

平成 25 年度

学士学位論文

未計測方向からの頭部伝達関数推定

Head-related transfer function estimation from
unmeasured direction

1140291 浅尾 将司

指導教員 福本昌弘

2014 年 2 月 28 日

高知工科大学 情報学群

要 旨

未計測方向からの頭部伝達関数推定

浅尾 将司

近年、デジタル処理技術の発展により、3次元の情報を提示するシステムが多く実現されている。私たちが普段生活しているなかで感じる知覚はアナログの情報を3次元の情報として知覚しているため、同じ情報をデジタル処理で作る際には、様々な付加的な情報を付け加える必要がある。3次元の情報をデジタル処理で作成する方法の中で、音に距離感や方向などの情報を与える技術として、立体音響技術がある。しかし立体音響の技術では聞こえ方に個人差があるという問題がある、立体音響技術を今より発展させるためには、この問題を解決する必要がある。解決の手法として個人の頭部伝達関数を用いることがあげられるが、測定に手間と時間がかかるという問題を抱えている。

本論文では、測定にかかる手間と時間を減らすために、少ない計測点から頭部伝達関数を推定することを目的とし、輻輳角モデルと逆2乗の法則、音の遅延特性を用いて、2点の計測された頭部伝達関数から間の点からの頭部伝達関数を推定する手法を提案し、提案手法の有用性について検証を行っている。検証の結果より、提案手法を用いて推定される頭部伝達関数は実測値と比較すると別の値となっているが、実測値の代わりとして使用できると考えられる。

キーワード 頭部伝達関数 輻輳角モデル 逆2乗の法則 音の遅延

Abstract

Head-related transfer function estimation from unmeasured direction

Recently, a system with the development of digital signal processing technology, presents three-dimensional information are realized more. As we live normally, we have information perceived as a three-dimensional information of the analog. The stereophonic sound is a method of representing digitally the information of three-dimensional. However, it has a problem that there are individual differences in how to hear. To solve the problem, there is a method of using head-related transfer function (HRTF) of an individual. However, time and effort is taken to measure it. In this paper, it is intended to estimate the HRTF of a small measuring point. We propose a new method which uses the inverse square law, convergence angle model and the delay of the sound, by using HRTF from two points, to estimate the HRTF from a point between the aforesaid two points. And we verified the proposed method. From the result of the verification, I presented the possibility that the HRTF which was estimated is in place of the HRTF actually measured.

key words head-related transfer function, convergence angle model,
inverse square law, the delay of sound

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の目的と背景	1
1.2	本論文の構成	1
第 2 章	頭部伝達関数	3
2.1	はじめに	3
2.2	頭部伝達関数	3
2.3	頭部伝達関数の測定	4
2.3.1	適応フィルタ [4]	5
2.4	まとめ	6
第 3 章	輻輳角モデルと補整	7
3.1	はじめに	7
3.2	音量の変化と遅延	7
3.2.1	逆 2 乗の法則	7
3.2.2	音の遅延	8
3.3	輻輳角モデル [5]	8
3.4	まとめ	10
第 4 章	未計測方向からの頭部伝達関数推定	11
4.1	はじめに	11
4.2	2 点の計測点から間の点からの頭部伝達関数推定	11
4.2.1	仮想音源の頭部伝達関数決定	12
4.2.2	計測した 2 点の間の点からの頭部伝達関数の推定	15
4.2.3	インパルス応答の変化	15

4.3	提案手法の検証	16
4.3.1	実験の際の頭部伝達関数のインパルス応答	16
	ダミーヘッドの頭部伝達関数のインパルス応答	18
	個人の頭部伝達関数のインパルス応答	20
4.4	推定した頭部伝達関数の評価	22
4.5	まとめ	23
第 5 章	結論	25
5.1	本研究のまとめ	25
5.2	今後の課題	25
	謝辞	26
	参考文献	27

図目次

2.1	頭部伝達関数の測定について	4
2.2	適応フィルタ	6
2.3	頭部伝達関数のインパルス応答測定時の適応フィルタ	6
3.1	音源の距離変化	9
3.2	輻輳角モデルの概念図	9
4.1	仮想音源と推定する音源の点決定	13
4.2	補整に使用する距離	14
4.3	補整を行った際のインパルス応答の変化	16
4.4	実験環境	17
4.5	正面方向 0° のときの左耳の頭部伝達関数のインパルス応答	18
4.6	正面 0° 方向のときの右耳の頭部伝達関数のインパルス応答	18
4.7	左 10° 方向のときの左耳の頭部伝達関数のインパルス応答	18
4.8	左 10° 方向のときの右耳の頭部伝達関数のインパルス応答	18
4.9	推定した左耳の頭部伝達関数のインパルス応答	19
4.10	推定した右耳の頭部伝達関数のインパルス応答	19
4.11	推定した点について実測した左耳のインパルス応答	19
4.12	推定した点について実測した右耳のインパルス応答	19
4.13	正面方向 0° のときの左耳の頭部伝達関数のインパルス応答	20
4.14	正面 0° 方向のときの右耳の頭部伝達関数のインパルス応答	20
4.15	左 10° 方向のときの左耳の頭部伝達関数のインパルス応答	20
4.16	左 10° 方向のときの右耳の頭部伝達関数のインパルス応答	20
4.17	推定した左耳の頭部伝達関数のインパルス応答	21

4.18 推定した右耳の頭部伝達関数のインパルス応答	21
4.19 推定した点について実測した左耳のインパルス応答	21
4.20 推定した点について実測した右耳のインパルス応答	21

表目次

4.1	実験環境	17
4.2	アンケート結果 (3 音声提示した場合)	22
4.3	アンケート結果 (2 音声提示した場合)	23

第 1 章

序論

1.1 本研究の目的と背景

日常生活のなかで人間は音の到来方向や距離を知覚することができる。この知覚には頭部伝達関数に関わっている。頭部伝達関数を利用してデジタル信号処理をおこない、音声に 3 次元の情報を与えることによって、高さや角度、距離の情報を持ったデータとして表現する手法として立体音響技術がある。しかし、頭部伝達関数には個人差があり、立体音響としてつくられた音声を聴いても正しく聴取できないことがある。この問題を解決するためには、個人の頭部伝達関数を用いてデジタル処理を行えばよい。しかし、頭部伝達関数の計測には時間がかかり、被計測者の負担も大きい。[1] そこで本研究では、頭部伝達関数を少ない計測点から推定する手法を提案し、推定をおこなった頭部伝達関数について、実際に同じ位置からの頭部伝達関数を計測して比較することにより、評価をおこなった結果を述べる。

1.2 本論文の構成

ここでは本論文の構成について述べる。第 2 章では立体音響を作成する際に用いられる頭部伝達関数について頭部伝達関数とはどういうものかまた、どのように計測を行うかを述べる。第 3 章では本研究においても使用している、音像の距離定位に重点をおいた頭部伝達関数の推定手法である輻輳角モデルについて説明し、輻輳角モデル内で使用される音声の補整手法について述べる。第 4 章では輻輳角モデルと補整手法を用いて計測された 2 点からの頭部伝達関数を用いて計測した 2 点の間の点からの頭部伝達関数を推定する手法を提案し、提

案手法について評価を行った結果と提案手法についての考察を述べる。最後に本研究で得られた結果をもとに第 5 章で結論を述べる。

第 2 章

頭部伝達関数

2.1 はじめに

近年、デジタル処理技術の発達により、3次元の情報を提示するシステムが多く実現されている。我々が生活しているなかで感じる感覚はアナログの情報だが、その情報をデジタルの世界で表現するために様々な手法が用いられている。そのなかで、聴覚について3次元の知覚を提示する立体音響という技術がある。立体音響の技術には大きく分けて2種類の方法があり、実際に録音を行った音をそのまま再生する方法と音声データに対してデジタル処理を行うことで擬似的に立体的な音を作り出す方法がある。音声に対してデジタル処理を行い立体的な音を作るために用いられるデータとして頭部伝達関数がある。本章では、頭部伝達関数について説明するとともに、測定方法について述べる。

2.2 頭部伝達関数

頭部伝達関数とは、人の耳に音が届く際に生じる音の変化を伝達関数として表現したものである。音を立体的に表現する方法として音源の位置から左右の耳への距離を使って、音の到達時間差、音の強度差を算出し、音に対して補正を行うことによって立体音響を実現する方法があるが、距離だけを用いているため、音源と耳の間の距離が同じ点が別の位置にも存在しているため正しい知覚を行うことができない。頭部伝達関数には到達時間差と強度差それぞれが含まれており、さらに周辺物の影響による音の変化の情報を含んでいるため上下左右の区別が可能となる。頭部伝達関数を利用することにより、音に3次元的な方向や距離、

拡がりなどを与えることができる。しかし頭部伝達関数には個人差があるため、結果として音の聞こえかたに差が生じることがある。この理由として、一般的に立体音響として作られた音はダミーヘッドなどの平均的な値の頭部伝達関数を用いているため聴取者によっては、立体的に感じるできない場合がある。この問題を解決するためには、個人用の頭部伝達関数を使用すればよいが、個人用の頭部伝達関数は計測に時間と手間がかかる。そのため、少ない計測点から頭部伝達関数を推定または補間する方法が多数提案されている。[2][3]

2.3 頭部伝達関数の測定

頭部伝達関数はマイクを中心とした球の表面上の点に音源をおいて計測される。図 2.1 は頭部伝達関数測定時の様子を上から見たときの、球を 8 分割した際の左上の図である。このとき点から計測された頭部伝達関数は正面から見て左方向 30° 高さ 20° の点における頭部伝達関数である。

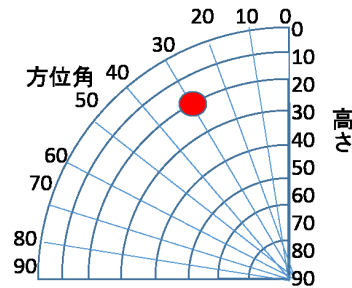


図 2.1 頭部伝達関数の測定について

頭部伝達関数測定時にスピーカーから出力される信号を入力信号、マイクから入力される信号を出力信号として計測されるが、このとき頭部伝達関数のインパルス応答について考えると、入力信号 $f(t)$ と出力信号 $g(t)$ 、インパルス応答 $h(t)$ とすると

$$g(t) = f(t) * h(t) \quad (2.1)$$

の形で表される。このとき*は畳み込みを表す。

この式についてフーリエ変換を行うと

$$G(\omega) = F(\omega) \times H(\omega) \quad (2.2)$$

の形となり $H(\omega)$ が頭部伝達関数を表す。上の式を $H(\omega)$ について解くと

$$H(\omega) = \frac{G(\omega)}{F(\omega)} \quad (2.3)$$

となり伝達関数を計算することができる。

頭部伝達関数を計測する際には入力信号としてホワイトノイズやスイープ信号が利用される。また、頭部伝達関数を測定する際に人間の代わりとしてダミーヘッドが用いられることが多い。大きな理由として計測に時間がかかり被計測者の負担が大きいことと頭部及び体が動くことによって頭部伝達関数の正しい計測が行えないことがあげられる。

2.3.1 適応フィルタ [4]

頭部伝達関数のインパルス応答を求める手法として適応フィルタを用いる方法がある。適応フィルタは、入力信号と所望信号が与えられているときに所望信号に近い出力信号を生成するフィルタ係数を算出するシステムである。適応フィルタは、図 2.2 のとき、入力信号 $x(t)$ と 所望信号 $d(t)$ を用いて、所望信号 $d(t)$ との誤差 $e(t)$ がなるべく小さくなる出力 $y(t)$ を算出するフィルタ係数を生成する。

ある入力に対する出力が常に一定のシステムにおいて、適応フィルタの係数は、ある入力に対する伝達特性を示す。頭部伝達関数を適応フィルタを使用して求める際の考え方を以下に示す。

頭部伝達関数の計測において、入力信号を適応フィルタに対する入力、出力信号を所望信号とすることで、作成される適応フィルタは頭部伝達関数のインパルス応答になる。このときのシステム全体の図は 2.3 のとおりである。

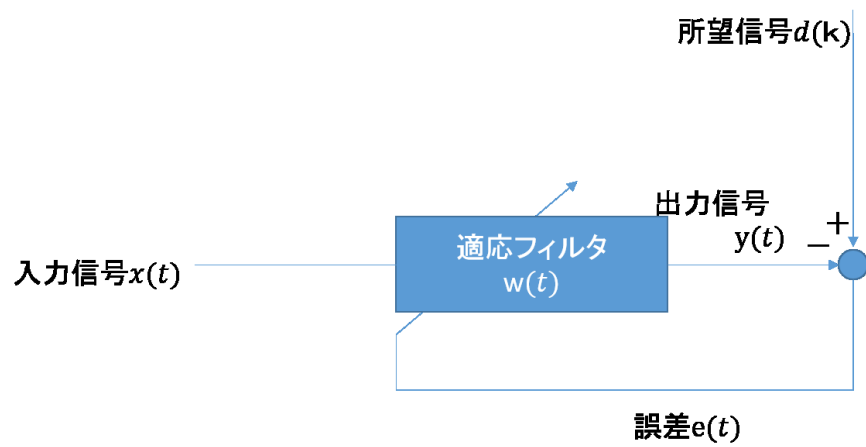


図 2.2 適応フィルタ

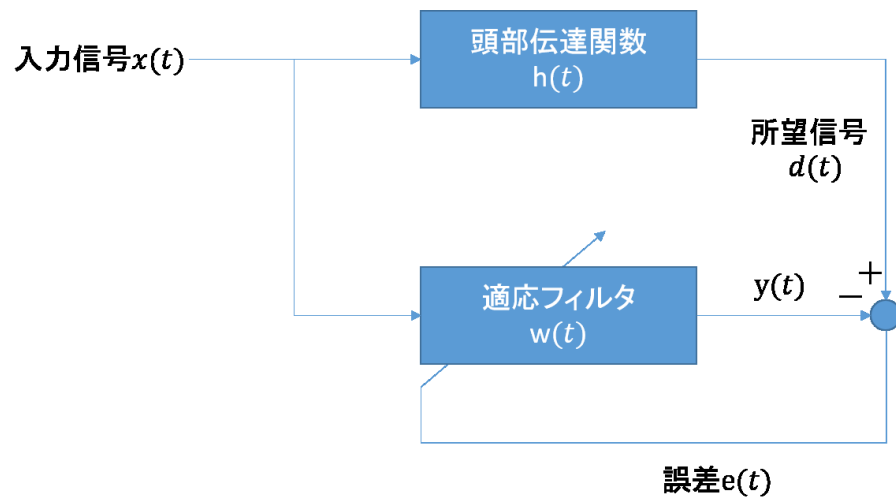


図 2.3 頭部伝達関数のインパルス応答測定時の適応フィルタ

2.4 まとめ

本章では頭部伝達関数とはどのようなものか、またどのような方法で計測を行うかについて述べた。第3章では本論文の提案手法を実現するために必要な、頭部伝達関数を推定するモデルのひとつである輻輳角モデルについて述べる。

第 3 章

輻輳角モデルと補整

3.1 はじめに

立体音響をデジタル処理で作成するために必要な頭部伝達関数の計測には時間が非常にかかる。その問題を解決するために補間や推定といった手法がある。

計測された頭部伝達関数を用いて未計測の頭部伝達関数について推定、補間する方法として様々な方法が提案されているが、その手法のひとつとして、音像の距離定位に重点をおいた輻輳角モデルという考え方がある。

本章では輻輳角モデルと、音源と観測点の間の距離の変化により生じる音の変化に対する補整の方法について解説する。

3.2 音量の変化と遅延

音は音源と観測点の距離の変化によって観測点到達時における音量及び到達時間が変化する。これらの変化については計算で算出できる。本節ではその変化を一般化された式で示し音源の移動による音の変化を計算であらわせるようにする方法について説明する。

3.2.1 逆 2 乗の法則

逆 2 乗の法則とは、物理量の定量的な値が発生源からの距離の 2 乗に反比例するという法則のことである。音も物理量であるためこの法則が成立する。音の場合、音源と観測点の距離の変化によって聞こえる音の大きさが変化するということを表している。つまり、図 3.1

において音源 a から聞こえる音の大きさ Y と、同一直線上の音源 b から聞こえる音の大きさ X の関係は逆 2 乗の法則によって得られる係数

$$K = \frac{1}{\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2} \quad (3.1)$$

を用いて

$$Y = K \times X \quad (3.2)$$

の式で表すことができる。

このとき Y の音の振幅は X の音の振幅の K 倍になっている。この法則を用いることで、音源の位置を移動させた場合の音量の変化を算出することができる。

3.2.2 音の遅延

音の遅延とは音源と観測点の距離の変化によって、音の到達時間に差が出ることである。この差について速く届く音に比べて遅く届く音が遅延しているという。図 3.1 の音源 a から聞こえる音 Y は音源 b から聞こえる音 X から t 遅れて聞こえる。このとき遅延時間 t は以下の式で表すことができる。

$$t = \frac{(r_1 - r_2)}{\text{音速}} \quad (3.3)$$

この計算を適用することで、音源の位置を移動させた場合の音の到達時間の変化を算出することができる。このとき k を時間を表す変数とすると、音源 a から聞こえる音 Y と音源 b から聞こえる音を X の到達時間 k についての関係は $Y(k) = X(k+t)$ となる。

遅延を補整する際に t が時間ならそのまま t を使用してよいが、インパルス応答など単位が量を時間で割ったものについて補整する際には、 $\frac{\text{量}}{\text{時間}}$ に t をかけた値を遅延と考える必要がある。

3.3 輻輳角モデル [5]

輻輳角モデルとは、音像の距離定位に関して、音源距離が変化する際に左右の耳の位置からみた音源に対する角度 (輻輳角) が変化することに着目した距離定位モデルのことである。

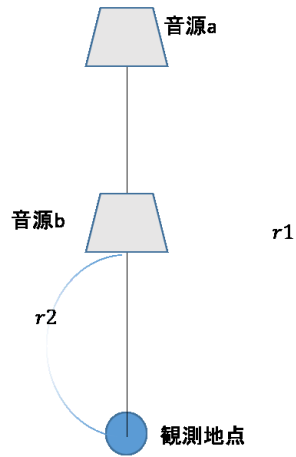


図 3.1 音源の距離変化

輻輳角モデルでは、人間は音源と右耳を結んだ線と、音源と左耳を結んだ線の交差角で音像距離を判断していると考ええる。輻輳角モデルの考え方として、左右それぞれの耳で聴取される音に含まれる頭部伝達関数の方向に依存して音像の知覚方向と距離が定まる。輻輳角モデルでは、ある方向から右耳への頭部伝達関数と別の方向から左耳への頭部伝達関数を利用して音声を作ると交わる点を仮想音源として音声の知覚が生じると考える。つまり図 3.2 において左右それぞれの耳に図示した方向から音声が届くとき、人間はそれぞれの音声が交差した地点に音源があると知覚すると輻輳角モデルでは考える。輻輳角モデルの考え方から、2

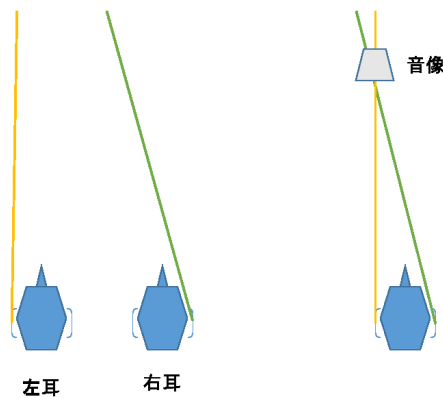


図 3.2 輻輳角モデルの概念図

つの点から計測された頭部伝達関数を用いて、仮想音源として、新たに 1 方向の頭部伝達関

数を決定することができる。このとき仮想音源について、元の音源位置から距離が変化しているため、逆 2 乗の法則と音の遅延の考え方から、補整を行うことで仮想音源における頭部伝達関数が決定できる。しかし、頭部中心からの距離について考えた場合、計測した 2 点からの頭部伝達関数と仮想音源からの頭部伝達関数には違いが生じる。このことから、輻輳角モデルは、頭部伝達関数の外挿のための手法であるといえる。

3.4 まとめ

本章では距離定位のモデルのひとつである輻輳角モデルについて説明するとともに、音源の位置の移動による音の変化に対する補整を行うための考え方として逆 2 乗の法則と音の遅延について述べた。次章では、本章で説明した 3 つの考え方から頭部伝達関数を推定する手法を提案し、提案手法の有用性について、述べる。

第 4 章

未計測方向からの頭部伝達関数推定

4.1 はじめに

本章では前章で述べた輻輳角モデルの考え方と補整を用いて 2 点から計測された頭部伝達関数を用いて計測した 2 点と頭部中心を中心とした同一円周上の 1 点からの頭部伝達関数を推定する方法を提案する。輻輳角モデルを用いることで仮想音源として、未計測方向の頭部伝達関数が定まるが、計測した 2 点からの頭部伝達関数と比べて、近い位置または遠い位置からの頭部伝達関数であるため、計測した 2 点からの頭部伝達関数と同じ距離からの頭部伝達関数にするために、補整を行い計測した 2 点の間の点における頭部伝達関数を推定する方法を提案する。また提案手法について実際に頭部伝達関数の計測を行い、計測された頭部伝達関数から推定を行い推定手法について評価を行った結果を示す。

4.2 2 点の計測点から間の点からの頭部伝達関数推定

提案手法では以下のような順番でそれぞれ計算を行うことによって頭部伝達関数の推定を行う。

初めに、高さを耳の位置に合わせた頭部中心を中心とする円周上の 2 点からの頭部伝達関数を計測する。次に、2 点から計測された頭部伝達関数を用いて輻輳角モデルと逆 2 乗の法則及び遅延の計算式を使い、仮想音源における頭部伝達関数を決定する。

決定した仮想音源の頭部伝達関数に対して逆 2 乗の法則及び音の遅延の考え方をを用いて補整を行うことで、頭部中心と仮想音源の点を結んだ線と頭部中心を中心とした円上の交差点に

おける点の頭部伝達関数を推定を行う。

提案手法でそれぞれの計算を行うために図 4.1 のように座標と数字を決定する。

頭部中心を座標 (0,0) の点とする。

頭部中心を中心とした円周上の頭部伝達関数を計測するとき半径を R とする。

仮想音源の点を座標 (x,y) とする。

測定した音源の点をそれぞれ p_1, p_2 とする。

点 p_1 と頭部中心がなす角を θ_{p1} 点 p_2 と頭部中心がなす角を θ_{p2} とする。

腰部中心から各耳への距離をそれぞれ r_R, r_L とおくそのとき各耳の座標は $(r_R, 0), (-r_L, 0)$ となる。

以上の情報を用いて頭部伝達関数の推定を行う。今回補整に用いた距離については図 4.2 に示す。なお、今回の提案手法では音源の高さを耳の高さに固定している。

4.2.1 仮想音源の頭部伝達関数決定

はじめに仮想音源の決定方法について述べる。

計測した 2 点について三角関数を用いてそれぞれの座標を決定する。このとき p_1 の座標 (x_{p1}, y_{p1}) は

$$x_{p1} = R \sin(\theta_{p1}) \quad (4.1)$$

$$y_{p1} = R \cos(\theta_{p1}) \quad (4.2)$$

のようになる。同じように p_2 の座標は

$$x_{p2} = R \sin(\theta_{p2}) \quad (4.3)$$

$$y_{p2} = R \cos(\theta_{p2}) \quad (4.4)$$

のようになる。

次に輻輳角モデルの考え方から計測した2点からの頭部伝達関数を用いて、2点それぞれから各耳への直線を引き交点を仮想音源の位置としての座標 (x, y) を求める。

計算方法は計測した各点の座標と各耳の座標について直線を引き、線の方程式を用いて各直線の式を求める。求めた2式について、連立方程式を解いて交点を決定する。このとき左右の耳と計測点を結ぶ直線の交点は2種類あり、仮想音源がとる位置として、頭部を挟んで計測点の反対側のエリアにできることがあるが今回提案する方法では、観測者から見て計測した2点と同一方向に仮想音源のできる組み合わせを用いて推定を行う。

次に右耳から仮想音源への距離を I_{p2} 求める。このときの計算式は余弦定理を用いて

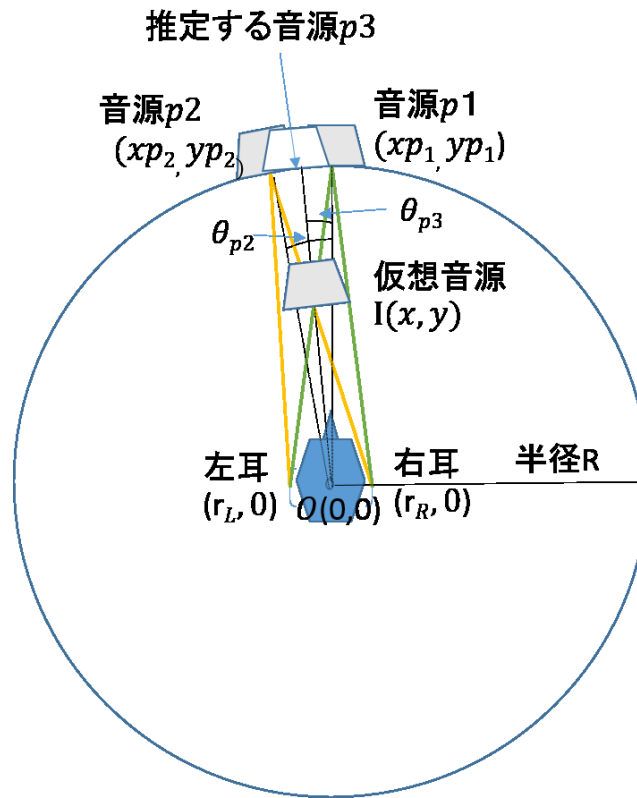


図 4.1 仮想音源と推定する音源の点決定

$$I_{p2} = \sqrt{(\sqrt{x^2 + y^2})^2 + r_R^2 - 2r(\sqrt{x^2 + y^2}) \cos(90 + \theta_{p2})} \quad (4.5)$$

となる。同じように左耳から仮想音源への距離 I_{p1} を求めると

$$I_{p1} = \sqrt{(\sqrt{x^2 + y^2})^2 + r_L^2 - 2r(\sqrt{x^2 + y^2}) \cos(90 - \theta_{p1})} \quad (4.6)$$

のようになる。次に三平方の定理を用いて右耳から音源 p_2 への距離と左耳から音源 p_1 への距離を求める。

このとき計算式は以下のようになる。

$$Y_{p1} = \sqrt{(x_{p1})^2 + (y_{p1})^2} \quad (4.7)$$

$$Y_{p2} = \sqrt{(x_{p2})^2 + (y_{p2})^2} \quad (4.8)$$

それぞれの距離が算出できたので計測した点の音源から仮想音源へ移動した際に生じる音の大きさの変化と遅延についてそれぞれに対応した K と t を計算して、それぞれの耳に届く音の伝達関数について補整を行う。

以上の計算を行うことにより、仮想音源からの頭部伝達関数を決定する。

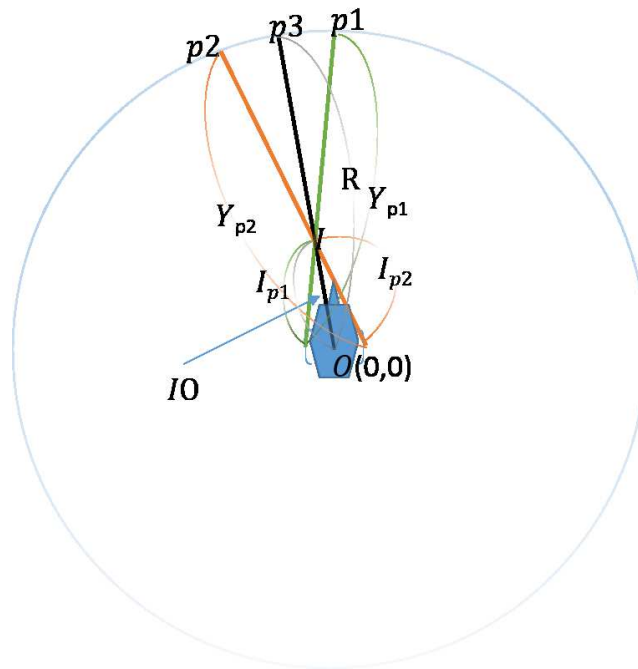


図 4.2 補整に使用する距離

4.2.2 計測した2点の間の点からの頭部伝達関数の推定

決定した仮想音源からの頭部伝達関数を用いて、計測した2点の間の点からの頭部伝達関数の推定を行う。

決定した仮想音源を用いて図 4.1 のように、頭部中心と仮想音源を結ぶ直線を引き、計測2点と同一円周上に推定する点を、推定を行う点 p_3 として決定する。

次に頭部中心から仮想音源への距離 IO を三平方の定理を用いて

$$IO = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4.9)$$

として算出する。頭部中心から点 p_3 への距離は半径 R なので R と IO の距離の変化から、逆2乗の法則と、遅延の計算を使用して p_3 に音源を移動させる補正を行う。

4.2.3 インパルス応答の変化

今回の提案手法では逆2乗の法則による音の大きさの変化の補正及び遅延の補正は頭部伝達関数のインパルス応答に対して行う。

インパルス応答は左右の耳によってことなり、頭部伝達関数と同じ情報を含んでいる。インパルス応答の値は係数であるため、逆2乗の法則により、係数の変化を表すことによって音の大きさの変化が露つ競る。また、遅延については、遅延の計算を行った結果に対してサンプリング周波数をかけた結果を遅延したサンプル数 t と考え、遅延したサンプル数 t の数だけ、インパルス応答の頭に 0 を挿入することによって遅延を表す。図 4.3 にそれぞれの処理を行った際のインパルス応答の変化を図 4.3 に示す。

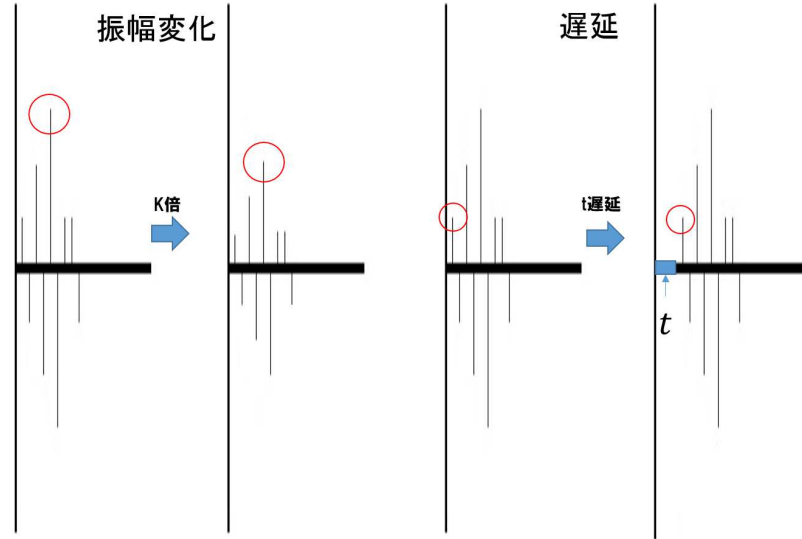


図 4.3 補整を行った際のインパルス応答の変化

4.3 提案手法の検証

提案手法の有用性を確かめるために実際に 2 点からの頭部伝達関数の計測を行い、間の点からの頭部伝達関数について推定を行った。実験環境は図 4.4、表 4.3 のとおりである。

ホワイトノイズはフリーソフトの Audacity を用いて作成したものを使用し、録音はダミーヘッドとイヤホンマイクを用いて行った。今回の実験では、頭部を中心とした耳の高さの半径 2 m の円周上の点について正面方向と左 10° 方向の頭部伝達関数について適応フィルタを用いて計測を行い、提案手法を用いて計測した 2 点の間の点からの頭部伝達関数の推定を行った。提案手法による推定の精度を知るために、比較対象として、推定した点からの頭部伝達関数についても実際に計測を行った。

4.3.1 実験の際の頭部伝達関数のインパルス応答

今回の実験で計測及び推定した頭部伝達関数のインパルス応答を図 4.5 から図 4.20 に示す。



図 4.4 実験環境

環境	福本研究室
測定に使用した音	ホワイトノイズ
測定機器	ダミーヘッド, イヤホンマイク
頭部中心から各耳への距離	7cm
音源と頭部中心の距離 (半径)	2m
音速	340m/s
点 p_1	正面方向 0° 、高さ 0°
点 p_2	正面方向左 10° 、高さ 0°
サンプリング周波数	48kHz
インパルス応答の長さ	1024(約 0.02 秒),

表 4.1 実験環境

ダミーヘッドの頭部伝達関数のインパルス応答

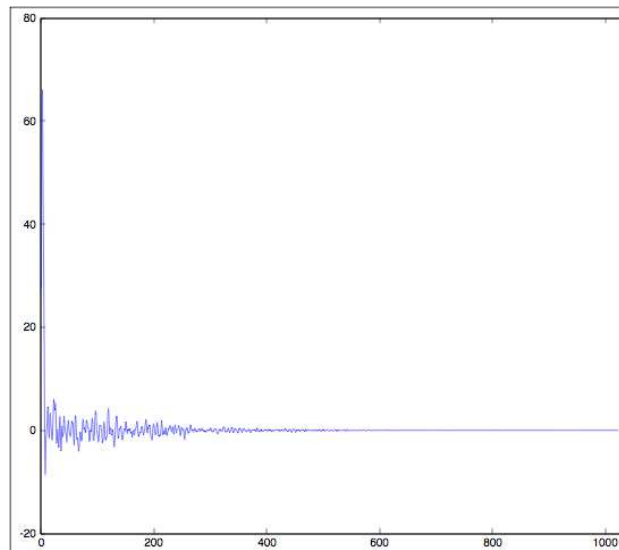


図 4.5 正面方向 0° のときの左耳の頭部伝達関数のインパルス応答

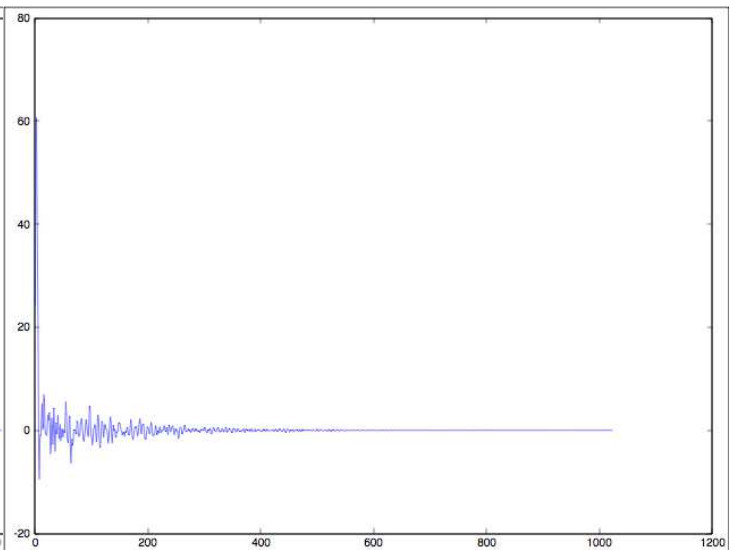


図 4.6 正面 0° 方向のときの右耳の頭部伝達関数のインパルス応答

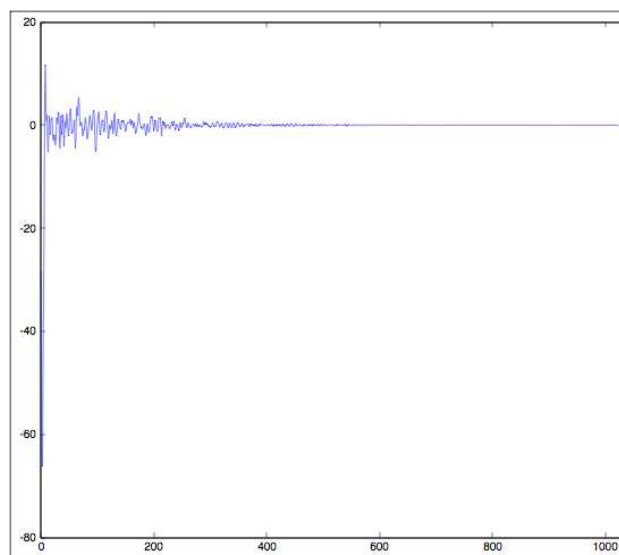


図 4.7 左 10° 方向のときの左耳の頭部伝達関数のインパルス応答

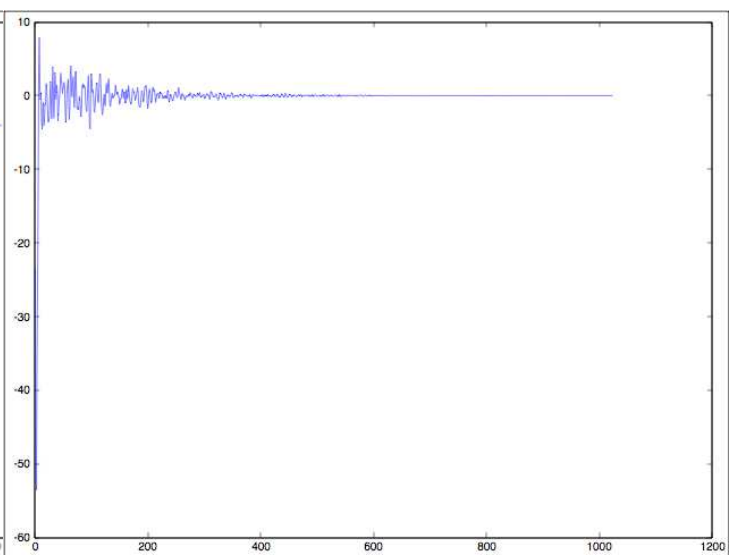


図 4.8 左 10° 方向のときの右耳の頭部伝達関数のインパルス応答

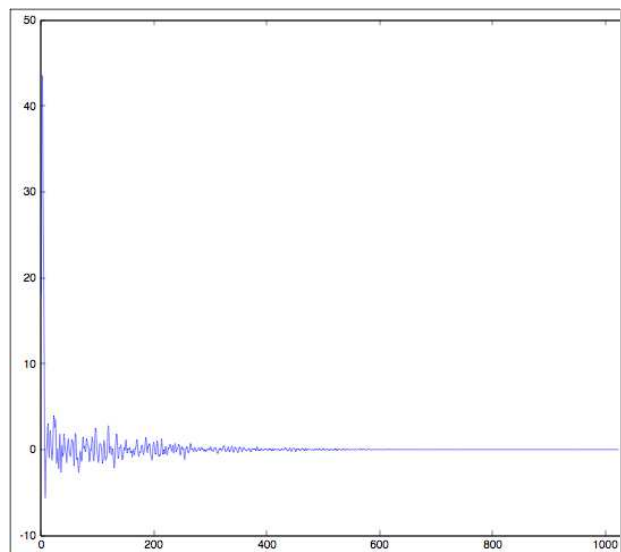


図 4.9 推定した左耳の頭部伝達関数のインパルス応答

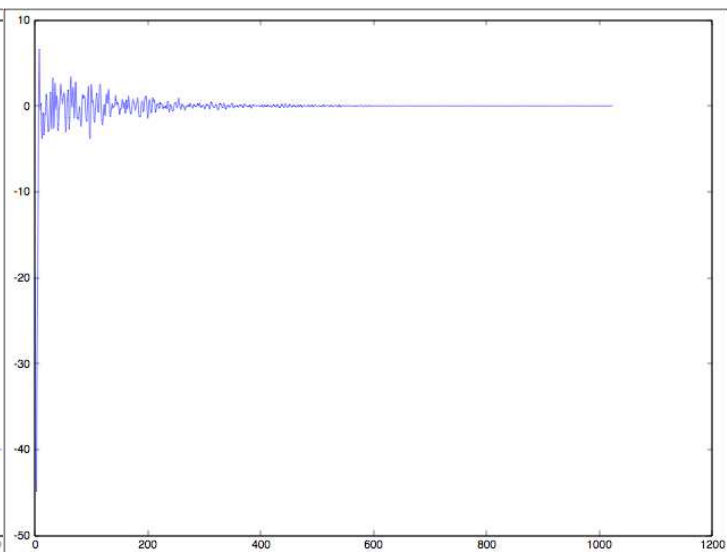


図 4.10 推定した右耳の頭部伝達関数のインパルス応答

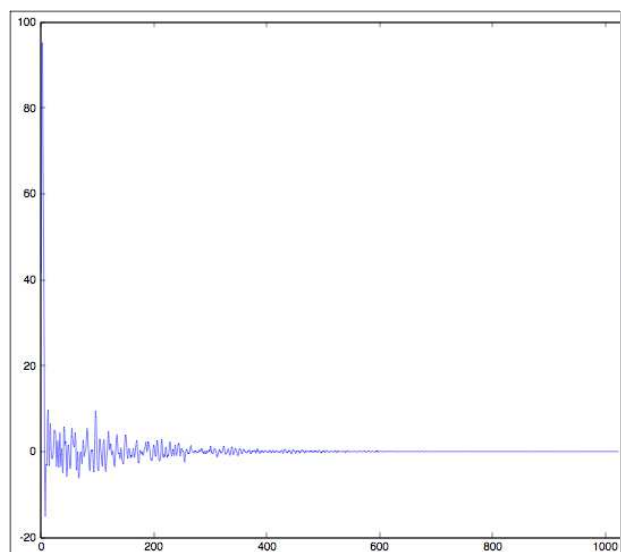


図 4.11 推定した点について実測した左耳のインパルス応答

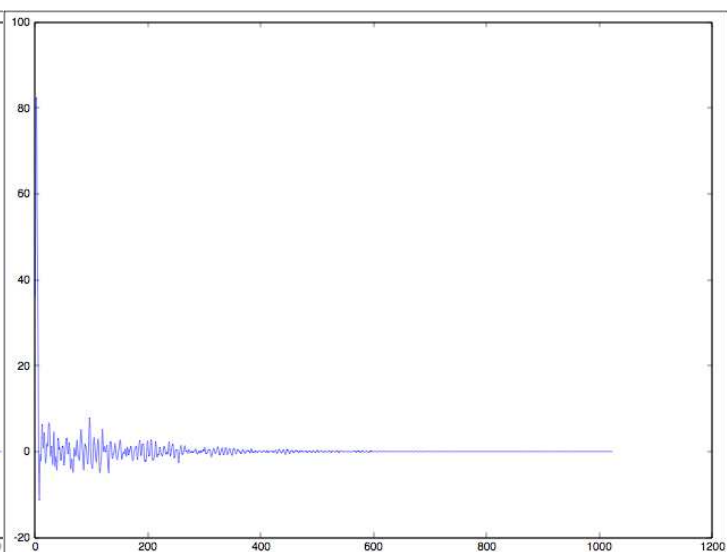


図 4.12 推定した点について実測した右耳のインパルス応答

個人の頭部伝達関数のインパルス応答

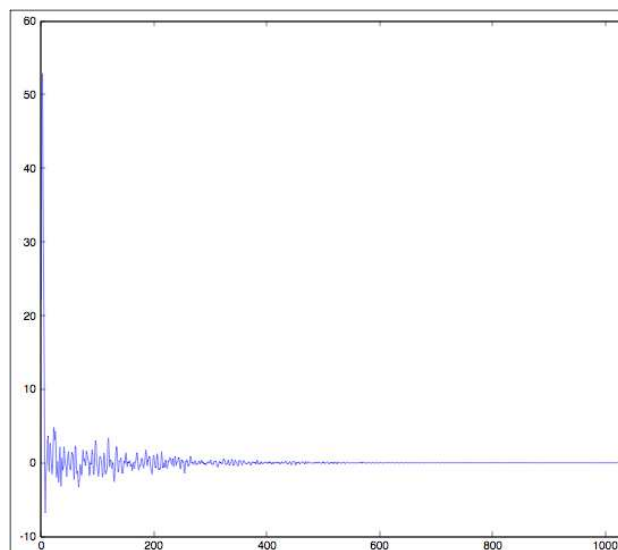


図 4.13 正面方向 0° のときの左耳
の頭部伝達関数のインパルス応答

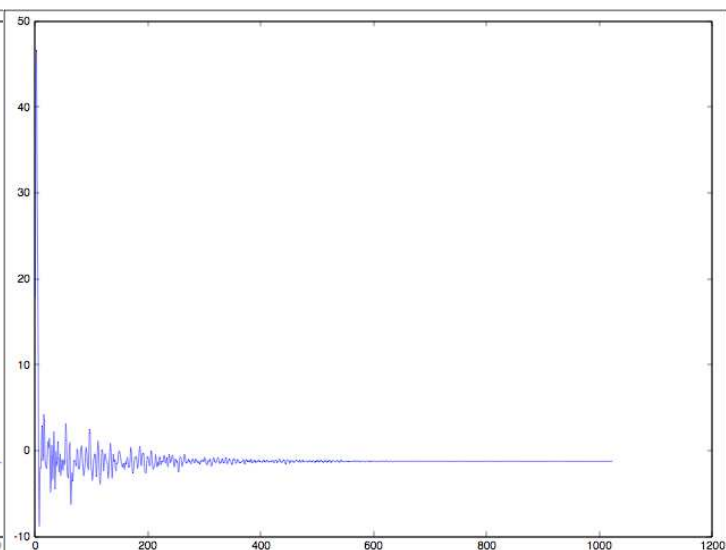


図 4.14 正面 0° 方向のときの右耳
の頭部伝達関数のインパルス応答

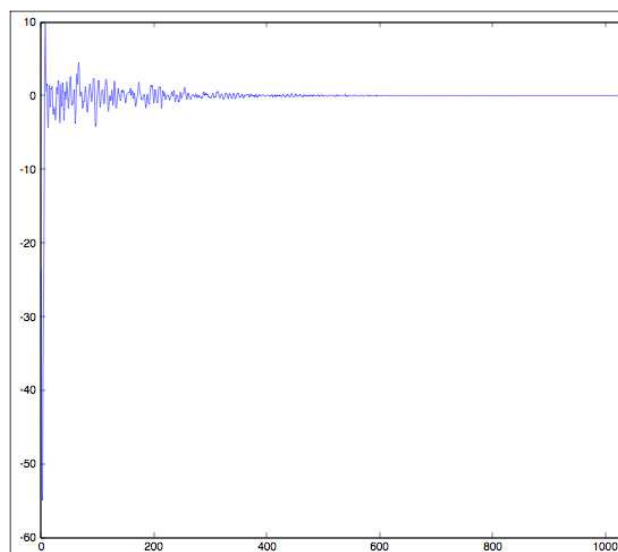


図 4.15 左 10° 方向のときの左耳
の頭部伝達関数のインパルス応答

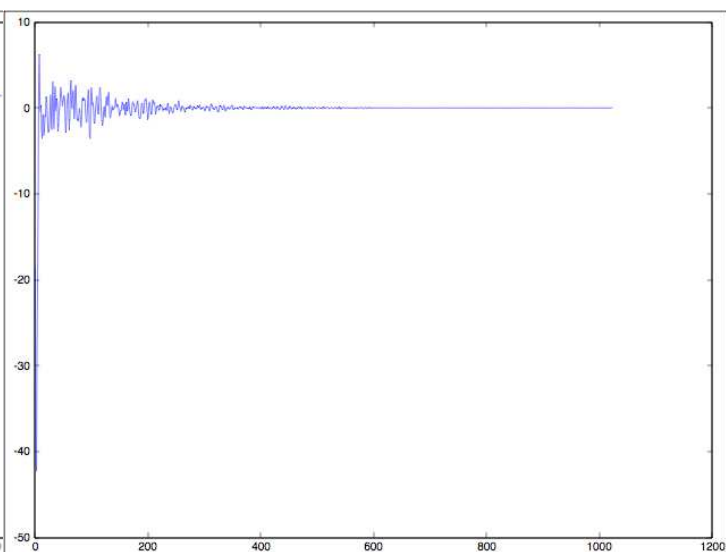


図 4.16 左 10° 方向のときの右耳
の頭部伝達関数のインパルス応答

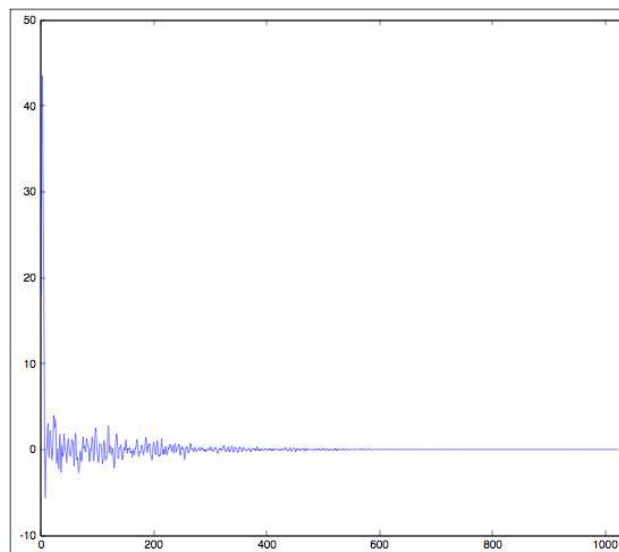


図 4.17 推定した左耳の頭部伝達
関数のインパルス応答

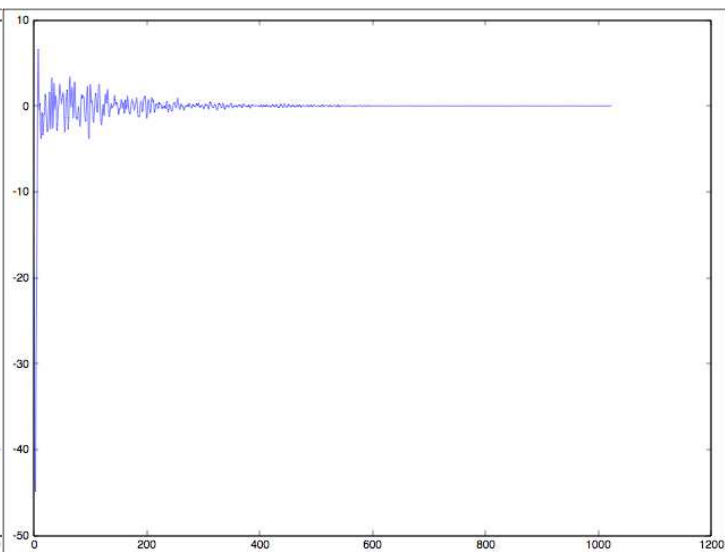


図 4.18 推定した右耳の頭部伝達
関数のインパルス応答

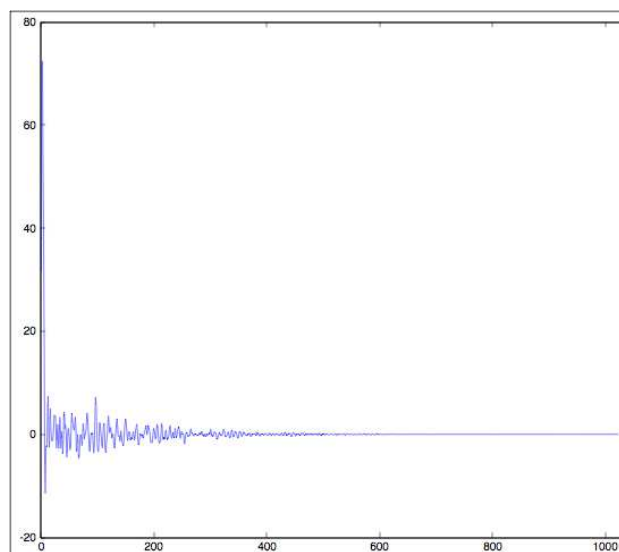


図 4.19 推定した点について実測
した左耳のインパルス応答

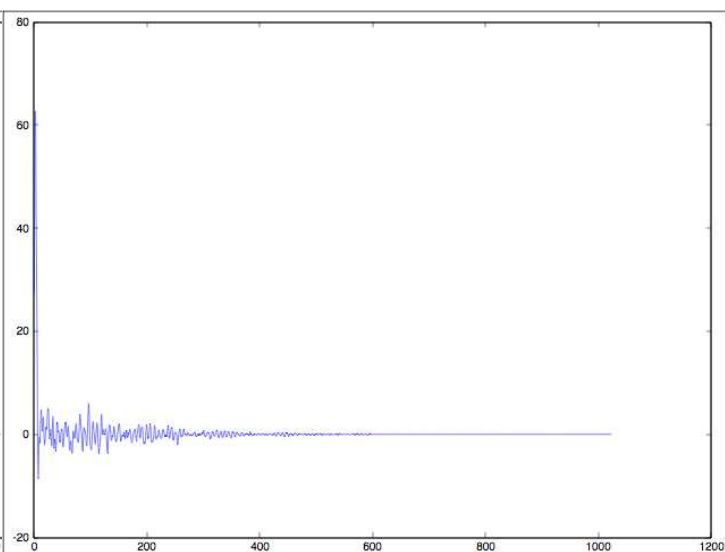


図 4.20 推定した点について実測
した右耳のインパルス応答

4.4 推定した頭部伝達関数の評価

実際に提案手法を用いて推定を行った頭部伝達関数について評価を行った。以下に評価結果を示す。

提案手法を用いて推定したダミーヘッドの頭部伝達関数について聴覚が正常な 20 代前半の男女 8 名を被験者として音声の知覚のアンケートを実施し主感的評価を行った。評価には 4 種類のホワイトノイズを使用した。使用したホワイトノイズは以下のとおりである

- A. ホワイトノイズに計測した一つ目に点についての頭部伝達関数を畳み込んだ音声
- B. ホワイトノイズの計測した二つ目の点についての頭部伝達関数を畳み込んだ音声
- C. ホワイトノイズに推定した頭部伝達関数を畳み込んだ音声
- D. ホワイトノイズに推定した点について実測した頭部伝達関数を畳み込んだ音声

以上の 4 種類の音声についてイヤホンを用いて、次のような方法で被験者に音声を提示し距離感の知覚、高さの知覚、角度の知覚についてアンケートを行った。

1.A,B,C の順番に音声を流して C の音声について前後の音声と比較して距離、高さ、角度についてどのように感じるか（3 音声提示）

2.D,C の順番に音声を流して C の音声について D の音声と比較して距離、高さ、角度についてどのように感じるか（2 音声提示）

以下に上記の 1,2 の問いに対するアンケートの結果を示す。それぞれの数字は人数である。

距離			高さ			角度		
‘ 遠い	同じ	近い	高い	同じ	低い	左寄り	間	右より
0	7	1	1	7	0	0	7	1

表 4.2 アンケート結果 (3 音声提示した場合)

アンケートの結果から計測した 2 点の間からの音としては知覚されていることがわかる。この結果より提案手法で推定を行った頭部伝達関数は計測した 2 点の間の頭部伝達関数であるといえる。しかし実測した値とに比べるとずれが生じていることがわかる。このような結

距離			高さ			角度		
遠い	同じ	近い	高い	同じ	低い	左寄り	同じ	右より
0	7	1	1	7	0	0	7	1

表 4.3 アンケート結果 (2 音声提示した場合)

果が生じた原因としてダミーヘッドの頭部伝達関数を用いたためと考えられる。

上の結果から、イヤホンマイクを用いて 1 人の被験者について提案手法を用いて、ダミーヘッドの場合と同様に評価を行ったところ、ダミーヘッドの頭部伝達関数を使用した場合と比較して、2 音提示した場合に実測した頭部伝達関数を用いた音に近い音として知覚した。この結果より、個人の頭部伝達関数について提案手法を用いると、その個人にとっては、正しい方向に近い知覚を行うことができると考えられる。ダミーヘッドについて行った、2 つのアンケートの結果と、推定と実測により得られた頭部伝達関数のインパルス応答のグラフ 4.17 から 4.20 より、推定した頭部伝達関数が、実測した頭部伝達関数と違っていても、同時に聞き比べない限り、似たような知覚ができると考えられる。このことを踏まえると、提案手法は頭部伝達関数の推定手法として有用であると考えられる。しかし、今後頭部伝達関数の推定について研究を進めていく上で、頭部伝達関数の類似性と許容誤差について考える必要がある。

4.5 まとめ

本章では 2 点の計測された頭部伝達関数から間の点からの頭部伝達関数を推定する手法を提案し、提案手法について評価を行った。客観的評価の結果から計測した 2 点の間の頭部伝達関数として用いる事ができると考えられる。しかし実測した同じ点における頭部伝達関数と比較した結果では評価の結果に個人差が大きくでていたこれはダミーヘッドを用いて提案手法を試した結果であると考え、個人の伝達関数について提案手法を用いて推定を行ったところ、ダミーヘッドを用いた場合よりも、個人が知覚する音源の位置が実測した値を用いた

音声に近くなることを確認した。また、実際の頭部伝達関数と違う値を持った、推定した頭部伝達関数でも、ある程度の音源の位置再現ができているため、今後推定や補間を行った頭部伝達関数と実測値の許容誤差についても考えていく必要がある。

第 5 章

結論

5.1 本研究のまとめ

立体音響技術を誰もが正しく聴取できるようにするために、頭部伝達関数について考える方法がある。一番良い方法として個人の頭部伝達関数を用いて、音声を作成する方法があるが、個人の頭部伝達関数を測定するには多くの時間がかかり、また被計測者の負担も大きい。この問題を解決する方法として、本研究では計測する点を減らすことを目的として、輻輳角モデル及び逆 2 乗の法則、遅延補整を用いて、2 点の計測された頭部伝達関数から頭部伝達関数の推定を行う手法を提案し、提案手法について、評価を行った。客感的評価の結果から、提案手法を用いることで、頭部伝達関数を少ない計測点から推定することができる可能性を示した。

5.2 今後の課題

今後の課題として推定に用いる点の選別を行うこと及び複数の被験者に対して提案手法を用いてそれぞれの被験者について推定した個人の頭部伝達関数が、どれくらい正しく知覚できるか検証する必要がある。また、今回の実験では 2 次元での計算を行い高さについて考慮していないため今後高さの変化についても同様の形で頭部伝達関数の推定が行えるか、隣どろしの点の頭部伝達関数でなく斜めの 2 点の頭部伝達関数を用いても推定が行えるかなどについても検証し最適な計測点の組み合わせを見つける必要がある。さらに推定した頭部伝達関数と実測した頭部伝達関数の許容誤差についても研究する必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたり、途中であきらめかけたり、ふらっといなくなったりする私を見捨てずに最後までご指導いただいた高知工科大学情報学群福本昌弘教授に心から感謝いたします。また、本研究を審議して下さった坂本明雄教授、植田和憲講師に深く感謝致します。夜遅くまで指導をして下さった福富さん、研究にあたり、たびたび助言をくれた同期の田中君及び実験を手伝ってくれた福本研究室のみんなに感謝します。最後に大学にきてから関わった全ての皆様に感謝します。

参考文献

- [1] 平原達也, 太谷真, 戸嶋巖
“ 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(4) 68-85 2009-04
- [2] 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 ”
日本音響学会誌 57(11),685-692,2001-11-01
- [3] 松井健太郎, 安藤彰男 “ 主成分分析による個人性頭部伝達関数の推定 ”
聴覚学会研究会資料 38(5),519-524,2008-08-04
- [4] S. ハイキンス 著 武部幹 訳 “ 適応フィルタ入門 ”
現代工学社 1994-3-10
- [5] 金海永, 鈴木陽一, 高根昭一, 曾根敏夫 “ 拡張輻輳角モデルを用いた音像距離定位の制御 ”
日本バーチャルリアリティ学会論文誌 5(3),911-918,2000-09-30