

平成 19 年度
学士学位論文

サブスピーカを用いたクロストークの軽減

Reduction of Cross-talk with Subspeaker

1080363 小林 源太

指導教員 福本 昌弘

2008 年 3 月 7 日

高知工科大学 情報システム工学科

要 旨

サブスピーカを用いたクロストークの軽減

小林 源太

ステレオチャンネルで録音された音声をスピーカで聞く場合、音源から受聴者の両耳までの壁面や床、受聴者の頭部などによる反射音の影響を無くすことで、録音時の音場を正しく再現することができる。しかし、スピーカでの楽音再生時には、クロストークと呼ばれる本来聞こえるべきでない音が観測されてしまうという問題が発生する。そして、この問題を解決するための技術として、これまでにいくつかのトランスオーラルシステムと呼ばれる技術が研究されている。しかしトランスオーラルシステムでの音場再生では、残響時間が長い場合には演算量が増大してしまうことから、実用化には至っていない。

そこで、本論文では、スピーカを使用した楽音再生時の音場再現精度向上を目的とし、サブスピーカと呼ばれる補正用のスピーカを用いたクロストーク成分の軽減を検証し、実験によってクロストーク成分が軽減されていることを確認している。

キーワード 音場再生, バイノーラルシステム, トランスオーラルシステム, クロストーク, 重ね合わせの原理

Abstract

Reduction of Cross-talk with Subspeaker

Genta Kobayashi

It is possible to reproduce ideal sound field by removing the room reverberation effect between loudspeakers and the listening points when sound is outputed by loudspeakers. The main disadvantage by using loudspeakers is the cross-talk problem. It has been investigated the transaural system for solving this problem. However, this system has not been applied to the realization of the acoustic field because of increase in amount of calculate.

In this study, in order to improve the reproduction precision in the transsaural system, I propose reduction of cross-talk by using subsperker. The result of compensation experiments shows reduction of the cross-talk component.

key words sound field reproduction, binaural system, transaural system, cross-talk, principle of superposition

目次

| | | |
|-------|---------------------|----|
| 第 1 章 | 序論 | 1 |
| 1.1 | 本研究の背景と目的 | 1 |
| 1.2 | 本論文の構成 | 2 |
| 第 2 章 | 音場再生システム | 3 |
| 2.1 | はじめに | 3 |
| 2.2 | 音響システムと線形モデル | 3 |
| 2.3 | バイノーラルシステム | 5 |
| 2.4 | トランスオーラルシステム | 7 |
| 2.4.1 | 多入力系逆フィルタ (MINT 理論) | 7 |
| 2.4.2 | トランスオーラルシステムの構成 | 8 |
| 2.5 | まとめ | 11 |
| 第 3 章 | サブスピーカを用いたクロストークの軽減 | 12 |
| 3.1 | はじめに | 12 |
| 3.2 | 重ね合わせの原理 | 12 |
| 3.3 | クロストーク音の消去方法 | 14 |
| 3.4 | 受聴点を 1 つとした場合での補正実験 | 15 |
| 3.4.1 | 実験環境 | 16 |
| 3.4.2 | 評価方法 | 18 |
| 3.4.3 | 実験結果と考察 | 18 |
| 3.5 | サブスピーカからのクロストーク軽減実験 | 22 |
| 3.5.1 | 実験環境 | 22 |
| 3.5.2 | 実験結果と考察 | 23 |

目次

| | | |
|-------|-------------------|----|
| 3.6 | まとめ | 24 |
| 第 4 章 | 結論 | 27 |
| 4.1 | 本研究のまとめ | 27 |
| 4.2 | 今後の課題 | 28 |
| 謝辞 | | 29 |
| 参考文献 | | 30 |

目次

| | | |
|------|---------------------------------------|----|
| 2.1 | 一般室内における音の伝搬の様子 | 4 |
| 2.2 | 図 2.1 の等価回路 | 5 |
| 2.3 | 人間の両耳での受音 | 5 |
| 2.4 | ダミーヘッドを使用したバイノーラルシステム | 6 |
| 2.5 | 信号処理を使用したバイノーラルシステム | 6 |
| 2.6 | スピーカを使用しての受音 | 7 |
| 2.7 | 多入力出力形逆フィルタ (MINT 理論) の基本構成 | 8 |
| 2.8 | トランスオーラルシステムの構成 | 9 |
| 2.9 | トランスオーラルシステムの構成 | 10 |
| 3.1 | $10 \cdot \sin(x)$ の波形 | 13 |
| 3.2 | $-(10 \cdot \sin(x))$ の波形 | 13 |
| 3.3 | 図 3.1 と図 3.2 の波を重ね合わせた波形 | 13 |
| 3.4 | サブスピーカを用いたクロストーク成分の消去法 | 14 |
| 3.5 | メインスピーカから受音した波形の例 | 14 |
| 3.6 | 図 3.5 の波形を消音するために必要な音波 | 14 |
| 3.7 | サブスピーカから受音した波形の例 | 15 |
| 3.8 | 図 3.7 の音波における音圧の変更と遅延処理 | 15 |
| 3.9 | ダミーヘッド | 17 |
| 3.10 | 実験を行った部屋 | 17 |
| 3.11 | 実験環境 | 17 |
| 3.12 | スピーカ-受聴点距離 | 22 |
| 3.13 | ダミーヘッドを配置する位置と方向 | 23 |
| 3.14 | サブスピーカの配置 | 23 |

表目次

| | | |
|-----|----------------|----|
| 3.1 | 観測時の条件一覧 | 16 |
| 3.2 | 条件 1 での観測結果 | 19 |
| 3.3 | 条件 2 での観測結果 | 20 |
| 3.4 | 条件 3 での観測結果 | 21 |
| 3.5 | 消去率の高い条件とその消去率 | 22 |
| 3.6 | 観測結果 (250Hz) | 25 |
| 3.7 | 観測結果 (500Hz) | 25 |
| 3.8 | 観測結果 (1000Hz) | 26 |

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景と目的

音の再生時には、コンサートホールや室内、屋外など、録音した様々な環境の臨場感を、できるだけ再現することが望まれている。これを実現するための技術として、音場再生と呼ばれる技術が提案され、現在までに様々な研究が進められている。

その音場再生技術の 1 つとして、バイノーラルシステムが挙げられる。バイノーラルシステムでの録音は、バイノーラル録音と呼ばれ、これはダミーヘッドと呼ばれる人の聴覚器官を再現したマイクを使用して録音を行う方法である。そして、受聴者は録音された音をイヤホンやヘッドホンで再生することで、録音された場所にいるかのような臨場感を得ることができる [1]。しかしイヤホンやヘッドホンなどによる再生には、長時間の使用による受聴者への負担などの問題があり、これを解消するための再生方法として、スピーカを使用しての再生方法を挙げることができる。

しかしスピーカでの再生時には、左スピーカから出力された音声は右耳にも届いてしまい、右スピーカから出力された音声は左耳にも届いてしまう。この片方のスピーカから逆側の受聴点に届く音の成分はクロストーク成分と呼ばれ、この成分によって、録音された時の音場が再生時に正しく再現されないという問題が発生する。

この問題を解決するためにトランスオーラルシステムと呼ばれる、逆フィルタを用いたシステムが提案されているが、この手法は残響時間の長い通常の部屋などの一般的な音場では、システムが複雑になり演算量が膨大なものになってしまう [2]。

そこで本研究では、制御システム自体には影響を与えない簡単な方法でクロストーク成分

1.2 本論文の構成

を削減し、音場再生精度を向上させることを目的とした基礎研究として、サブスピーカと呼ぶ補正用のスピーカを用いた方法での、クロストーク成分軽減の可能性を考察する。

1.2 本論文の構成

第2章では、音場などの音響伝達系を含んだ音響システムが線形モデルとして表現できることについて説明し、音場再生技術の代表例であるバイノーラルシステムとトランスオーラルシステムについて述べ、これらのシステムにおける問題点を指摘する。また、トランスオーラルシステムについては、多入出力形逆フィルタ (MINT 理論) の考え方に基づいたシステムを説明し、その問題点を指摘する。

第3章では問題を解決する提案方法の基礎である重ね合わせの原理について述べ、続いて提案方法を述べる。そしてこの方法を用いて実験を行い、結果と考察を述べる。

第4章では本研究の結論を述べ、今後の課題について述べる。

第 2 章

音場再生システム

2.1 はじめに

音の再生時には、コンサートホールなど、録音した環境の音場をできるだけ再現することが望まれており、これを実現するための技術として音場再生がある。そして、その音場再生技術における録音技術のひとつとしてバイノーラル録音が既に研究されている。しかし、バイノーラル録音した音声の再生方法は一般にヘッドホン再生であり、ヘッドホン再生時には長時間の使用による耳介の痛みなどの問題点がある。この問題点を解消するための技術として、バイノーラル録音した音声をスピーカ再生で実現するトランスオーラルシステムがある。

本章では、まず音場などの音響伝達系を含んだ音響システムが、線形モデルとして表現されることを説明する。線形モデルは、音響システムの動作の理解や解析に有用となる。次に、バイノーラルシステムとトランスオーラルシステムについての詳細を述べ、各々の問題点を述べる。また、多チャンネル-多点制御系において MINT 理論を用いることで音場再生が可能であることを述べる。

2.2 音響システムと線形モデル

空間内の 2 点間の音の伝わり方を表す関数を空間伝達関数 $G(z)$ という。空間が屋外や吸音壁をもった部屋などのように、音の反射がない自由空間と呼ばれる空間であれば、空間伝達関数 $G(z)$ は音源からの距離にのみ依存し、これは、音圧が音源からの距離に反比例して減少する距離減衰特性と、空間を音が伝搬するのに要する伝搬遅延時間を表す。ここで、図 2.1 の

2.2 音響システムと線形モデル

ような一般室内である場合での 2 点間の音の伝達を考える。時刻 t におけるスピーカに入力した音を $x(t)$ 、マイクロホンで受信した信号を $y(t)$ とする。このときマイクロホンで受信した信号 $y(t)$ には、音源からマイクロホンに直接最初に到達する直接音と、壁面や床などで反射され遅れて到達する反射音が含まれる。ここで反射音は、マイクロホンで受信されるまでに壁面などで反射された回数によって 1 次反射音、2 次反射音などに分類される。なお、1 次、2 次などの低次反射音は単に初期反射音と呼ばれ、また高次の反射音は残響音と呼ばれる場合がある。このような音の反射は壁面や床での吸音などによって、音のエネルギーが消滅してしまうまで多数繰り返される。

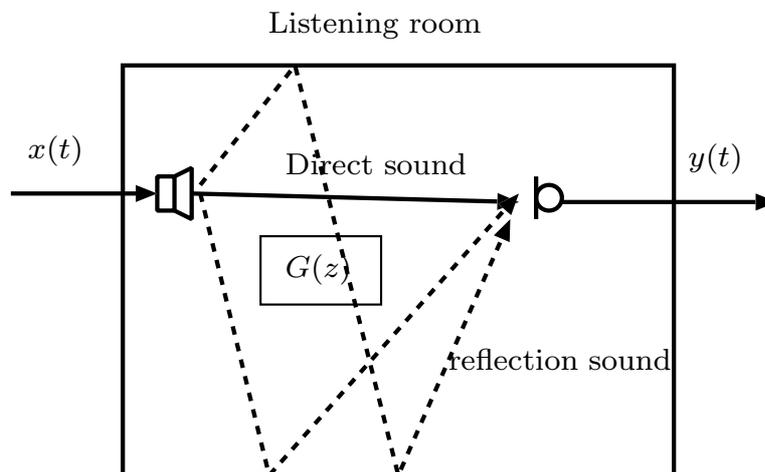


図 2.1 一般室内における音の伝搬の様子

このインパルス応答を標本化して得た離散数列を $g(0), g(1), g(2), \dots$ と表す。このとき室内伝達関数 $G(z)$ は、この離散数列を z 変換した次式により求められる。

$$G(z) = \sum_{i=0}^{\infty} g(i)z^{-i} \quad (2.1)$$

さらに、ここで音源、マイクロホン、空間伝達系による影響をすべて線形であると仮定すると、 $x(t)$ と $y(t)$ の関係は、インパルス応答 $g(k)$ を用いて以下のように表される。

$$y(t) = \sum_{i=0}^{\infty} g(i)x(t-i) \quad (2.2)$$

2.3 バイノーラルシステム

そしてこの式は、観測したインパルス応答 $g(k)$ を用いることにより、任意の入力信号 $x(n)$ に対する応答 $y(t)$ を求めることができることを意味している。ここで式 2.2 の両辺を z 変換すると、次式のように変形される。ただし、 $X(z), Y(z)$ は、それぞれ $x(t), y(t)$ の z 変換を意味する。

$$Y(z) = G(z)X(z) \quad (2.3)$$

この式 2.3 の関係より、図 2.1 の音響伝達系は、図 2.2 のような等価回路で表すことができる。このように、室内音場における音響の入出力システムは、線形システムとして表すことができる。

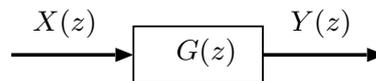


図 2.2 図 2.1 の等価回路

2.3 バイノーラルシステム

人間が両耳で音声を聞く場合、音源からの音波は、図 2.3 のように、受聴者の耳介や顔面などによる反射や回折の影響を受けたのち、外耳道を経て鼓膜へ到達する。このような頭部による音源への影響は、頭部伝達関数と呼ばれる。

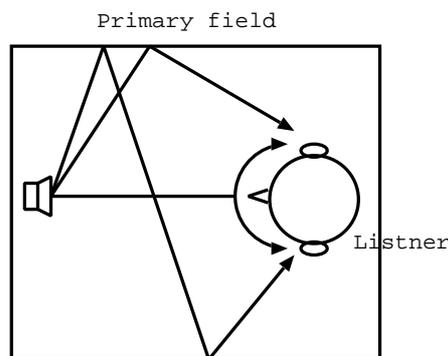


図 2.3 人間の両耳での受音

そこで、録音した原音場の臨場感をより高く得るための音場再生技術として、バイノーラルシステムがある。バイノーラルシステムでは、図 2.4 のようにダミーヘッドと呼ばれる人間

2.3 バイノーラルシステム

の頭部や耳介を再現した特殊なマイクを使用して録音を行い、それをヘッドホンやイヤホンを使用して再生する [1]。このようにすることで、頭部伝達特性を再現することができる。また、ダミーヘッドを使用して録音する方法の他に、図 2.5 のように音源信号を、無響室での近似録音などで、直接音成分だけからなる 1 チャンネルのドライソース信号として与え、これに頭部伝達特性を畳み込んで、2 チャンネルのバイノーラル信号を生成し、再生する手法もある。これらの方法により受聴者は、原音場での頭部や耳介などによる反射や回折の影響を再生時に体感することができ、これらの録音・再生方法を、それぞれバイノーラル録音・バイノーラル再生と呼ぶ。しかしヘッドホンやイヤホンでの再生には、長時間の使用に伴い耳介の痛みなどの問題が発生する。

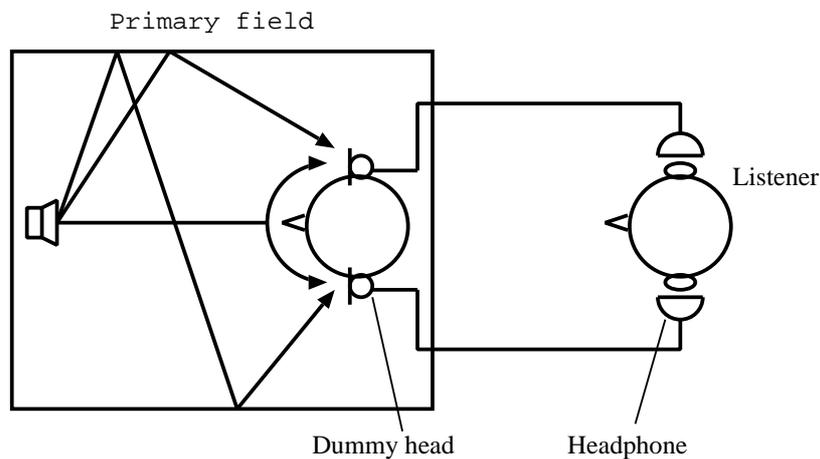


図 2.4 ダミーヘッドを使用したバイノーラルシステム

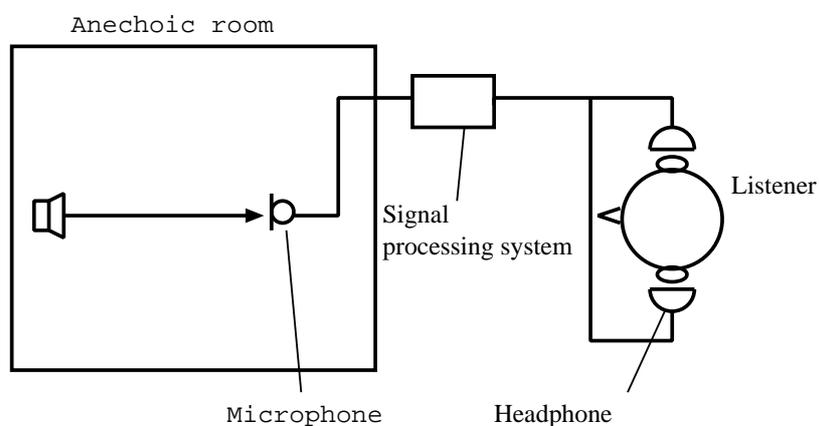


図 2.5 信号処理を使用したバイノーラルシステム

2.4 トランスオーラルシステム

2.4 トランスオーラルシステム

バイノーラル録音された音声の再生は、前述したように、通常ヘッドホンやイヤホンを使用したバイノーラル再生で行われるが、長時間のバイノーラル再生には、耳介の痛みなどの問題点が発生する。この問題点を解決するために、バイノーラル録音された音声の音場再生をスピーカを使用して実現しようとする技術が、トランスオーラルシステムである。

しかし、スピーカを使用して再生する場合、バイノーラル再生とは異なり、図 2.6 のように右スピーカからの音が左耳に届いてしまい、左スピーカからの音は右耳に届いてしまうという問題点が発生する。この本来聞こえるべきでない音の成分はクロストーク成分と呼ばれ、これによりバイノーラル録音された原音場の特性が、再生時に正しく再現できなくなってしまう。

ここではまずトランスオーラル系での音場再生に用いられる MINT 理論を説明し、その後トランスオーラルシステムの構成について述べる。

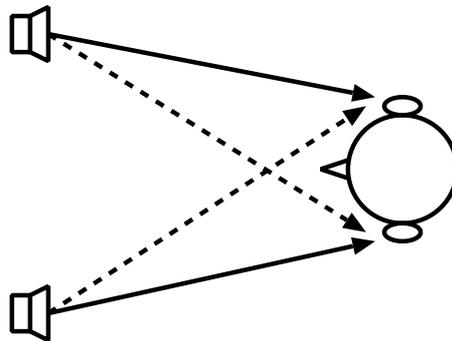


図 2.6 スピーカを使用時の受音

2.4.1 多入力系逆フィルタ (MINT 理論)

室内音場のように、複数の空間伝達経路を設けることが可能な系に対しては、系が最小位相でない場合でも、性格な逆特性を実現できることが示されている [4]。図 2.7 に MINT (Multi-input/output INverse Theorem) 理論に基づく基本的な音場制御システムを示す。ここで、 G_1 , G_2 は室内伝達関数を表している。この図に示すように MINT 理論では、2 つのスピーカを利用して、室内音場に対する入力を複数化している。そして、2 つのスピーカの前段には

2.4 トランスオーラルシステム

それぞれフィルタ $H_1(z), H_2(z)$ を設置する. このとき受音点における観測信号 $Y(z)$ は

$$\begin{aligned} Y(z) &= G_1(z)H_1(z)X(z) + G_2(z)H_2(z)X(z) \\ &= (G_1(z)H_1 + G_2(z)H_2(z))X(z) \end{aligned} \quad (2.4)$$

と表される. この系で逆フィルタ処理を行なうには, 次の関係を満たす FIR フィルタ $C_1(z), C_2(z)$ を求めればよい.

$$G_1(z)H_1 + G_2(z)H_2(z) = 1 \quad (2.5)$$

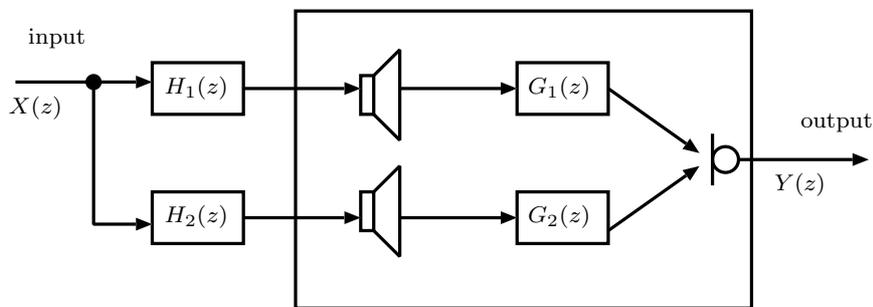


図 2.7 多入力出力形逆フィルタ (MINT 理論) の基本構成

また, この解の存在条件は $G_1(z), G_2(z)$ が有限次数であり, かつ共通の零点を持たないことである. これらの条件が満たされている場合, 式 2.5 を満たす有限次数の $C_1(z), C_2(z)$ が存在することは, 代数学の Diophantos の方程式として証明されている.

2.4.2 トランスオーラルシステムの構成

図 2.8 にトランスオーラルシステムの構成を示す. このシステムではバイノーラルシステムと同じように, 原音場にダミーヘッドを設置し, 録音を行なう. 録音された音は, 異なった場所でスピーカを用いて再生される.

図 2.8 に示したトランスオーラルシステムでは, フィルタ $H_{ij}(z), i = 1, 2, j = 1, 2$ を用いてこの問題の解決を図る. ここで, ダミーヘッドが右耳で受音した信号を $x_1(z)$, 左耳で受音した信号を $x_2(z)$, 右および左のスピーカに入力される信号をそれぞれ $y_1(z), y_2(z)$ と表し,

2.4 トランスオーラルシステム

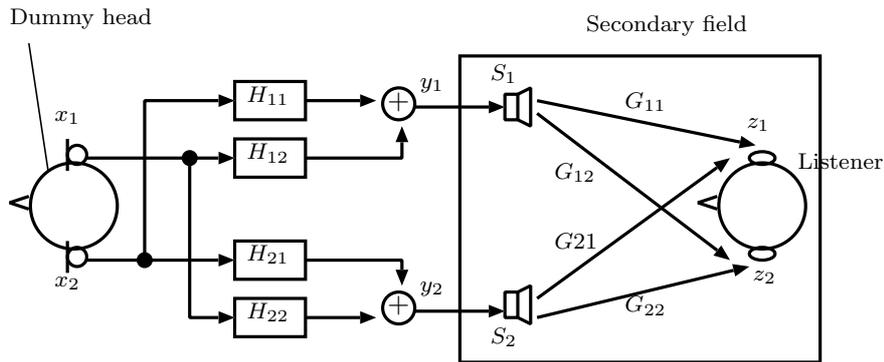


図 2.8 トランスオーラルシステムの構成

再生音場での受聴者の右耳および左耳で観測される信号をそれぞれ $z_1(z)$, $z_2(z)$ と表す. このとき図 2.8 より,

$$z_1 = G_{11}(z)y_1(z) + G_{21}(z)y_2(z) \quad (2.6)$$

$$y_1 = H_{11}(z)x_1(z) + H_{21}(z)x_2(z) \quad (2.7)$$

の関係が成り立つ. これらの関係を行列を用いて表示すると,

$$\begin{aligned} z(z) &= \begin{bmatrix} z_1(z) \\ z_2(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(z) & G_{21}(z) \\ G_{12}(z) & G_{22}(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(z) \\ y_2(z) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} G_{11}(z) & G_{21}(z) \\ G_{12}(z) & G_{22}(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{11}(z) & H_{21}(z) \\ H_{12}(z) & H_{22}(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(z) \\ x_2(z) \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{G}(z)\mathbf{H}(z)\mathbf{x}(z) \end{aligned} \quad (2.8)$$

となる.

クロストーク成分を除去し, $G_{11}(z)$ などの影響を除去したとすると, 耳元での受信信号 $z(z)$ はダミーヘッドの出力 $x(z)$ と一致する. 式 2.5 より, $z(z) = x(z)$ を実現するには, $\mathbf{H}(z)$ が $\mathbf{G}(z)$ の逆行列 $\mathbf{G}^{-1}(z)$

$$\mathbf{G}^{-1}(z) = \begin{bmatrix} G_{22}(z)/G_{00}(z) & -G_{21}(z)/G_{00}(z) \\ -G_{12}(z)/G_{00}(z) & G_{11}(z)/G_{00}(z) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$G_{00} = G_{11}(z)G_{22}(z) - G_{12}(z)G_{21}(z) \quad (2.10)$$

2.4 トランスオーラルシステム

となればよい. 従って, $G^{-1}(z)$ の第 ij 要素を図 2.8 のフィルタ $H_{ij}(z)$ の特性として与えることで, クロストーク成分を除去したトランスオーラルシステムを構成することができる.

このように, 再生音場が無響室や反射音の少ない場所であれば, 逆フィルタ処理を用いてトランスオーラルシステムを構成することができるが, 一般的な部屋などの再生音場では反射が発生し, 逆フィルタ処理の精度は低下してしまう. このような場合には, 前述した MINT 理論の考え方に基づいた図 2.9 のようなシステムを構成する必要がある.

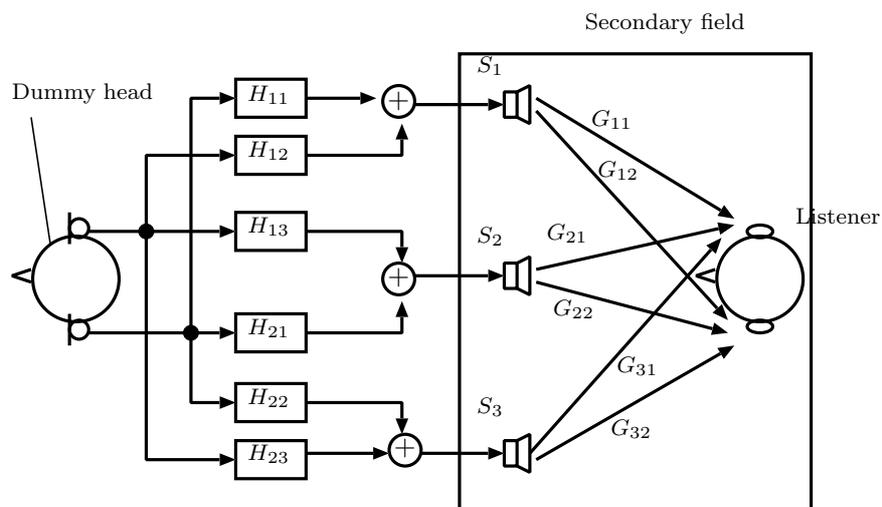


図 2.9 トランスオーラルシステムの構成

MINT 理論によれば, $M+1$ 個以上のスピーカを用いることで, M 個の点の音圧を自由に制御することが可能となる. 従って, 図 2.9 のように第 3 のスピーカ S_3 と, フィルタ $H_{13}(z), H_{23}(z)$ を新たに導入することで, 反響の多い音場でも受聴者の両耳の音圧が $x_1(z), x_2(z)$ となるように制御することができる.

しかし, 一般の部屋などを再生空間とした場合, その残響時間は長く, 空間伝達関数のインパルス応答長は長くなってしまふ. そのため, 図 2.9 のフィルタ H_{ij} を行列計算で直接的に計算する方法では, 膨大な計算量が必要になる. このことから, MINT 理論によってフィルタを算出することは, 理論的には可能であるが, 現実的ではないといえる.

2.5 まとめ

本章では、原音場での臨場感を再生時に得るための音場再生技術である、バイノーラルシステムとトランスオーラルシステムについて説明し、バイノーラルシステムでの問題点をトランスオーラルシステムで解決できることを示した。また、MINT 理論を用いたトランスオーラルシステムでの再生においては、通常の部屋などを再現空間としたとき、残響時間の増大によって演算量が膨大になってしまい現実的にシステムを構成するのは困難であることを説明した。そこで、第 3 章ではこの問題に対する改善手法の提案を行う。

第 3 章

サブスピーカを用いたクロストークの軽減

3.1 はじめに

本章では、本研究におけるクロストーク音軽減の基礎原理である重ね合わせの原理について説明し、次に、実際にこの原理に基づいたクロストーク成分の軽減法を提案する。そして、その有効性を確認するために実験を行い、その結果を考察する。

3.2 重ね合わせの原理

2つの波 $y_1 = f_1(x, t), y_2 = f_2(x, t)$ が同時に存在し、干渉したときに観測できる波形 y は、それらの単純な代数和

$$y = y_1 + y_2 = f_1(x, t) + f_2(x, t) \quad (3.1)$$

の波で表すことができる。これを重ね合わせの原理という。

また、ここで逆位相の音波同士を重ね合わせた場合について説明する。図 3.1 は、振幅 10 の \sin 波である。この音波を、逆位相関係にある図 3.2 の振幅 10 の $-\sin$ 波と重ね合わせた場合、音波同士が重ね合わせの原理により、互いに打ち消しあい図 3.3 のように音波は消える。

3.2 重ね合わせの原理

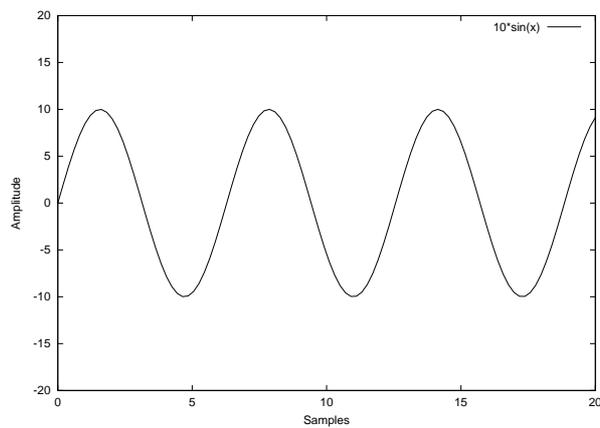


図 3.1 $10 \sin(x)$ の波形

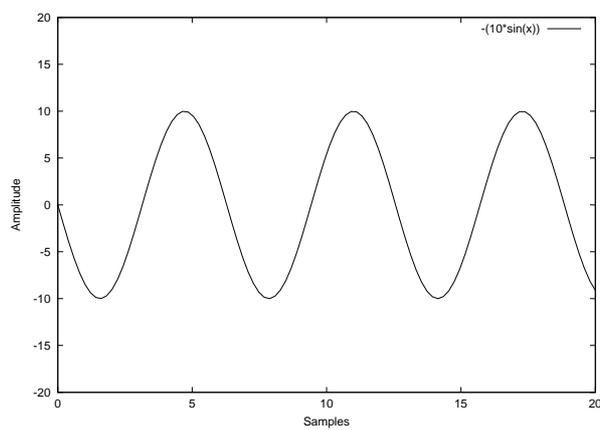


図 3.2 $-(10 \sin(x))$ の波形

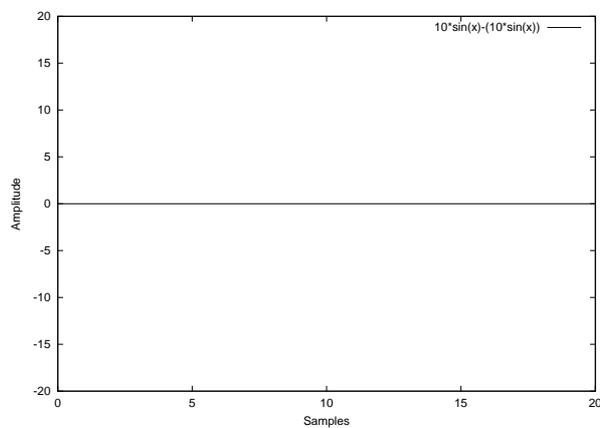


図 3.3 図 3.1 と図 3.2 の波を重ね合わせた波形

3.3 クロストーク音の消去方法

3.3 クロストーク音の消去方法

補正用のサブスピーカを用いたクロストーク成分の消去方法を図 3.4 に提案する。

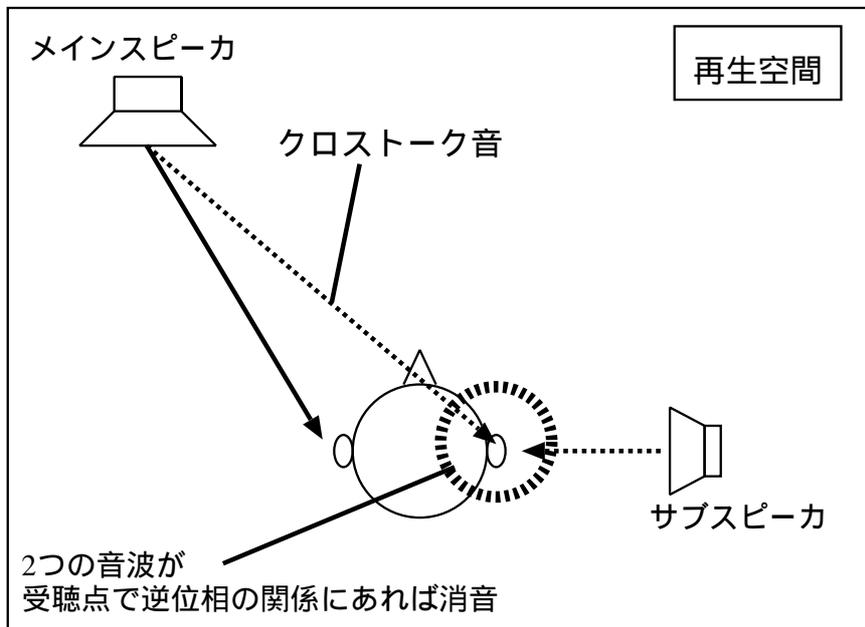


図 3.4 サブスピーカを用いたクロストーク成分の消去法

ここでは、左メインスピーカからのクロストーク成分を右サブスピーカで補正する方法を示す。図のように左メインスピーカからの音波と右サブスピーカからの音波が、受聴点で逆位相の関係にあれば、前述した重ね合わせの原理により、音波の周波数や距離などの条件が変化しても、理論上はクロストーク成分の消去が可能である。

メインスピーカから受音した音波が、図 3.5 のような波形の場合、それを消音するためにサブスピーカからは、逆位相の関係にある図 3.6 の音波を受音しなければならない。

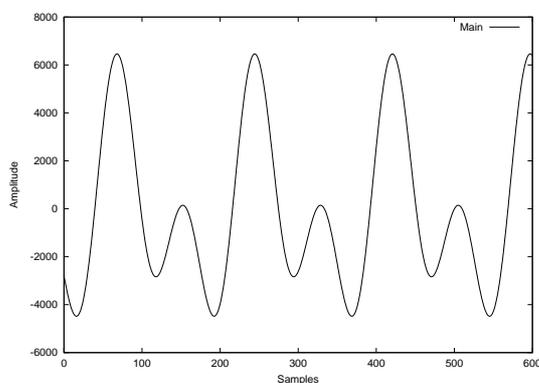


図 3.5 メインスピーカから受音した波形の例

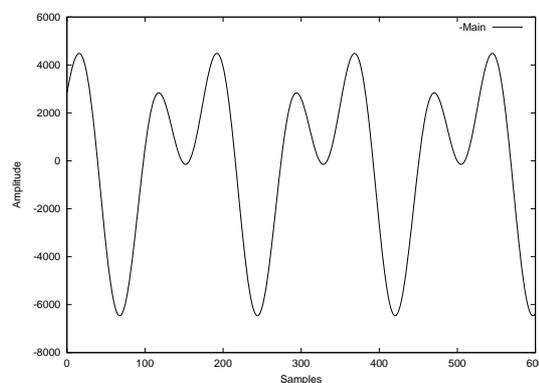


図 3.6 図 3.5 の波形を消音するために必要な音波

3.4 受聴点を1つとした場合での補正実験

しかし、サブスピーカはメインスピーカとは異なった場所に設置するため、サブスピーカから受音される音波は室内伝達特性の影響を受け、図 3.7 のように、所望される波形とは位相が異なるものになる場合がある。

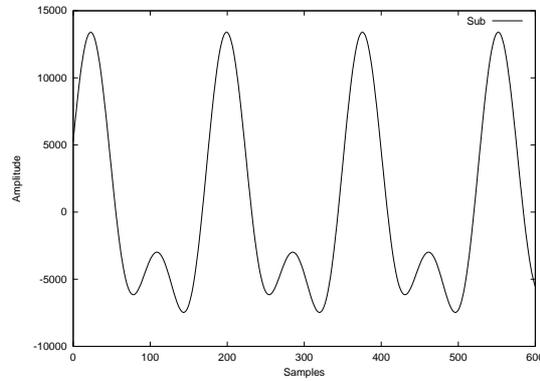


図 3.7 サブスピーカから受音した波形の例

そこで、この問題に対応するために、音圧の変更と遅延処理を行うことで、所望する波形に近付ける。図 3.8 には、図 3.7 の音波の音圧変更と遅延処理を行って、図 3.6 の波形に近づけていく様子を示す。

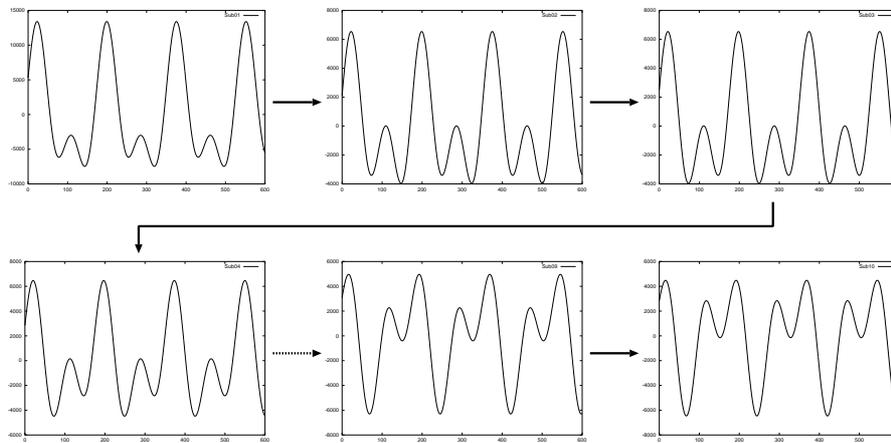


図 3.8 図 3.7 の音波における音圧の変更と遅延処理

3.4 受聴点を1つとした場合での補正実験

提案した方法で、実際に両耳で観測されるクロストーク成分を軽減する場合、サブスピーカからもクロストークが発生し、観測される波形はさらに複雑になる。そのため、片側の耳で

3.4 受聴点を1つとした場合での補正実験

の補正ができなければ、他条件で実験を行っても音を補正することができない可能性が高いと考えられる。そこで、受聴点を1つとしてクロストークを軽減することが可能かどうかを、実験した。

3.4.1 実験環境

今回の実験では、音の出力にメインスピーカとサブスピーカを使用し、観測には実際の間での受聴を想定して図 3.9 のようなダミーヘッドを使用する。任意の部屋に、図 3.11 のような位置関係になるように、メインスピーカとダミーヘッドと補正用のサブスピーカを設置し、音波の周波数や機器間の距離などの条件を変えながら、メインスピーカからの音をサブスピーカから出力した補正波により軽減できるかを検証する。今回の実験では、図 3.10 のような形の部屋で観測を行った。そして、メインスピーカからの出力は受聴点で 50dB とし、出力する音には、250Hz と 500Hz、500Hz と 1000Hz の正弦波の重音を用いた。また、各スピーカから受聴点の距離は、メインスピーカ-受聴点間が 2m と 3m、サブスピーカ-受聴点間は 0.3m と 1m とした。ここでの機器間の距離は、機器の個体差などから正確に測定するのは困難であるため、スピーカ・ダミーヘッドともに機器の中心部を基準にして距離をとった。表 3.1 に観測に使用する音波と距離の条件を条件 1、条件 2、条件 3 として示す。

表 3.1 観測時の条件一覧

| | 使用する音波 | メインスピーカ-受聴点間距離 | サブスピーカ-受聴点間距離 |
|------|--------------|----------------|---------------|
| 条件 1 | 250Hz+500Hz | 約 2m | 約 0.3m |
| 条件 2 | 250Hz+500Hz | 約 3m | 約 1m |
| 条件 3 | 500Hz+1000Hz | 約 2m | 約 0.3m |

なお、サブスピーカから出力する音には、室内伝達特性による音圧の変化に対応するため、あらかじめ周波数ごとに音圧の変更を行い受聴点で同音圧にしておく。そして位相の変化には、1つの正弦波を、その正弦波の $1/72$ 周期ずつ遅延させていき、2つの音波が逆位相の関係

3.4 受聴点を1つとした場合での補正実験

になるようにすることで対応する.



図 3.9 ダミーヘッド

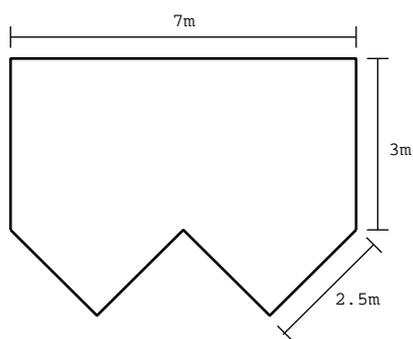


図 3.10 実験を行った部屋



図 3.11 実験環境

3.4 受聴点を1つとした場合での補正実験

3.4.2 評価方法

音の軽減効果の評価として、メインスピーカのみを出力した場合に観測される信号 $x(t)$ と、サブスピーカでの補正を行った場合に観測される信号 $y(t)$ との振幅値から式 3.2 で計算される、クロストーク成分の消去率 S を用いた。消去率 S は、値が小さいほどクロストーク成分が軽減されていることとなる。

$$S = \frac{y^2(t)}{x^2(t)} \quad (3.2)$$

3.4.3 実験結果と考察

表 3.2~3.4 に各条件別のクロストーク消去率を示す。また、表 3.5 に、今回の実験において消去率の高い条件と、その消去率を示す。なお、表 3.5 の距離 A, 距離 B は、図 3.12 に示すように、各スピーカと受聴点間の距離を表すものとする。これらの結果より、機器同士の距離や周波数の変化に関わらず、音圧と位相を調整することで、3次元空間でも減音が可能であることが確認できた。また、消去率の最も良かった遅延時間から 1/4 周期遅延させたときに、音圧が 2 倍近くまで増幅されていることから、消去率の良いときは 2 つの音波がほぼ逆位相になっており、逆に音圧が増幅されてしまっているときは、2 つの音波がほぼ同位相になっていると考察できる。

これらの結果から、2 つの音の干渉による音の変化は、理論上での計算通り位相に依存しており、一方の音波に音圧の変更や遅延処理を行い、波形をもう一方の音波と逆位相の関係にすることで、空間内での減音が可能であることが分かった。

3.4 受聴点を1つとした場合での補正実験

表 3.2 条件 1 での観測結果

| 遅延時間 | 消去率 | 遅延時間 | 消去率 |
|------|----------|-------|----------|
| 0 ° | 2.642364 | 95 ° | 1.223531 |
| 10 ° | 2.722434 | 100 ° | 1.135327 |
| 15 ° | 2.964248 | 105 ° | 0.976511 |
| 20 ° | 3.275221 | 110 ° | 0.786532 |
| 25 ° | 3.586432 | 115 ° | 0.257992 |
| 30 ° | 3.783831 | 120 ° | 0.001837 |
| 35 ° | 3.523002 | 125 ° | 0.256411 |
| 40 ° | 3.440394 | 130 ° | 0.561113 |
| 45 ° | 3.211139 | 135 ° | 0.753434 |
| 50 ° | 2.910948 | 140 ° | 0.946743 |
| 55 ° | 2.742503 | 145 ° | 1.109918 |
| 60 ° | 2.433487 | 150 ° | 1.454417 |
| 65 ° | 2.329483 | 155 ° | 1.775311 |
| 70 ° | 2.144621 | 160 ° | 1.875314 |
| 75 ° | 1.984757 | 165 ° | 2.041489 |
| 80 ° | 1.833409 | 170 ° | 2.194341 |
| 85 ° | 1.537672 | 175 ° | 2.300171 |
| 90 ° | 1.308471 | 180 ° | 2.560494 |

3.4 受聴点を1つとした場合での補正実験

表 3.3 条件 2 での観測結果

| 遅延時間 | 消去率 | 遅延時間 | 消去率 |
|------|----------|-------|----------|
| 0 ° | 2.882545 | 95 ° | 0.689411 |
| 10 ° | 2.618135 | 100 ° | 0.717785 |
| 15 ° | 2.589637 | 105 ° | 0.901558 |
| 20 ° | 2.205523 | 110 ° | 1.215997 |
| 25 ° | 1.981136 | 115 ° | 1.390031 |
| 30 ° | 1.721157 | 120 ° | 1.582591 |
| 35 ° | 1.636987 | 125 ° | 1.804813 |
| 40 ° | 1.468223 | 130 ° | 1.981690 |
| 45 ° | 1.215855 | 135 ° | 2.214570 |
| 50 ° | 1.115236 | 140 ° | 2.426993 |
| 55 ° | 0.962215 | 145 ° | 2.650406 |
| 60 ° | 0.716255 | 150 ° | 2.788041 |
| 65 ° | 0.505812 | 155 ° | 2.891520 |
| 70 ° | 0.305815 | 160 ° | 3.165657 |
| 75 ° | 0.155831 | 165 ° | 3.310015 |
| 80 ° | 0.006775 | 170 ° | 3.692151 |
| 85 ° | 0.301599 | 175 ° | 3.484893 |
| 90 ° | 0.412435 | 180 ° | 3.403337 |

3.4 受聴点を1つとした場合での補正実験

表 3.4 条件 3 での観測結果

| 遅延時間 | 消去率 | 遅延時間 | 消去率 |
|------|----------|-------|----------|
| 0 ° | 1.316510 | 95 ° | 2.269954 |
| 10 ° | 1.569981 | 100 ° | 2.011514 |
| 15 ° | 1.797411 | 105 ° | 1.840100 |
| 20 ° | 2.001651 | 110 ° | 1.640098 |
| 25 ° | 2.198110 | 115 ° | 1.408409 |
| 30 ° | 2.448777 | 120 ° | 1.248940 |
| 35 ° | 2.652581 | 125 ° | 0.911165 |
| 40 ° | 2.880014 | 130 ° | 0.764980 |
| 45 ° | 3.015512 | 135 ° | 0.585516 |
| 50 ° | 3.188751 | 140 ° | 0.315477 |
| 55 ° | 3.399810 | 145 ° | 0.101523 |
| 60 ° | 3.514850 | 150 ° | 0.001856 |
| 65 ° | 3.540401 | 155 ° | 0.210186 |
| 70 ° | 3.315220 | 160 ° | 0.421441 |
| 75 ° | 3.271568 | 165 ° | 0.634891 |
| 80 ° | 2.901045 | 170 ° | 0.798713 |
| 85 ° | 2.687810 | 175 ° | 0.882198 |
| 90 ° | 2.561198 | 180 ° | 1.096510 |

3.5 サブスピーカからのクロストーク軽減実験

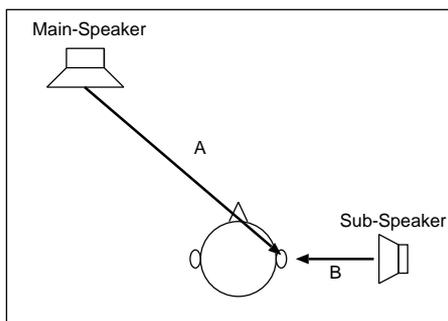


図 3.12 スピーカ-受聴点距離

表 3.5 消去率の高い条件とその消去率

| 使用した音 | 距離 A | 距離 B | 遅延時間 | 消去率 |
|----------------|------|-------|--------|----------|
| 250Hz + 500Hz | 約 2m | 120 ° | 約 0.3m | 0.001837 |
| 250Hz + 500Hz | 約 3m | 80 ° | 約 1m | 0.006775 |
| 500Hz + 1000Hz | 約 2m | 150 ° | 約 0.3m | 0.001856 |

3.5 サブスピーカからのクロストーク軽減実験

次に両耳での補正を想定し、受聴点を 2 つとして実験を行った。両耳を対象とした場合、サブスピーカからのクロストークも発生してしまう。そこで本実験では、サブスピーカを配置する場所を変化させることで、できるだけサブスピーカからのクロストークが小さくなるようにする。

3.5.1 実験環境

図 3.13 のようにサブスピーカを 2 つとダミーヘッドを設置する。今回の実験では、部屋の中心部と壁際での観測を行うため、図のように部屋のおよそ中心となる場所を A 点、部屋の中心ではなく無作為に選んだ場所を B 点、部屋の壁際での観測場所を C 点とした。ここでの矢印の向きは、ダミーヘッドが向いている方向を示す。なお、受聴点と、その同方向に設置

3.5 サブスピーカからのクロストーク軽減実験

したメインスピーカとの距離は 3m とし、受聴点と、その同一方向に設置したサブスピーカとの距離は 0.3m とする。そして、図 3.14 のようにサブスピーカの距離を 2 倍、3 倍と変化させ、さらにサブスピーカの受聴者への角度を 45° 、 90° 、 135° と変化させ観測を行う。また、各スピーカから出力される音は、そのスピーカと同一方向の受聴点で 50dB とし、用いる音は 250Hz、500Hz、1000Hz の正弦波とする。

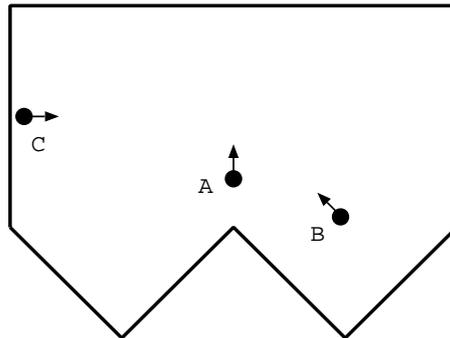


図 3.13 ダミーヘッドを配置する位置と方向

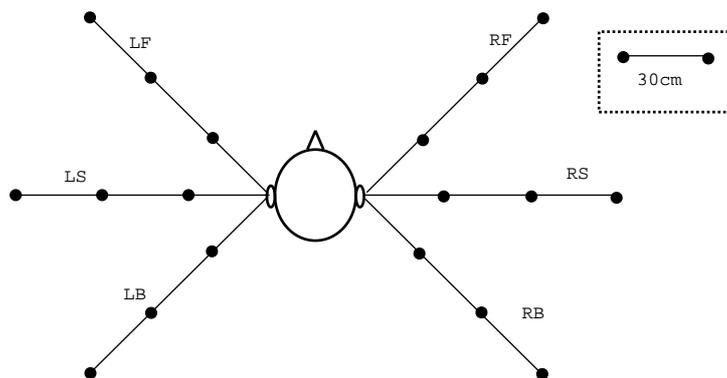


図 3.14 サブスピーカの配置

3.5.2 実験結果と考察

表 3.6 ~ 3.8 に、実験の結果を示す。なお、サブスピーカ位置は図 3.14 に示すように、 45° ずつ角度を変えた各方向を LF、LS、LB、RF、RS、RB とし、また表中の - は、壁際での観測時にサブスピーカが後方に配置できなかったことを示す。

今回の実験では、これらの結果の通り、観測場所や周波数、設置スピーカの角度によって多少の差はあるが、サブスピーカからのクロストークは、スピーカを受聴点近くに設置したと

3.6 まとめ

きに、-5dB ~ -9dB と、最も軽減することができた。

このことから、サブスピーカを用いたクロストーク成分の軽減法における、サブスピーカからクロストークが発生する問題に対しては、サブスピーカを受聴者近傍に設置し、クロストーク成分をできるだけ小さくする方法が有効であるといえる。

3.6 まとめ

本章では、本研究の基礎となる重ね合わせの原理について説明し、次に、実際にこの原理に基づいた音の消去法を提案し、その有効性を確認するために、まず片耳での受聴を想定し、受聴点を1つにして実験を行った。その結果、サブスピーカからの出力に音圧の変更と遅延処理を行うことによって位相を変化させ、2つの音波を逆位相の関係にすることで、減音を確認することができた。

また、両耳での受聴を想定した受聴点を2つとした場合における、サブスピーカからのクロストークの発生に対しては、サブスピーカを配置する適切な位置と角度を検証する実験を行った。その結果、サブスピーカを受聴点の近傍に設置することで、サブスピーカからのクロストークを最も軽減することができるということが分かった。

3.6 まとめ

表 3.6 観測結果 (250Hz)

| 観測位置 | 受聴点- スピーカ間距離 | スピーカ位置 | | | | | |
|------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | LF | LS | LB | RF | RS | RB |
| A | 0.3m | -5.1dB | -8.2dB | -7.3dB | -5.3dB | -7.9dB | -7.0dB |
| | 0.6m | -4.1dB | -4.5dB | -4.5dB | -3.8dB | -3.8dB | -3.1dB |
| | 0.9m | -3.9dB | -3.7dB | -3.8dB | -3.3dB | -2.9dB | -2.8dB |
| B | 0.3m | -6.4dB | -8.0dB | -7.8dB | -7.6dB | -8.5dB | -8.3dB |
| | 0.6m | -5.0dB | -5.3dB | -4.1dB | -4.3dB | -4.3dB | -4.8dB |
| | 0.9m | -5.3dB | -4.8dB | -4.5dB | -4.3dB | -4.3dB | -3.5dB |
| C | 0.3m | -7.4dB | -7.9dB | - | -6.9dB | -6.7dB | - |
| | 0.6m | -4.0dB | -4.3dB | - | -4.3dB | -4.0dB | - |
| | 0.9m | -3.8dB | -4.5dB | - | -4.9dB | -5.3dB | - |

表 3.7 観測結果 (500Hz)

| 観測位置 | 受聴点- スピーカ間距離 | スピーカ位置 | | | | | |
|------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | LF | LS | LB | RF | RS | RB |
| A | 0.3m | -7.8dB | -8.9dB | -8.7dB | -8.4dB | -8.7dB | -8.6dB |
| | 0.6m | -5.1dB | -4.9dB | -5.1dB | -4.6dB | -4.5dB | -4.8dB |
| | 0.9m | -4.3dB | -4.2dB | -3.1dB | -4.3dB | -4.5dB | -4.2dB |
| B | 0.3m | -7.7dB | -7.7dB | -7.4dB | -7.6dB | -8.6dB | -8.4dB |
| | 0.6m | -4.1dB | -4.5dB | -4.6dB | -5.0dB | -4.9dB | -4.9dB |
| | 0.9m | -4.0dB | -4.2dB | -4.2dB | -4.3dB | -3.8dB | -4.6dB |
| C | 0.3m | -6.9dB | -6.8dB | - | -7.6dB | -7.4dB | - |
| | 0.6m | -5.6dB | -5.3dB | - | -5.1dB | -5.3dB | - |
| | 0.9m | -5.3dB | -5.0dB | - | -3.5dB | -5.1dB | - |

3.6 まとめ

表 3.8 観測結果 (1000Hz)

| 観測位置 | 受聴点- スピーカ間距離 | スピーカ位置 | | | | | |
|------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | LF | LS | LB | RF | RS | RB |
| A | 0.3m | -7.4dB | -8.9dB | -8.7dB | -8.4dB | -8.6dB | -7.6dB |
| | 0.6m | -6.2dB | -5.7dB | -5.4dB | -5.3dB | -5.1dB | -5.3dB |
| | 0.9m | -5.4dB | -5.6dB | -5.3dB | -5.3dB | -5.0dB | -5.2dB |
| B | 0.3m | -8.5dB | -8.6dB | -8.6dB | -8.1dB | -8.2dB | -8.7dB |
| | 0.6m | -4.3dB | -3.9dB | -4.5dB | -5.1dB | -5.3dB | -5.3dB |
| | 0.9m | -5.4dB | -5.5dB | -5.0dB | -5.8dB | -5.9dB | -5.8dB |
| C | 0.3m | -8.3dB | -8.4dB | - | -8.0dB | -8.8dB | - |
| | 0.6m | -4.5dB | -4.7dB | - | -4.5dB | -4.6dB | - |
| | 0.9m | -4.2dB | -4.1dB | - | -4.5dB | -4.1dB | - |

第 4 章

結論

4.1 本研究のまとめ

音声再生時に、録音環境の臨場感を得るための音場再生技術と呼ばれる技術の録音技術の 1 つとしてバイノーラル録音がある。バイノーラル録音された音声はヘッドホンやイヤホンでの再生が基本であるが、これらの再生方法では長時間の視聴による耳介の痛みなどの問題が挙げられる。その問題点を解決するために、スピーカを使用した再生方法があるが、スピーカを使用しての受聴では、クロストークが発生してしまい、正しい音場再生ができない。そこで、スピーカを使用し音場再生を行うためのシステムとしてバイノーラル録音された音声の音場再生をスピーカの使用により実現する、トランスオーラルシステムがある。しかし、従来のトランスオーラルシステムは、計算量が膨大なものになってしまうという問題点から実現が困難である。そこでこの問題を解決することを目的とした研究として、本研究ではサブスピーカを用いた補正による、クロストーク成分軽減の可能性を考察した。

第 3 章では、1 受聴点を対象とした補正実験により、受聴点で 2 つの波を逆位相の関係にすることで、音を大きく減音できることが確認した。さらに、両耳での受聴を想定した実験では、サブスピーカの配置位置を受聴点近傍にすることで、サブスピーカからのクロストーク成分を小さくできるということを確認した。

4.2 今後の課題

本研究で提案したサブスピーカによるクロストークの軽減法では、受聴点で消したい音と逆位相の関係になるような音を、サブスピーカから出力しなければならない。そのため多くの周波数を含んだ音や、周期性の低い音を消すためには、サブスピーカから出力する音の生成方法に検討が必要である。

また、このシステムをステレオで実現する場合、サブスピーカからのクロストークも発生する。本研究ではサブスピーカからのクロストークを、スピーカの配置する位置や角度を調整することで軽減できることが確認できたが、左右2つの観測点での同時補正については未検証である。よって、サブスピーカからのクロストークをより小さくする方法を検討するなどして、受聴者の両耳で同時にクロストークを補正することができるかどうかを検証する必要がある。

謝辞

まず、福本研究室に配属されてから 2 年弱、本論文の作成並びに研究発表において、ご指導をいただきました高知工科大学情報システム科 福本昌弘准教授に、心から深く感謝いたします。そして、本研究の審議をしていただいた島村和典教授、浜村昌則准教授に感謝いたします。また、同大学大学院在籍の佐伯幸郎氏、福富英次氏、劉立剛氏にも、感謝いたします。特に福本研究室の福本准教授、福富氏、佐伯氏には、研究実配属時より、本論文はもちろん論文梗概、発表資料等の作成にあたり、夜遅くまで（朝早くまで）理解力の足りない私に対して、何度も説明をしていただいたり、資料の添削をしていただいたからこそ、本論文を完成させることができました。皆様のご指導なくして、こうして 4 年間の就学を終え、卒業するまでに至ることはできませんでした。今一度ここに厚く御礼申し上げます。

就職活動においても、福本准教授には自身の軽く、甘い考えを払拭していただき、自身で成功といえる就職活動をすることができました。物事を軟らかく、正確に、広く、多角的に見て考えるということの大切さは、間違いなく福本研究室で活動をしてきたからこそ、学ぶことができたのだと思っています。

また、研究や就職活動で暗く静かになりがちな研究室の雰囲気も、准教授のバットの風切り音や、佐伯氏の笑い声で救われてきました。急に開催される芋煮やバーベキュー等のイベントも楽しいものばかりで、合宿で嬉々としてロケット花火を天空に投げる福本准教授の御姿は一生忘れません。合宿や宴会に参加された吉田研究室の皆さんや妻鳥講師、同大学の関係者の方々にも感謝いたします。

最後に、皆様を個々にお名前を申し上げられませんが、同研究室で仮面ライダーカードを一緒に集めた山田とか金井君、野村君、愉快的な 3 年生達、それから 4 年間に関わった他研究室の皆様、特にプライベートでは濱村研究室の毛利君に、そしてこれまで私を支えてくださった両親、家族に感謝の気持ちを込めて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 春日正男, 船田哲男, 林伸二, 武田一哉, "音声情報処理", コロナ社,2001
- [2] 北脇 信彦, "デジタル音声・オーディオ技術", 電気通信協会,pp197-pp198
- [3] 日本音響学会, "アクティブノイズコントロール", コロナ社,2006
- [4] 大賀寿郎, 山崎芳男, 金田豊, "音響システムとデジタル信号処理", 電子情報通信学会,1995
- [5] 辻井重男, 鎌田一雄, "デジタル信号処理", 昭晃堂,1997
- [6] 山崎芳男, 金田豊, 東山三樹夫, 宇佐川毅, "音・音場のデジタル処理", コロナ社,2002