$ のみに依存する時間遅れ項 $\exp(-j\omega(l/c))$ をもちいてそれぞれ、

$$H_L(j\omega, \theta_M, \theta_G) = H_{L0}(j\omega, \theta_M, \theta_G) \exp(-j\omega(l_L/c))$$

$$H_R(j\omega, \theta_M, \theta_G) = H_{R0}(j\omega, \theta_M, \theta_G) \exp(-j\omega(l_R/c)) \quad (4)$$

と記述できる。頭部の微小な回転 $-\delta\theta_M$ と $-\delta\theta_G$ による頭部伝達関数の微小変化はそれぞれ

$$\delta H_L = H_{L0} \frac{\delta}{\delta\theta_M} \frac{\delta}{\delta\theta_G} (\exp(-j\omega(l_L/c))) \delta\theta_G \delta\theta_M$$

$$\delta H_R = H_{R0} \frac{\delta}{\delta\theta_M} \frac{\delta}{\delta\theta_G} (\exp(-j\omega(l_R/c))) \delta\theta_G \delta\theta_M \quad (5)$$

と記述できる。 H_0 の θ_M 、 θ_G に対する偏微係数はほぼ0であると期待されるのに対して時間遅れ項は音源から外耳道入り口までの距離が変化するため大きく変化する。頭部の半径は平均的な値を採用しても効果が得られることが報告されている [1]。また、正中面付近の遅延差は近似的な値を用いることができるが、今回は正中面付近以外の方向の遅延差も求める。

ここで問題になるのは、音源の位置が前方か後方、上方か下方かによって方位角と傾げの回転両方に伴う両耳間の時間差変化率の符号が逆になることである。頭部の回転に違和感なく符号を変化させるためには提示角度 θ_M 、 θ_G を、前方後方モードと上方下方モードを選択するための情報として用いる必要がある。また、その情報を保持して回転時の変化率の計算をする。頭部固定時で提示した状態での元ある両耳間時間差に対して回転時の時間変化を付与する。3次元の回転であるので、回転の方向によっては効果打消しや効果の増大なども起こりうる。よって、より自然な回転に対応した頭部伝達関数変化模擬が行える。

平原達也らのパーソナルダミーヘッドで集音した信号をヘッドホン再生し、聴取者の頭の回転に合わせてダミーヘッドが回転する実験では、頭部を動かすと音源の前後誤判定が減少し、ほとんどの音が頭外定位したと方向されている [7]。よって、今回は一人分の頭部伝達関数を用いて実験を行う。データ内にあるインパルス応答は標準化周波数 44,100Hz、長さは 512 点、測定方位は 72 方位 (5 度間隔)、測定高さは 28 方位 (-45 度から 90 度) (5 度間隔) である。インパルス応答である頭部伝達関数を離散フーリエ変換する。そして、フィルターとして音源に付与し模擬する。

システムの開発は MATLAB で行う。方位角と傾げ角の頭部回転に伴う両耳間時間差は Android の方位センサーを用いて、3次元の頭部回転のデータを取得して計算する。また、頭の回転に合わせて頭部伝達関数を 5 度おきに当てはめる。頭部伝

達関数の当てはめは、仰角の変化もある。そこで、Android センサーの方位角、仰角、傾げ角全てを用いて座標を計算して当てはめる。模擬の際の計算は、センサーが頭の中心にあるとするのが理想だが、物理的に不可能である。そのため、Android 端末は両耳を線で結んだ際の中点位置のヘッドホンアームに設置する。MATLAB 上で頭部伝達関数データベースとセンサーデータを用いて動的な頭部伝達関数の模擬を行う。そして、出来るだけリアルタイムで受聴者に音を提示できるシステムを作成し聴取実験を行う。

4 聴取実験

2、3 節で述べた動的な頭部伝達関数模擬の手法を用いて、静的な頭部伝達関数の模擬のみを行った場合、方位角の頭部回転に伴う頭部伝達関数の模擬を行った場合、傾げ角の頭部回転に伴う頭部伝達関数の模擬を行った場合、最後に 3 次元の頭部回転に伴う頭部伝達関数の模擬を行った場合の 4 通りの聴取実験を行う。それぞれの回転が、前後や上下の音像定位に与える影響を検証する。

まず、全実験に共通する実験条件を述べる。被験者は正常な聴力を有する大学生 5 名である。模擬する音源の提示位置は正中面内の 9 方向である。被験者から見て真上を 0 度とする。被験者の前方を正、後方を負とし -120 度から 120 度の範囲を 30 度おきに提示する。被験者の頭の中心から音源までの距離は 1.5m とする。実験の前に、被験者全員について、ヘッドホン再生状態における、外耳道入り口に置かれたマイクロホンの出力端までの伝達関数を測定した。使用する音源は、ピンクノイズと音声を用意した。ピンクノイズを用いる理由は、どのオクターブ帯域においても音の大きさが均等に感じ取れる音であるからである。音声は、一人称視点の映像コンテンツを想定しているからである。それぞれの音源について 9 方向、繰り返し数 3 とし、合計 27 の刺激音をランダムな順で提示する。

4.1 静的な頭部伝達関数模擬の実験

静的な頭部伝達関数の模擬のみを行う実験では、被験者には刺激音を 5 秒間提示して、音の出ている間は目をつぶり、刺激音の切れ目で目を開けて、知覚した音像の定位を解答用紙に記入してもらう。被験者には頭を動かさないように指示をする。回答の内容は、音像方向を方位角では真上を 0 度とし、正面を 90 度とする。前方にあるとき + を、後方にあるとき - を記入する。また、知覚した音源の距離を以下の番号で記入する。

1. 頭の中心付近
2. 頭の表面付近だが党内
3. 頭外だが頭の付近
4. 手を伸ばせば届くくらいの距離
5. 測定の際のラウドスピーカのあった位置 (1.5m)
6. 5 より遠い

ピンクノイズを使用した結果 (図 1) を示す。図の横軸は提示角度、縦軸は被験者が知覚した角度を表している。黒丸は知覚した角度を表し、その大きさは被験者が知覚した数の平均値の大きさに比例している。赤線上の黒丸は前後に対称な誤判定を表す。青線は上下に対称な誤判定を表す。

図では、-120 度のように後方に提示した音源に対して 120 度のように前方にあると被験者が知覚している。他にも赤線上に黒丸が頻発していることから前後の誤判定が生じていることがわかる。また、-60 度のように上方に提示した音源に対して -120 度のように下方にあると被験者が知覚している。他にも青線上に黒丸が頻発していることから上下の誤判定が生じてい

ることがわかる。このように、静的な頭部伝達関数では、正中面内の誤判定が起こる。上下前後を対称的に間違えるわけではなく、誤判定をした知覚角度に特徴は見られない。

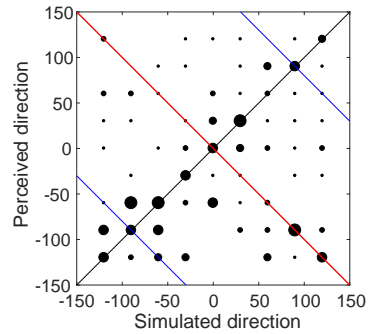


図 1 静的な頭部伝達関数模擬

4.2 動的な頭部伝達関数の模擬実験

動的な頭部伝達関数の模擬のみを行う実験では、方位角の頭部回転に伴う頭部伝達関数の模擬実験、傾げ角の頭部回転に伴う頭部伝達関数の模擬実験、そして 3 次元の頭部回転に伴う頭部伝達関数の模擬実験の 3 種類を行う。0.1 秒の音源と 0.02 秒の無音区間のセットを連続で提示する。被験者には、刺激音提示中は目をつぶり、頭を最大で方位角と傾げ角 ± 30 度程度まで自由に回転させ、音像の定位が安定した時に目を開けて回答を記入するように指示を与える。記述内容は前記実験と同様の内容である。頭部回転時に取得できる Android 端末のセンサーデータは 0.1 秒単位での取得である。また、システム上での両耳間遅延差やフィルタ等の処理があるため被験者にはできるだけゆっくりと頭を回転させるように指示を与える。以下、ピンクノイズを使用した結果を示す。

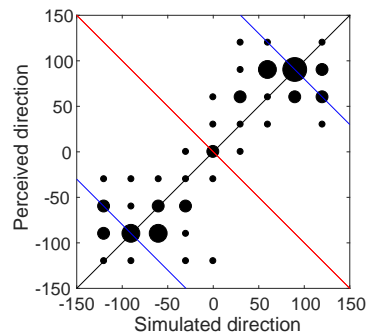


図 2 方位角の頭部回転に伴う頭部伝達関数模擬

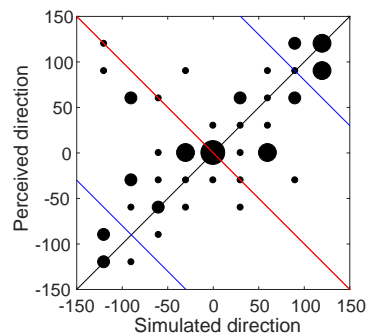


図 3 傾げ角の頭部回転に伴う頭部伝達関数模擬

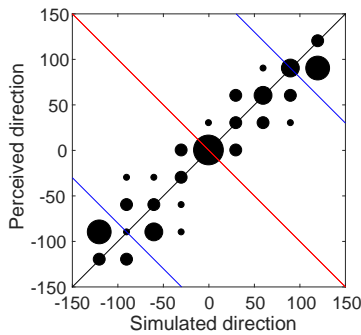


図4 3次元回転に伴う頭部伝達関数模擬

図2の方位角回転では、提示角度に対する知覚角度の正負が一致していることから前後の誤判定が減少していることがわかる。しかし、絶対値120度のように下方に提示した音源に対して絶対値90度未満のように上方にあるとの回答があることから、上下の誤判定が生じている。また、頭頂部付近の音像の誤判定が高い傾向にある。

図3の傾げ角回転では、提示角度に対する知覚角度の正負が異なる回答があることから前後の誤判定が生じていることがわかる。しかし、絶対値120度のように下方に提示した音源に対して絶対値90度未満のように上方にあるとの回答がないことから、上下の誤判定が減少していることがわかる。また、絶対値90度付近にある音像の誤判定が高い傾向がある。

図4の3次元回転では、提示角度に対する知覚角度の正負が一致していることから前後の誤判定が減少していることがわかる。また、絶対値120度のように下方に提示した音源に対して絶対値90度未満のように上方にあるとの回答がないことから、上下の誤判定が減少していることがわかる。 ± 30 度程度の誤判定はあるが、前後と上下を対称的に間違えることはなくなった。

音声を用いた実験では、ピンクノイズを用いた時と同様の結果であった。

5 考察

方位角回転では、両耳を結んだ直線に対して前後に線対称な誤判定が見られない。この理由は、回転による両耳間の音圧差の変位が前後では逆になるためである。また、 ± 90 度付近の誤判定が減少したのは、回転時の両耳間の音圧差の変化が0度付近と比較して大きいことが挙げられる。傾げ角回転によって上下の誤判定が減少したのは、方位角回転による前後の誤判定が減少した理由と同様であり、水平面での回転を前頭面に置き換えたためである。そのため、 ± 90 度の点を結んだ直線に対して上下に線対称な誤判定が減ったのである。0度付近の誤判定が減少したのは両耳間の音圧差の変化が大きいことが挙げられる。3次元回転の模擬では、前方上方、前方下方、後方上方、後方下方の4通りの判定が他の実験と比べて向上している。

3次元回転の実験で ± 30 度の定位誤判定が生じる原因として、頭部伝達関数データベースの被測定者の両耳間時間差を用いたことが挙げられる。両耳間時間差は音源から両耳までの距離に依存するため、頭の大きさによって変化する。被験者の頭の大きさが使用する伝達関数の被測定者より大きい場合、両耳間時間差の変化が日常経験しているものより少なくなる。そして、方位角回転時に音源位置が真上または真下に近づくにつれて、両耳間時間差変化は少なくなることから、伝達関数の被測定者より頭部の大きい被験者には、水平面にある音像が上昇ま

たは下降して知覚される。逆に、伝達関数の被測定者より頭部の小さい被験者には上方または下方に提示した音が水平面にあると知覚される。今回、被験者達の頭の半径7.9cmから9.5cmであり、半径7.9cmと8.1cmの被験者の評価値が高い。被験者数を増やし検証する必要があるが、頭部の大きさによる両耳間時間差が誤判定に影響している。

6 あとがき

デジタル信号処理の手法等を用いて、ヘッドホン再生でのラウドスピーカ再生時の音場の模擬をすることにより、正中面内上に音像を頭外定位させる手法を提案し、聴取実験によってその有効性を検証した。

正中面内の音源から外耳道入り口までの動的な頭部伝達関数模擬を行うことによって、静的な模擬模擬の際の定位誤判定が減少した。また、2次元的な模擬と比較して3次元的な模擬では誤判定が減少した。このことから、人が音源の位置を知覚するためには様々な頭部の動きが必要であることが明らかになった。

今後の課題として、3次元回転時の誤判定を減らすため被験者毎に両耳間時間差を測定し、それを基に計算値から全方位の模擬をする必要がある。

参考文献

- [1] 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”, 音響誌 45 巻 10 号 756-766 (1989)
- [2] F.M.Wiener and D.A.Ross, “The pressure distribution in the auditory canal in a progressive sound field”, J.cottst.Soc.Am.18. 401-408 (1946)
- [3] 川浦淳一, 鈴木陽一, 曾根敏夫, 相馬次朗, “デジタル信号処理を用いた音響系の模擬手法について”, 音響誌 42 巻 10 号 774-779 (1986)
- [4] 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 Vol.2 No.4 68-85 (2009)
- [5] 草野友輝, 斎藤康之, “三次元音像制御における頭部伝達関数の個人化”, ITE Technical Report Vol.40, No.5 25-28 (2016)
- [6] B.C.J.Moore, S.R.Oldfield, G.J.Doolev, “Detection and discrimination of spectral peaks and notches at 1 and 8 kHz”, J.acoust.Soc.Am vol.85. 820-836 (1980)
- [7] 平原達也, 吉崎大輔, 塚田孝光, “テレヘッド六号機の運動特性と騒音特性と音像定位性能”, 音響誌 71 巻 11 号 563-570 (2015)
- [8] 平原達也, 吉崎大輔, 塚田孝光, “テレヘッド四号機及び六号機の運動特性と音響特性”, 信学技報 IEICE Technical Report 49-54 (2012)
- [9] 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “水平方向及び仰角方向に関する頭部伝達関数の補間”, 音響誌 57 巻 11 号 685-692 (2001)
- [10] 飯田一博, 石井要次, 西岡伸介, “耳介形状から推定したスペクトラルノッチ周波数に基づいた頭部伝達関数の個人化”, 信学技報 IEICE Technical Report 51-61 (2013)
- [11] 大橋幸則, 村越一支, “聴覚特性に基づいた頭部伝達関数の補正による音像定位精度の改善”, 信学技報 IEICE Technical Report 85-88 (2012)