

平成 18 年度
学士学位論文

音場再生に適したスピーカ配置

Speaker Arrangement for Sound Field Reproduction

1070405 鈴木 康太

指導教員 福本 昌弘

2007 年 3 月 9 日

高知工科大学 情報システム工学科

要 旨

音場再生に適したスピーカ配置

鈴木 康太

スピーカから出力された音を聞く場合, スピーカから受聴者までの室内反響などの影響を消すことによって, 理論的には理想的な音を聞くことが可能となる. その手法として, 浜崎らにより 2 チャンネル-2 点制御系が提案された. このシステムでは, 2 つのスピーカを用いることにより音場再生が可能であることが示されている. 2 点制御系での大きな問題はクロストークと呼ばれる本来聴こえるべきでない音が観測されてしまうことである.

本論文では, 2 チャンネル-2 点制御系を用いた音場再生システムの再現精度向上を目的とし, 補正を行うスピーカを用いてさらなるクロストーク成分の軽減とスピーカの位置によってどの程度変化するか検証している. 耳もとでの補正実験と実環境を想定した計算機シミュレーションの結果から, 補正したい音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, 重ね合わせの原理, クロストーク

Abstract

Speaker Arrangement for Sound Field Reproduction

Kota Suzuki

It is theoretically possible to remove the room reverberation effect between the loudspeakers and the listening points by using loudspeakers to reproduce a ideal sound field. Hamasaki has proposed a 2-channel 2 control points system, in which 2 loudspeakers were used to reproduce a sound field. The main disadvantage in this system is the cross-talk problem.

In this study, in order to improve the reproduction precision and to cancel cross-talk component in 2-channel 2 control-point system, I study the relationship between the reproduction precision and the loudspeakers' position. The results of close ear compensation experiments and computer simulations with real environment data confirm that the proposed method can greatly cancel the cross-talk component.

key words sound field reproduction, principle of superposition, cross-talk cancellation

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	多入力形逆フィルタ (MINT 理論)	5
2.4	バイノーラルシステム	6
2.5	トランスオーラルシステム	7
2.6	2 チャンネル-2 点制御系	10
2.7	まとめ	12
第 3 章	音場再生に適したスピーカ配置システム	13
3.1	はじめに	13
3.2	重ね合わせの原理	14
3.2.1	逆位相の波同士の重ね合わせ	14
3.3	音の消去法	17
3.4	耳もとでの補正実験	17
3.4.1	実験環境	18
3.4.2	評価方法	19
3.4.3	実験結果	19
3.5	計算機シミュレーション	23
3.5.1	実験環境	23

目次

3.5.2	室内伝達特性の測定	24
3.5.3	計算機シミュレーションの結果	24
3.6	まとめ	25
第 4 章	結論	32
4.1	本研究のまとめ	32
4.2	今後の課題	32
謝辞		33
参考文献		34

目次

2.1	反射音を有する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	多入力出力形逆フィルタ (MINT 理論) の基本構成	6
2.4	バイノーラルシステムの一例	7
2.5	トランスオーラルシステムの構成	8
2.6	MINT 理論の考え方に基づいたトランスオーラルシステムの構成	10
2.7	2 チャンネル-2 点制御系線形モデル	11
3.1	$10 * \sin(x)$ の波形	15
3.2	$-(10 * \sin(x))$ の波形	15
3.3	図 3.1 の波と図 3.2 の波を重ね合わせた波形	16
3.4	クロストーク消去法	17
3.5	室内での実験環境	18
3.6	評価方法	19
3.7	メインスピーカのみの波形	21
3.8	サブスピーカで補正を行った波形	21
3.9	室内での実験結果	22
3.10	実験環境	23
3.11	ダミーヘッド	23
3.12	室内の測定環境	24
3.13	シミュレーション結果	31

表目次

3.1	実験における消去率が高い条件の結果	22
3.2	実験における消去率が低い条件の結果	22
3.3	サブスピーカの角度 (R75 度) 消去率	26
3.4	サブスピーカの角度 (R60 度) 消去率	27
3.5	サブスピーカの角度 (C0 度) 消去率	28
3.6	サブスピーカの角度 (L60 度) 消去率	29
3.7	サブスピーカの角度 (L75 度) 消去率	30
3.8	(C,g,L0) 地点における消去率が高い地点の結果	31

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景と目的

音楽等の記録に広く使われているステレオ録音された音を 2 つのスピーカから聞く場合、左スピーカから出力された音はそのまま左耳のみへ、右スピーカから出力された音はそのまま右耳のみへ届くことによって理想的な音を聞くことが可能となる。しかし、実際には片側のスピーカから出力された音は逆の耳にも届き、また理想とする耳に届く音も室内の反射等の影響を受けそのままの音が届くことはない。この問題を解決する方法として、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。

ステレオシステムにおける音場再生技術の一例として、2 チャネル-2 点制御というものがある。過去に提案された [1]。これは、システムの簡素化を目的とした手法で、複数のスピーカを用いそれぞれを制御する他の手法と比べ、音の再生に必要な 2 つのスピーカのみを用い、両耳に届く音を補正するものである。複数のスピーカを用いる音場再生技術は主にその余分なスピーカを、片側のスピーカから出た音が逆の耳に届くクロストークと呼ばれる現象を削減するために用いる。しかし、この手法は複数のスピーカの削減の制御が非常に難しく、システム自体が複雑になるために実用化は難しいとされている。

本研究では、2 チャネル 2 点制御を用いたシステムに対し、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を削減することで 2 チャネル 2 点制御システムの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、サブスピーカと呼ばれるクロストーク軽減するスピーカを設置することでクロストーク軽減の可能性を考察する。

1.2 本論文の構成

ここで、本論文の構成について述べる。

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、再生音場において原音場を再現する手段の代表例である、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、多入出力形逆フィルタ (MINT 理論) の考え方に基づいたトランスオーラルシステムについて説明し、このシステムの問題点が改良された2チャンネル-2点制御系モデルを説明する。

第3章では、重ね合わせの原理を利用した、音の消去法を提案する。そして、実環境を想定した環境における実測値を用いて計算機シミュレーションを行う。また、計算機シミュレーション結果より実際に音が消えているかを確認するために周期性のある音を用いて実験を行う。最後に、消去したい音が軽減されているかを確認し、音場再生における最適なスピーカ配置について検討する。

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

コンサートホールなどで録音された音楽を一般的な部屋などで再生する場合，可能な限り所望の音場に近い音場で再現することが望まれている．これを実現する技術として音場再生がある．音場再生を実現する方法として，バイノーラルシステムやトランスオーラルシステムが既に研究されている．バイノーラルシステムでは，受聴者の耳もとでヘッドホンを利用することで再現している．しかし，これには長時間のヘッドホン装着により受聴者に負担がかかってしまうことや受聴移動が限定されてしまう問題がある．トランスオーラルシステムでは，スピーカを用いて再現しているため，バイノーラルシステムの問題を解消することができる．

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 (音源と受音点など) の音の伝わり方を表す関数を空間伝達関数 $G(z)$ という．空間が屋外などの自由空間である場合，空間伝達関数 $G(z)$ は音源からの距離のみに依

2.2 音響システムと線形モデル

存する．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，その距離を音が伝搬するのに要する伝搬遅延時間を表すものとなっている．一方，音場が図 2.1 に示すように反射音を有する室内などの閉空間において，音源であるラウドスピーカを受音器となるマイクロホンを設置し，この 2 点間の音の伝達について考える．ここで時刻 t におけるラウド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観測される音 $y(t)$ には，音源から受音点に直接到達する音 (直接音) と，壁面で反射された多数の反射音が含まれる．反射音はマイクロホンで受信されるまでに壁面で反射された回数によって一次反射音，2 次反射音などに分類される．

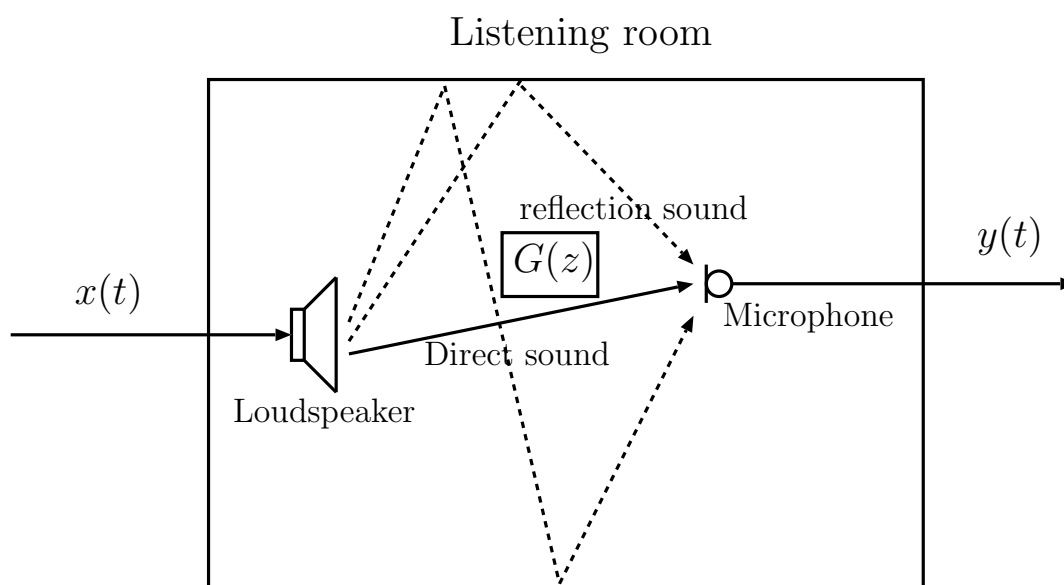


図 2.1 反射音を有する室内における音の伝搬の様子

音の反射は壁面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回繰り返される．音源からパルス音を発生させたときにマイクロホンで受信される信号 (インパルス応答) は時間の経過と共に，まず直接音が受信され，次に 1 次，2 次などの低次反射音が受信される．その後，続けて高次反射音が受信される．ここで低次の反射音は単に初期反射音と呼ばれ，また高次の反射音はインパルス応答長が時間の経過と共に級数的に増加し，残響音と呼ばれる場合がある．このインパルス応答を標準化して得られた離散数列を

2.3 多入力形逆フィルタ (MINT 理論)

$g(0), g(1), g(2), \dots$ と表す. 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.

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

音源, マイクロホン, 空間音響伝達系による影響は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.

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

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 $y(t)$ が求められることを意味している. 式 (2.2) の両辺を z 変換すると, 次式のように変形される.

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

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. 式 (3.2) 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される. このように室内音場における音響の入出力システムは, 線形系としてモデル化することができる.

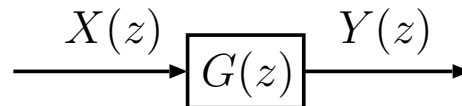


図 2.2 図 2.1 の等価回路

2.3 多入力形逆フィルタ (MINT 理論)

室内音場のように複数の信号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正確な逆特性を実現することができる [3]. MINT (Multi-input/output INverse Theorem) 理論は, 入力経路または出力経路を増加することで逆フィルタ特性を実

2.4 バイノーラルシステム

現する方法で、その基本構成を図 2.3 に示す．ここで、 $G_1(z)$, $G_2(z)$ は室内伝達関数を表している．図 2.3 に示したように MINT 理論では、二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、二つのスピーカの前段にはそれぞれフィルタ $H_1(z)$, $H_2(z)$ を設置する．このとき、出力 $Y(z)$ は、

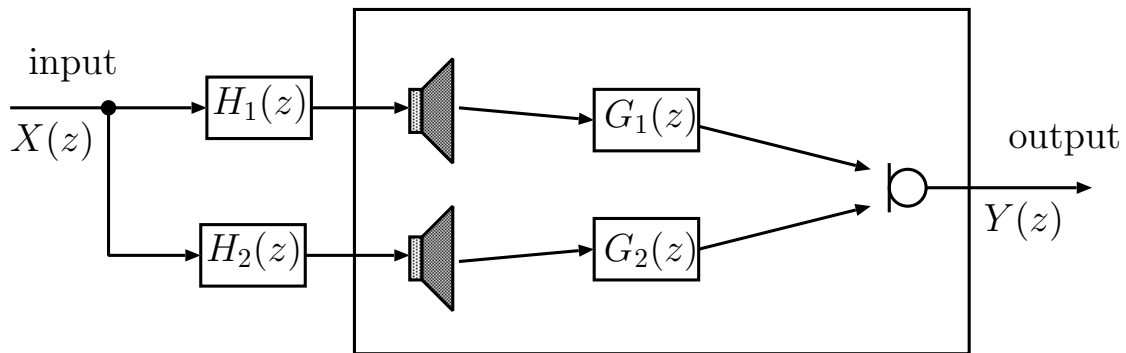


図 2.3 多入力出力形逆フィルタ (MINT 理論) の基本構成

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

となる．このシステムの目的、室内伝達特性 $G_1(z)$, $G_2(z)$ の影響を除去し、 $Y(z) = X(z)$ とすることである．そのためには、次式を満足する $H_1(z)$, $H_2(z)$ が見いだせばよい．

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

2.4 バイノーラルシステム

ヘッドホンを用いて実現しようとする技術がバイノーラルシステムと呼ばれる技術である [4]．音源の方向知覚など、聴覚における空間情報の把握は、おもに両耳受聴によって行われると考えられている．スピーカを用いた受聴では、再生側の音場の影響を受けやすい．したがって、両耳知覚を正確に模擬したいと考えるならば、ヘッドホン受聴系から取り組んでみる必要がある．

2.5 トランスオーラルシステム

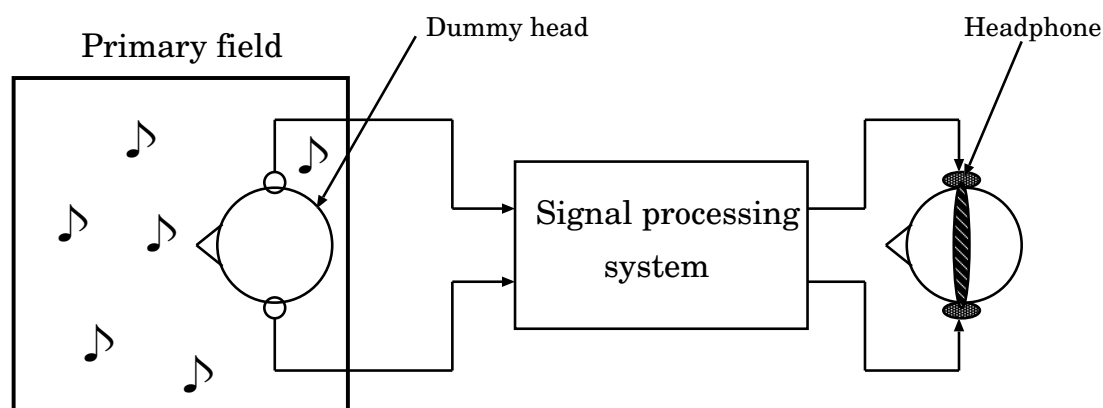


図 2.4 バイノーラルシステムの一例

図 2.4 のように原音場にダミーヘッドを設置し、ダミーヘッドの左右の耳の位置にマイクロホンを用いて 2 チャンネル録音を行う。録音された音響信号は、記録・伝送などを経た後ヘッドホンを用いて受聴者の耳元で再生される。

しかし、ダミーヘッドを用いた直接録音を行うと、信号の中に、人間の頭部と耳介によって回折した伝達特性が初めから含まれてしまうので、通常のスtereo録音とは互換性をとるのが難しいという問題がある。

また、音源を定位させる位置を録音後に移動させることは容易ではない。そこで、音像情報と定位情報を分離するために、音源信号は無響室での近似録音、あるいは電子合成音として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、これに左右の耳に到来する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する考え方が生まれた。

2.5 トランスオーラルシステム

スピーカを用いて実現しようとする技術がトランスオーラルシステムと呼ばれる技術である [3]。図 2.5 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様に、原音場にダミーヘッドを設置して 2 チャンネル収録を行う。収録された音は、異なった部屋において、スピーカを用いて再生される。

2.5 トランスオーラルシステム

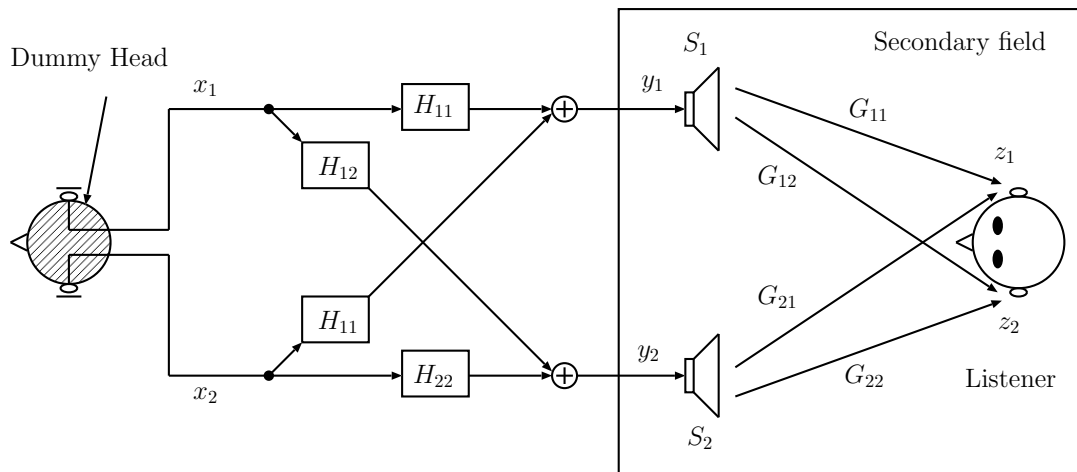


図 2.5 トランスオーラルシステムの構成

このとき、単純な再生、即ちダミーヘッドの右チャンネルで收音した音 x_1 を右のスピーカ S_1 から再生し、左チャンネルの音 x_2 を左スピーカ S_2 から再生することを考える。このとき、右のスピーカ S_1 から出力した音は、空間伝達関数 G_{11} を経て右耳に到達すると同時に、 G_{12} を経て左耳にも到達してしまう。本来右耳だけに聞こえるべき音が、左耳にも聞こえてしまう。この現象は空間のクロストークと呼ばれ、原音場での音を再生するためには大きな妨害要因となる。また、空間伝達特性 $G_{ij}(z)$ はスピーカや再生音場の特性などを表したものであるが、このような特性も付加されないことが望ましい。

図 2.5 に示したトランスオーラル系では、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、ダミーヘッドの右耳の信号を $x_1(z)$ 、左耳の信号を $x_2(z)$ 、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、再生音場で受聴者の右耳および左耳で再生される信号をそれぞれ $z_1(z)$ 、 $z_2(z)$ と表す。このとき、図 2.5 より、

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

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

などの関係が成立する。これらの関係を行列を用いて表示すると、

2.5 トランスオーラルシステム

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

となる．

空間クロストークを除去し， $G_{11}(z)$ などの影響を除去したとすると，耳元での受信信号 $\mathbf{z}(z)$ はダミーヘッド出力 $\mathbf{x}(z)$ と一致する．式 (2.8) より，このこと ($\mathbf{z}(z) = \mathbf{x}(z)$) を実現するためには， $\mathbf{H}(z)$ が $\mathbf{G}(z)$ の逆行列 $\mathbf{G}^{-1}(z)$

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

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

となればよい．従って， $\mathbf{G}^{-1}(z)$ の第 ij 要素を図 2.5 のフィルタ $H_{ij}(z)$ の特性として与えれば，空間クロストークを除去したトランスオーラルシステムが構成される．

再生音場が無響室や反響の少ない音場である場合には，delayed inverse の考え方を導入した最小自乗誤差法により十分良好な近似が実現できることが知られている．一方，再生音場の反響が無視できない場合には MINT 理論 (多入出力形逆フィルタ) の考え方に基づいた図 2.6 のような系を構成する必要がある．

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 2.6 に示すように第 3 のスピーカ S_3 とフィルタ $H_{13}(z)$ ， $H_{23}(z)$ を導入すれば，反響のある音場において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．

2.6 2チャンネル-2点制御系

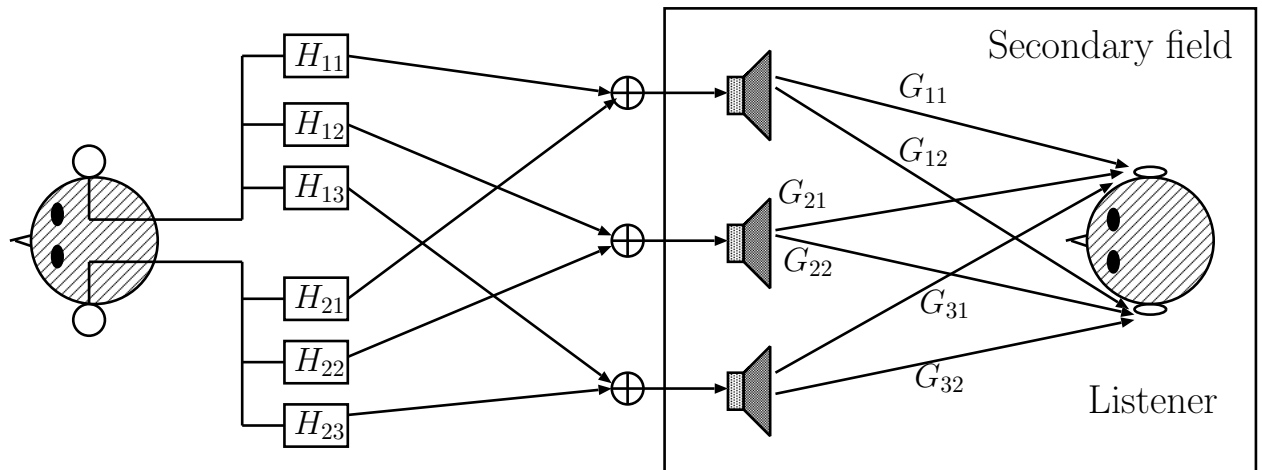


図 2.6 MINT 理論の考え方に基づいたトランスオーラルシステムの構成

MINT 理論に基づいた図 2.6 のフィルタ H_{ij} を，行列演算で直接的に計算する方法では，インパルス応答長が大きい場合には多大な計算量が必要になる．よって，この方法で逆フィルタを計算し，MINT 理論で再現することは，演算量やハードウェア規模から考えて実用化には至っていない．

2.6 2チャンネル-2点制御系

ここでは，2つのスピーカを用いて2つの制御点を制御する音響系に対して線形モデル化を行い，2つのスピーカから出力される原音と制御点で観測される観測信号が一意に等価できないことについて述べる [1]．図 2.7 に2チャンネル-2点制御線形モデルを示す．対象とする伝達系 $G_{ij}(z)$ のインパルス応答を $g_{ij}(z)$ のインパルス応答を $g_{ij}(k)$ と表す． g_{ij} の値はいずれも，時刻 L_g 以降零とみなせるものと仮定する，つまり， $g(k)$ は $0 \leq k \leq L_g$ のみ非零の値をもつものとする．また，近似逆フィルタ (補正フィルタ) $C_i(z)$ は L 次の FIR フィルタでそのインパルス応答を $c(k)$ ， $k=0,1,\dots,L$ と表す．入力される原音は $x_i(t)$ と表す．入力される原音は $x_i(t)$ と表し，観測信号は $y_j(t)$ と表す．

ここで補正フィルタ $C_i(z)$ が1を示す (補正しない) 場合を考える．このとき，2つの制御点 M_j で観測される信号 $y_j(t)$ と原音 $x_i(t)$ の関係はインパルス応答 $g_{ij}(k)$ を用いて以下の

2.6 2 チャンネル-2 点制御系

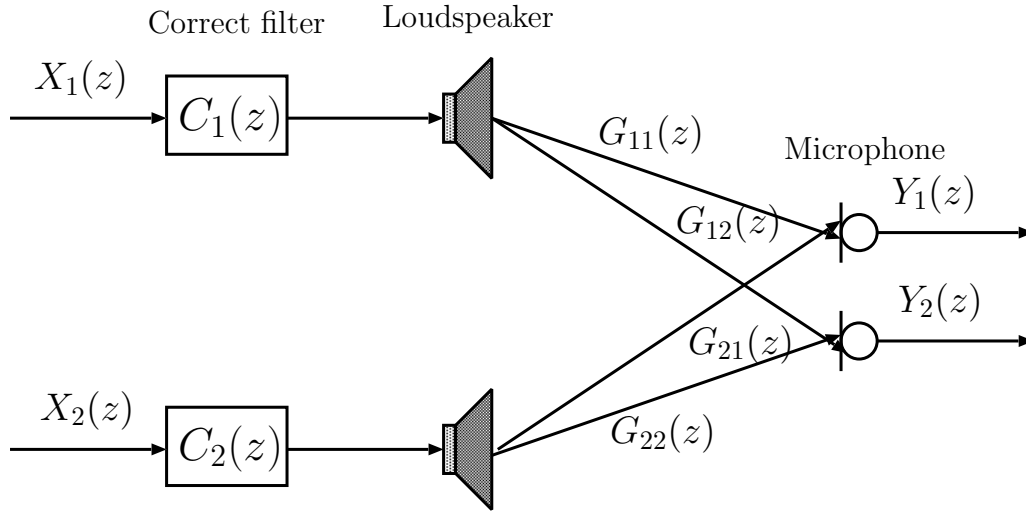


図 2.7 2 チャンネル-2 点制御系線形モデル

ように表される.

$$y_1(t) = \sum_{k=0}^{L_g} g_{11}(k)x_1(t-k) + \sum_{k=0}^{L_g} g_{21}(k)x_2(t-k) \quad (2.11)$$

$$y_2(t) = \sum_{k=0}^{L_g} g_{22}(k)x_2(t-k) + \sum_{k=0}^{L_g} g_{12}(k)x_1(t-k) \quad (2.12)$$

ここで、式 2.12 における右辺の第 1 項は、右側のスピーカから右側制御点に至る成分を示しており、第 2 項は本来、左側のスピーカから左側観測信号に伝えられるべき音が右側観測信号へ伝達されるクロストーク現象を示している。したがって、伝達特性 $G_{11}(z)$ に対する近似逆フィルタを算出し、これを補正フィルタ $C_1(z)$ として使用しても、右チャンネルから G_{21} を通過するクロストーク信号が加算されることにより右側観測信号は右側原信号とは大きく異なってしまう。また、左右のチャンネルに対して制御系は対称な構成であるため、式 2.12 についても例外ではない。

以上のことから 1 つの補正フィルタは伝達特性の影響を軽減させること、クロストークの影響を軽減させることを同時に実現するような機能を持たなければならない。

2.7 まとめ

本章では，本研究で取り扱う音場再生が線形であることを説明し，ヘッドホンを用いて再生を行うバイノーラルシステムとスピーカを用いて再生を行うトランスオーラルシステム，2チャンネル-2点制御系を用いた音場再生について説明した．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示した．しかし，MINT 理論を用いた音場再生では，通常の部屋などのを再現空間としたとき，残響時間は長くなってしまい，つまり，空間伝達特性のインパルス応答が長くなってしまうので，演算量が増大してしまい現実的なシステムではない．2チャンネル-2点制御系システムでは，クロストークが問題となり，原音場の音を再現することは難しい．そこで，第3章においてこの問題に対する改善手法の提案を行う．

第 3 章

音場再生に適したスピーカ配置システム

3.1 はじめに

音を音で消す基本原理は，消したい音の波形に逆位相を足し合わせることにより，波形の山と谷が相殺されることで音を打ち消すことが可能となる．これを重ね合わせの原理と呼んでいる．この原理は，正弦波のような同じ信号が時間的に続く場合には重ね合わす位相の倍数を考えなくてもよいが，周期波では無い場合には，時間的な位相のずれは許容されないことになる．しかし，実際の音声は非常に周期性が高いために，仮に時間的なずれがあった場合でも逆相の音を出すことにより，音を消去できる可能性がある．前章において述べた 2 チャンネル-2 点制御系では，原信号と観測信号を近づけるためにクロストーク成分の軽減が大きな課題であるため，この重ね合わせの原理を用いたクロストーク成分の軽減について検討する．

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，実際に実験と計算機シミュレーションを行う．

3.2 重ね合わせの原理

重ね合わせの原理とは、消したい波形に逆位相を足し合わせるにより、波形の山と谷が相殺されることで音を打ち消すことができる原理である。一般に 2 つの波 $y_1 = f_1(x, t)$, $y_2 = f_2(x, t)$ が同時に存在するとき実際に観測できる波形 y は、それらの単純な代数和

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

で表される波である。これを、波の重ね合わせの原理という。

この原理が成り立つのは、波動方程式の解が次の性質を持つことと関係がある。すなわち、 c_1, c_2 が任意の定数であり、関数 $y_1 = f_1(x, t)$, $y_2(x, t)$ がそれぞれ波動方程式の解であるとき、関数 $c_1 y_1 + c_2 y_2$ もまた、その方程式の解である。

3.2.1 逆位相の波同士の重ね合わせ

逆位相の波同士の重ね合わせを行った場合について説明する。図 3.1 の波は、振幅 10 の $\sin$ 波である。図 3.2 の波は、振幅 10 の $-\sin$ 波である。ここで、図 3.1 の波と図 3.2 の波は互いに逆位相の関係にある。そのため、重ね合わせると波は互いに打ち消し合い、図 3.3 のように音は消える。

3.2 重ね合わせの原理

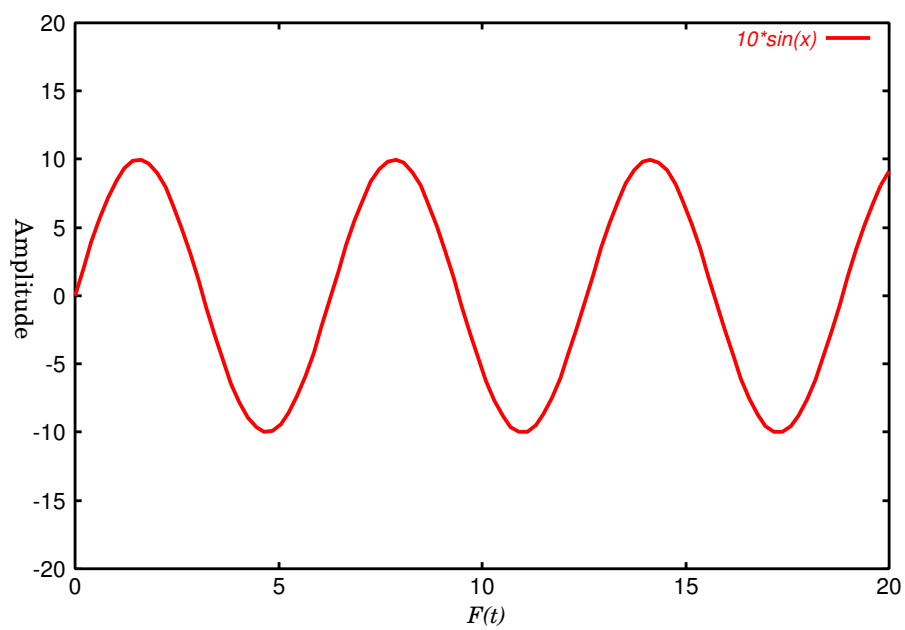


図 3.1 $10 * \sin(x)$ の波形

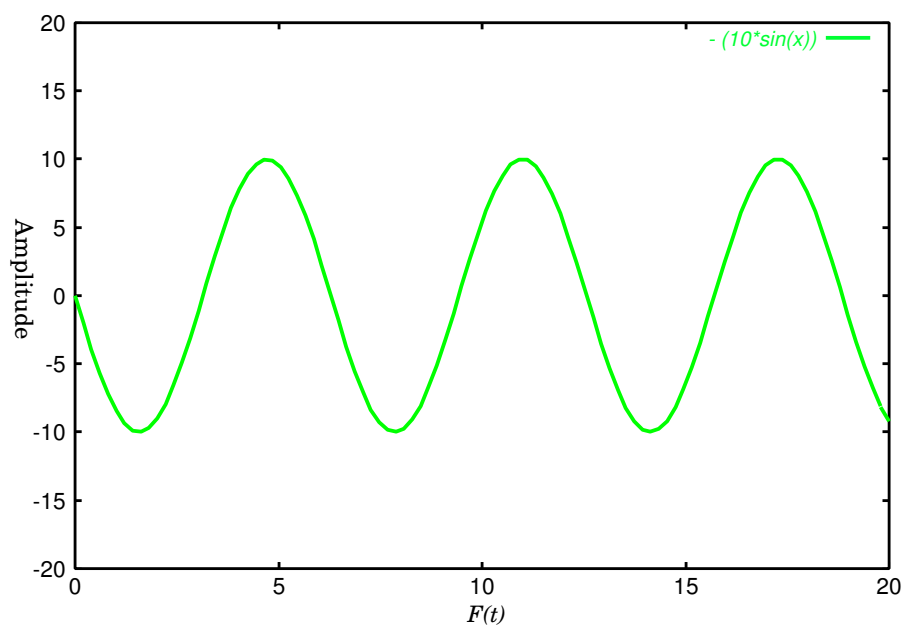


図 3.2 $-(10 * \sin(x))$ の波形

3.2 重ね合わせの原理

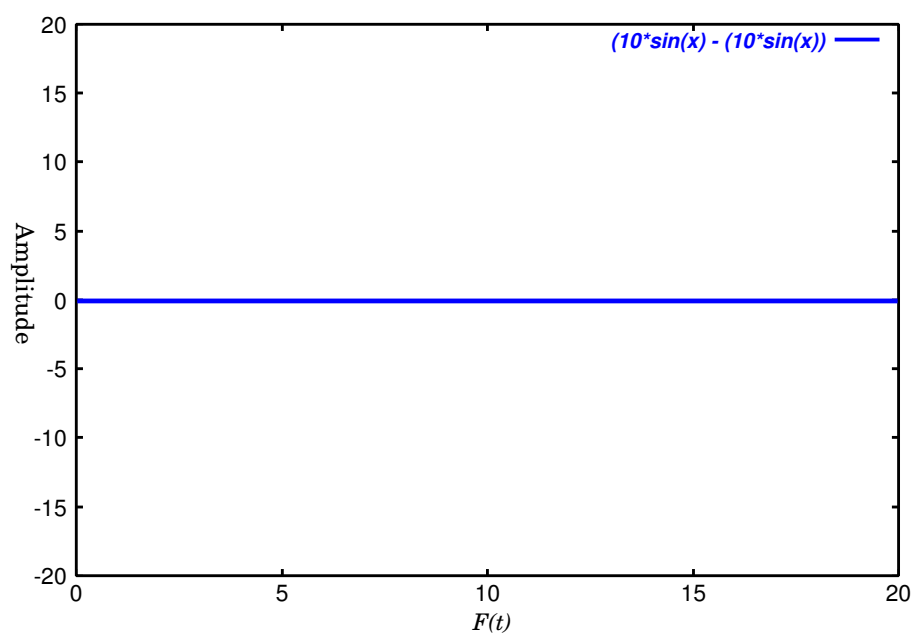


図 3.3 図 3.1 の波と図 3.2 の波を重ね合わせた波形

3.3 音の消去法

図 3.4 に提案するサブスピーカを用いた音の消去法を示す．ここでは，簡単にするために右のスピーカをメインスピーカとし，左耳へ聞こえるクロストーク成分を補正するスピーカをサブスピーカとする．まず，補正したい空間に補正するサブスピーカを配置する．配置位置については，左耳がメインスピーカから聞こえる音の逆位相となる位置にサブスピーカを配置する．つまり，重ね合わせの原理により理論上ではクロストークを打ち消すことが可能となる．

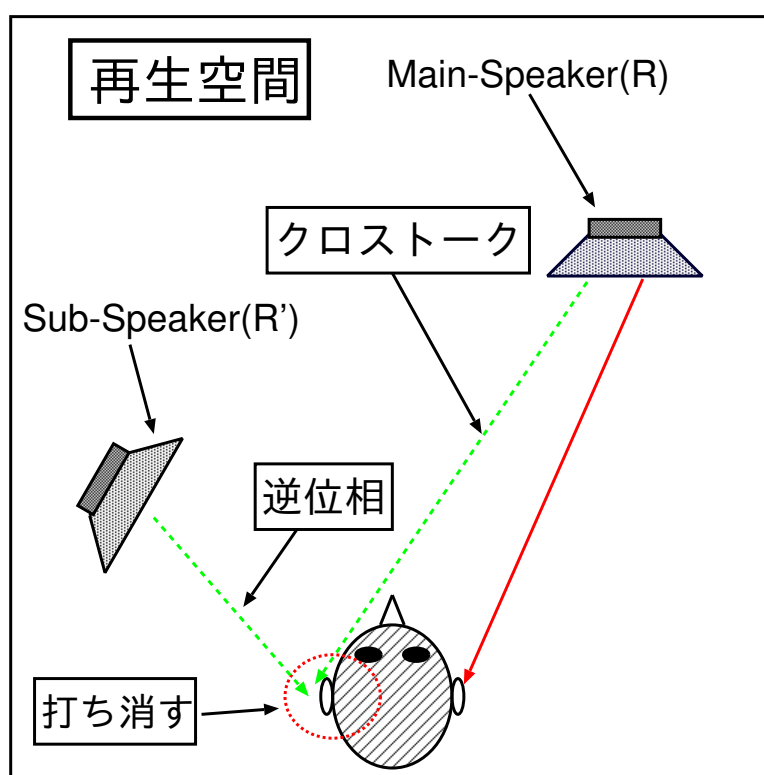


図 3.4 クロストーク消去法

3.4 耳もとでの補正実験

サブスピーカを耳もとへ配置することによって，観測点に伝わるまでの信号が受ける室内伝達特性等の影響は小さくなる．つまり，この条件で音を補正されなければ，他条件で実験

3.4 耳もとでの補正実験

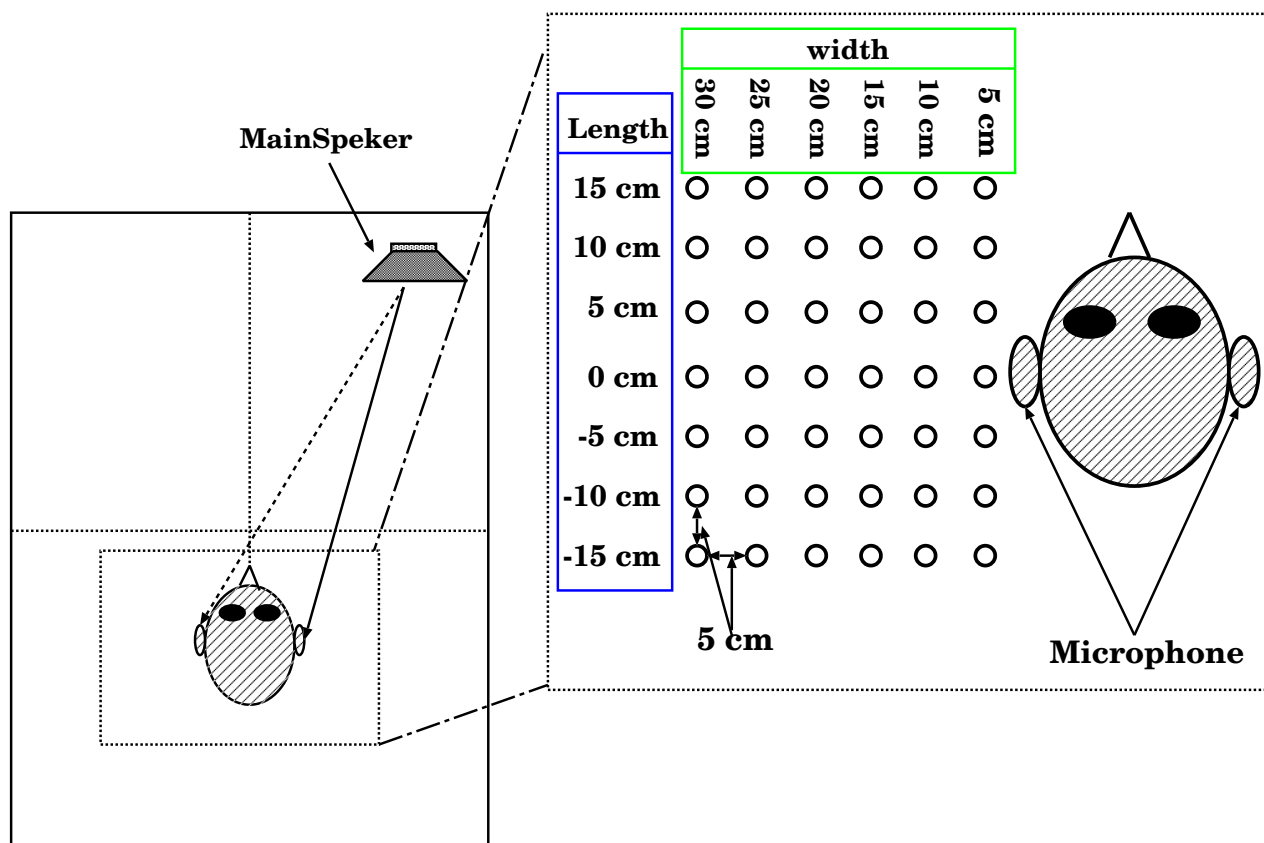


図 3.5 室内での実験環境

を行っても音が補正できない可能性が高いと考えられる．そこで，あまり環境の影響を受けないようにサブスピーカを耳もとに配置して実験を行った．

3.4.1 実験環境

実験には，2000Hz の正弦波を用い，サブスピーカから逆相の信号を出力した．メインスピーカを (C,g,L0) 地点に配置し，サブスピーカを受聴者から向かって真正面の左側に 5cm 間隔で横方向に 6 点，縦方向に 7 点，角度を受聴者に向かって 0 度と左右に 45 度の点を用意し，実験を行った．

3.4 耳もとでの補正実験

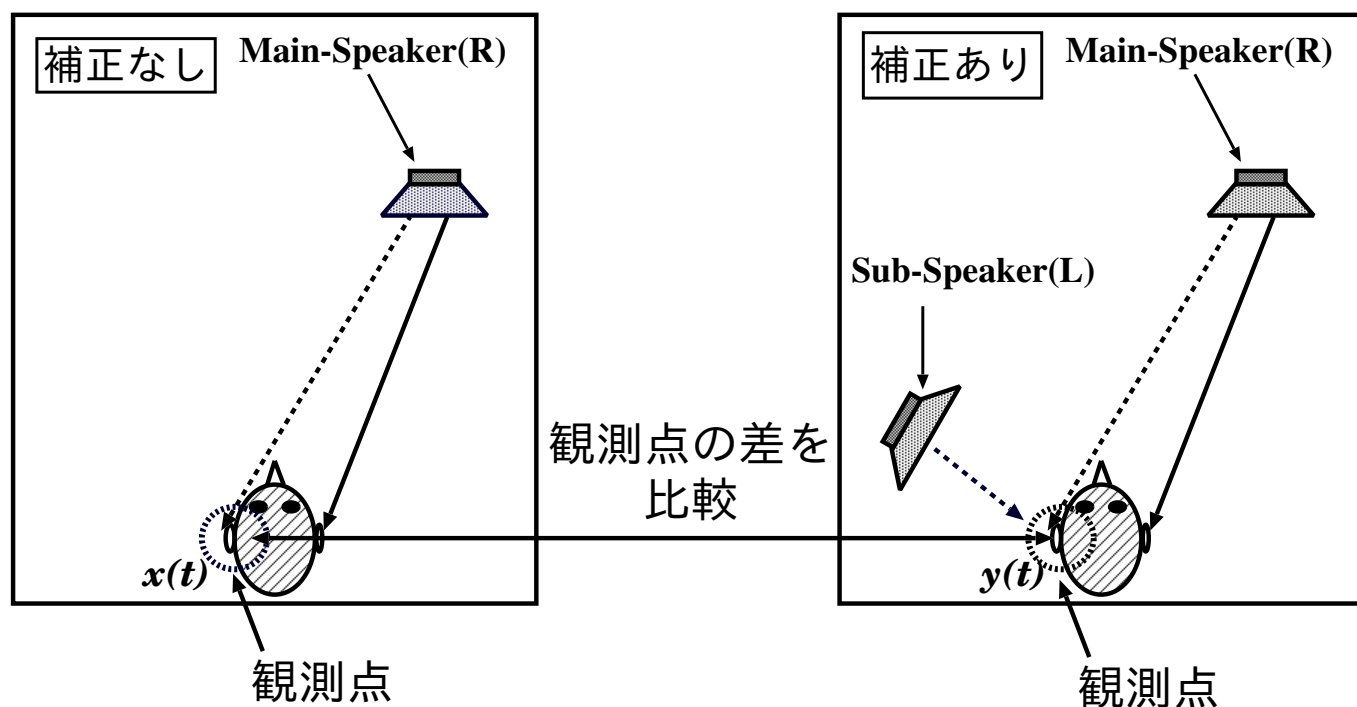


図 3.6 評価方法

3.4.2 評価方法

音の軽減効果の評価は図 3.6 に従い、式 3.2 で計算されるメインスピーカのみで出力した観測信号 $x(t)$ とメインスピーカとサブスピーカ両方を用いてクロストーク成分の補正をおこなった観測信号 $y(t)$ との振幅値の差を比較し、クロストークの消去率を用いた。消去率 S は、少なければ少ないほどクロストーク成分が軽減されることになる。

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

3.4.3 実験結果

図 3.7 に左耳へ観測されるメインスピーカのみで出力した信号を示し、図 3.8 に左耳へ観測されるメインスピーカとサブスピーカから出力した消去率が一番よい地点の信号を示す。また、消去率の高い条件における結果を図 3.9 と表 3.1 に、消去率の低い条件における結果

3.4 耳もとでの補正実験

を表 3.2 に示す．この結果より，消去したい音が消えていることが確認できた．また，サブスピーカが観測点に近いほど結果が良く，縦方向に離れた場合であれば角度を変化させることにより，変化させない場合よりも結果が良かった．つまり，実験結果は理論上での計算通りで，位相の距離に依存していることが分かった．

3.4 耳もとでの補正実験

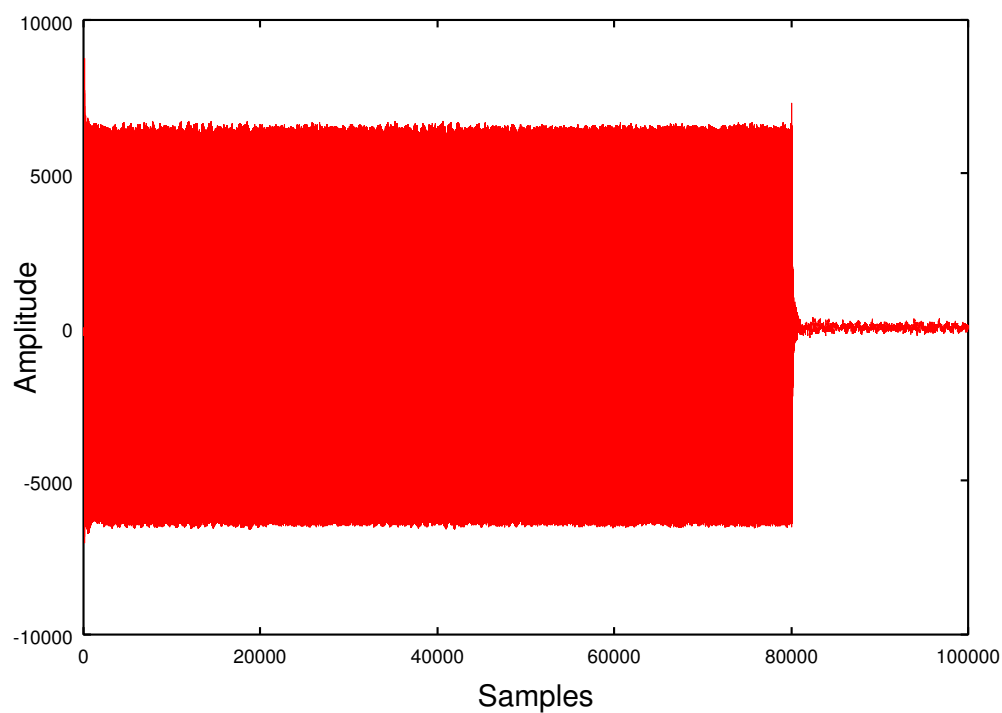


図 3.7 メインスピーカのみの波形

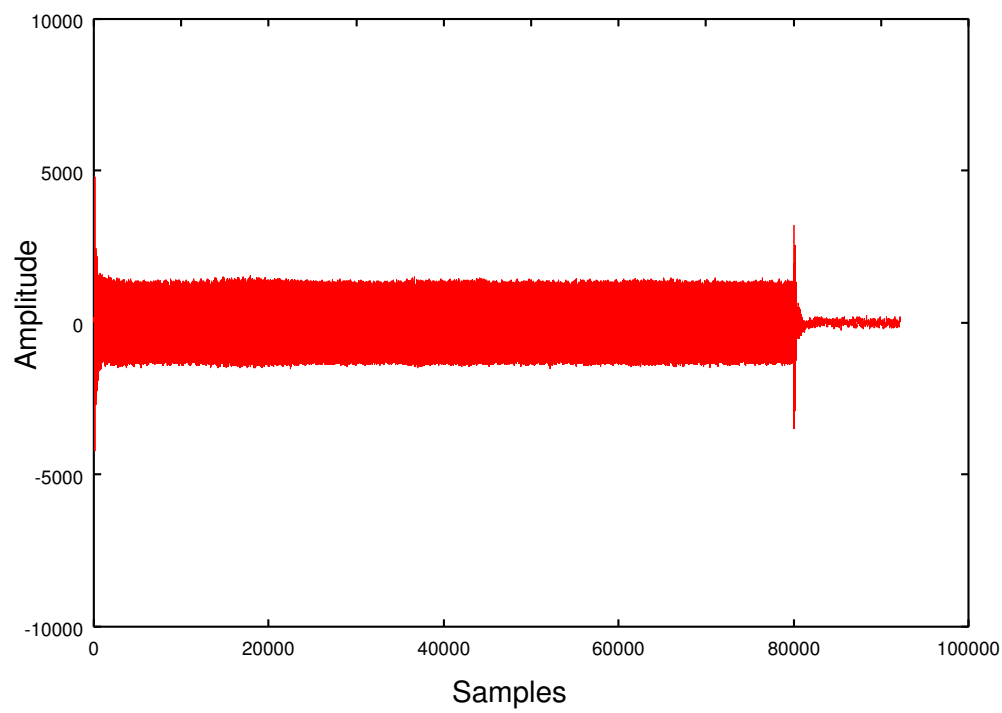


図 3.8 サブスピーカで補正を行った波形

3.4 耳もとでの補正実験

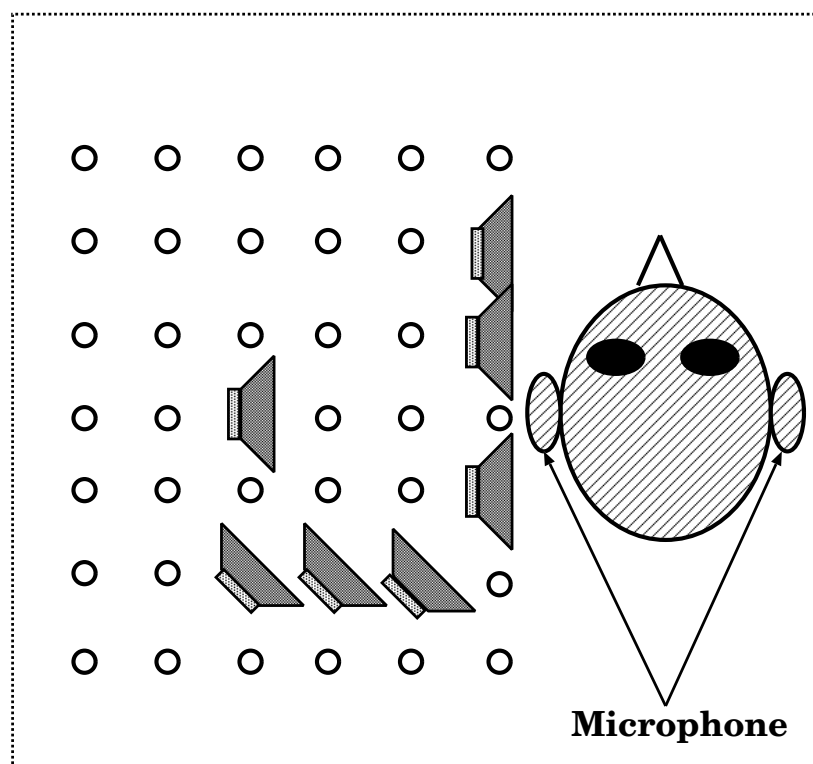


図 3.9 室内での実験結果

表 3.1 実験における消去率が高い条件の結果

サブスピーカの位置 (Length, Width, 角度)	消去率
(-10cm, 15cm, 45 度)	0.05924
(10cm, 5cm, 0 度)	0.08100
(-10cm, 20cm, 45 度)	0.09542
(-10cm, 10cm, 45 度)	0.09653
(10cm, 5cm, 45 度)	0.17359
(0cm, 20cm, 0 度)	0.23403
(5cm, 5cm, 0 度)	0.24811
(-5cm, 5cm, 0 度)	0.27688

表 3.2 実験における消去率が低い条件の結果

サブスピーカの位置 (Length, Width, 角度)	消去率
(0cm, 5cm, 0 度)	2.81553
(5cm, 15cm, 0 度)	2.37262
(10cm, 25cm, 0 度)	1.72524
(-5cm, 15cm, 0 度)	1.68312
(5cm, 10cm, 0 度)	1.57235
(5cm, 20cm, 0 度)	1.52329
(10cm, 25cm, 0 度)	1.47694
(-10cm, 5cm, 0 度)	1.20383

3.5 計算機シミュレーション

シミュレーションではメインスピーカの位置を固定し，サブスピーカの配置位置について検討した．また，今回は観測点に対してスピーカを前方のみで，サブスピーカから再生する信号は，メインスピーカからの出力信号に対して，そのままのものと，位相を反転させた逆相のいずれかのものを用いた．

メインスピーカは (C,G,L0) 地点に配置し，入力信号に 2000Hz の正弦波を用いた．また，サブスピーカはメインスピーカ地点を除くすべての位置に配置した．提案した手法でどのようにクロストークが軽減されるか検証するために，実環境で計測した室内伝達関数を用いて計算機シミュレーションを行った．今回は，検証が複雑になるため対象とするスピーカを 1 つとして行っている．評価方法として，3.4.2 で説明したものを使用する．

3.5.1 実験環境

計算機シミュレーションで用いる伝達特性は，比較的かつ理論的な解析がしやすいよう反響の少ない図 3.10 の空間を作成し，実際の人間が聞く音に近くなるように図 3.11 に示すダミーヘッドと呼ばれる人間に模したものをを用いた．このダミーヘッドにイヤホン型マイクロホンに左右の耳に設置し，測定した．



図 3.10 実験環境



図 3.11 ダミーヘッド

3.5 計算機シミュレーション

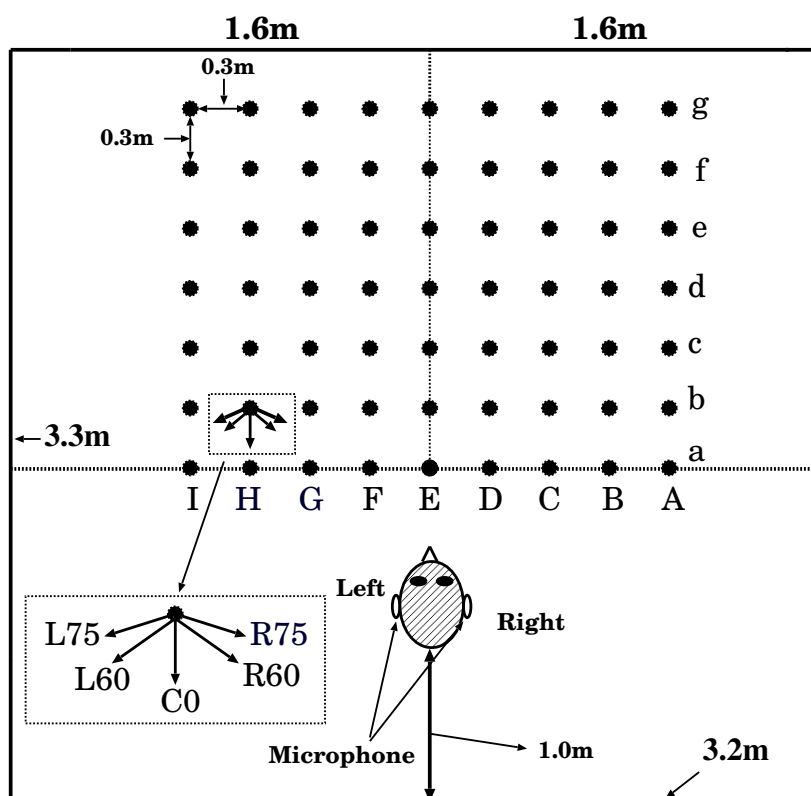


図 3.12 室内の測定環境

3.5.2 室内伝達特性の測定

図 3.12 に室内伝達特性の測定環境を示す．スピーカの位置を横方向へ 0.3m 間隔でラージ A からラージ I までの 9 点，縦方向 0.3m 間隔でスモール a からスモール g までの 7 点，スピーカの角度を受聴者から見て左右に 75 度,60 度，真正面の 5 種類，計 315 点を用意し，室内伝達関数を測定した．

3.5.3 計算機シミュレーションの結果

表 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 に計算機シミュレーション結果における角度別の消去率を示す．ここで，g~a(1) は同相，g~a(2) は逆相とする．また，結果より，消去率がよい条件を図 3.13, 表 3.8 に示す．ここで，メインスピーカを (C,g) 地点に配置しているため，この地点の結果は存在しない．この結果から，スピーカの位置によってクロストーク成分を軽減で

3.6 まとめ

きる可能性があることが分かった。また，消去率がよかった配置位置や角度はあまり規則性がみられず，逆接的に言うと自分が配置しやすい壁際等の配置場所でもクロストークの軽減は可能であるとも考えられる。

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，実際に実験と計算機シミュレーションを行った。また，結果について考察している。

3.6 まとめ

表 3.3 サブスピーカの角度 (R75 度) 消去率

	I	H	G	F	E	D	C	B	A
g(1)	0.409	3.596	0.506	1.543	0.882	1.208		5.198	6.595
g(2) g	1.894	0.085	2.192	0.613	1.312	2.212		0.219	9.061
f(1)	3.495	5.641	9.047	2.693	3.206	2.977	0.567	2.196	3.297
f(2)	0.156	15.106	1.370	2.754	1.807	0.973	2.989	2.981	1.377
e(1)	1.774	8.048	3.876	2.524	1.049	7.069	1.439	0.458	0.097
e(2)	4.618	0.779	1.194	7.343	0.959	0.655	3.498	2.298	5.345
d(1)	5.825	0.330	0.329	3.404	5.874	0.701	5.728	5.942	6.135
d(2)	0.187	2.071	2.567	0.342	2.035	2.313	1.975	1.081	1.490
c(1)	1.549	5.107	2.824	1.801	1.321	1.961	2.680	6.337	3.782
c(2)	1.770	0.125	0.996	1.941	5.390	3.530	0.148	0.269	1.342
b(1)	0.092	2.194	3.153	0.522	0.150	4.786	0.958	1.771	6.271
b(2)	3.591	0.667	0.222	2.223	2.895	0.830	1.045	2.582	3.390
a(1)	0.655	2.602	0.546	2.508	1.188	0.407	0.955	1.810	0.150
a(2)	4.877	1.880	4.983	5.830	0.836	4.123	1.403	2.553	3.728

3.6 まとめ

表 3.4 サブスピーカの角度 (R60 度) 消去率

	I	H	G	F	E	D	C	B	A
g(1)	0.022	2.980	0.432	1.425	0.904	1.669		0.802	2.626
g(2)	0.873	3.808	1.817	0.853	1.147	1.000		4.690	4.605
f(1)	0.022	2.981	1.077	1.500	1.386	3.596	3.268	2.479	3.121
f(2)	3.429	13.063	9.225	2.128	2.768	0.883	1.610	2.877	0.552
e(1)	5.094	3.666	3.227	0.813	0.767	5.029	0.966	1.452	0.174
e(2)	0.404	0.481	1.426	5.249	1.352	0.434	2.586	0.910	4.059
d(1)	5.693	0.178	4.045	3.687	7.039	0.214	3.972	1.965	5.424
d(2)	0.292	2.786	0.598	0.152	1.680	3.085	1.160	5.122	2.015
c(1)	1.331	0.615	3.230	1.658	1.688	1.444	1.342	8.969	2.116
c(2)	2.059	4.914	0.579	2.305	4.482	4.479	0.754	1.312	1.786
b(1)	0.019	2.893	0.101	1.031	1.361	0.490	0.546	0.650	7.039
b(2)	3.707	0.392	3.829	4.017	0.870	3.642	1.618	1.434	2.256
a(1)	0.019	4.076	0.183	6.761	1.493	0.782	6.873	5.051	0.251
a(2)	3.674	1.635	4.925	1.642	0.874	3.713	1.114	0.263	5.868

3.6 まとめ

表 3.5 サブスピーカの角度 (C0 度) 消去率

	I	H	G	F	E	D	C	B	A
g(1)	0.367	3.703	1.418	1.209	4.254	1.027		0.592	3.649
g(2)	1.945	0.169	0.794	0.813	0.020	1.400		1.658	4.105
f(1)	1.099	1.999	1.389	0.524	0.388	4.268	3.280	2.048	2.484
f(2)	1.080	8.476	8.440	2.644	4.206	3.294	5.929	2.340	1.764
e(1)	0.110	2.183	1.881	0.984	0.775	3.515	0.537	1.029	0.184
e(2)	5.423	2.253	0.569	1.589	1.373	0.146	3.356	9.085	5.899
d(1)	4.212	0.348	1.647	3.333	5.766	0.055	5.278	1.182	2.287
d(2)	0.465	3.132	4.967	0.462	0.167	4.423	0.442	2.236	1.600
c(1)	1.360	5.738	2.802	1.915	1.139	4.909	2.081	3.830	2.728
c(2)	4.045	1.350	0.445	5.901	3.237	4.541	0.550	0.388	0.416
b(1)	0.118	3.301	2.371	2.459	0.157	7.993	0.509	2.303	1.754
b(2)	2.880	1.145	0.280	3.953	4.249	3.048	5.093	0.565	9.541
a(1)	7.783	4.191	0.020	5.814	2.803	0.841	1.358	0.229	0.385
a(2)	0.791	0.937	3.900	1.628	0.875	1.219	1.445	5.513	3.460

3.6 まとめ

表 3.6 サブスピーカの角度 (L60 度) 消去率

	I	H	G	F	E	D	C	B	A
g(1)	0.623	4.103	2.002	0.908	0.993	0.436		3.073	3.675
g(2)	4.131	2.262	0.352	1.727	4.123	3.051		0.125	0.931
f(1)	4.732	1.573	0.508	2.246	3.584	2.857	16.226	4.529	5.757
f(2)	5.022	10.428	5.009	0.743	0.219	3.387	16.233	3.183	4.196
e(1)	0.911	6.452	0.423	0.376	0.706	2.787	0.006	1.187	4.990
e(2)	5.526	0.557	5.008	2.042	3.347	0.168	4.029	2.272	0.079
d(1)	2.236	0.787	0.148	7.337	2.496	1.087	6.316	2.152	1.229
d(2)	1.367	1.240	3.395	1.151	0.179	1.900	0.335	0.703	1.323
c(1)	4.820	0.888	2.001	4.851	0.066	1.221	0.984	7.141	0.741
c(2)	1.679	4.416	6.518	3.270	5.075	2.966	1.592	0.678	3.453
b(1)	0.087	1.514	3.878	2.497	0.347	4.878	0.377	3.676	0.567
b(2)	4.749	0.846	0.258	4.338	2.845	1.988	5.448	0.317	6.699
a(1)	9.789	4.199	1.004	2.040	2.786	8.465	1.627	1.084	2.551
a(2)	3.944	1.387	4.089	1.312	0.386	1.118	2.343	8.387	2.768

3.6 まとめ

表 3.7 サブスピーカの角度 (L75 度) 消去率

	I	H	G	F	E	D	C	B	A
g(1)	1.317	3.266	1.540	0.775	3.989	0.611	2.644	2.291	5.920
g(2)	2.701	2.452	0.577	2.524	0.753	5.058	0.759	0.280	1.563
f(1)	3.263	2.398	0.111	0.462	2.110	1.786	8.474	5.378	5.209
f(2)	7.056	12.248	4.350	2.905	0.408	1.643	11.734	4.699	5.209
e(1)	0.510	5.282	0.319	0.839	4.950	0.385	0.115	1.074	5.897
e(2)	3.249	0.144	4.382	1.302	0.511	2.641	4.272	2.874	0.258
d(1)	1.305	1.166	2.441	7.250	0.830	0.781	6.756	1.964	1.378
d(2)	1.620	0.919	0.372	1.623	1.271	1.800	0.360	0.441	2.040
c(1)	3.852	0.907	0.956	4.326	0.222	0.489	1.873	6.136	0.774
c(2)	1.060	3.457	6.294	2.582	4.902	3.547	0.438	0.842	3.332
b(1)	3.907	2.118	6.130	2.734	0.902	6.240	1.266	2.687	0.568
b(2)	0.568	2.185	0.258	4.141	3.027	1.313	2.161	0.459	6.959
a(1)	1.568	1.216	1.893	1.094	1.848	5.729	1.266	0.554	2.844
a(2)	1.222	1.636	3.008	2.938	0.589	0.156	2.161	7.407	3.123

3.6 まとめ

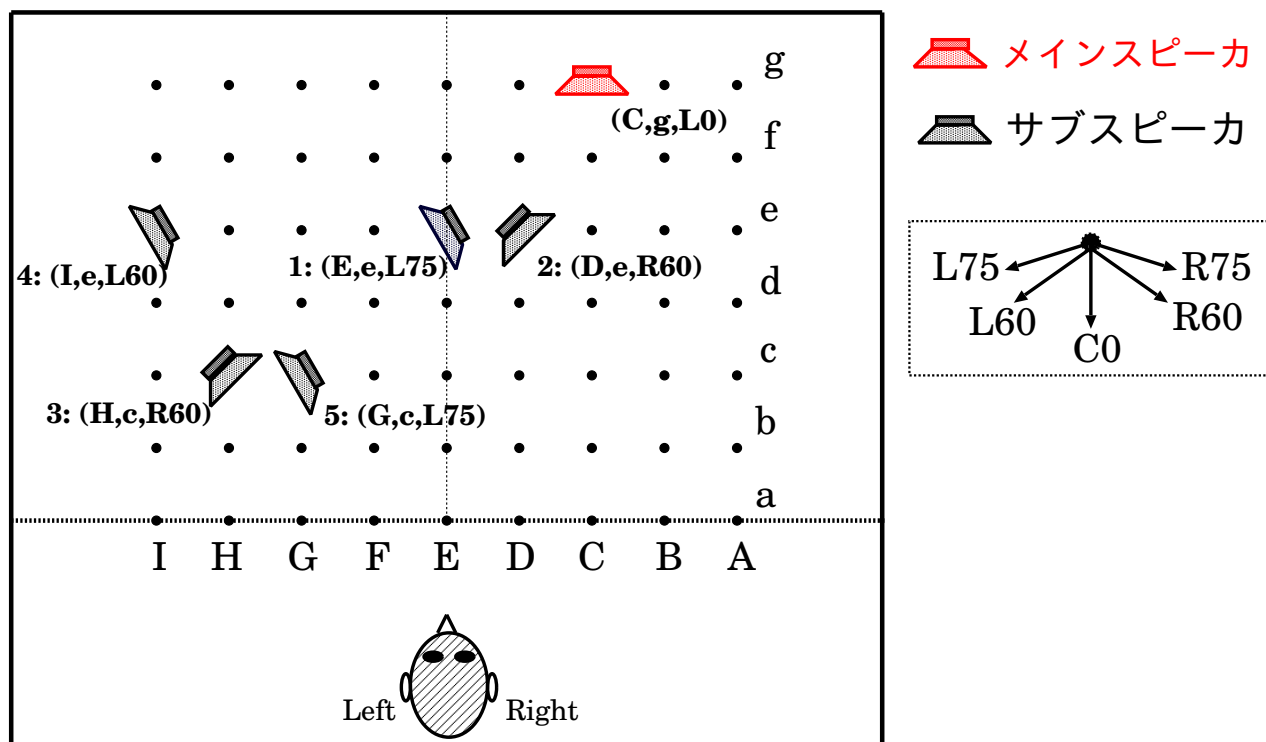


図 3.13 シミュレーション結果

表 3.8 (C,g,L0) 地点における消去率が高い地点の結果

サブスピーカの位置	原信号との位相差	改善率
1:(G,a,R75)	同相	0.003777
1:(E,e,L75)	逆相	0.004534
2:(D,e,R60)	同相	0.006964
3:(H,c,R60)	同相	0.007586
4:(F,e,R60)	同相	0.014061
5:(I,e,L60)	逆相	0.019267
6:(G,c,L75)	同相	0.024166
7:(D,b,L75)	逆相	0.033895
8:(I,d, L0)	逆相	0.035767

第 4 章

結論

4.1 本研究のまとめ

ステレオシステムにおける音場再生技術として、2 チャンネル 2 点制御が提案されている。しかし、2 点制御での大きな問題は本来聴こえるべきでない音であるクロストークが観測されてしまうことである。そこで、2 チャンネル 2 点制御を用いたシステムに対し、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を削減することで 2 チャンネル 2 点制御システムの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、サブスピーカと呼ばれるクロストーク軽減するスピーカを設置することでクロストーク軽減の可能性を考察した。

重ね合わせの原理を用いてクロストーク成分の軽減と音場再生に適したスピーカ配置について検証した。実際の実験結果より、音が消去されるスピーカの配置位置については位相の距離に依存することが確認できた。また、計算機シミュレーションの結果より、音が消去されることは確認できたが、配置位置や角度はあまり規則性が見つかることはできなかった。

4.2 今後の課題

本論文では、音場再生における最適なスピーカ配置について結果を示した。しかし、今回考慮されなかったステレオでの利用を考えた場合、サブスピーカの音自体もクロストークを発生させてしまうことを考えなければならない。このことから、補正は片側の観測点だけでなく、左右 2 つの観測点で同時に補正が行えるように検討する必要がある。

謝辞

本研究において、言われたこともまったくできず、身勝手な私を最後まで見捨てず、また、毎晩夜遅くまで御指導して頂いた高知工科大学情報システム工学科 福本昌弘 助教授に心から感謝致します。今後、この研究室での生活はたぶん忘れることができないと思います。また、本研究の審議をして頂いた島村和典教授、坂本明雄教授に感謝致します。

同大学院生の佐伯 幸郎氏、福富 英次氏、劉 立剛氏にも心から深く感謝致します。佐伯氏には、研究室配属になってからお世話になりっぱなしでした。研究はもちろん、私生活でも多くのことを教わりました。また、一緒に野球観戦に行きたいです。あと、ありもしないことを本当にあったかのように話される、あの話術は勉強したいところです。福富氏には、輪講や論文メ切前など夜遅くまで残って面倒を見て下さりありがとうございました。また、一緒によく遊んだことを覚えています。劉氏には、英語に関する知識をたくさん教えて下さりありがとうございました。また、もう少しお酒にのまれないようにしたいと思います。

研究活動や生活を共にした福本研究室の一同にも感謝致します。おもしろい話や意味のない笑いが絶えなかった一年間でした。おかげさまで充実した生活をおくることが出来ました。また、食事等で一緒に出かけた坂本研究室のみなさんにも感謝致します。

この4年間で出会ったすべての人に感謝致します。

参考文献

- [1] 浜崎真二, 福本昌弘, “クロストーク成分における相互相関係数に着目した音場再生システム,” 信号技報, SIP2004-115, vol.104, pp.31-36, Jan. 2005.
- [2] 辻井重男, 鎌田一雄, デジタル信号処理, 昭晃堂, 1997.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 北脇信彦, 菅村昇, 小泉宣夫, 音のコミュニケーション, コロナ社, 1996.