

長岡技術科学大学大学院
工学研究科修士論文

題 目
クロストークと骨導特性が
定位精度に与える影響に関する研究

指導教員
准教授 杉田 泰則

著 者
工学専攻
電気電子情報工学分野
20316683 田上 尚樹

令和 6 年 2 月 9 日

令和 6 年 2 月 9 日

Year Month Date

専攻名 Major	工学専攻 電気電子情報工学分野	学籍番号 Student ID No.	20316683
申請者氏名 Name of Applicant	田上 尚樹		
指導教員 氏 名 Name of Academic Supervisor	杉田 泰則		

審査委員主査
Chief Examiner 杉田 泰則審査委員
Examiner 岩橋 政宏審査委員
Examiner 圓道 知博審査委員
Examiner 原川 良介審査委員
Examiner専攻主任印
Seal of Chair of Major

論 文 要 旨

Abstract of Thesis

論文題目 Title of Thesis	クロストークと骨導特性が定位精度に与える影響に関する研究
-------------------------	------------------------------

近年、音像定位技術を用いた製品の開発が盛んに行われている。音像定位とは、音だけで音源の方向や距離を知覚する能力のことで、この技術を骨伝導イヤホンに用いることによって、どこでも耳を塞がずに立体感のある音を聞くことができる。そのため、視覚障碍者の歩行支援や骨を通して音を聞く性質上、伝音難聴者の補聴器などに応用することが期待されている。しかし、骨導音を用いた音像定位は気導音の音像定位と比べて定位精度が低くなると言われている。理由としては、片方の振動子で加振した音が反対の耳に届くクロストークの発生や骨導伝達特性による信号の減衰などが原因とされている。したがって、これらの原因を取り除くことができれば気導音と同程度の定位精度が実現できるとされている。

そこで、本論文では先行研究で使用されている手法を用いてクロストークの抑制および骨導伝達特性の補正を行ったときに、定位にどの程度変化があるかを実験にて評価を行うことを目的とする。本論文では、FxLMS (Filtered-X Least Mean Square) アルゴリズムで作成したクロストーク補償フィルタ (Crosstalk Compensation filter : CTC filter) を用いたアクティブノイズコントロールでクロストークの抑制を行い、NLMS (Normalized Least Mean Square) アルゴリズムで作成した骨導伝達特性の補正をする逆フィルタを用いて骨導伝達特性の補正を行った。実験は物理評価実験、定位試験、主観評価実験の3つを行った。

物理評価実験では、外耳道内に骨伝導マイクを挿入した際の外耳道壁に届くクロストークや、骨導トランステューサーから外耳道壁までの骨導伝達経路の補正について評価を行った。また、定位試験ではフィルタなし（気導音）、フィルタなし（骨導音）、逆フィルタのみ、CTC フィルタのみ、逆フィルタ+CTC フィルタの5つの条件でを行い、定位精度を比較した。最後に、主観評価実験では外耳道でのクロストークキャンセルが蝸牛において効果があるのか評価した。

上記の3つの実験より、トランステューサーからマイクまでの骨導伝達特性による減衰については、補正をすることはできるが、逆フィルタの効果が表れなかつたことから、本論文のような 4kHz 以下の狭帯域信号を入力とした場合、外耳道までの骨導伝達特性による減衰と定位は関係性が薄い可能性があることが分かった。また、クロストークについては、個人差はあるが外耳道で最大 15dB、蝸牛で最大 11dB 減衰させることができ、クロストークを減衰させた際に定位精度が向上した。

以上のことから、本論文では狭帯域信号を用いた時の外耳道における骨導伝達特性の減衰については定位に影響が少なく、クロストークについては定位に悪影響を与えている可能性があることを確認した。

ABSTRACT

Research on the effects of crosstalk and bone conduction characteristics on localization accuracy

Author : Shoki TANOUE
Supervisor : Yasunori SUGITA

In recent years, the development of products using sound image localization technology has been active. Sound image localization refers to the ability to perceive the direction and distance of a sound source using only sound, and by using this technology in bone-conduction earphones, it is possible to hear sound with a three-dimensional effect anywhere without blocking the ears. Therefore, it is expected that bone-conduction earphones can be used to assist the visually impaired in walking and to provide hearing aids for people with hearing loss due to the nature of hearing sound through the bone. However, sound image localization using bone-conducted sound is said to be less accurate than that using air-conducted sound. The reasons for this are said to be the generation of crosstalk, in which the sound vibrated by one transducer reaches the opposite ear, and signal attenuation due to bone-conducted sound transmission characteristics. Therefore, it is believed that if these causes can be eliminated, it will be possible to achieve the same level of localization accuracy as that of air-conducted sound.

Therefore, the purpose of this paper is to experimentally evaluate the degree of change in localization when crosstalk suppression and correction of bone-conducted transfer characteristics are performed using the method used in previous studies. In this paper, crosstalk is suppressed by active noise control using a crosstalk compensation filter (CTC filter) created with the FxLMS (Filtered-X Least Mean Square) algorithm. The bone-conduction transfer characteristics were corrected using an inverse filter created with the NLMS (Normalized Least Mean Square) algorithm. Three experiments were conducted: a physical evaluation experiment, a localization test, and a subjective evaluation experiment.

In the physical evaluation experiment, crosstalk reaching the ear canal wall when a bone-conducting microphone was inserted into the ear canal and correction of the bone-conducting transmission path from the bone-conducting transducer to the ear canal wall were evaluated. In addition, localization tests were conducted under five conditions: no filter (air-conducted sound), no filter (bone-conducted sound), inverse filter only, CTC filter only, and inverse filter + CTC filter, and localization accuracy was compared. Finally, a subjective evaluation experiment was conducted to assess whether crosstalk cancellation

in the ear canal was effective in the cochlea.

From the above three experiments, it was found that the attenuation due to the bone-conducted transfer characteristics from the transducer to the microphone can be compensated for, but the effect of the inverse filter was not apparent, indicating that when the input signal is a narrow band below 4 kHz, as in this paper, there may be little relationship between the attenuation due to bone-conducted transfer characteristics to the ear canal and the localization. In addition, the crosstalk could be attenuated by up to 15 dB in the ear canal and 11 dB in the cochlea, although there were individual differences, and the localization accuracy improved when the crosstalk was attenuated.

In conclusion, this paper confirms that the attenuation of bone-conducted transfer characteristics in the ear canal when using narrowband signals has little effect on localization, while crosstalk may have a negative effect on localization.

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	研究背景	1
1.1.1	骨伝導イヤホンを用いた音像定位	1
1.1.2	骨伝導イヤホンの聴覚経路	2
1.1.3	骨伝導マイクを用いたクロストークキャンセル	3
1.1.4	骨伝導マイクを用いたクロストークキャンセル及び骨導伝達特性の補正	3
1.2	研究目的	3
1.3	本論文の構成	4
第 2 章	基礎知識	5
2.1	クロストークの抑制	5
2.1.1	アクティブノイズコントロール	5
2.1.2	FxLMS アルゴリズム	6
2.2	骨導伝達特性の補正	8
2.2.1	NLMS アルゴリズム	8
第 3 章	実験	11
3.1	実験条件	11
3.1.1	前提条件	11
3.1.2	被験者	11
3.1.3	刺激音	12
3.2	実験環境	12
3.3	骨導伝達特性の測定	13
3.4	フィルタの作成	16
3.5	実験 1 物理評価実験	19
3.5.1	実験方法	19

3.5.2	評価方法	20
3.5.3	実験結果	20
3.6	実験 2 定位試験	26
3.6.1	実験方法	26
3.6.2	評価方法	28
3.6.3	実験結果	28
3.7	実験 1, 実験 2 のまとめ	32
3.8	追加実験 主観評価実験	32
3.8.1	実験環境	32
3.8.2	実験方法	32
3.8.3	評価方法	35
3.8.4	実験結果	35
第 4 章	おわりに	38
4.1	まとめ	38
4.2	今後の展望	39
謝辞		40
参考文献		41

第1章

はじめに

1.1 研究背景

1.1.1 骨伝導イヤホンを用いた音像定位

近年、音像定位技術を用いた製品の開発が盛んに行われている。音像定位とは、音だけで音源の方向や距離を知覚する能力のことで、この技術の応用例として立体音響を用いた映画鑑賞などがある [1]。また、この音像定位技術をイヤホンに用いることによって、どこでも立体感のある音を聞くことができる。

このイヤホンを用いた音像定位で最近注目され始めているのが骨伝導イヤホンを用いた音像定位である。骨伝導イヤホンとは、骨を加振させることによって蝸牛に振動を与え、音を聞くイヤホンのことである。耳を塞がずに音を聞くことができる、外耳や中耳を通さずに音が聞けるため伝音難聴者でも音を聞くことができるといった利点がある。そのため、伝音難聴者の補聴器や視覚障害者の歩行支援 [2] などへの応用が期待されている。一方で、空気の振動から鼓膜を通して音を聞く気導音と比べて、骨伝導イヤホンの音像定位では定位精度が低くなると言われている [3]。理由としては、骨導伝達特性による減衰やクロストークの発生 [4] などが原因とされているが、生きている人間の蝸牛での測定が困難なことから未だに原因は解明されておらず、気導音に比べて骨導音を用いた音像定位についての論文は少ない。ここで本論文のクロストークとは、片方の骨導トランスデューサーで加振した音が、骨を伝わって反対側の蝸牛に伝わってしまう現象のことであり、骨導伝達特性とは骨導トランスデューサーから蝸牛までの伝達特性を指す。上記のような原因を取り除くことができれば、骨導音でも気導音と同程度の定位精度が実現できるとされており、現在の研究では蝸牛の測定の代替案として様々な測定方法が提案されている。

1.1.2 骨伝導イヤホンの聴覚経路

実際に骨導聴覚によるメカニズムを解明することによって、骨導聴取において一番関与している経路を調べる研究が行われている。骨伝導イヤホンを用いた際の骨導経路は大きく分けて下図の3つとなる。

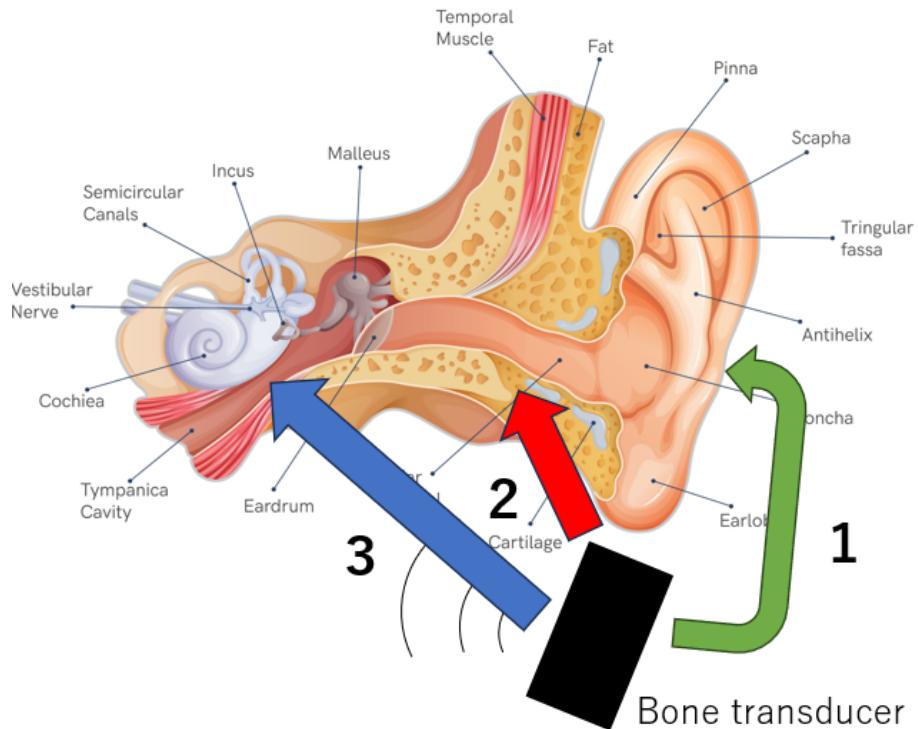


図 1.1: 骨導聴覚の経路

上図の聴覚メカニズムとしては下記のようになっている。

1. 上図の緑：振動子から直接空気中へ漏れ出た音が通常の気導経路（外耳道→鼓膜→耳小骨→蝸牛）を通って知覚される経路
2. 上図の赤：骨導音が生体内部を伝導する過程で、外耳道内に気導音として放射され、その音が鼓膜を振動し、通常の気導音と同じ経路（外耳道→鼓膜→耳小骨→蝸牛）で知覚される経路
3. 上図の青：外耳や中耳を経由せず、直接内耳に到達し蝸牛内の受容器官を刺激して知覚される経路

このうち、1は気導経路、2,3は骨導経路であり、一般的な骨導受聴の場合2,3の経路の音の成分が十分に大きいことから、1の経路の成分はほとんど知覚に寄与しないことが判明している。また、両耳間ラウドネスマッチングを用いて2,3のどちらの寄与

が大きいかを調べた結果、2の経路成分が一番大きいことも報告されている[5,6]。以上のことから、生きている健聴者の骨導聴取について外耳道内の放射成分を測定することにより、疑似的に蝸牛での測定が可能であることが示唆されている。

1.1.3 骨伝導マイクを用いたクロストークキャンセル

Irwansyah らは、外耳道と蝸牛の位置が近いことから、外耳道壁の振動と蝸牛の振動がほぼ同じであると仮定し、片側のクロストークの抑制を行っていた[7]。測定方法は、骨導トランスデューサーから発せられたクロストークを外耳道内に挿入した骨伝導マイクで観測するというものだった。観測したクロストークを FxLMS アルゴリズムを用いたアクティブノイズコントロールで抑制することによって、200~2,000Hz の周波数領域で最大 13dB のクロストークの抑制に成功していた。

また、Irwansyah らの次の研究では、外耳道内に放射され気導音となったクロストークを抑制することによって、蝸牛でも効果があるかどうかの実験も行っていた[8]。論文では、上記の抑制方法と同様のアルゴリズムで片側の外耳道内に放射されるクロストークの抑制に成功しており、周波数で差はあるが蝸牛でも最大 13.4dB のクロストークキャンセルができたと報告されている。

1.1.4 骨伝導マイクを用いたクロストークキャンセル及び骨導伝達特性の補正

以上の研究では外耳道の信号を測定することによってクロストークの抑制に成功していたが、佐々木らは上記の研究に加えて NLMS アルゴリズムを用いた片側の骨導伝達特性の補正も同時に行い、クロストークの抑制と骨導伝達特性の補正を同時にうことが可能であると報告している[9]。ただし、佐々木らの研究で定義している骨導伝達特性とは骨導トランスデューサーから骨伝導マイク、すなわち外耳道壁までの伝達経路を指す。

上記の先行研究では、外耳道でのクロストークの抑制と骨導伝達特性の補正を行っているが、いずれも片側しか行っておらず、定位への影響もどの程度あるのかわからない。したがって、クロストークと骨導伝達特性による減衰が定位精度に悪影響を与えているのか調査をすることが必要がある。

1.2 研究目的

本論文では、外耳道内で測定した信号を用いて、クロストークキャンセルおよび骨導伝達特性の補正を行ったとき、定位精度にどの程度影響がでるかを実験を行い評価

することが目的である。

1.3 本論文の構成

第1章では研究の背景および目的を述べた。第2章では本論文で使用した基礎知識について述べる。第3章では物理評価実験、定位試験、主観評価実験について述べる。最後に、第5章では本論文のまとめ及び今後の展望について述べる。

第 2 章

基礎知識

本論文では先行研究で使用されていた 2 つの手法を用いてクロストークの抑制と骨導伝達特性の補正を行った。クロストークの抑制については、FxLMS アルゴリズムを用いたアクティブノイズコントロールで抑制を行い、骨導伝達特性の補正については NLMS アルゴリズムを用いて骨導伝達特性の補正を行う逆フィルタを作成して補正を行った。次節で手法の詳細について説明する。

2.1 クロストークの抑制

2.1.1 アクティブノイズコントロール

本論文では、クロストークを抑制する手法としてアクティブノイズコントロール(Active Noise Control:ANC)を使用した。ANC とは、”逆位相の音を発生して元の音をキャンセル消音する技術”と言われており、主に低周波域の騒音対策などに用いられている [10]。図 2.1 にダクト内伝搬音の消音例 [11] を示す。

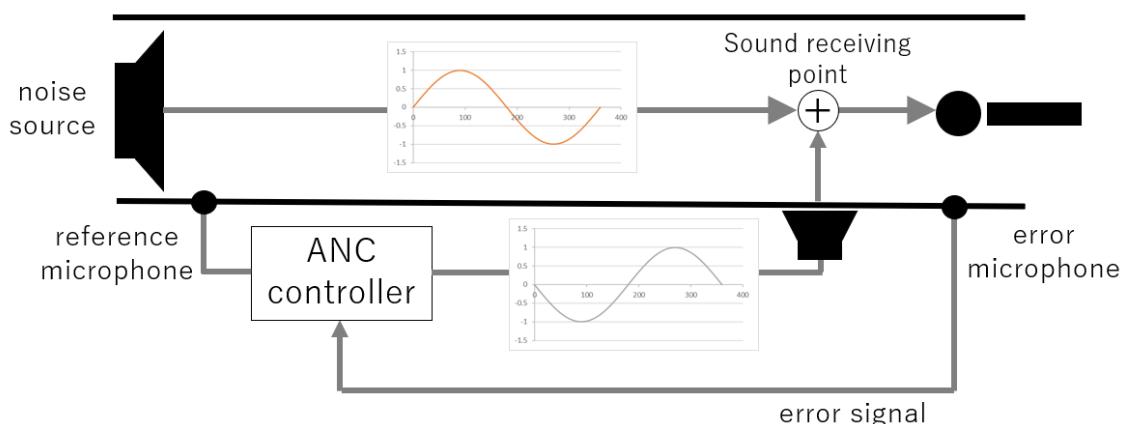


図 2.1: ダクト内伝搬音の消音例

図2.1では、参照マイクで騒音を観測し、ANCコントローラにてキャンセル信号を作成している。そして、キャンセル信号を制御スピーカーから放射することによって、受音点にて騒音を抑制している。また、受音点付近に誤差マイクを設置することによって、受音点での誤差信号からANCコントローラの係数を更新できる。したがって、ダクト内伝搬音のANCを用いた消音では、適応型の騒音抑制が可能となる。

一般的に、ANCで制御可能な周波数帯は500Hz以下の周波数帯で有効とされているが、本論文のようにキャンセル音を出す制御スピーカーと制御点の位置が近い場合、制御可能な周波数帯域も広くなると言われている。そのため、本論文ではクロストークキャンセルが可能な200~4,000Hzの帯域を対象に抑制を行った。

2.1.2 FxLMSアルゴリズム

ANCでは、適応フィルタを用いてキャンセル音を作成し、抑制を行っている。本論文では、ANCの適応フィルタをFxLMSアルゴリズム(Filtered-x Least Mean Square Algorithm)を用いて作成した。FxLMSアルゴリズムとは、制御スピーカーと受音点との間にある二次経路が存在する場合に用いられるフィルタ係数更新アルゴリズムである。図2.2にFxLMSアルゴリズムを用いたフィルタ係数更新のブロック図を示す。ただし、 $x(n)$ は参照信号、 $x_1(n)$ は入力された信号が一次経路を通ってクロストークとして観測点に届く制御対象信号、 $x_2(n)$ は制御スピーカーから制御信号放射し二次経路を通った後の信号、二次経路モデルは事前に測定した二次経路特性、 $r(n)$ は参照信号が二次経路モデルを通った後の濁波参照信号である。

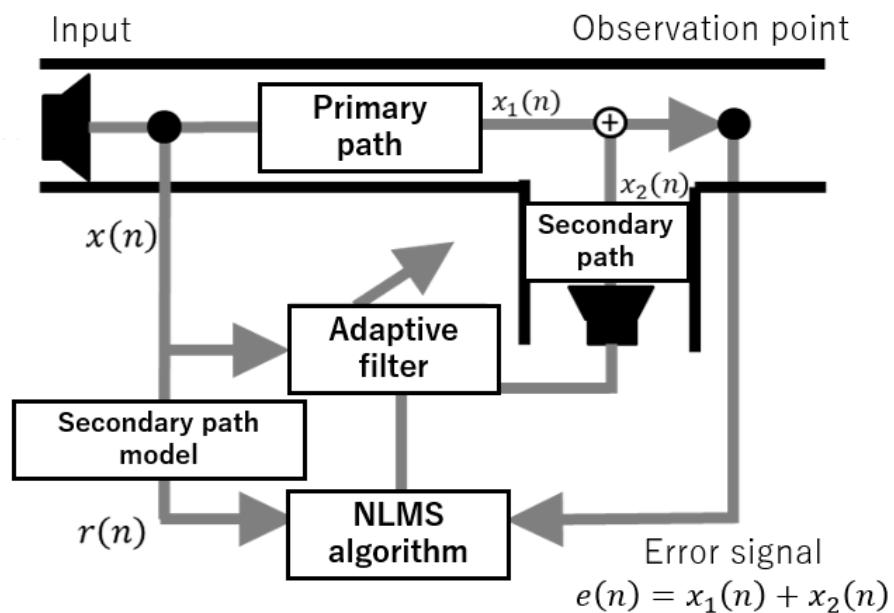


図2.2: FxLMSアルゴリズムのブロック図

FxLMS アルゴリズムでは、 $x_1(n)$ と $x_2(n)$ を足した誤差信号が最小となるように 2.1 式を用いて適応フィルタの係数を更新する。ただし、本来 FxLMS アルゴリズムでは係数更新式に LMS アルゴリズムを使用しているが、本論文では LMS アルゴリズムよりもステップサイズの調整が簡単な NLMS アルゴリズムを使用している。

$$\mathbf{h}(n+1) = \mathbf{h}(n) + \frac{\mu e(n)\mathbf{r}(n)}{\mathbf{x}(n) \cdot \mathbf{x}(n)^T} \quad (2.1)$$

ここで、 \mathbf{h} は適応フィルタの係数ベクトル、参照信号ベクトル $\mathbf{x}(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-N_h+1)]$ 、瀧波参照信号ベクトル $\mathbf{r}(n) = [r(n), r(n-1), \dots, r(n-N_h+1)]$ 、 N_h は適応フィルタの次数、 μ はステップサイズ、 e は誤差信号、 n は現在の時刻、 T は転置記号を表している。また、FxLMS アルゴリズムの具体的な処理過程 [10] は以下になる。

1. フィルタ係数ベクトル \mathbf{h} の初期化
2. 参照信号ベクトル $\mathbf{x}(n)$ の初期化
3. ステップサイズパラメータの設定
4. 瀧波フィルタベクトルの設定（二次経路モデルの設定）
5. 以下の a から e の繰り返し
 - (a) 誤差信号 $e(n)$ を計算する。
 - (b) 参照信号 $x(n)$ を取り出し、参照信号ベクトルに組み込む。
 - (c) 参照信号ベクトルに誤差経路フィルタを畳み込むことにより瀧波参照信号 $r(n)$ を求める。
 - (d) 参照信号ベクトルに適応フィルタをフィルタリングして得た制御信号を $x_2(n)$ とする。
 - (e) (2.1) 式に基づき適応フィルタの係数ベクトル $\mathbf{h}(n)$ を更新する。

例として、左側のトランステューサーから右の骨伝導マイクに届いたクロストークを抑制する場合を示す。

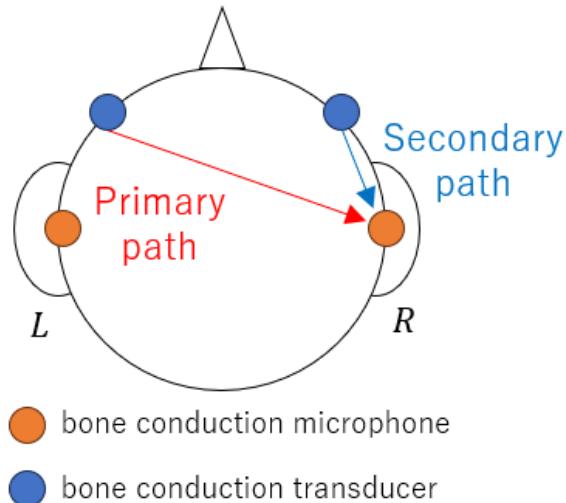


図 2.3: 本論文における FxLMS アルゴリズムの適用例

図 2.3 より、一次経路特性を左の骨導トランスデューサーから右の骨伝導マイクまでの経路(クロストークが通る経路)、二次経路特性を右のトランスデューサーから右の骨伝導マイクまでの経路となる。そして、左側の骨導トランスデューサーから発した信号がクロストークとして右側の骨伝導マイクに届くとき、適応フィルタ(以降、クロストーク補償(Crosstalk Compensation: CTC) フィルタ)を用いて作成したキャンセル音とクロストークの誤差が最小となるように 2.1 式を使って再度フィルタ係数を更新するといった流れで抑制を行う。ただし、本論文では実際に信号を流してリアルタイムに係数を更新する訳ではなく、事前に一次経路と二次経路を測定し、図 2.2 のブロック図通りのシミュレーションを行い、CTC フィルタ係数を更新した。

2.2 骨導伝達特性の補正

本論文では、骨導伝達特性を補正する方法として NLMS アルゴリズムを用いて補正フィルタの作成を行った。以降、骨導伝達特性を補正するフィルタを逆フィルタと呼ぶ。

2.2.1 NLMS アルゴリズム

NLMS アルゴリズム (Normalized Least Mean Square Algorithm) とは、少ない演算量でシステム同定を実行する算法の一つである。誤差信号を最小にするように誤差曲面の最急勾配方向に係数を反復的に更新する手法で、LMS アルゴリズム (Least Mean Square Algorithm) と違って入力信号の平均パワーでステップサイズを正規化するため、ステップサイズの調整がより簡単になった手法である [12]。

以下に逆フィルタ作成時のブロック図を示す。ここで、 $x(n)$ は入力信号、 $y(n)$ は未知システムを適応フィルタで打ち消した後の信号、 z は遅延器、 l は遅延させるサンプル数、 $e(n)$ は誤差信号、 n は現在の時刻である。

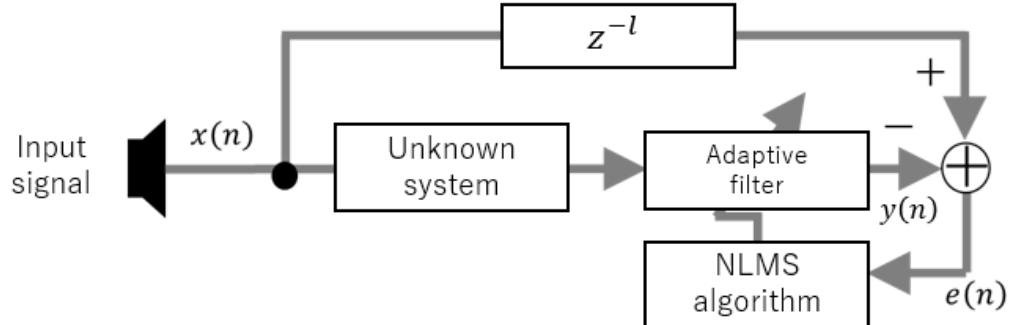


図 2.4: NLMS アルゴリズムのブロック図

このシステムでは、入力信号が未知システムを通った後の信号が、遅延した入力信号になるように適応フィルタを更新するシステムである。したがって適応フィルタは、未知システムを打ち消しつつ入力信号を遅延させる動作をする。適応フィルタの更新方法は、誤差信号を最小にするように 2.2 式を使用して係数の更新を行う。

$$\mathbf{h}(n+1) = \mathbf{h}(n) + \frac{\mu e(n)\mathbf{x}(n)}{\mathbf{x}(n) \cdot \mathbf{x}(n)^T} \quad (2.2)$$

ここで、 \mathbf{h} は適応フィルタの係数ベクトル、参照信号ベクトル $\mathbf{x}(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-N_h+1)]$ 、 N_h は適応フィルタの次数、 μ はステップサイズ、 e は誤差信号、 n は現在の時刻、 T は転置記号を表している。

今回は、図 2.4 の未知システムは片側の骨導トランステューサーから同側の骨伝導マイクまでの経路である。図 2.5 に今回補正する経路の概念図を示す。

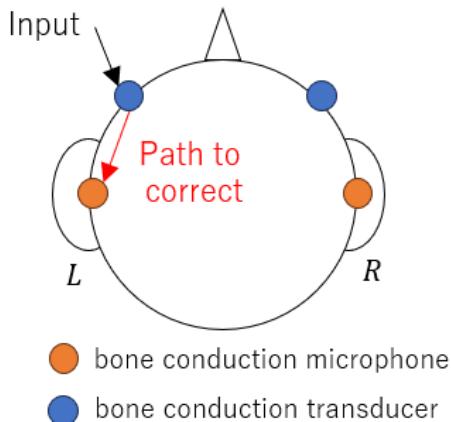


図 2.5: 本論文における NLMS アルゴリズムの概念図

本論文の逆フィルタは、図2.5の骨導伝達特性を補正して、聞かせたい所望の入力信号をマイクに届けるよう動作をする。

第3章

実験

本論文は、以下の2つの実験で構成されている。

1. 物理評価実験
2. 定位試験

実験1では外耳道内に挿入した骨伝導マイクで外耳道壁の振動を測定し、外耳道内のクロストークの抑制と骨導伝達特性の補正について評価を行った。実験2では作成したフィルタを使用して、クロストークと骨伝導特性による減衰が定位精度にどの程度影響を与えていているかを調査した。

3.1 実験条件

3.1.1 前提条件

本論文では外耳道と蝸牛の位置が近いことから、外耳道壁の振動を蝸牛に届く振動と仮定して実験を行った。また、本論文での骨導伝達特性とは、両側の骨導トランスデューサーから両側の外耳道壁までの伝達経路を指す。

3.1.2 被験者

今回実験で使用した頭部伝達関数(Head related transfer function:HRTF)は、KEMARのダミーヘッドにて録音されたHRTFを使用した[13]。HRTFとは、人が方向を定位するための手がかりである両耳間レベル差(Interaural Level Difference:ILD)や両耳間時間差(Interaural Time Difference:ITD)などが含まれた頭部周辺の伝達関数のことである。したがって、定位させたい音源にHRTFを畳み込むことによって、その音源に方向感を付与することができる。しかし、HRTFは耳介などの形状によって個人差が

表れるため、一般的に他人の HRTF を使用すると定位精度が著しく低下する場合がある。そのため他人の HRTF を使う本論文では、被験者として健聴者 14 名（成人男性 12 名、成人女性 2 名）の内、気導音での定位精度が 50 %を超える 8 名を選出して結果とした。

3.1.3 刺激音

本論文で使用したアクティブノイズコントロールでは、高周波のキャンセルが困難であること、使用した骨伝導マイクの周波数特性が 200~3,000Hz であることから、本実験で使用する入力信号は 200~4,000Hz で帯域制限したホワイトノイズを使用した。また、クロストークの抑制や骨導伝達特性の補正を行う際には、上記の入力音に CTC フィルタや逆フィルタを畳み込んだ音を刺激音とした。

3.2 実験環境

図 3.1 に実験環境を示す。

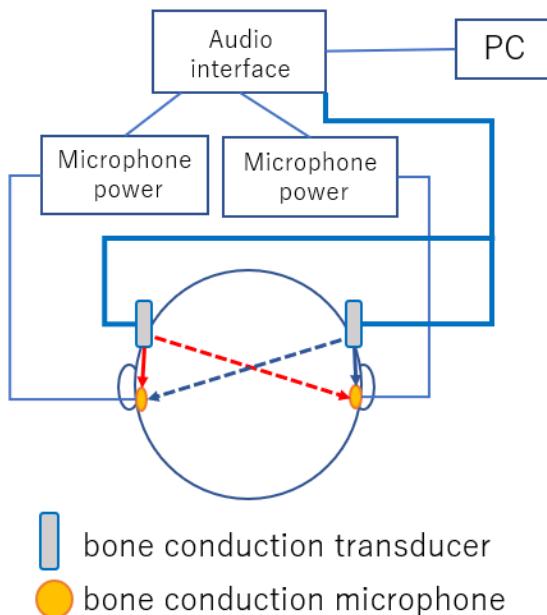


図 3.1: 実験環境

本実験では、TEAC の HP-F200 の骨伝導トランスデューサーを耳ともみあげの間にある頬骨の辺りに装着して加振し、外耳道に挿入したテムコジャパンの EM21N-Tip で外耳道壁の振動を測定した。また、骨伝導マイクの電源は Audio-Technica の AT9903 のパワーモジュールを使用し、アンプは OCTA-CAPTURE を使用して信号を增幅し

た。また、実験1の物理評価実験では外耳道での測定を行うために骨伝導マイクを外耳道に入れていたが、実験2の定位試験では、骨導音は外耳道に耳栓を挿入し、気導音は SENNHEISER の HD-600 の気導ヘッドホンを使用して実験を行った。下記に使用機器をまとめた表を示す。

表 3.1: 実験機器

Device	Maker	Model
Bone conduction transducer	TEAC	HP-F200
Air conduction headphones	SENNHEISER	HD-600
Bone conduction microphone power supply	Audio-Technica	AT9903
Bone conduction microphone	テムコジャパン	EM21N-Tip
Audio interface	Roland	OCTA-CAPTURE UA-1010

3.3 骨導伝達特性の測定

まず、フィルタの作成を行うために骨導伝達特性を測定した。測定した骨導伝達経路 H を図 3.2 に示す。

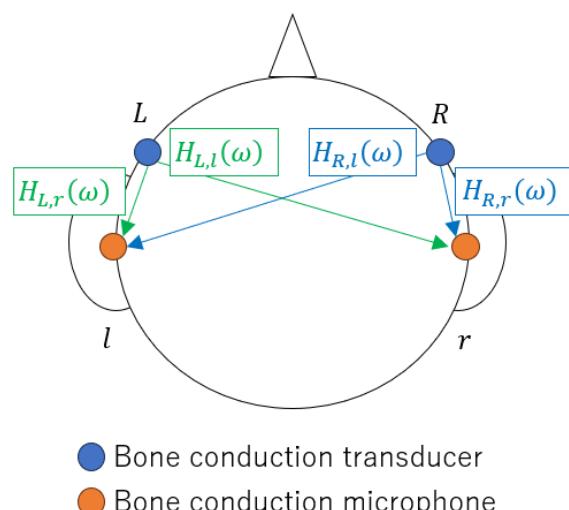


図 3.2: 測定した骨導伝達経路

骨導伝達特性の測定では、up-TSP(Time Stretched Pulse)信号を入力して測定を行った。up-TSP 信号とは、時間に比例して周波数が上昇する信号のことである。この up-TSP

応答に対して逆特性を乗じることによって、インパルス応答を取得できる [14]. 本実験では、左右 10 回ずつ TSP 音を流し、その応答で得られたインパルス応答を加算平均することによって骨導伝達特性とした. 被験者には、その間なるべく唾を飲み込まず、静止するように注意喚起をした上で測定を行った. 図 3.3, 3.4 に測定した骨導伝達特性を示す. ただし、実線は平均値を表しており、帯は標準偏差を表している.

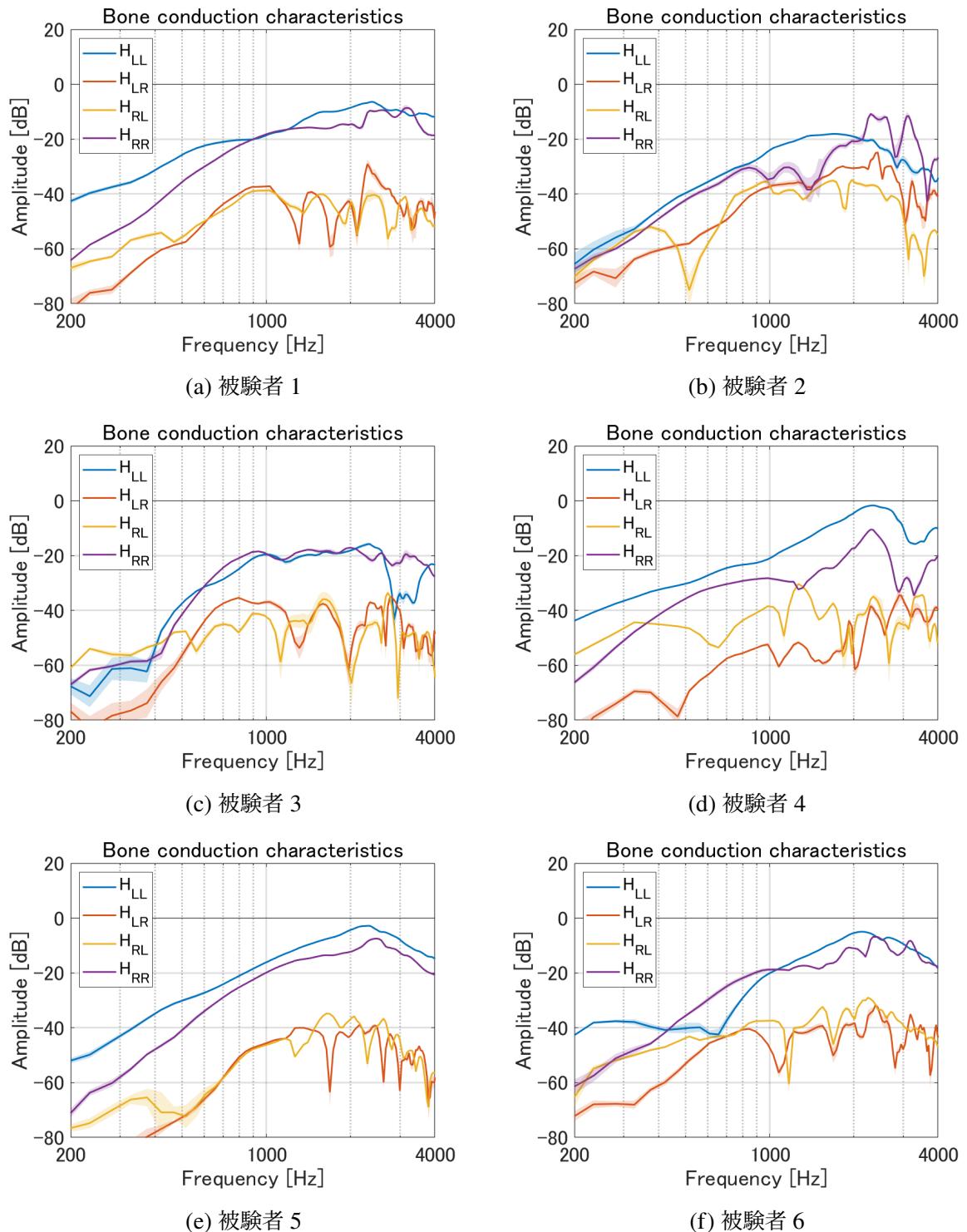


図 3.3: 測定した骨導伝達特性

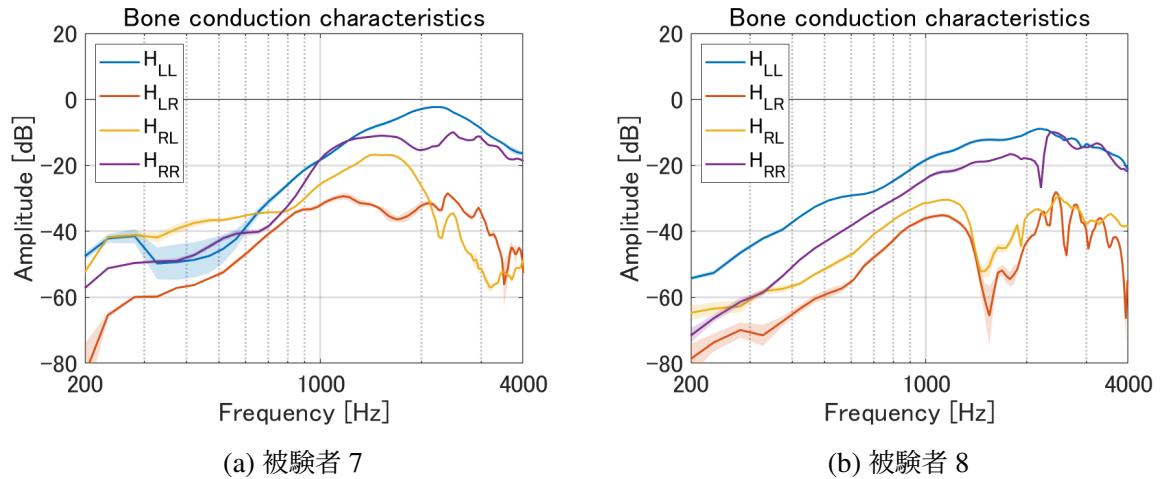


図 3.4: 図 3.3 の続き

図 3.3, 3.4 より、骨導伝達特性の個人差は大きく、クロストーク成分が同側成分と同程度まで出ている人もいれば、同側成分に比べて 30dB 以上クロストーク成分が小さい人もいることが分かった。以上の骨導伝達特性を使用して、各フィルタを作成した。

3.4 フィルタの作成

骨導伝達特性を測定した後、フィルタの作成を行った。本実験で使用したフィルタは2種類で、クロストークを抑制するCTCフィルタと骨導伝達特性を補正する逆フィルタである。上記のフィルタを左右2種類ずつ作成した。フィルタ作成時のステップサイズはCTCフィルタは0.01、逆フィルタは0.05で行い、フィルタの更新回数に関してはCTCフィルタ7,000,000回、逆フィルタ2,000,000回で行った。また、フィルタ更新時の入力信号は200~4,000Hzで帯域制限したホワイトノイズを入力信号とした。図3.5にCTCフィルタ更新時の制御対象信号と誤差信号の周波数特性、図3.6に逆フィルタの周波数特性を示す。

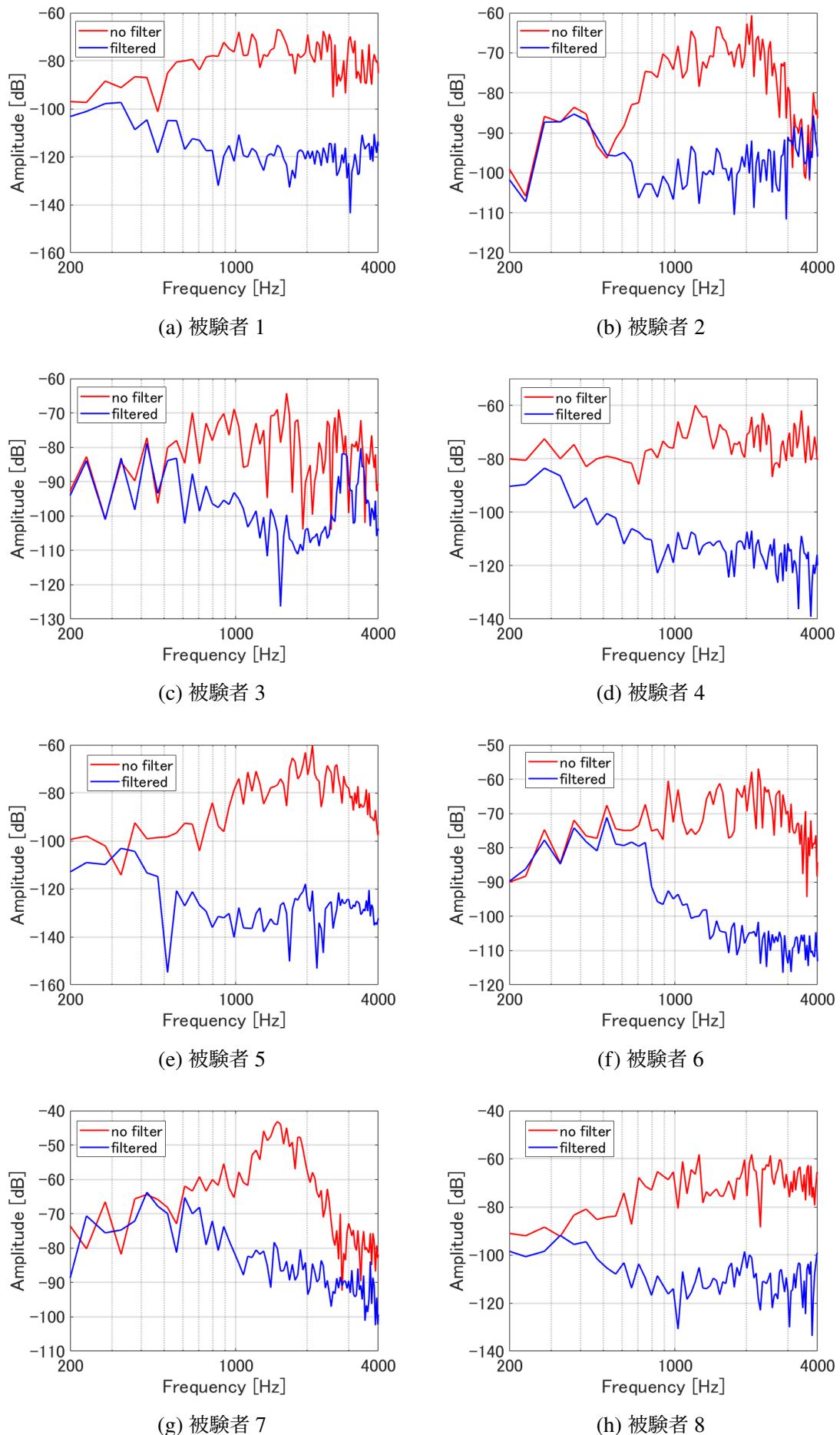


図 3.5: CTC フィルタ更新時の制御対象信号と誤差信号の周波数特性

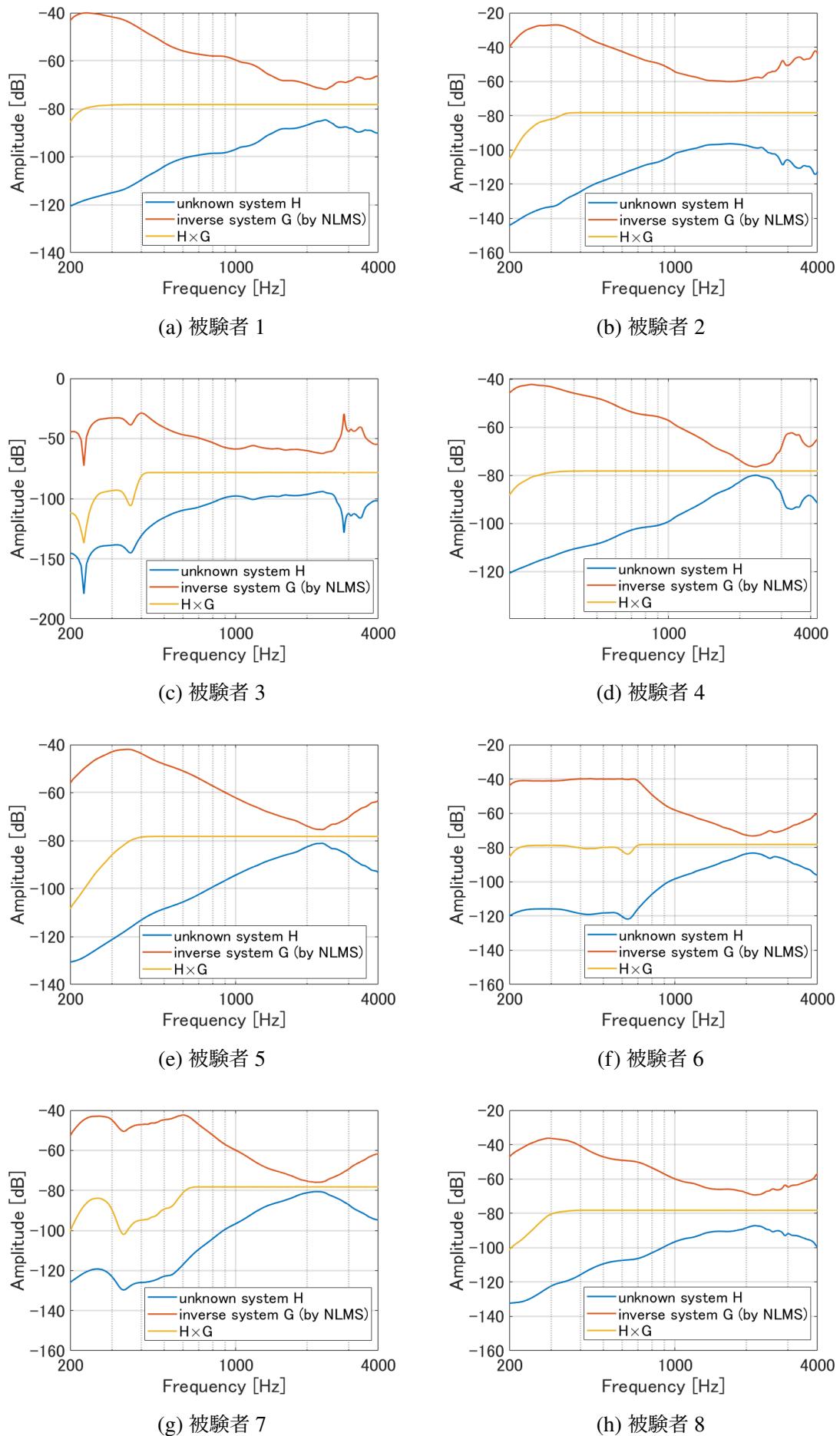


図 3.6: 逆フィルタの周波数特性

3.5 実験 1 物理評価実験

フィルタの作成が終了した後、外耳道内でのクロストークの抑制と骨導伝達特性の補正についての評価実験を行った。実験 1 では、シミュレーションと実測にて評価を行った。

3.5.1 実験方法

実験方法は、左のトランステューサーから入力信号、右からクロストークキャンセル音を流し、両側のマイクにて信号を観測する。そして、左側(同側)で観測した信号で逆フィルタの評価、右側(対側)で CTC フィルタの評価を行った。入力信号は 200 ~4,000Hz で帯域制限した 3 秒間のホワイトノイズに各フィルタを畳み込んだ信号を用いて、下記の 4 条件を各 5 回ずつ再生して加算平均を取り、評価を行った。また、実験 1 では両側で評価することが困難であるため、片側のみの補正を行った。

1. フィルタなし
2. 逆フィルタ
3. CTC フィルタ
4. 逆フィルタ + CTC フィルタ

図 3.7 に実験 1 のブロック図を示す。本実験のシミュレーションは図 3.7 のブロック図通りにシミュレーションを行った。

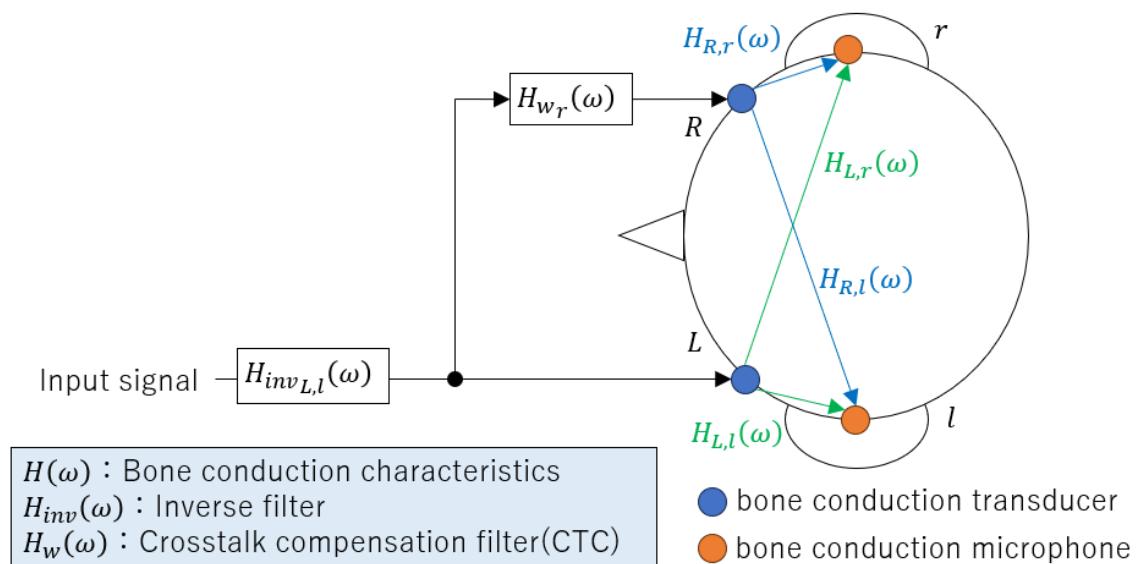


図 3.7: 実験 1 のブロック図

3.5.2 評価方法

クロストークの抑制についての評価方法は、右側(対側)で観測した信号を用いて、フィルタの有無によるクロストークの変化を周波数領域にて観察することによって評価した。また、骨導伝達特性の補正については左側(同側)で観測した信号を用いて、同側のマイクに所望の信号が届いているかをフィルタが有る場合と無い場合で周波数領域で観察することによって評価した。また、骨導伝達特性の補正の評価は観察しやすいように1kHzで0dBになるように調整した。

3.5.3 実験結果

図3.8, 3.9にクロストークの抑制結果を示す。図において、上図がシミュレーション結果、下図が実測での結果である。また、青線がCTCフィルタのみを用いた結果、橙色の線がCTCフィルタに逆フィルタを追加したときの結果であり、実線が測定5回の平均、帯が標準偏差を示している。この図では、縦軸がクロストークの減衰量を示しており、正の方向へ大きくなればなる程クロストークを減衰できていることを表している。

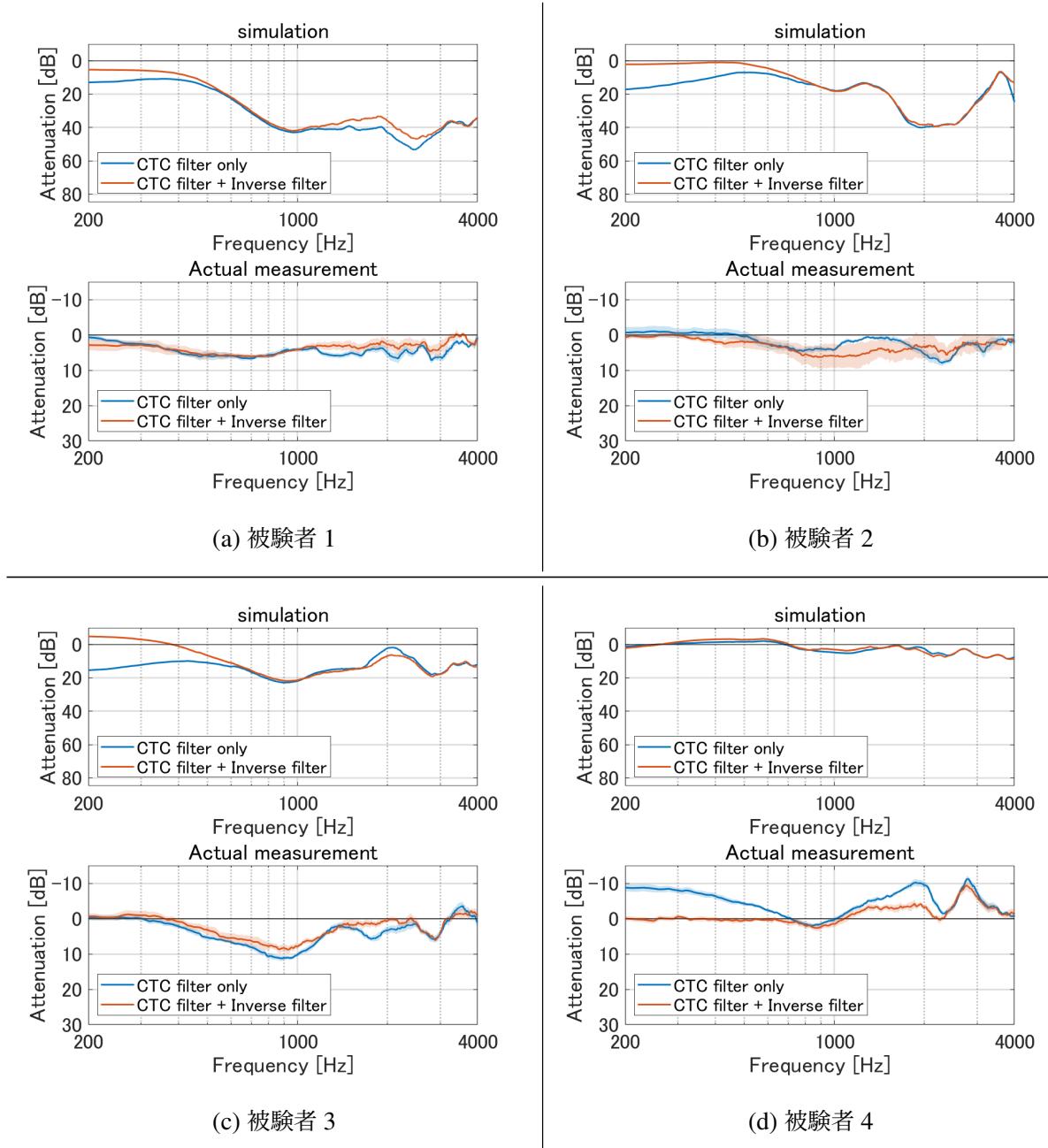


図 3.8: クロストークの減衰量

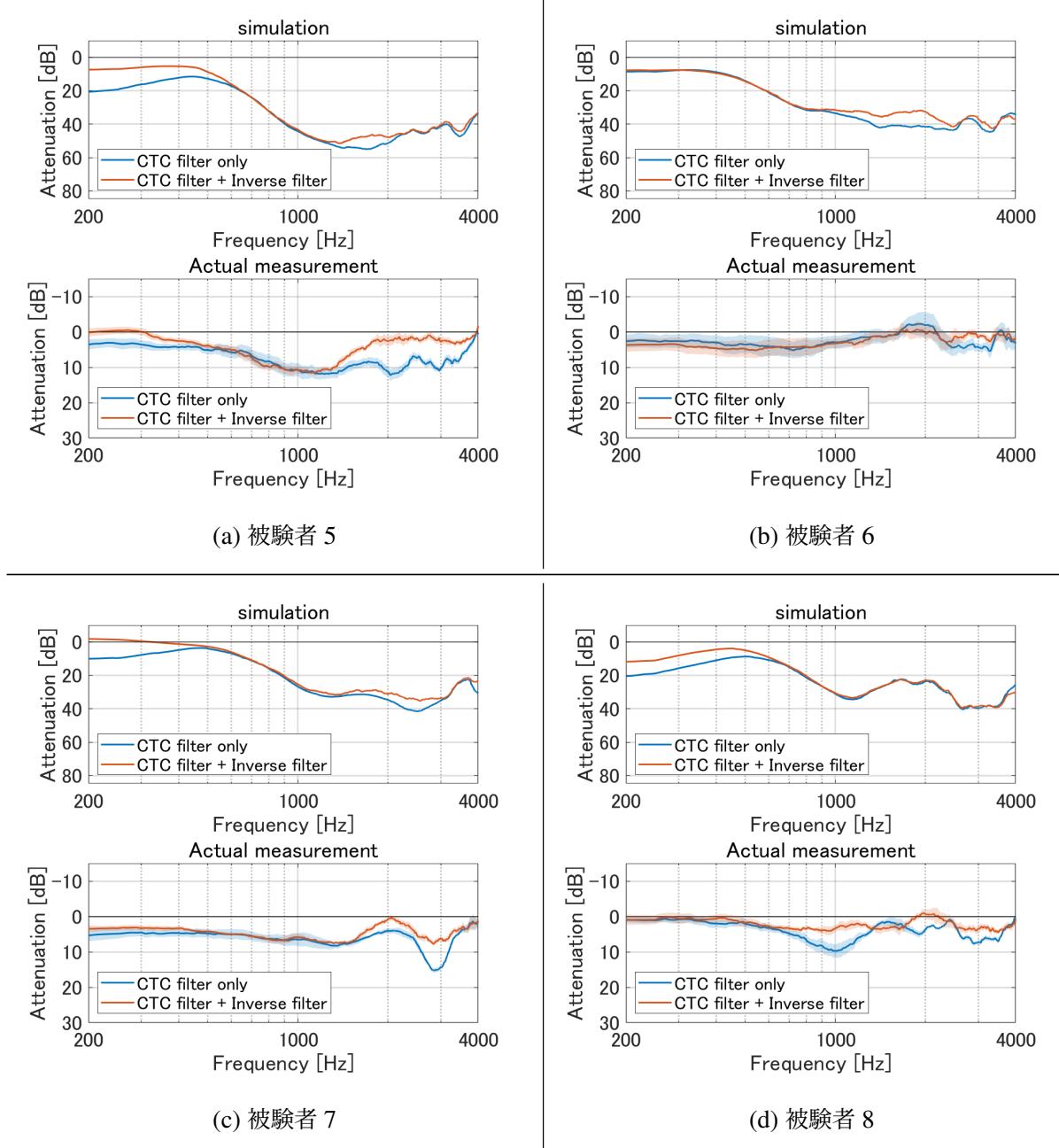


図 3.9: 図 3.8 の続き

図 3.8, 3.9 より、被験者 4 以外の全員がシミュレーション、実測ともにクロストークを抑制できており、個人差はあるが CTC フィルタのみの場合最大で約 16dB, CTC+逆フィルタの場合最大で約 10dB の減衰を実測で確認できた。また、被験者 4 以外の全被験者で共通して 1kHz 付近が一番クロストークを抑制できることが分かった。一方、被験者 4 ではシミュレーションにおいてクロストークをほとんど抑制できず、実測においてはクロストークが増幅してしまっている。これは、図 3.3d の H_{LR} より他の被験者より 1kHz 付近のクロストーク成分が約-10dB 程度低く、元々のクロストー

クが小さいため、キャンセル信号を入力した際に CTC フィルタを用いていない時と比べてクロストークが増幅してしまったことが原因と考えられる。

次に、骨導伝達特性を補正した際の同側の観測信号と所望の信号（入力信号）との差を図 3.10, 3.11 に示す。図において、上図がシミュレーション結果、下図が実測での結果である。また、青線が逆フィルタのみを用いた結果、橙色の線が逆フィルタに CTC フィルタを追加したときの結果、黄色線が何もフィルタをかけてないときの結果であり、実線が測定 5 回の平均、帯が標準偏差を示している。この図では、縦軸が所望の信号との差を示しており、0dB 付近でフラットであるほど所望の信号が同側に挿入した骨伝導マイクに届いていることを表している。

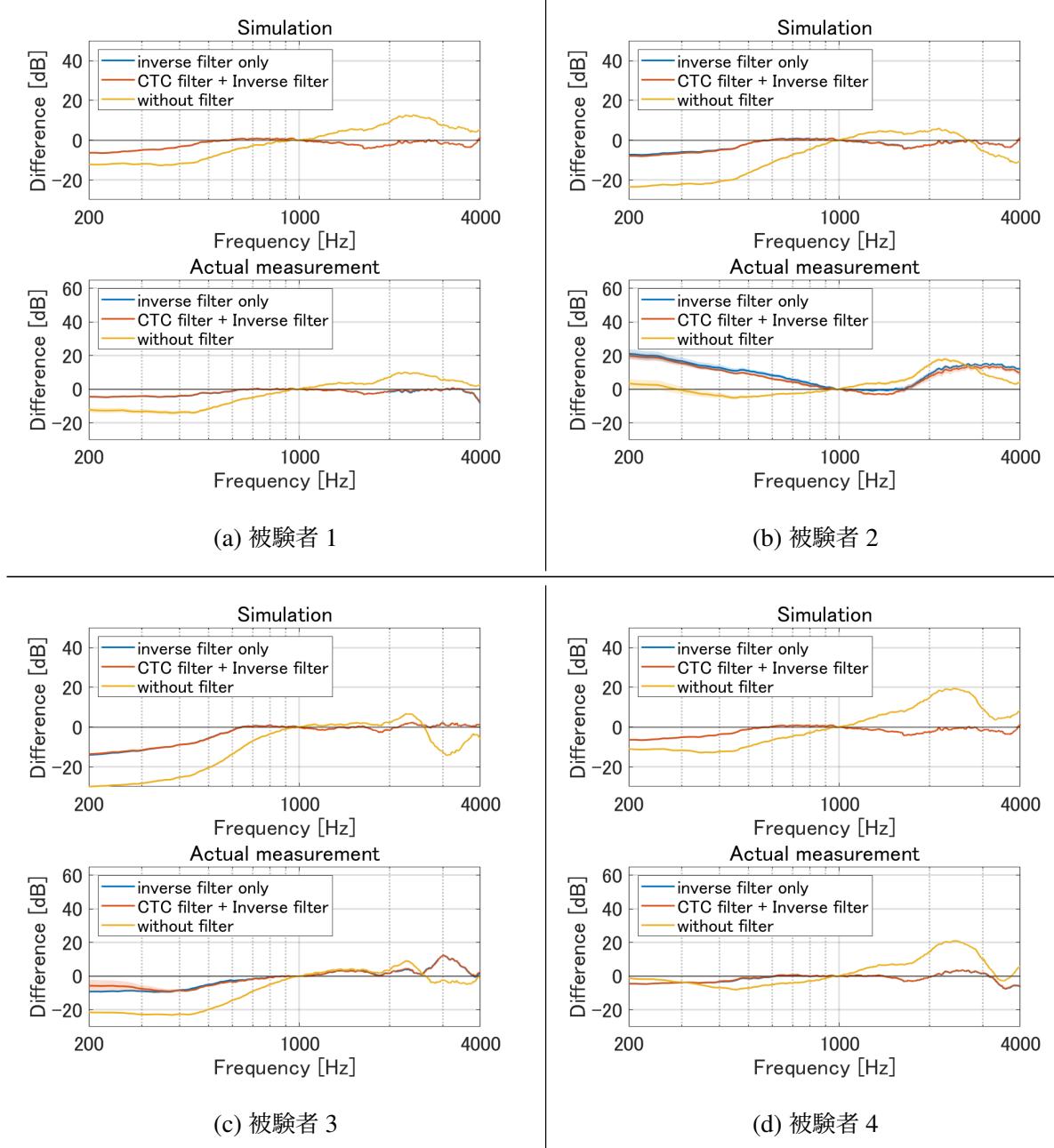


図 3.10: 所望信号との差

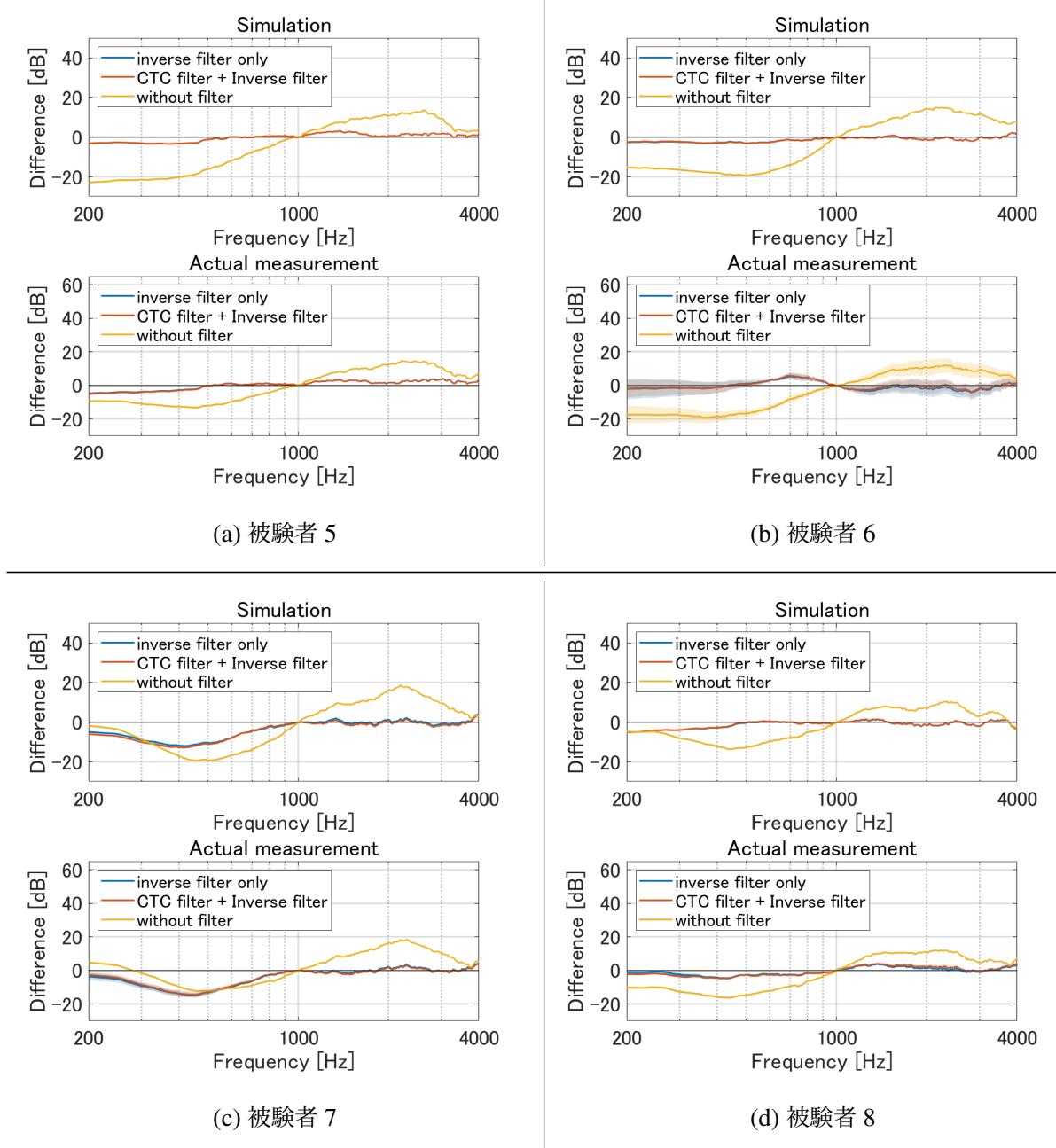


図 3.11: 図 3.10 の続き

図 3.10, 3.11 より、フィルタの有無で結果を比較したところ、被験者 2 以外の全被験者で 0dB 付近でフラットにできていることから骨導伝達特性の補正効果を確認できた。しかし、骨導伝達特性に急峻なピークやノッチがある場合、補正精度は低下した。また、被験者 2 についてはシミュレーションでは補正できているが実測において 300Hz 付近の低周波で信号が増幅してしまっている。これは、骨導伝達特性の測定後に機器の位置が少しずれたことが原因と考えられる。

上記の結果より、外耳道内に挿入したマイクで観測することによって、CTC フィル

タと逆フィルタ両方の効果を確認することができた。

3.6 実験2 定位試験

実験2では、下記の5つの条件で定位試験を行った。

1. フィルタなし(気導音)
2. フィルタなし(骨導音)
3. 逆フィルタ
4. CTC フィルタ
5. 逆フィルタ+CTC フィルタ

3.6.1 実験方法

定位試験では、呈示角を一周 $0\sim330^\circ$ を 30° 刻み(12方向)に設定し、1条件につき各方向3回ずつの計36回呈示した。呈示音は、200~4,000Hzで帯域制限した1秒間のホワイトノイズにKEMARのHRTF[13]を畳み込んだ信号を入力信号とし、条件に合わせて各フィルタを畳み込み呈示した。また、被験者には図3.12の定位試験用アプリにて回答してもらった。図3.13に実験2のブロック図を示す。

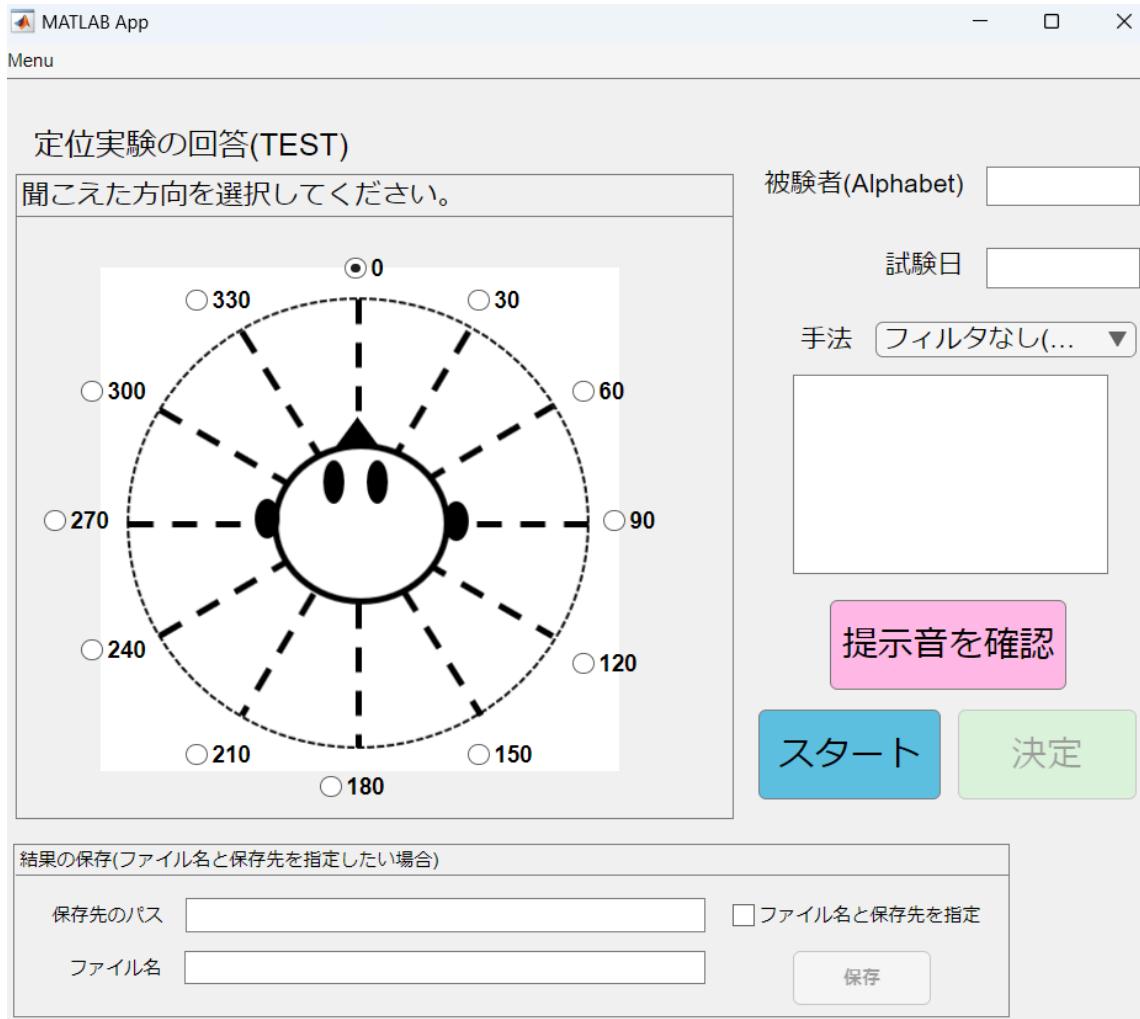


図 3.12: 定位試験用アプリ

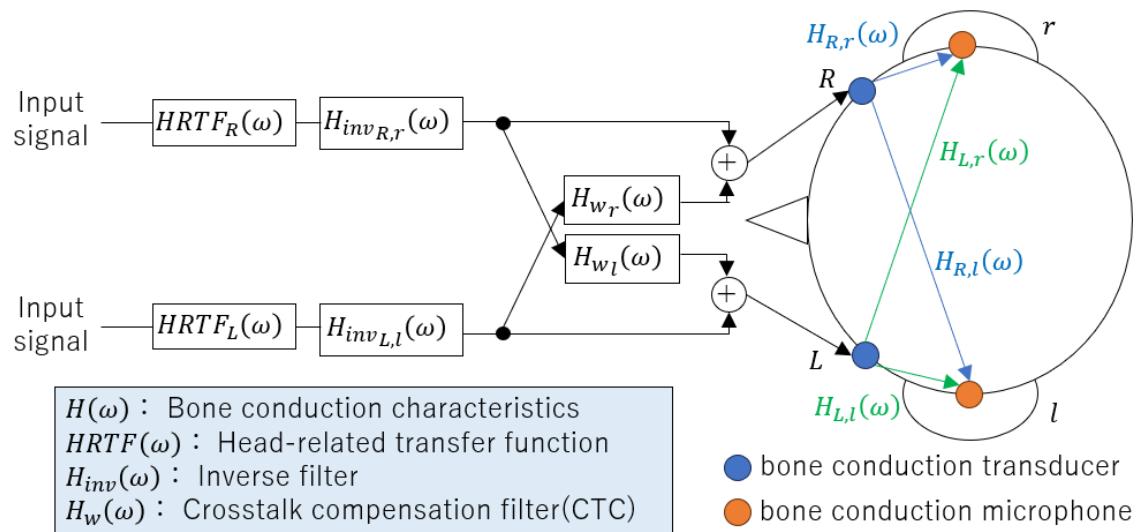


図 3.13: 実験 2 のブロック図

3.6.2 評価方法

定位試験では、以下の2種類の評価指標を用いる。

- 正答率
- 定位誤差

まず正答率では、被験者全員がどの程度正解したかを評価している。下記に正答率の式を示す。

$$Y_{Accuracy} [\%] = \frac{X_{CorrectAnswer}}{n} \times 100 \quad (3.1)$$

ただし、 $Y_{Accuracy}$ は正答率、 $X_{CorrectAnswer}$ は正答数、 n は呈示回数である。

次に、平均定位誤差では呈示角度と回答角度がどの程度離れているかを表している。下記に定位誤差の式を示す。

$$Y_{error} [^\circ] = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n |X_{PresentationAngle}(m) - X_{AnswerAngle}(m)| \quad (3.2)$$

ただし、 Y_{error} は定位誤差、 $X_{PresentationAngle}$ は呈示角、 $X_{AnswerAngle}$ は回答角、 n は呈示回数であり、 $|X_{PresentationAngle} - X_{AnswerAngle}|$ が 180° を超えたときは 360° で減算した。

以上の2つの評価方法で定位誤差への影響を調べた。しかし、一般的に人が前後方向の定位をするために必要な HRTF の周波数帯域は 5kHz 以上のピークやノッチに存在していると言われている [15]。そのため、本実験で使用した入力信号は 200~4,000Hz であり、前後方向の定位が困難である。したがって、本論文では実験自体は 360° の一周で行っているが、評価する際は後方を考慮せずに前面のみでの評価とする。具体的には、後方の角度を前方の角度に置換して計算を行う。例として呈示角度が 0° 、回答角度 180° の時、評価の際は回答角度を 0° に置換して評価を行う。

3.6.3 実験結果

表 3.2, 3.3 に定位試験の結果を示す。本論文ではクロストークと骨導伝達特性の減衰が定位精度にどのくらい影響を与えていたかの評価を行うこと目的のため、表において気導音の定位精度に近づく程クロストークなどが定位に影響を与えていることを示している。

表 3.2: 定位試験の正答率 [%]

	No filter (air)	No filter (bone)	Inverse filter	CTC filter	Inverse+CTC filter
Subject 1	67	36	47	44	56
Subject 2	86	39	44	50	31
Subject 3	64	50	53	53	47
Subject 4	61	56	17	69	11
Subject 5	61	56	25	47	31
Subject 6	56	36	33	42	53
Subject 7	69	47	42	67	44
Subject 8	61	50	31	42	39
Average	66	46	37	52	39

表 3.3: 定位試験の平均定位誤差 [°]

	No filter (air)	No filter (bone)	Inverse filter	CTC filter	Inverse+CTC filter
Subject 1	10	21	20	21	16
Subject 2	4	20	23	15	32
Subject 3	10	18	16	15	20
Subject 4	10	15	46	10	72
Subject 5	13	13	26	15	30
Subject 6	16	23	23	19	16
Subject 7	8	16	17	10	19
Subject 8	13	18	33	21	26
Average	11	18	25	16	29

表 3.2,3.3 より、CTC フィルタのみの場合、フィルタなし(骨導音)に比べて定位精度が平均で 6 ポイント向上し、平均定位誤差が 2° 小さくなった。これは、両耳に届く信号のレベル差(両耳間レベル差)が CTC フィルタによって改善され、より気導音に近づいたことが原因ではないかと考える。以上のことから、本実験の条件下(入力信号の帯域が 200~4,000Hz の狭帯域)において、クロストークが両耳間レベル差に

悪影響を及ぼしていることが分かった。

一方で、逆フィルタのみを用いた場合、正答率、平均定位誤差とともにフィルタなし(骨導音)と比べて精度が悪化した。これは、逆フィルタの特性上、骨導減衰をフラットにするように入力信号を増幅するため、同時にクロストークも増幅されたことが原因だと考える。したがって、純粋な骨導伝達特性の補正による効果を確認するには逆フィルタにCTCフィルタを追加した場合を見る必要がある。しかし、逆フィルタとCTCフィルタを同時に用いた場合でも正答率、平均定位誤差とともにフィルタなし(骨導音)と比べて精度が悪化した。これは、定位において左右方向の知覚の手がかりとなるのが1,500Hz以下の低域では両耳間時間差、1,500Hz以上では両耳間レベル差が優位[16]になると言われており、今回使用した入力信号が4kHz以下の信号のため効果が表れなかった可能性がある。また、クロストークキャンセル信号が反対側の蝸牛にクロストークとして届いたことによる精度低下も一つの原因として考えられる。

さらに、定位誤差について詳しく見るために、定位誤差の分布を下記に示す。図3.14より、逆フィルタをかけた際フィルタなしよりも 60° , 90° の定位誤差が増え、精度が悪化することが分かった。また、CTCフィルタのみの場合ほとんどの被験者で 0° , 30° 付近の定位誤差が増え、フィルタなしの場合と比べて定位誤差が小さくなつた。

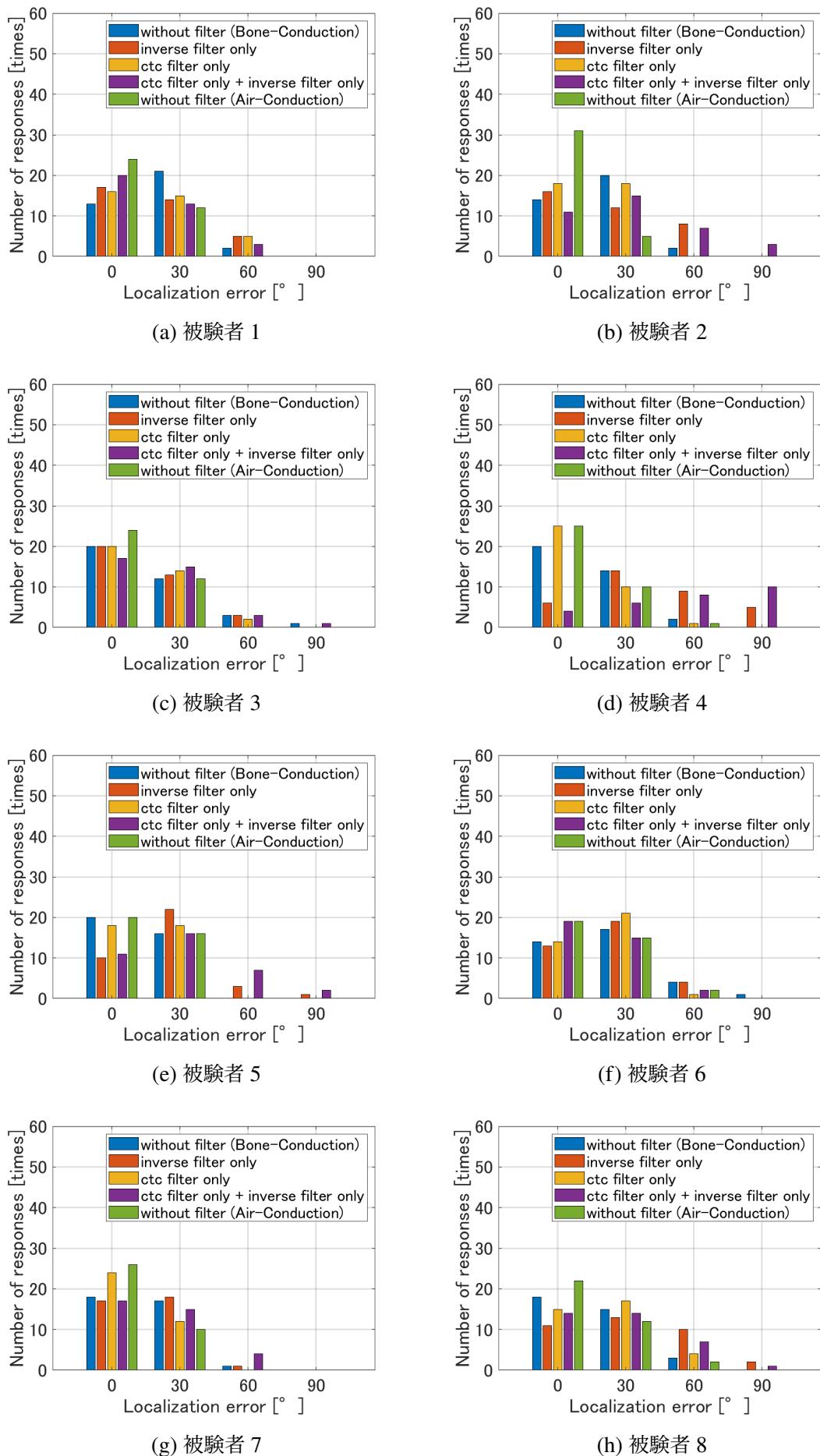


図 3.14: 定位誤差の分布

3.7 実験1, 実験2のまとめ

3.5節, 3.6節より, 個人差はあるが外耳道内でクロストークを減衰させることによって, 定位精度の向上を確認した. 特に, 被験者7ではクロストークを最大15dB減衰させることによって, 定位精度が20ポイント向上した. 以上のことから, クロストークが両耳間レベル差に悪影響を与えていたことが分かった.

一方で, 骨導伝達特性による減衰では, 逆フィルタをかけることによって8人中5人定位精度が悪化した. これは, 一般的に1,500Hz以上の高域において左右感の手がかりとなるものが両耳間レベル差であるのに対して, 今回使用した入力信号が200~4,000Hzの狭帯域信号であり, 骨導減衰を補正する逆フィルタの効果が表れなかったのではないかと考えられる. また, クロストークキャンセル信号が反対側の蝸牛にクロストークとして届いたことによる精度低下も一つの原因として考えられる. 以上のことから, 200~4,000Hzの狭帯域信号を用いた場合, 外耳道までの骨導伝達特性による減衰は定位との関係性が薄くなる可能性があることが本実験では分かった.

本論文において, 外耳道までの骨導伝達特性による減衰より外耳道に届くクロストークの方が定位に影響を与えていたことが分かった. しかし, あまりクロストークを抑制できていなくとも定位精度が改善した被験者や, 逆にクロストークを抑制できても定位精度があまり改善されない被験者もいた. これは, 今回の実験が外耳道壁に届いたクロストークを抑制しており, 実際に蝸牛に届くクロストークまで抑制できているとは限らないからである. そのため, 蝸牛でクロストークが抑止できているかを調べるために, 上記の実験に加えて主観評価実験も行った.

3.8 追加実験 主観評価実験

3.8.1 実験環境

主観評価実験は, 実験2と同じ骨導トランスデューサーと耳栓を装着して行った. ただし, 本実験では測定時間の都合上, 右側のみ主観評価実験を行った.

3.8.2 実験方法

本論文では, 主観的指標として純音受信閾値を利用した. 純音受信閾値とは, 片側からマスク音, その反対側から純音を流した時の純音の最小可聴音のことである. 今回は, 1-up/2-downの形式に基づいて純音受信閾値を測定した. 1-up/2-downとは, 誤反応が1試行あると刺激強度が上がり, 正反応が2試行連続すると刺激強度が下がる.

刺激強度の変化の反転回数がある値に達したときに測定は打ち切られ、そのときの刺激強度が最終的な推定値となる実験形式 [17] である。

本実験では、入力信号はキャンセルなしの場合左側からマスク音、右側から無音か純音を流し、キャンセルありの場合は左側からマスク音、右側から無音 + マスク音のキャンセル信号か純音 + マスク音のキャンセル信号とした。下記に実際の実験手順を示す。

1. 区間1、区間2の順番で音が流れる
2. 純音が聞こえた区間を選択する
 - 2連続正解 → 純音のレベルを下げる
 - 1回不正解 → 純音のレベルを上げる
3. 1, 2を繰り返し、純音のレベル増減の切り替わりが6回起こったら、後ろ4回分の切り替わり時のレベルを記録し、平均をとることによって閾値とする

レベル増減値は切り替わり回数が2回以下の時は4dB、3回以上の時は2dBとしている。なお、純音の開始レベルはマスク音に対して-15dBと設定した。図3.15に実際のレベル増減の経過を示す。また、測定する周波数は250, 500, 750, 1,000, 2,000, 3,000, 4,000Hzの計7つをCTCフィルタがある場合とない場合で行った。

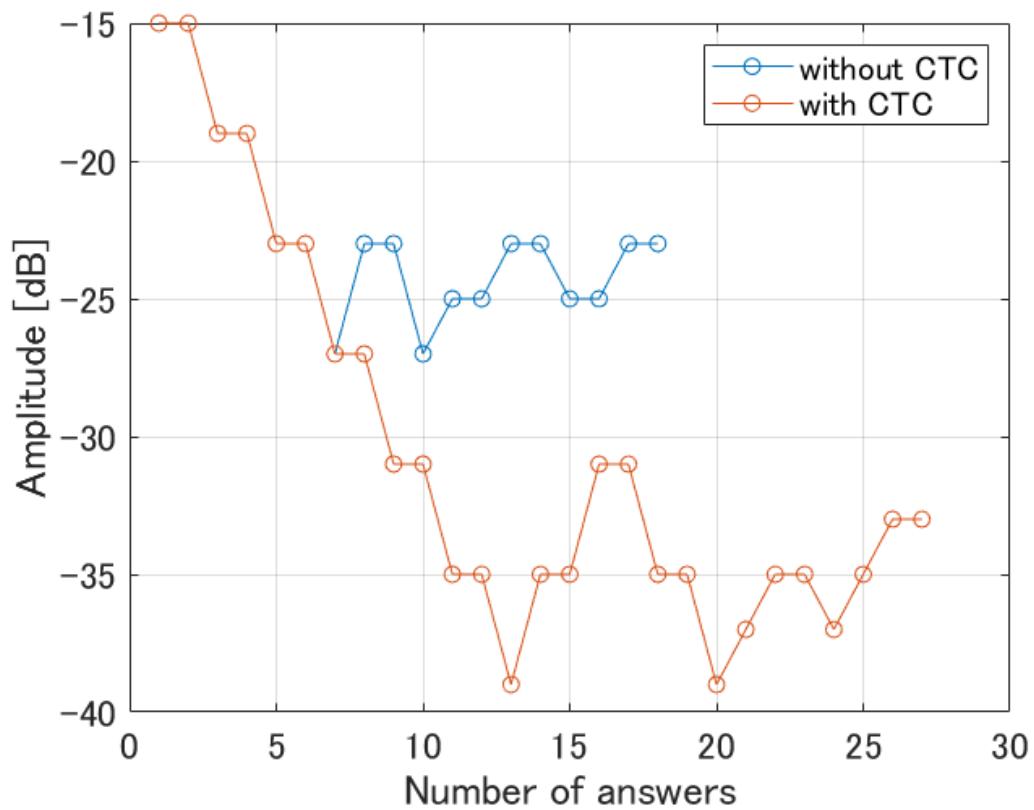


図 3.15: 主観評価実験の例 (500Hz)

実験では、図 3.16 に示すような主観評価実験用アプリを用いて行った。

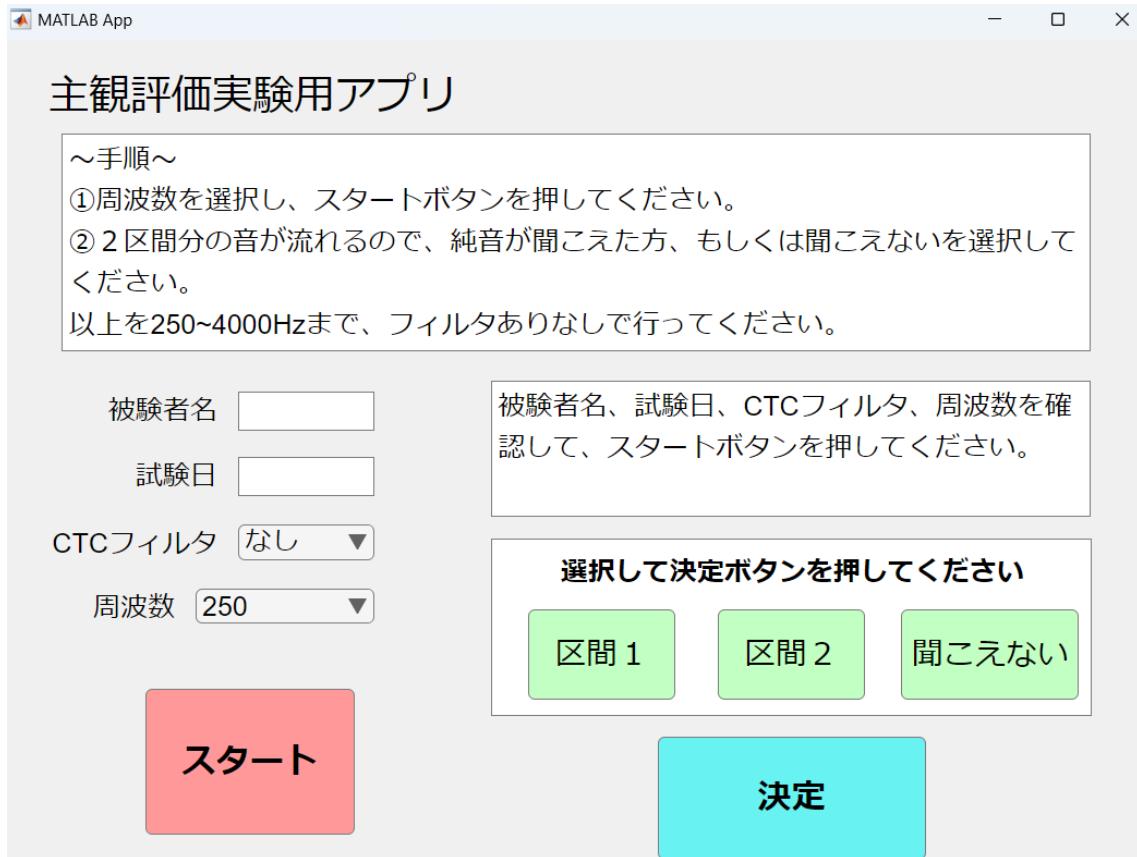


図 3.16: 主観評価実験用アプリ

3.8.3 評価方法

主観評価実験におけるクロストーク減衰量は、最終的な純音の減衰量をフィルタがある場合とない場合で比較して求めた、具体的な式を下記に示す。

$$Y_{\text{Attenuation}}[\text{dB}] = X_{\text{WithoutFilter}} - X_{\text{WithFilter}} \quad (3.3)$$

ただし、 $Y_{\text{Attenuation}}$ はクロストークの減衰量、 $X_{\text{WithFilter}}$ は CTC フィルタがある場合の純音の最終的な減衰量、 $X_{\text{WithoutFilter}}$ は CTC フィルタがない場合の純音の最終的な減衰量である。

3.8.4 実験結果

図 3.17 に主観評価実験でのクロストークの減衰量のグラフ、表 3.4 に主観評価実験でのクロストークの減衰量の表を示す。

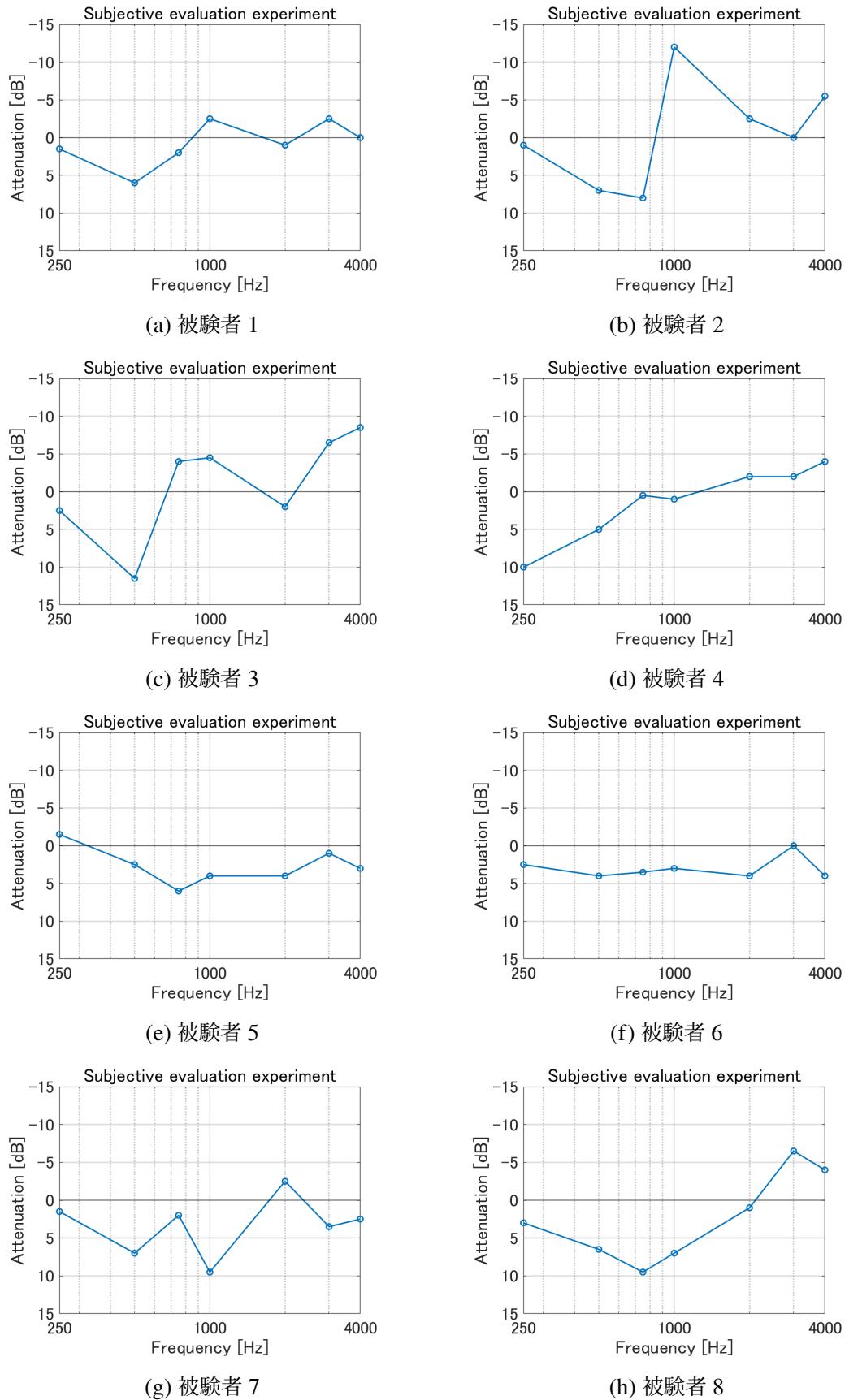


図 3.17: 主観評価実験におけるクロストークの減衰量

表 3.4: 主観評価実験のクロストーク減衰量 [dB]

	Frequency [Hz]						
	250	500	750	1,000	2,000	3,000	4,000
Subject 1	1.5	6.0	2.0	-2.5	1.0	-2.5	0.0
Subject 2	1.0	7.0	8.0	-12.0	-2.5	0.0	-5.5
Subject 3	2.5	11.5	-4.0	-4.5	2.0	-6.5	-8.5
Subject 4	10.0	5.0	0.5	1.0	-2.0	-2.0	-4.0
Subject 5	-1.5	2.5	6.0	4.0	4.0	1.0	3.0
Subject 6	2.5	4.0	3.5	3.0	4.0	0.0	4.0
Subject 7	1.5	7.0	2.0	9.5	-2.5	3.5	2.5
Subject 8	3.0	6.5	9.5	7.0	1.0	-6.5	-4.0
Average	2.6	6.2	3.4	0.7	0.6	-1.6	-1.6

表 3.4 より、個人差はあるが全被験者で 500Hz 付近のクロストークの減衰を確認できた。また、全周波数帯の中で 500Hz が一番抑制できており、平均 6.2dB 減衰した。外耳道でのクロストークキャンセル（図 3.8, 3.9）と蝸牛でのクロストークキャンセル（図 3.17）を比較すると、被験者 2, 3, 4 以外は概ね同じようにクロストークを減衰させることができているが、被験者 2, 3 を見てみると外耳道では抑制できているが蝸牛ではクロストークが増幅してしまっている。また、被験者 4 では外耳道でのクロストークは増幅し、蝸牛でのクロストークは 500Hz 以下で減衰している。以上のことから、外耳道でのクロストークキャンセルが、必ずしも蝸牛に効果があるわけではないということが分かった。

次にクロストークの減衰についての結果（図 3.8, 3.9, 3.17）と定位試験における定位誤差の結果（図 3.14）を比較する。今回 CTC フィルタを用いたときの定位精度が骨導音のフィルタなしより低かった被験者 5, 8 は蝸牛でのクロストークの抑制は確認できた。しかし、図 3.17 より 30° の定位誤差が増えたことにより、定位精度が低下した。これは、主観評価実験と定位試験の間で機器の位置が少しすれてしまったことによる位相のずれや、クロストークキャンセル音がクロストークとして反対側の蝸牛に悪影響を及ぼしていることが原因ではないかと考える。しかし、蝸牛でのクロストークの抑制を確認できた被験者は両耳間レベル差が改善され、定位誤差が減り正答率も向上したことから、クロストークが定位に悪影響を与えていることが本実験で確認できた。

第4章

おわりに

4.1 まとめ

本論文では、骨導音を用いた際の定位精度低下の原因と言われている骨導伝達特性による減衰とクロストークが定位にどの程度影響を与えていたかを実験にて評価した。

物理評価実験では、外耳道内に挿入した骨伝導マイクを用いて、骨導トランスデューサーから骨伝導マイクまでの経路特性の補正および外耳道壁に届くクロストークの抑制についての評価を行った。その結果、個人差はあるもののほとんどの被験者で骨導伝達特性の補正に成功し、クロストークは最大で 16dB 減衰させることができた。

また、定位試験では逆フィルタ、CTC フィルタを用いた際の定位精度の変化を調べた。その結果、逆フィルタを用いた際はフィルタなし（骨導音）と比べて正答率、平均定位誤差とともに精度が悪くなかった。これは、クロストークキャンセル信号が反対側の蝸牛にクロストークとして届いたことや、本論文で使用した入力信号が 200~4,000Hz の狭帯域信号であるため、逆フィルタの効果が表れなかったことが原因ではないかと考えられる。したがって、本論文において 4kHz 以下の狭帯域信号を用いた場合、外耳道での骨導伝達特性による減衰と定位精度は関係性が薄い可能性があることが分かった。一方で、CTC フィルタを用いてクロストークの抑制を行った場合、定位精度が平均 6 ポイント向上した。これは、被験者によって個人差はあるが、外耳道でのクロストークの抑制を行うことによって蝸牛でもクロストークが抑制され、両耳間レベル差が改善されたためである。したがって、本論文において外耳道壁に届くクロストークは両耳間レベル差に悪影響を与えており、その結果、定位精度にも影響を与えていたことが確認できた。

4.2 今後の展望

本論文では音源に方向感を持たせるために、ダミーヘッドの HRTF を使用した。しかし、一般的に他人の HRTF では前後誤判定が多くなることから定位精度が著しく低下すると言われているため、本実験を本人の HRTF を使用して再度実験を行うことが必要である。また、今回骨導伝達特性の補正について入力信号が 4kHz 以下の信号のため定位への影響が表れなかった可能性があることや、本論文で使用したアクティブノイズコントロールでは高周波のキャンセルは困難であることから、本論文とは違うクロストークキャンセルの手法で 4kHz 以上の広帯域で実験を行う必要がある。また、クロストークキャンセル信号がクロストークとしてどの程度反対側の蝸牛に影響を与えていているかを調査する必要がある。

また、本実験全体の所要時間が約 2 時間（頭部伝達関数の測定 10 分、フィルタの作成 30 分、物理評価実験 10 分、主観評価実験 50 分、定位試験 20 分）と長時間の測定であり、機器の取り外しもできないため被験者への負担が大きくなつた。そのため、今後はフィルタの作成時間を短くするなどで測定時間の改善が必要である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、指導教員として日頃より多くのご指導ご鞭撻を頂きました、杉田泰則准教授に厚くお礼申し上げます。また、本論文の審査において適切かつ丁寧にご指摘して頂きました岩橋政宏教授、圓道知博教授、原川良介准教授、藤井賢吾助教に心より感謝申し上げます。

最後に、本研究について多くのアドバイスや相談に乗ってくださったり、被験者実験にご協力いただいた信号処理応用研究室の皆様、並びに、これまでの学生生活において様々な面で支えて下さった両親に深く感謝の意を示して、謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] 森川大輔, ”はじめての音像定位試験,” 日本音響学会誌, 74巻, 10号, pp.547-554, 2018年.
- [2] T. Asakura, ”Bone Conduction Auditory Navigation Device for Blind People,” Applied Sciences, Vol.11, No.8, 3356, pp.1-19, 2021.
- [3] 白石君男, ”聴覚にかかわる社会医学的諸問題「骨導補聴器の両耳聴による方向感」,” Audiology Japan, Vol.62, No.4, pp.261-275, 2019.
- [4] S. Stenfelt, ”Bilateral fitting of BAHA and BAHA® fitted in unilateral deaf persons: Acoustical aspects Adaptación bilateral de BAHA y adaptación de BAHA en sorderas unilaterales: Aspectos acústicos,” International Journal of Audiology, Vol.44, No.3, pp.178-189, 2005.
- [5] 伊藤一仁, ”骨導聴覚の知覚機序に関する実験的考察,” 純真学園大学雑誌, 第11号, pp.67-72, 2021.
- [6] 矢田雅人, 杉田泰則”歯骨伝導における骨導知覚寄与成分の調査とその推定に関する研究,” 長岡技術科学大学大学院工学研究科修士論文, pp.1-35, 2023.
- [7] Irwansyah, T. Usagawa, ”Bone conduction microphone measures in the external auditory canal:An application for implementing cross-talk cancellation for bone-conducted sound,” The Acoustical Society of Japan, Vol.40, No.5, pp.356-359, 2019.
- [8] Irwansyah, S. Otsuka and S. Nakagawa, ”Improved Low-Frequency Crosstalk Cancellation in Bone Conduction Using Bone Transducers and Probe Microphone,” in IEEE Access, vol.10, pp.79201-79212, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3194171.
- [9] 佐々木大毅, 杉田泰則, ”骨伝導デバイスによる音像定位のためのクロストークキャンセルに関する研究,” 長岡技術科学大学大学院工学研究科修士論文, pp.1-33, 2023.
- [10] 西村正治, 宇佐川毅, 伊勢史郎, ”日本音響学会編 音響テクノロジーシリーズ9 アクティブノイズコントロール,” 日本音響学会, 株式会社コロナ社, pp.1,74-76, 2006.

- [11] 小泉孝之, 岩木雅俊, 那須潔, ”アクティブノイズコントロールの紹介,” 神鋼パンテック技報, Vol.42, No.1, pp.88-95, 1998 年 9 月.
- [12] 中西功, ”3 章 適応信号処理,” 電子情報通信学会『知識ベース』, 電子情報通信学会, pp.1-5. 2011.
- [13] B. Gardner, K. Martin, ”HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone,” MIT Media Laboratory, 1994.
<https://sound.media.mit.edu/resources/KEMAR.html>
- [14] 金田豊, ”インパルス応答測定信号と測定誤差,” 日本音響学会誌, 69 卷, 10 号, pp.549-554, 2013.
- [15] 飯田一博, ”頭部伝達関数の基礎と 3 次元音響システムへの応用,” 日本音響学会, 株式会社コロナ社, p.9, 2017.
- [16] 倉片憲治, ”音の方向知覚とその加齢変化,” 日本心理学会機関誌 心理ワールド, 89 号, pp.23-24, 2020.
- [17] 原澤賢充, ”適応的心理物理学的測定法による閾値の推定,” VISION, Vpl.15, No.3, pp.189-190, 2003.