

平成 18 年度
学士学位論文

受聴者の移動に対応した音場再生システム

**The Sound Field Reproduction System with
movement of Listener**

1070365 一色 雄太

指導教員 福本 昌弘

3 月 9 日

高知工科大学 情報システム工学科

要 旨

受聴者の移動に対応した音場再生システム

一色 雄太

近年、音響の分野では原音場の再現による音場再生が注目されており、その手法として多入力信号補正システムが挙げられる。

この手法は対象として指定した点にのみ補正を行うように考慮されており、受聴者が移動する等の要因で制御を行う点と受聴点が異なった場合、受聴者に対して正しく音場が再現されない問題がある。

この問題に対し、制御点を増加させることで制御点近傍での音場再生を行う手法が試みられたが、補正可能な範囲が拡大した代わりに従来法に比べて制御点での音場の再現精度が低下するという問題が発生した。

本論文では従来提案されていた受聴者の移動に合わせて制御点も移動する手法について精度の検証を行い、その際発生した受聴者の移動距離に応じて再現精度の低下が起こる問題点について、移動距離に応じてフィルタの初期化を行うことによる解決法を提案している。提案手法と従来手法において受聴者の移動に対するシミュレーションを行い、それぞれの結果より提案手法の有効性について検証を行った。その結果、受聴者の移動に対する補正として提案手法は有効であるが、有効に働く範囲は環境によって異なることが確認できた。

キーワード 音場再生 多入力信号補正システム FIR フィルタ

Abstract

The Sound Field Reproduction System with movement of Listener

Yuuta Isshiki

In recent years, the sound field reproduction system that aims to produce a sound field same to the original one has attracted much attention. The multi-input multi-output signal processing technology is proposed to solve this problem. This technology can perform well in predefined control points. However its performance is poor when the control points are different from the predefined ones and it can not deal with the situation of moving listener in the target environment. Although by increasing the number of control points near the desired control area, the problem can be partly solved, the precision of reproduced sound decreases compared with the conventional method. In this research, by inspecting the reproduction precision of conventional method that considers the moving control point and moving listener, I discover the reason why the precision decreases. A new method is proposed to initiate the filter according to movement distance. Computer simulations verify the effectiveness of the proposed method, a different thing shared the effective range by environment.

key words sound field reproduction, multi-input signal correction system, FIR filter

目次

第 1 章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	本論文の構成	3
第 2 章	音場再生システム	5
2.1	はじめに	5
2.2	音響システムと線形モデル	5
2.3	適応フィルタを用いた逆特性の近似	7
2.4	多チャネル-多点制御系による逆特性近似フィルタ	9
2.5	まとめ	10
第 3 章	多入力信号補正システム	11
3.1	はじめに	11
3.2	2 チャネル-2 点制御系	11
3.3	多入力信号補正システム	12
3.3.1	逆特性の近似的推定法	12
3.4	クロストークの影響を考慮した補正フィルタ係数の導出	15
3.5	適応フィルタの更新	17
3.6	まとめ	17
第 4 章	受聴者の移動に対応した音場再生システム	18
4.1	はじめに	18
4.2	受聴者の移動に対応する制御点移動	18
4.2.1	室内伝達環境の測定	19
4.2.2	シミュレーション条件	19

目次

4.2.3	従来手法に関するシミュレーション	20
4.3	提案手法	22
4.3.1	提案手法に関するシミュレーション	22
4.4	異なる環境での提案手法の有効性の検証	24
4.5	受聴者の頭部回転に関する影響	26
4.6	まとめ	28
第 5 章	結論	35
5.1	本研究のまとめ	35
5.2	今後の課題	35
	謝辞	36
	参考文献	37
	付録 A 適応アルゴリズム	38

目次

1.1	バイノーラルシステムの例	2
1.2	トランスオーラルシステムの例	2
1.3	MINT 理論に基づくトランスオーラルシステムの例	3
2.1	閉空間における信号伝搬の様子	6
2.2	図 2.1 の等価回路	7
2.3	室内伝達特性の補正	7
2.4	MINT 理論に基づく音場制御	8
2.5	2 次音源数 l , 制御点数 n の音響系	9
3.1	2 チャネル-2 点制御系モデル	12
3.2	室内における伝達特性の補正	13
3.3	多入力信号補正システムの構成図	15
4.1	従来手法	19
4.2	実験環境での伝達環境の測定モデル	20
4.3	提案手法のシステム図 1	22
4.4	提案手法のシステム図 2	23
4.5	各環境における縦方向への移動の改善結果	26
4.6	各環境における横方向への移動の改善結果	26
4.7	残響時間と縦方向移動に関する提案手法の有効性	27
4.8	残響時間と横方向移動に関する提案手法の有効性	27
4.9	受聴者の頭部回転による影響	28
4.10	左側原信号	29
4.11	右側原信号	29

図目次

4.12 受聴点 D でのインパルス応答 g_{11}	30
4.13 受聴点 D でのインパルス応答 g_{12}	30
4.14 受聴点 D でのインパルス応答 g_{21}	31
4.15 受聴点 D でのインパルス応答 g_{22}	31
4.16 無補正状態での横方向の移動への影響	32
4.17 無補正状態での縦方向の移動への影響	32
4.18 従来手法での横方向の移動への影響	33
4.19 従来手法での縦方向の移動への影響	33
4.20 提案手法での横方向の移動への影響	34
4.21 提案手法での縦方向の移動への影響	34

表目次

4.1	従来手法での実験結果	21
4.2	提案手法での実験結果	23
4.3	縦方向の移動に関する結果	24
4.4	横方向への移動に関する結果	24
4.5	シミュレーション結果 (A556)	25
4.6	シミュレーション結果 (A110)	25

第 1 章

序論

1.1 はじめに

近年，デジタル信号処理技術の発展に伴い様々なメディアでデジタル信号処理の技術が用いられるようになってきた．音響の分野においては原音場（音を収録した空間の音場）を再生空間で再現するための技術について研究がなされている．この技術を用いることにより，コンサートホールでの演奏のような臨場感のある音をコンサートホール以外の場所でも聴くことが出来たり，無響音室と呼ばれる一切響きのない部屋で録音した音を再現した上で任意の響きを追加することにより，有名なコンサートホールで演奏しているかの様な音を人工的に作ることが可能となる．

この原音場を再現するために幾つかの手法が考案されている．

複数のマイクロフォンを用いて音を収録し，再生する環境で測定したマイクロフォンと同じ位置や方向に設置したスピーカを用いて録音された音と同じものを再現する手法がある．しかしこの手法では再生環境での影響については考えられていないので，残響時間の短い部屋でのみ正確に再現可能であることや，用いるスピーカの数が増加することによる制御の複雑化，再現範囲が広いと多数のスピーカを必要とすることになる等の様々な問題があり，実用に至っていない．

また，再生する範囲を受聴点に限定することで音場再生を行う手法がある．この手法は受聴者の耳もとで再生される音が録音された音と同じになるように再生を行っている．ダミーヘッドを用いて人間が音を聴いているのに近い環境で録音することにより，この手法を用いて音場の再現を行っている．このダミーヘッドを用いた録音方法のことをダミーヘッド収音

1.1 はじめに

またはバイノーラル収音という．バイノーラル収音で録音した音を用いた音場再生の手法と

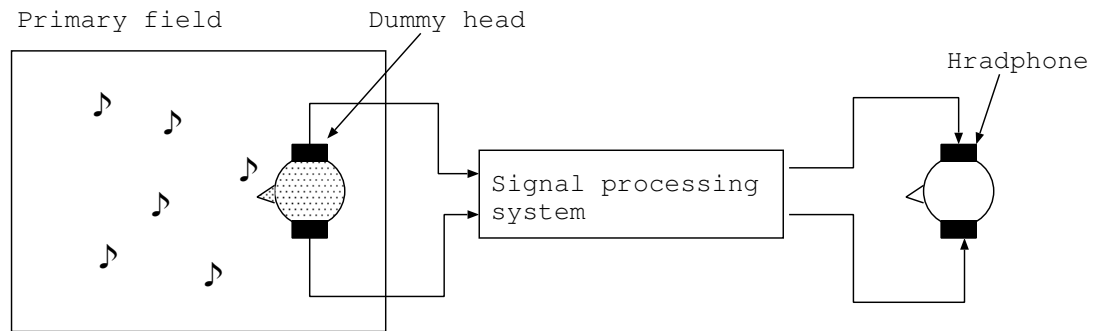


図 1.1 バイノーラルシステムの例

してヘッドフォンを用いたものがある．バイノーラル収音した音そのまま耳もとで再生されれば，録音した環境を再現することが出来る [1]．このようなヘッドフォンを用いた音場再生システムのことをバイノーラルシステムと言う．技術的にはハードウェア構成が簡単であるため，バイノーラル収音された音があれば既存の技術を用いて実現が可能である．しかし受聴者の頭部とダミーヘッドの形状が異なる場合，受聴者には正確に音場を再現できないことや，ヘッドフォン装着による受聴者への負担などの問題がある．

バイノーラル収音した音を，ラウドスピーカを用いて再現する方法に関しても研究されている．空間を伝搬したバイノーラル信号を受聴者の耳もとで再現するために，ラウドスピーカから受聴者の耳 (受聴点) までの伝達経路の影響を除去する逆フィルタを用いる方法をトランスオーラルシステムという．MINT 理論に基づいて受音点以上のスピーカを用いる事でトランスオーラルシステムが実現可能である．しかし MINT 理論によるシステム構成の場合

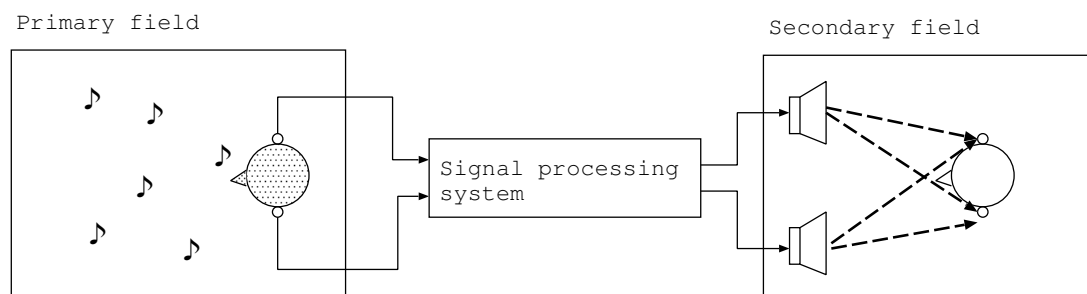


図 1.2 トランスオーラルシステムの例

1.2 本論文の構成

合，受音点が増加するとスピーカの数が増加するとラウドスピーカの数が増加するためハードウェアの制御の複雑化やコストの増加，逆フィルタの計算に必要なメモリ量と演算量の増加といったシステム上の問題の他，残響時間の長い環境でトランスオーラルシステムを構築する場合，逆フィルタのタップ数が増加するという環境に関する問題もある。

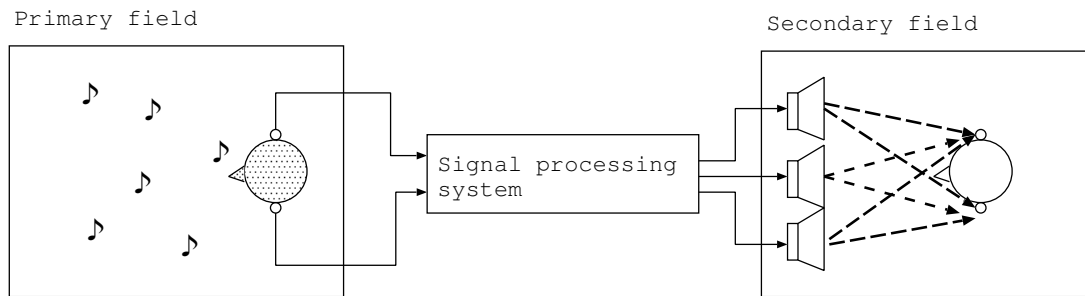


図 1.3 MINT 理論に基づくトランスオーラルシステムの例

この様な問題に対して，2つのスピーカを用いて2点の制御点に対して補正を行う多入力信号補正システムが考案された．このシステムは補正対象の点に対して補正を行うため，受聴者の移動に対して対応できない．実用的なシステムを考慮すると，受聴者の移動に対応させる必要がある

これに対し，補正範囲の拡大を目的として制御点の近傍に対しても補正を行うシステムが考案された [2]．制御点を増加させることにより補正領域を拡大させる事が可能となったが，制御点での再現精度が従来手法に対して低下するという問題が残った．

1.2 本論文の構成

本論文の構成について述べる．

第2章では，本研究に用いている基礎的な技術である，適応アルゴリズムおよび逆フィルタについて述べる．また，それらを用いて基本的な音場再生の理論について述べる．

第3章では，本研究においても使用している多入力信号補正システムについて述べる．

第4章では，受聴者の移動距離に応じて，各フィルタの初期化を行うことにより受聴者の移動による影響を改善する手法を提案し，従来手法と提案手法を用いて受聴者の移動による

1.2 本論文の構成

影響と改善に関して計算機シミュレーションを行った結果について述べる.

最後に, 本研究で得られた結果を基に第 5 章において結論を述べる.

第 2 章

音場再生システム

2.1 はじめに

音場再生システムには，システムを構築するハードウェアや再生手法の違いから様々なシステムが考案されてきた．本章では，まず伝達環境などの音響システムが線形モデルとして表される事について説明する．次にラウドスピーカによる音場再生の実現方法に対して逆フィルタを用いることによる音場再生の実現に関して説明を行い，多チャネル-多点出力による逆フィルタの設計について説明する．

2.2 音響システムと線形モデル

空間中の 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．伝達関数 $G(z)$ は空間が屋外などの自由空間の場合，2 点間の距離に依存する．これは音圧が音源までの距離に反比例して減衰する特性と，その距離を音が伝搬するのに要する伝搬遅延時間によるものである．一方，音場が図 2.1 に表すように反射性を持つ閉空間であった場合の，音源であるラウドスピーカと受音点であるマイクロフォンの 2 点間での音の伝搬について考える．ここではラウドスピーカに入力した信号を $x(t)$ ，マイクロフォンで収録した信号を $y(t)$ とする．このとき，マイクロフォンで収録された信号 $y(t)$ は，音源から受音点へ直接届く信号 (直接音) に，壁などで反射して受音点へ到達する信号 (反射音) が含まれた信号となる．音の反射は壁などに吸音されてエネルギーが消滅するまで続けられ，反射した回数によって 1 次反射音，2 次反射音といった分類をされる．音源からパルス波が出力さ

2.3 適応フィルタを用いた逆特性の近似

れた時，マイクロフォンで観測される信号（インパルス応答）は時間の経過と共にまず直接音が観測され，次に1次反射音，2次反射音が観測される．このインパルス応答を標本化して得られた離散数列を $g(0), g(1), g(2), \dots$ と表すと，室内伝達環境 $G(z)$ はこの離散数列を z 変換して求められた次式より求められる．

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

音源，マイクロフォン，空間音響伝達系による影響が全て線形であると仮定すると，入力信号 $x(t)$ と出力信号 $y(t)$ 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．

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

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 $x(n)$ に対する観測信号が求められることをあらわす．両辺を z 変換することにより，次式のように変形される．

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

ただし， $X(z), Y(z)$ はそれぞれ $x(t), y(t)$ の z 変換を意味している．式 (2.3) の関係より，図 2.1 の伝達系は図 2.2 のような等価回路で表され，室内音場における音響システムは線形モデル化することが出来る．

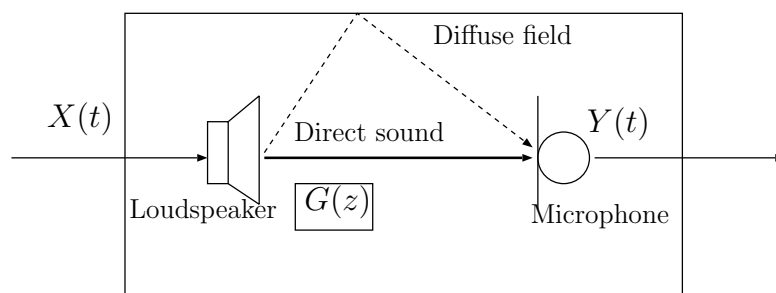


図 2.1 閉空間における信号伝搬の様子

2.3 適応フィルタを用いた逆特性の近似

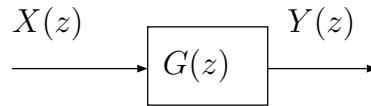


図 2.2 図 2.1 の等価回路

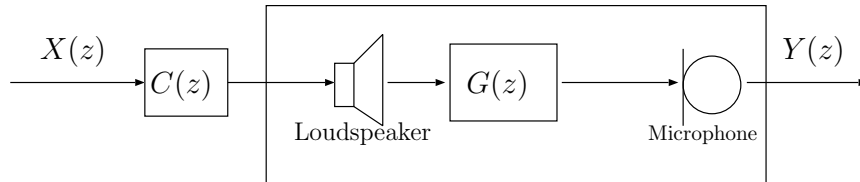


図 2.3 室内伝達特性の補正

2.3 適応フィルタを用いた逆特性の近似

トランスオーラルシステムを用いた音場再生では、ラウドスピーカに入力される所望信号とマイクロフォンで観測される観測信号が等しくなるように制御することを目的とする。つまり図 2.2 の線形モデルを想定した場合、 $X(z) = Y(z)$ となるように制御する必要がある。しかし実空間上の音場では先に示した通り、受音点での観測信号には式 (2.3) のように伝達特性 $G(z)$ の影響を受けるため、この影響を補正してやる必要がある。そこで、図 2.3 で示すように所望信号に対して補正フィルタ $C(z)$ を通して信号を出力する。この補正フィルタは伝達特性の逆特性に近似した近似逆フィルタである。この補正フィルタが $C(z)$ が伝達特性 $G(z)$ の完全な逆特性を示すものと仮定すると、

$$C(z) = G^{-1}(z) \quad (2.4)$$

という関係が成り立つ。図 2.3 の関係から補正フィルタと伝達特性を畳み込むことで

$$\begin{aligned} G(z)C(z) &= G(z)G^{-1}(z) \\ &= 1 \end{aligned} \quad (2.5)$$

となる。したがって伝達特性が 1 を示すとき、受音点では所望信号 $x(t)$ がそのまま再生される。ただし、このような関係が成り立つためには伝達関数の零点が単位円上に存在する(最小位相系) 必要がある。しかし一般的に室内伝達環境は非最小位相系であり、したがって

2.3 適応フィルタを用いた逆特性の近似

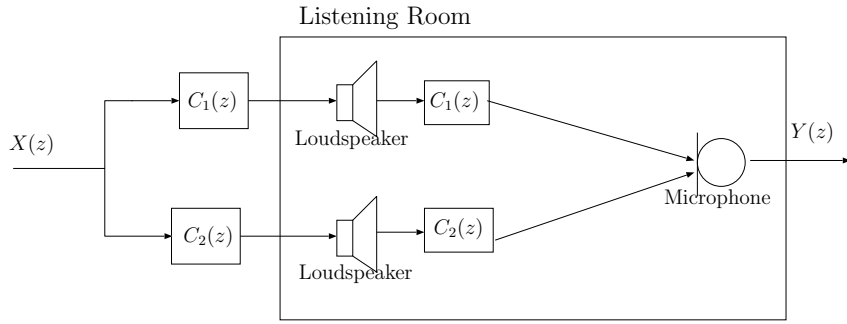


図 2.4 MINT 理論に基づく音場制御

正確な逆特性を推定することは困難であるため，式 (2.5) のような関係は実現できない．非最小位相系で逆近似を実現するための方法として，逆特性の誤差エネルギーを最小にする FIR フィルタを用いる手法が挙げられる．これは

$$E(z) = 1 - G(z)C(z) \quad (2.6)$$

で与えられる誤差エネルギー $E(z)$ を最小とする $C(z)$ の搜索問題に帰着する．一方 MINT 理論ではスピーカから受音点までの複数の空間伝達経路を設けることにより，特性が最小位相を示さない場合でも正確な逆特性を実現できることが示されている．図 2.4 に MINT 理論に基づく音場制御について示す．受聴点における観測信号 $Y(z)$ は

$$\begin{aligned} Y(z) &= G_1(z)C_1(z)X(z) + G_2(z)C_2(z)X(z) \\ &= (G_1(z)C_1(z) + G_2(z)C_2(z))X(z) \end{aligned} \quad (2.7)$$

と表される．この系で逆フィルタ処理を行うには，次の関係を満たす FIR フィルタ $C_1(z), C_2(z)$ を求める必要がある．

$$G_1(z)C_1(z) + G_2(z)C_2(z) = 1 \quad (2.8)$$

この解の存在条件として， $G_1(z), G_2(z)$ が有限であり，かつ共通の零点を持たないという条件がある．この条件を満たすとき，式 2.8 を満たす $C_1(z), C_2(z)$ が存在することが数学的に証明されている．

2.4 多チャネル-多点制御系による逆特性近似フィルタ

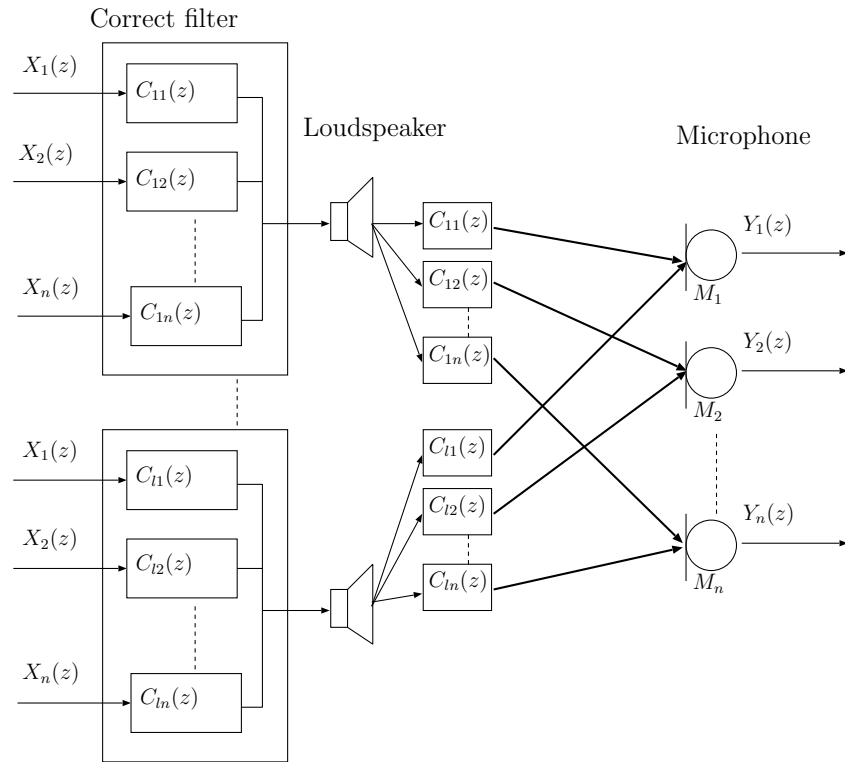


図 2.5 2 次音源数 1, 制御点数 n の音響系

2.4 多チャネル-多点制御系による逆特性近似フィルタ

図 2.5 に音源数 l , 制御点数 n の多チャネル音場再生系において逆特性を近似するための近似逆フィルタの構成を示す. 室内伝達環境のインパルス応答を $G_{jk}(z)$, 補正フィルタを $C_{jk}(z)$, 所望信号を $X_l(z)$, 観測信号を $Y_l(z)$ とする. また $j(= 1, 2, \dots, l)$ および $k(= 1, 2, \dots, n)$ はそれぞれ音源及び制御点の番号である. 多チャネル音場再生システムでは, 各制御点に対する制御を他点とは独立して行うことが望ましい. そこで補正フィルタ群においては入力信号 $X_j(z)$ をパルスとしたときに, 制御点 M_j にのみパルスが観測されるような補正フィルタ群を基本単位とする. すなわち

$$G(z)C(z) = l_l \quad (2.9)$$

2.5 まとめ

を満たす $C(z)$ を求めればよい。ただし

$$G(z) = \begin{bmatrix} G_{11}(z) & G_{12}(z) & \cdots & G_{1l}(z) \\ G_{21}(z) & G_{22}(z) & \cdots & G_{2l}(z) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1}(z) & G_{n2}(z) & \cdots & G_{nl}(z) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$C(z) = \begin{bmatrix} C_{11}(z) & C_{12}(z) & \cdots & C_{1l}(z) \\ C_{21}(z) & C_{22}(z) & \cdots & C_{2l}(z) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1}(z) & C_{n2}(z) & \cdots & C_{nl}(z) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

とし、 l_l は $l \times l$ の大きさの単位行列とする。各制御点に対して、上記の補正フィルタ係数を求め、それらを 2 次音源毎に畳み込むことで逆特性を近似する制御系が構築される。

2.5 まとめ

本章では音場再生システムが線形モデルで表されることについて説明し、伝達特性の影響に関して補正を行う近似逆フィルタが設計できることを述べた。また、多チャネル-多点制御系に関して MINT 理論を用いることで音場再生が行えることについて示した。しかし一般的な室内環境を再現空間としたとき、残響時間が長くなる場合がほとんどである。つまり、空間伝達特性のインパルス応答長が長くなることから演算量の増加という問題が起こるため、MINT 理論を用いた音場再生システムは実現的ではない。第 3 章ではこの問題を解決するために考案された手法について説明する。

第 3 章

多入力信号補正システム

3.1 はじめに

ラウドスピーカによる多チャネル音場再生システムでは室内伝達特性の影響を除去する近似逆フィルタを用いる必要がある。そのための方法として、MINT 理論に基づいた多チャネル-多点制御系が提案されている [1][3]。しかし第 2 章で説明した通り、空間伝達環境の残響時間が長くなる環境では、インパルス応答長が長くなり計算量とメモリ量が増大することから実用化には至っていない。これに対して、2 つの制御点に対して 2 つのスピーカで音場再生を行う多入力信号補正システムが考案された。本章では多入力信号補正システムについて解説する。また、これまでに提案されていた受聴者の移動に対応する方法について解説する。

3.2 2 チャネル-2 点制御系

ここでは 2 つの音源を用いて 2 つの制御点に対して制御を行う音響系である 2 チャネル-2 点制御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の観測信号が一様に等価できないことを示す。図 3.1 に 2 チャネル-2 点制御系モデルを示す。観測点における観測信号 y_i は入力信号 x_i と室内伝達特性 g_{ij} を用いて以下の式で与えられる。

$$y_1(t) = x_1(t)g_{11} + x_2(t)g_{21} \quad (3.1)$$

$$y_2(t) = x_2(t)g_{22} + x_1(t)g_{12} \quad (3.2)$$

ここで右側の観測信号は、右側受音点に右側入力信号 x_1 が伝達特性 g_{11} の影響を受けて届く直接信号と、左側入力信号 x_2 が伝達特性 g_{21} の影響を受けて届くクロストーク信号の総

3.3 多入力信号補正システム

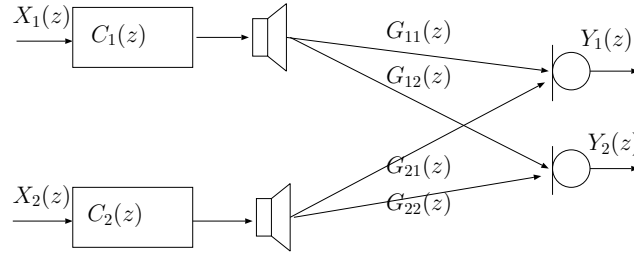


図 3.1 2 チャネル-2 点制御系モデル

和である。クロストーク信号とは，ある受音点に伝わるべき信号がもう一方の受音点に伝わってしまう成分のことである。このクロストーク信号があるために，右側原信号と右側観測信号が大きく異なってしまふ。これは左側受音点に対しても同様のことが言える。以上のことから，補正フィルタ C_i は直接信号の伝達特性の影響とクロストークの影響を同時に除去あるいは軽減することが望まれる。

3.3 多入力信号補正システム

ここでは，先で述べた 2 つの制御点に対して 2 つの音原を用いる 2 チャネル-2 点制御系におけるクロストーク成分による影響を軽減させるための，2 チャネル-2 点制御系をもとに提案された多入力信号補正システムについて説明する。

3.3.1 逆特性の近似的推定法

伝達特性を軽減させる方法として，適応フィルタを用いて伝達特性の逆特性を近似的に導出する過程について述べる。ここでは，説明簡略化のため 1 つの音原 (スピーカ) と 1 つの受音点からなる線形モデルを考える。原音である所望信号 $x(t)$ が補正フィルタ $C(z)$ を通過した信号 $d(z)$ は，フィルタ係数 c_L とすると次のように表される。

$$d(t) = x_L(t)c_L^T \quad (3.3)$$

ただし，

$$x_L(t) = [x(t), x(t-1), \dots, x(t-L)] \quad (3.4)$$

3.3 多入力信号補正システム

$$c_L = [c_0, c_1, \dots, c_L] \quad (3.5)$$

である．また L は補正フィルタのインパルス応答長である．ここで制御点での観測信号 $y(t)$ は

$$y(t) = d_{Lg}(t) c_{Lg}^T \quad (3.6)$$

となる．また L_g は伝達関数のインパルス応答長である．ただし

$$d_{Lg}(t) = [d(t), d(t-1), \dots, d(t-L_g)] \quad (3.7)$$

$$g_{Lg} = [g_0, g_1, \dots, g_{L_g}] \quad (3.8)$$

である．ここで補正フィルタ $C(z)$ が伝達関数 $G(z)$ に対する近似逆フィルタと同等の性質であると仮定すると， z 変換による表現を用いて以下の近似式が成り立つ

$$\begin{aligned} Y(z) &= D(z)G(z) \\ &= X(z)C(z)G(z) \\ &\approx X(z)G^{-1}(z)G(z) \\ &= X(z) \end{aligned} \quad (3.9)$$

これは，伝達関数に対する近似逆フィルタを用いることで原音である所望信号と観測点での観測信号を等価にすることができることを示している．図 3.2 に近似逆フィルタ係数を推定

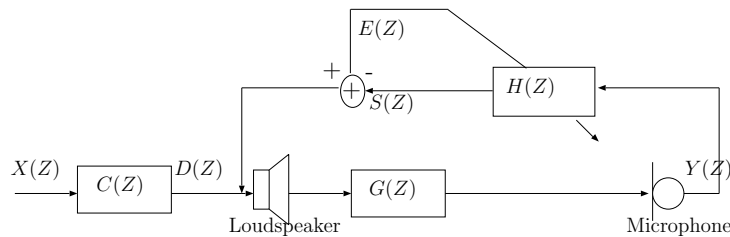


図 3.2 室内における伝達特性の補正

するための構成図を示す．伝達特性 g_{Lg} の逆特性を推定するために適応フィルタ $H(z)$ を

3.3 多入力信号補正システム

用いている．適応フィルタのフィルタ係数を $h_L(t)$ ，適応フィルタへの入力状態ベクトルを $y_L(t)$ とすると，入出力関係は

$$s(t) = y_L(t)h_L^T(t) \quad (3.10)$$

となる．ただし

$$y_L(t) = [y(t), y(t-1), \dots, y(t-L)] \quad (3.11)$$

$$h_L(t) = [h_0(t), h_1(t), \dots, h_L(t)] \quad (3.12)$$

である．一方，スピーカから出力される信号 $d(t)$ を式 3.3 で与えられるものとする，出力誤差 $e(t)$ は

$$e(t) = d(t) - s(t) \quad (3.13)$$

となる．ここで，出力誤差 $e(t)$ が 0 であるとする

$$\begin{aligned} d(t) &= s(t) \\ x_L(t)c_L^T(t) &= y_L(t)h_L^T(t) \end{aligned} \quad (3.14)$$

となり，この式において適応フィルタ係数 h_L を補正フィルタ c_L として与えると

$$\begin{aligned} x_L(t)c_L^T(t) &= y_L(t)c_L^T(t) \\ x_L(t) &= y_L(t) \end{aligned} \quad (3.15)$$

となる．これより，出力誤差 $e(t)=0$ であるならば，補正フィルタへの入力 (所望) 信号 $x(t)$ と観測信号 $y(t)$ は等しくなる．よって，出力誤差 $e(t)$ を 0 に近づけるように適応フィルタのフィルタ係数 $h_L(t)$ を更新していく必要がある．フィルタ係数の更新には

$$h_L(k+1) = h_L(k) + \alpha \frac{y_L(t)}{\|y_L(t)\|^2} e(k) \quad (3.16)$$

で示される学習同定法を用いて行う [3]．ここで， $\|\cdot\|$ はベクトルのユークリッドノルムを表す．また， α はステップゲインと呼ばれフィルタ係数の修正率の大きさを制御するパラメータである．

3.4 クロストークの影響を考慮した補正フィルタ係数の導出

図 3.3 に多入力信号補正システムの構成図を示す。

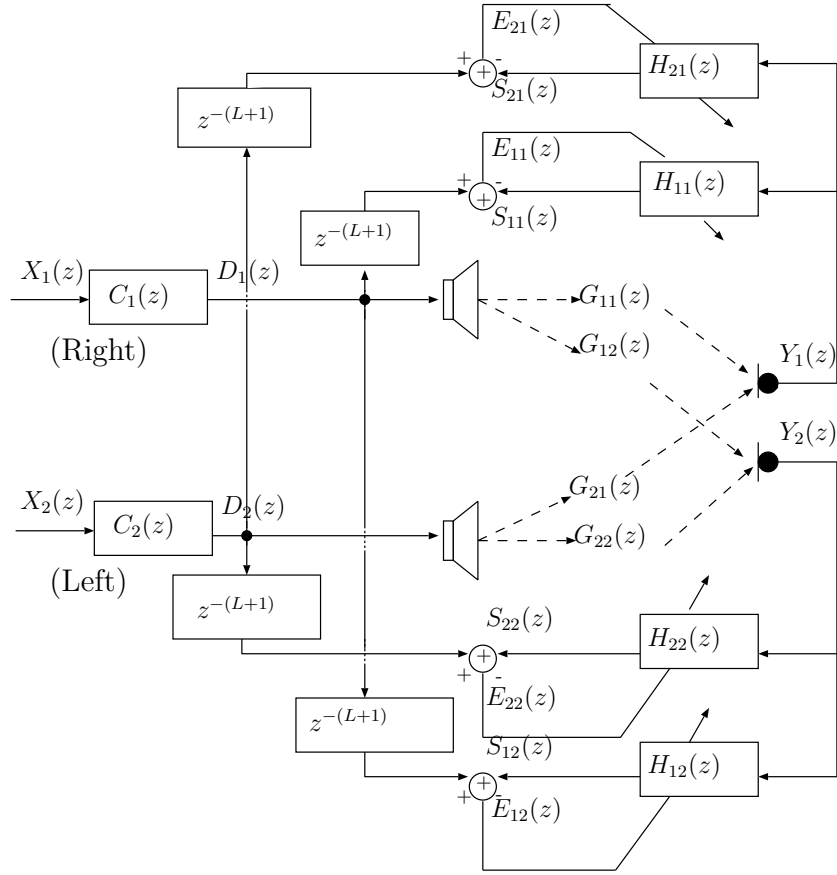


図 3.3 多入力信号補正システムの構成図

2つの音原から受長者の耳に相当する2点の観測点までの伝達経路は、2章でも述べたクロストークによる影響を含めて4本の経路があり、右側制御点への入力信号 $y_1(t)$ を式で表すと

$$y_1(t) = x_1 L_g(t) g_{11}^T L_g + x_2 L_g(t) g_{21}^T L_g \quad (3.17)$$

となる。この式での第2項はクロストーク成分を表しており、左側制御点でも同様にクロストークによる影響がある。つまり、2チャンネルの音場再生ではクロストークの影響により式 3.17 を成立させることが困難である。この問題を解決に対し、クロストークにおける伝達関

3.4 クロストークの影響を考慮した補正フィルタ係数の導出

数 $g_{12}L_g$ と $g_{21}L_g$ は強い相関を持つことから、補正フィルタ係数はクロストークとそれ以外の経路の伝達特性の逆特性から求める方法が考案されている。

適応フィルタ $H_{11}(z)$ は、右側入力信号 $d_1(t)$ と右側観測信号 $Y_1(z)$ が適応フィルタを通過した後の信号 $s_{11}(t)$ との出力誤差 $e_{11}(t)$ を算出している。前小節で述べたように、適応フィルタは出力誤差 $e_{11}(t)$ を徐々に小さくする。つまり右側入力信号から右側制御点までの伝達特性 $g_{11}L_g$ の逆特性を近似するフィルタとなる。このフィルタ係数 $h_{11}(t)$ を右側補正フィルタ C_1 に与えることにより、右側観測信号 $y_1(t)$ を右側所望信号 $x_1(t)$ に近似させることができる。しかし、この補正処理はクロストークにより左側観測信号 $y_2(t)$ に関しても、右側所望信号 $x_1(t)$ への近似を行うように作用するため、これを防ぐ必要がある。一方、適応フィルタ $H_{21}(z)$ では左側入力信号 $d_2(t)$ と、右側観測信号 $Y_1(z)$ が適応フィルタを通過した後の信号 $s_{21}(t)$ との出力誤差 $e_{21}(t)$ を算出しており、左側入力信号から右側制御点までの伝達特性 $g_{21}L_g$ 、つまり左側入力信号から右側制御点におけるクロストークの逆特性を近似するフィルタとなる。通常、 $H_{21}(z)$ で得られるフィルタ係数は右側補正フィルタ $C_1(z)$ と接続されていないため、フィルタ係数 c_1 として与えることはできない。しかし、本システムでの左右の制御点の距離は人間の頭部における左右の耳間の距離であるため、先で述べた通りクロストークの伝達関数 $g_{12}L_g$ と $g_{21}L_g$ は強い相関を持つと考えられる。これを利用すると、適応フィルタ $H_{21}(z)$ は伝達関数 $g_{12}L_g$ の近似逆特性を求める適応フィルタとして扱うことができる。よって、適応フィルタ $H_{21}(z)$ のフィルタ係数を右側補正フィルタ係数 c_1 として与えることで、 $g_{12}L_g$ を通過するクロストーク成分を左側所望信号 $x_2(t)$ に近似させることができる。以上のことから、 $H_{11}(z)$ で得られたフィルタ係数 $h_{11,L}$ と $H_{21}(z)$ で得られたフィルタ係数 $h_{21,L}$ を合成させることで右側補正フィルタの係数を求めることができる。これにより、それぞれの直接音の伝達特性の影響とクロストークの影響を同時に軽減できる補正フィルタを構成することができる。また左側チャンネルについても同様の手法で補正フィルタを構成することができる。ここで、左右の補正フィルタ係数は以下の式より与えられる。

$$c_1(t+1) = w_1 h_{11}(t) + (1 - w_1) h_{21}(t) \quad (3.18)$$

3.5 適応フィルタの更新

$$c_2(t+1) = w_2 h_{22}(t) + (1 - w_2) h_{12}(t) \quad (3.19)$$

ただし, $w_{i,m}$ は重み付けパラメータ ($0 \leq w_i \leq 1$) である.

3.5 適応フィルタの更新

補正フィルタの係数を求めるために, 学習同定法に基づいて適応フィルタを更新する. 式 3.19, 3.22 を信号 1 サンプル毎に繰り返し処理することで, 右側音原から伝達特性 $G_{12}(z)$ を通過するクロストーク信号が左側所望信号 $x_2(t)$ に近似していくと考えられる. もう一方のクロストークに関しても同様のことが言える. まず, 4 つの近似逆フィルタ $H_{ij}(z)$ に対する出力誤差 $e_{ij}(t)$ をそれぞれ以下のように計算する.

$$e_{ij}(t) = d_i(t) - s_{ij}(t) \quad (3.20)$$

次に各逆フィルタ $H_{ij}(z)$ の係数を学習同定法を用いて以下のように算出する.

$$h_{ij,L}(t+1) = h_{ij,L}(t) + \alpha \frac{y_{j,L}(t)}{\|y_{i,L}(t)\|^2} e_{ij}(k) \quad (3.21)$$

ここで, 左右の所望信号に対する補正フィルタ係数 c_i をそれぞれ以下のように更新する.

$$c_{1,L}(t+1) = w_{1,L} h_{11}(t) + (1 - w_{1,L}) h_{21,L}(t) \quad (3.22)$$

$$c_{2,L}(t+1) = w_{2,L} h_{22}(t) + (1 - w_{2,L}) h_{12,L}(t) \quad (3.23)$$

ここで, w_i は重み付けパラメータ ($0 \leq w_i \leq 1$) である.

3.6 まとめ

本章では, 2 チャネル-2 点制御系の音場再生である多入力信号補正システムに関して, 補正フィルタ係数の算出法および係数の更新手順についてまとめた. しかし, このシステムは受聴点に対して補正が行えることが確認されているが, 制御点以外の点に対しての補正は考慮されていない. よって, 受聴者が移動することで制御点と受聴点が異なってしまうと, 正しい音像での補正が行えない可能性が高い. そこで, 第 4 章において, この問題に対処する手法の提案を行う.

第 4 章

受聴者の移動に対応した音場再生システム

4.1 はじめに

前章で述べた通り，従来の多入力信号補正システムでは制御点以外の点に関しては補正を考慮していないため，受聴者の移動によって制御点と観測点の位置がずれることにより，受聴者に対する音場再生の精度に影響が出るという問題がある．これに対し，マイクを受聴者に合わせて移動させることにより受聴者の位置に対し音場再生を行う手法がこれまでに考案されていたが，この手法では本章で述べるような改善精度に関する問題点がある．これに対して，受聴者の移動距離に応じてフィルタの初期化を行う事によりこの問題に対応する手法の提案を行う．また，計算機シミュレーションを行い提案手法の有効性を検証する．

4.2 受聴者の移動に対応する制御点移動

多入力信号補正法は 2 つのスピーカを用いて 2 点の制御点に対し音場再生を行うものであるが，制御点以外の点に対しての音場再生については考慮されていない．これに対して，これまでマイクを受聴者と共に移動させることにより受聴者の移動に対応させる手法が考案されてきた．図 4.1 にシステムのモデルを示す．ここではまず，この従来考えられていた受聴者の移動に対応する手法に関して，計算機シミュレーションを行いその精度を検証する．

4.2 受聴者の移動に対応する制御点移動

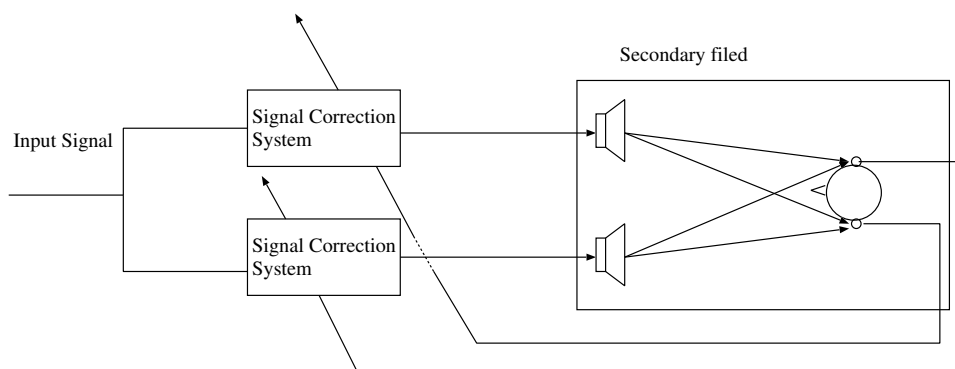


図 4.1 従来手法

4.2.1 室内伝達環境の測定

福本研究室において実験環境を構築し、室内伝達環境の測定を行った。カーペットを引いた床以外の面はビニール製のエアキャップを用いて均一な素材による壁を作成した。ラウドスピーカとマイクの位置関係を図 4.2 のように変化させた 49 箇所の受聴点を用意し、インパルス応答の測定を行った。測定には、ラウドスピーカに入力する白色雑音とマイクロフォンを用いて録音した観測信号から最小 2 乗法を用いて室内伝達環境の測定を行った。測定環境の中央点である D 地点で観測したインパルス応答を図 4.12, 図 4.13, 図 4.14, 図 4.15 に示す。

4.2.2 シミュレーション条件

図 4.10, 図 4.11 にシミュレーションで用いた原音を示す。原音には成人男性の声をサンプリングレート 8kHz でステレオ録音した音声信号を与える。補正フィルタ及び適応フィルタのインパルス応答長は $L = 800$ とし、再生空間での伝達関数のインパルス応答長は $L_g = 800$ とした。原音に対する各制御点と受聴点における再現精度を求める式は

$$\text{SNR}[\text{dB}] = 10 \log_{10} \frac{\sum x_i^2(t)}{\sum [(y_i(t) - x_i(t))^2]} [\text{dB}] \quad (4.1)$$

を用いる。ここで、 $x_i(t)$ は所望信号の音圧、 $y_i(t)$ は各制御点と各受聴点における観測信号の音圧を表す。補正を行って観測した SNR を $\text{SNR}(C)$ 、補正を行わずに観測した SNR を

4.2 受聴者の移動に対応する制御点移動

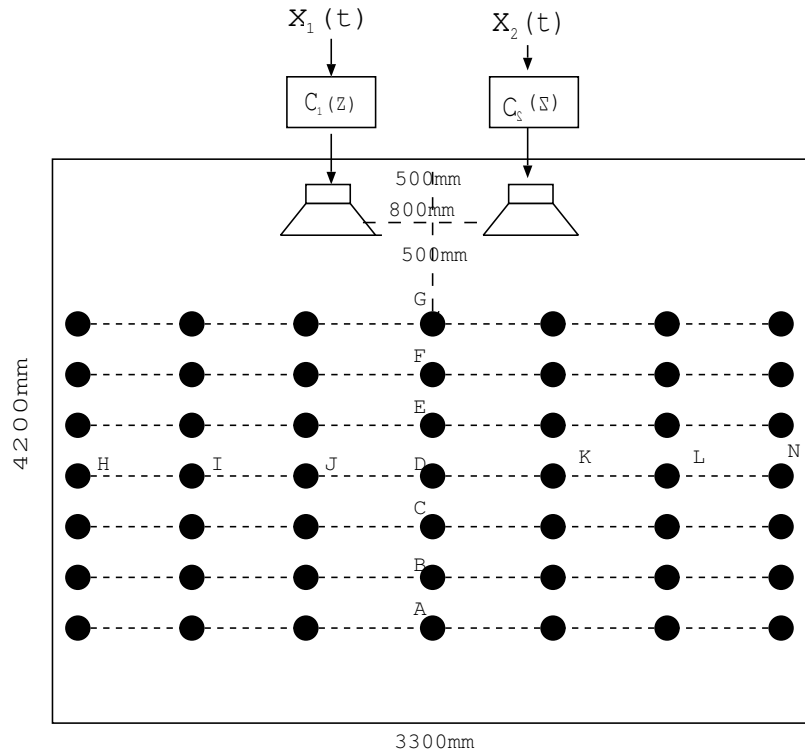


図 4.2 実験環境での伝達環境の測定モデル

SNR(NC) とする時，本論文では改善量を

$$\text{改善量} = SNR_C - SNR_{NC} \quad (4.2)$$

として求めて，評価値として用いる．ここで， $SNR_C = SNR_{NC}$ であれば

$$\begin{aligned} \text{改善量} &= SNR_C - SNR_{NC} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

となる．つまり，補正が行えていない場合の改善量は 0 を表す．本研究では改善量が 0 より多ければ補正が行えているとする．

4.2.3 従来手法に関するシミュレーション

受聴点と制御点が点 D にある場合から，受聴者が縦方向 (点 C~A) へ移動した場合と，横方向へ移動した場合 (点 K~N) に従来手法を用いて補正を行った場合の改善量について示

4.2 受聴者の移動に対応する制御点移動

す．フィルタの更新に用いるステップゲイン α の値を 0.02~0.07 の間で 0.1 ずつ変化させ，重み付けパラメータ w_i の値を 0.1~1.0 の間で 0.1 ずつ変化させながら，点 D から観測各点へ受聴者が移動した場合の制御点と観測点での SNR を算出し，良好な結果を用いて改善量を求めた．測定時間を 30 秒とし，測定開始 15 秒後に受聴者が各点 (A~C,K~N) へ移動した際に改善量に及ぼす影響について検証を行う．比較対象として，図 4.16 に無補正時の横方向の移動に関する改善量の変化の推移を，図 4.17 に無補正時の縦方向の移動に関する改善量の変化の推移を示す．図 4.18 に従来手法での横方向の移動に関する改善量の変化の推移を，図 4.19 に従来手法での縦方向の移動に関する改善量の変化の推移を示し，表 4.1 に従来手法における受聴者の移動による改善量の結果を示す．なお，本結果での重み付けパラメータは， $\alpha=0.05$ ， $w_1=0.4$ ， $w_2=0.6$ である．

表 4.1 従来手法での実験結果

観測地点	D	C	B	A	K	L	N
15 秒地点	1.67						
30 秒地点	1.53	1.57	1.59	0.87	1.52	0.98	-0.92

表で表すのは，15 秒地点での改善量と 30 秒地点での改善量である．表の D 地点での結果が受聴者が移動していない場合の結果であり，これと比較した時，受聴者が遠ざかる程改善量が低下していることが分かる．

これは，観測信号より適応フィルタの更新を行う場合，受聴者の移動によって受聴者の移動先の伝達関数とこれまで適応フィルタが近似してきた伝達特性との間に誤差が生じ，この誤差は受聴者の移動距離に応じて大きくなるためである．大きくなった誤差の影響を引きずったまま学習を続けることにより，最終的な改善量の低下が発生する可能性がある．以上のことから，従来提案されていた受聴者の移動に対応する方法では，移動距離に応じた改善量への影響があることが分かった．

4.3 提案手法

4.3 提案手法

提案手法のシステム図を図 4.3, 図 4.4 に示す.

受聴者の移動距離に応じて再現精度の低下が起こることに着目し, 受聴者の移動距離が小さい場合には適応フィルタ, 補正フィルタはそのまま学習を続け, 受聴者の移動距離が一定距離を越えていれば各フィルタの初期化を行うことにより, 受聴者の移動による影響について対応する.

受聴者の移動検知に関しては RFID 等のシステムを用い, フィルタの初期化を行うと判断する移動距離は補正環境下において事前学習を行うことで定める.

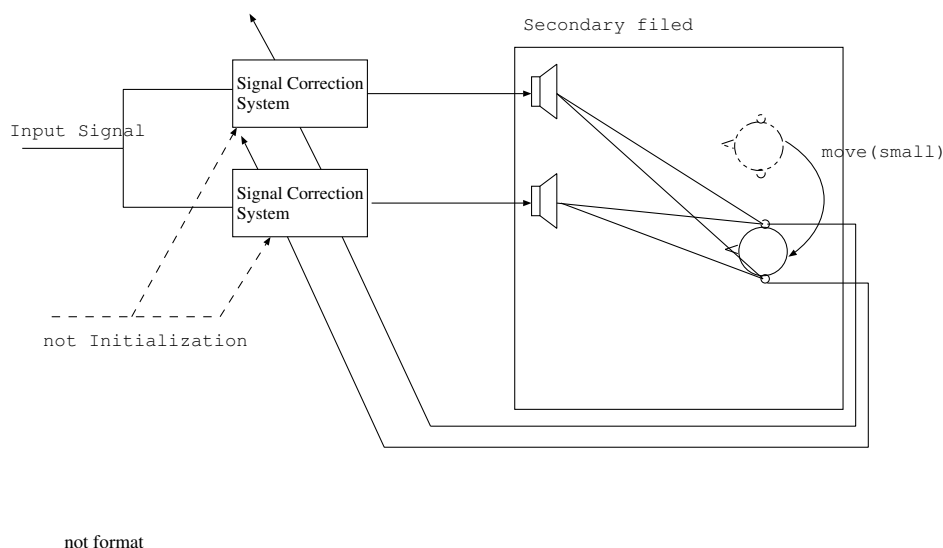


図 4.3 提案手法のシステム図 1

4.3.1 提案手法に関するシミュレーション

従来手法に関してシミュレーションを行ったものと同様の条件において提案手法における計算機シミュレーションを行った. 測定開始後 15 秒地点で受聴者の移動が起こると同時に各フィルタの初期化を行い, フィルタの初期化による改善量への影響について検証を行う. 図 4.20 に横方向の移動に関する改善量の変化の推移を, 図 4.21 に縦方向の移動に関する改善量の変化の推移を示し, 表 4.2 に提案手法における受聴者の移動による改善量の結果を示

4.3 提案手法

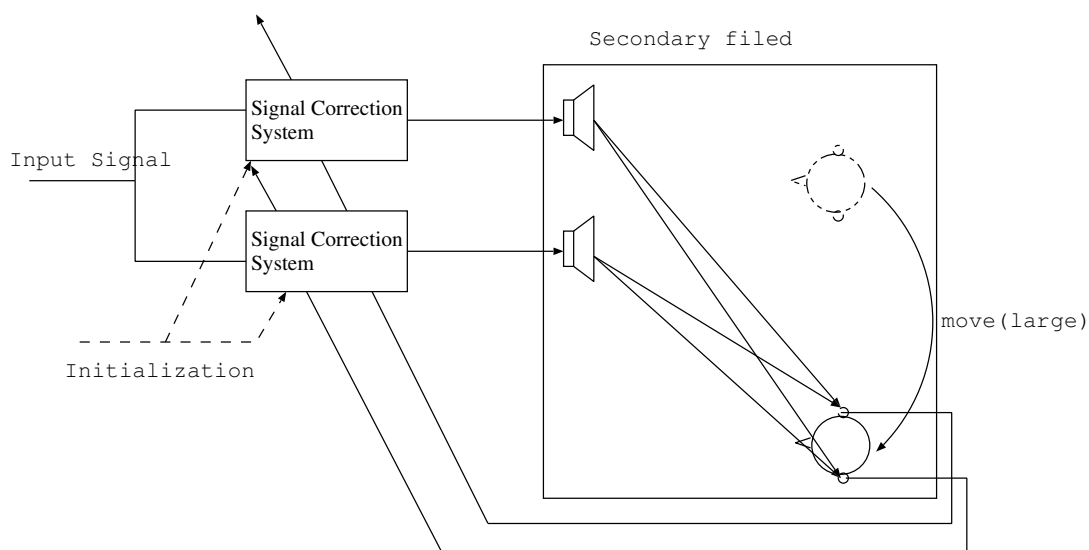


図 4.4 提案手法のシステム図 2

す。なお，本結果での重みづけパラメータは $\alpha=0.05$ ， $w_1=0.6$ ， $w_2=0.8$ である。

表 4.2 提案手法での実験結果

観測地点	D	C	B	A	K	L	N
15 秒地点	1.67						
30 秒地点	1.76	1.73	1.74	2.21	1.09	1.81	1.03
従来法との誤差	0.23	0.16	0.15	1.34	-0.43	0.83	1.95

これらの結果より，受聴者の移動距離が大きい場合，各フィルタの初期化を行うことにより最終的に改善量の向上が行えることが確認でき，提案手法の有効性が検証できた。

これらの結果を踏まえた上で受聴者が 1.5m 以上移動することを想定し，縦，横方向それぞれに対し，始点を点 G,H，終点を点 A,N として従来法と提案手法において系善量の変化について検証を行った。縦方向への移動の結果を表 4.3，横方向への移動の結果を表 4.4 に示す

これらの結果より，一定距離以上の移動に関して，提案手法により改善量の改善が行えていることが確認できた。しかし，各フィルタを初期化することにより，初期化直後に改善量が大きく低下するという問題が残った。

4.4 異なる環境での提案手法の有効性の検証

表 4.3 縦方向の移動に関する結果

観測地点	G	F	E	D	C	B	A
15 秒	1.84						
30 秒地点 (従来)	1.72	1.61	1.29	1.02	0.61	0.42	0.23
30 秒地点 (提案)	1.62	1.48	1.94	1.96	1.44	1.54	1.49
誤差	-0.10	-0.13	0.65	0.94	0.83	1.12	1.26

表 4.4 横方向への移動に関する結果

観測地点	H	I	J	D	K	L	N
15 秒地点	1.84						
30 秒地点 (従来)	1.45	1.41	2.27	0.46	0.19	0.27	-2.90
30 秒地点 (提案)	1.38	1.44	2.07	1.96	1.39	1.76	1.13
誤差	-0.07	0.03	-0.20	1.50	1.20	1.49	4.03

4.4 異なる環境での提案手法の有効性の検証

提案手法の有効性を検証するため、異なる環境下での提案手法と従来手法の有効性について検証を行う。A556 教室,A110 教室において 4.2.1 と同等の条件で室内伝達関数の測定を行い、従来手法と提案手法において 4.2.3、4.3.1 それぞれと同様の条件でシミュレーションを行い、改善量を比較する。なお、スピーカとマイクの位置関係に関しても、4.2.1 で行ったものと同じ状況で測定を行った。A556 教室でのシミュレーション結果を表 4.5 に示し、A110 教室でのシミュレーション結果を表 4.6 に示す。

これらの実験の結果から、提案手法の有効性について考察を行う。図 4.5 で示すのが、各環境での点 D から点 A までの縦方向の移動において提案手法と従来手法の差を取ったもので、図 4.6 で示すのが、各環境での点 D から点 N までの横方向の移動において提案手法と従来手法の差を取ったものである。また各環境での残響時間と提案手法の改善量が従来手法の改善量を上回る位置関係について、縦方向の関係を図 4.7 横方向への移動の関係を図 4.8 に

4.4 異なる環境での提案手法の有効性の検証

表 4.5 シミュレーション結果 (A556)

観測地点	D	C	B	A	K	L	N
15 秒地点	2.52						
30 秒地点 (従来)	2.54	2.31	2.28	1.92	2.80	1.88	1.02
30 秒地点 (提案)	2.45	2.03	2.43	2.56	2.69	2.21	1.93
誤差	-0.09	-0.18	0.25	0.64	-0.11	0.33	0.91

表 4.6 シミュレーション結果 (A110)

観測地点	D	C	B	A	K	L	N
15 秒地点	2.01						
30 秒地点 (従来)	2.21	1.78	2.06	1.31	1.92	1.14	0.16
30 秒地点 (提案)	2.16	1.93	2.54	2.01	1.93	1.82	1.91
誤差	-0.05	0.15	0.48	0.70	0.01	0.68	1.75

示す。

これらの結果から、異なる環境においても提案手法が有効である事が確認できた。また受聴者の移動による影響は、スピーカに対して垂直方向へ移動するよりも水平方向へ移動する方が影響が大きいことが分かった。これは多入力信号補正法がスピーカから受頂点までの4つの伝達経路が左右対象である場合に最も有効に働くと言う条件から、この条件に対する影響の大きい並行移動に対して改善量の低下が起こるものと考えられる。そのため、特に受聴者の横方向への移動に対して提案手法が有効であると言える。また残響時間と提案手法が有効となる位置関係のグラフより、基本的に残響時間が長い環境において提案手法が有効となる距離が短くなることが分かった。福本研究室の環境においてはこの通りではない結果が出たが、これは測定環境の構成上、測定位置がほぼ壁に密着するような位置であったため従来法における改善量の低下が大きく、その結果従来法と比較した改善量が大きくなったために、短い距離で提案手法の改善量が従来手法を上回ったものである。このように、従来法におい

4.5 受聴者の頭部回転に関する影響

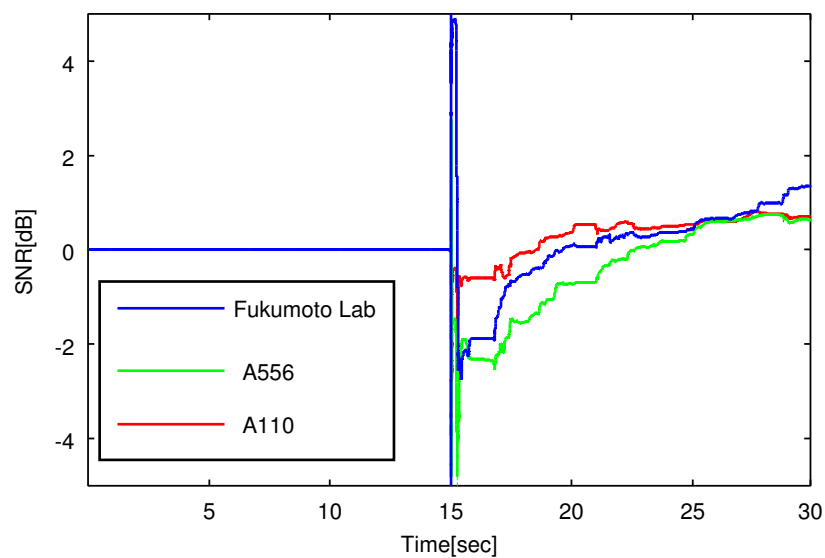


図 4.5 各環境における縦方向への移動の改善結果

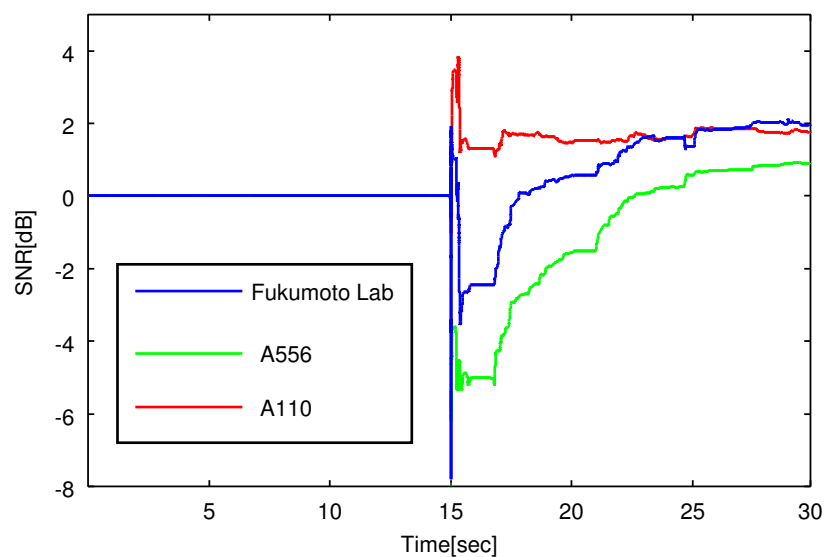


図 4.6 各環境における横方向への移動の改善結果

て改善量の低下が起りやすい環境においても提案手法が有効であることが確認できた。

4.5 受聴者の頭部回転に関する影響

受聴者の移動として、受聴者自身が移動する他に受聴者頭部の角度が変動する移動が挙げられる。この受聴者の頭部移動に関しても従来手法において測定を行った。測定の結果を図

4.5 受聴者の頭部回転に関する影響

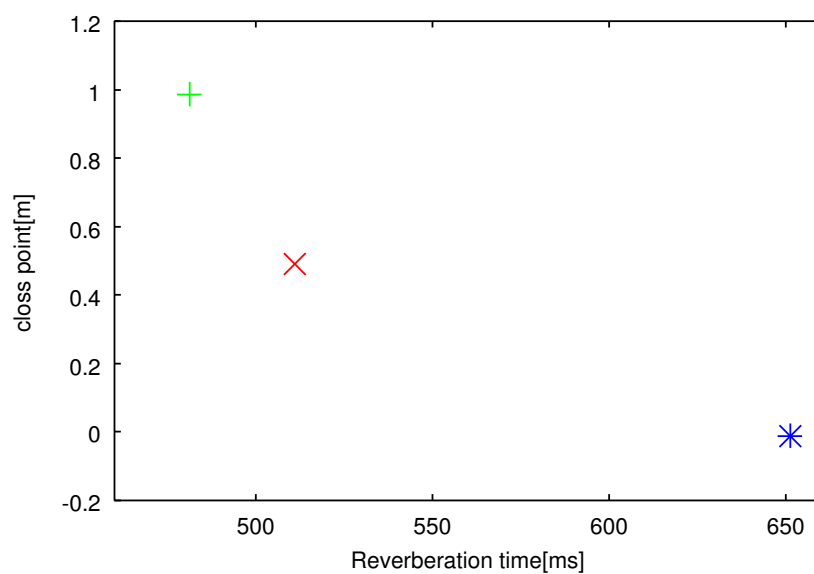


図 4.7 残響時間と縦方向移動に関する提案手法の有効性

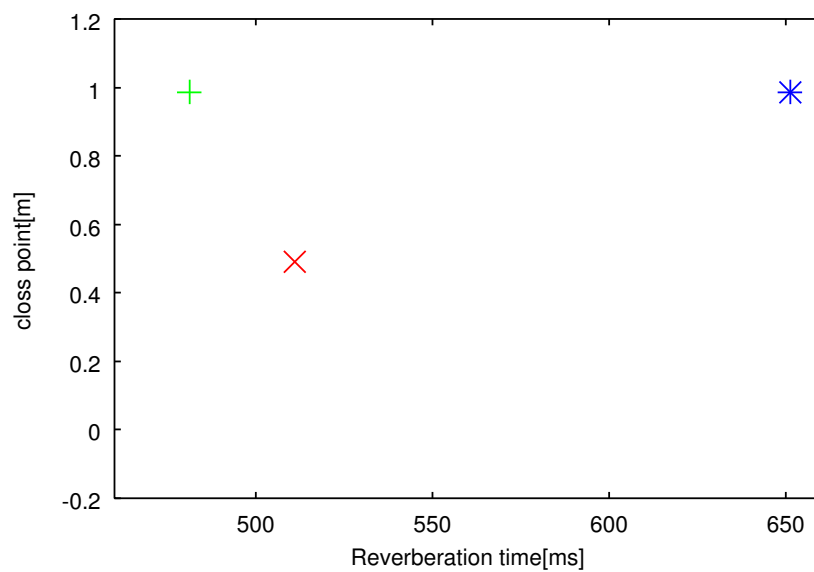


図 4.8 残響時間と横方向移動に関する提案手法の有効性

4.9 に示す。測定の結果、受聴者の頭部角度の変動に関する影響は受聴者自身の移動による影響に比べて小さいことが確認出来たため、本研究の提案手法においては受聴者の頭部の回転に関する影響について考慮しないものとした。

4.6 まとめ

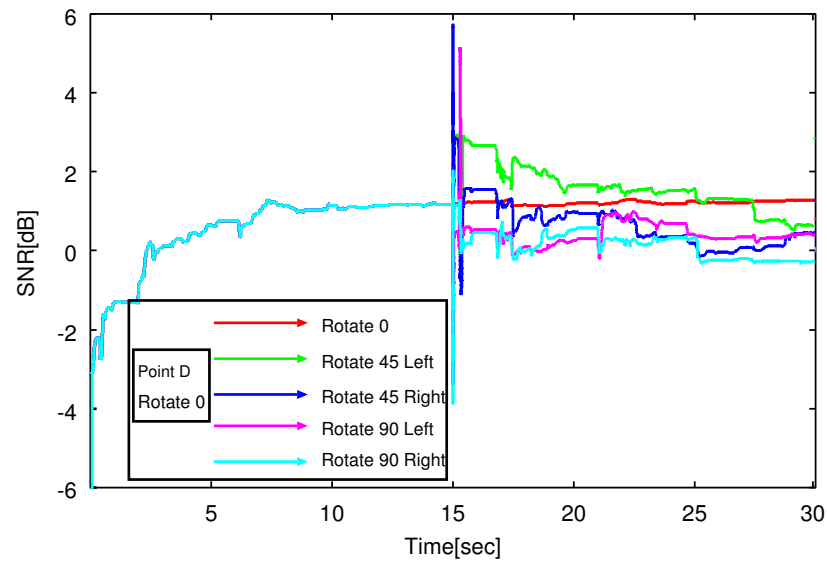


図 4.9 受聴者の頭部回転による影響

4.6 まとめ

本章では、まず従来提案されていた受聴者の移動に対応するシステムについて解説を行い、計算機シミュレーションを行ってその改善精度について検証を行った。しかし従来手法では受聴者の移動距離が大きい場合、伝達特性の誤差から改善量の低下が起こるという問題があることがわかった。これに対し、移動距離が大きい場合に対して適応フィルタ、補正フィルタの初期化を行うことにより、受聴者の移動による影響を除去する手法を提案し、従来手法と同様の条件でシミュレーションを行うことにより、提案手法の有効性について検証を行った。シミュレーションの結果、受聴者の移動距離が大きい場合には総じて最終的な改善量の向上が行えることが確認できた。特に従来法において改善量が大きく低下する可能性が高い横方向の移動、また残響時間の大きい環境に対して改善効果が大きい事が分かった。しかし各フィルタを初期化することにより、初期化直後に改善量が大きく低下する問題が残った。

4.6 まとめ

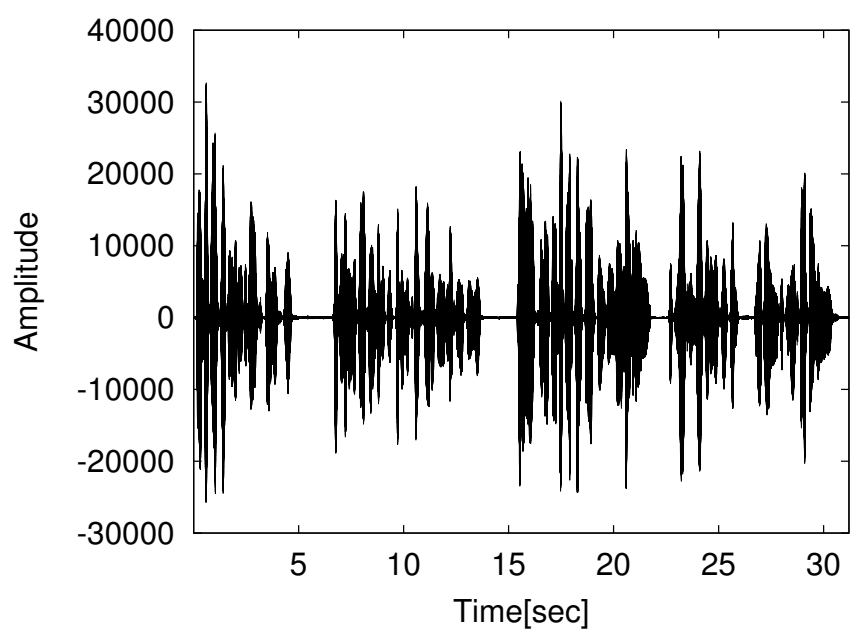


図 4.10 左側原信号

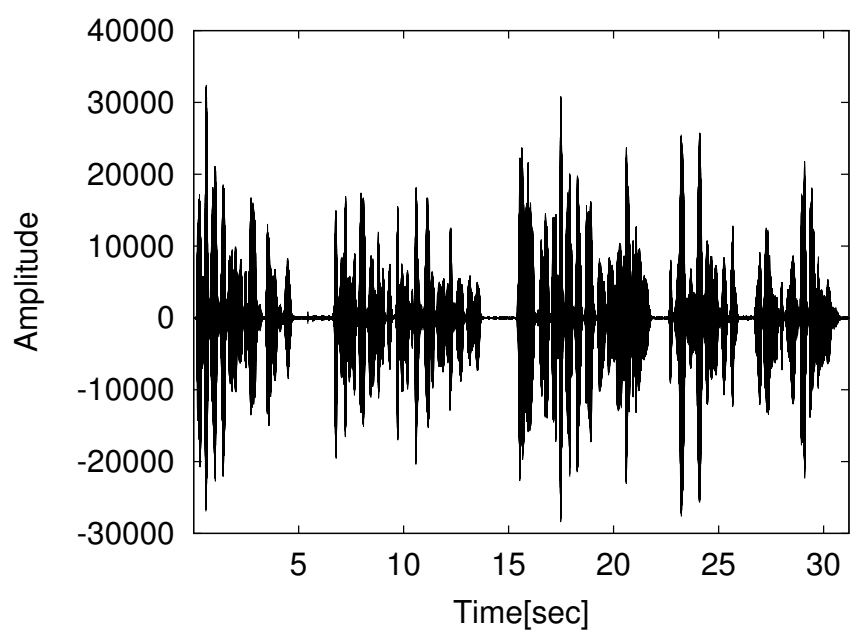


図 4.11 右側原信号

4.6 まとめ

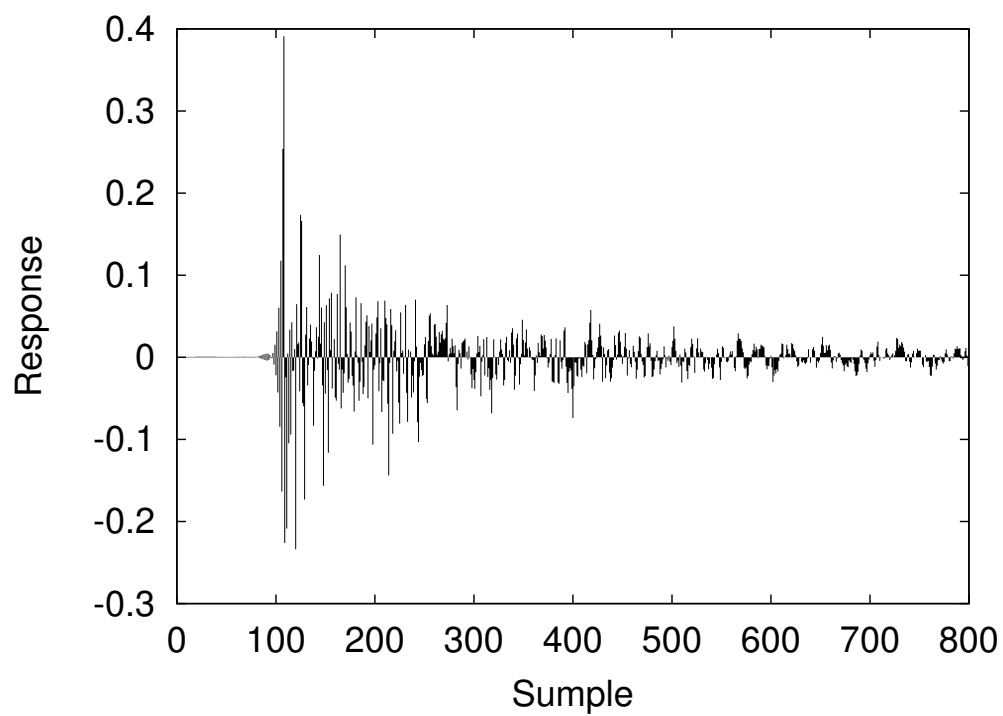


図 4.12 受聴点 D でのインパルス応答 g_{11}

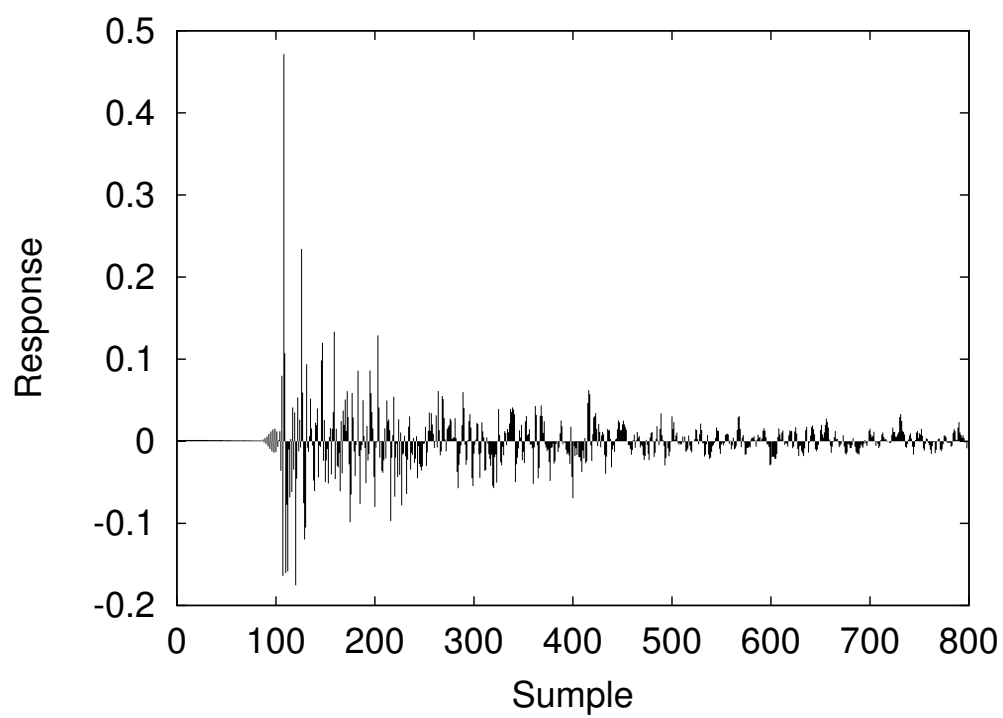


図 4.13 受聴点 D でのインパルス応答 g_{12}

4.6 まとめ

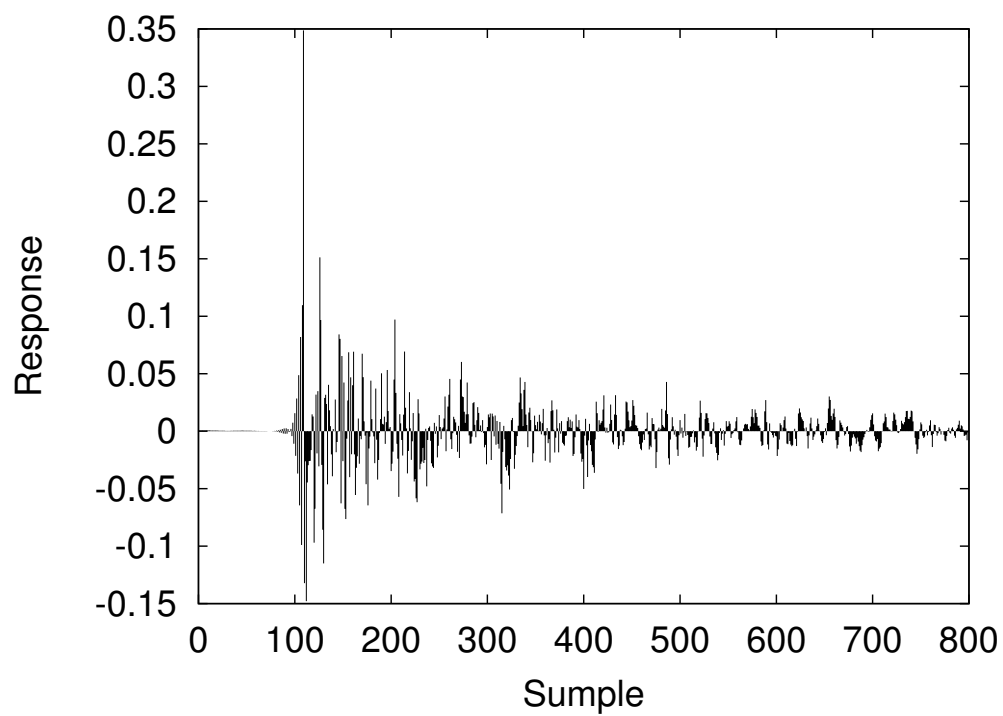


図 4.14 受聴点 D でのインパルス応答 g_{21}

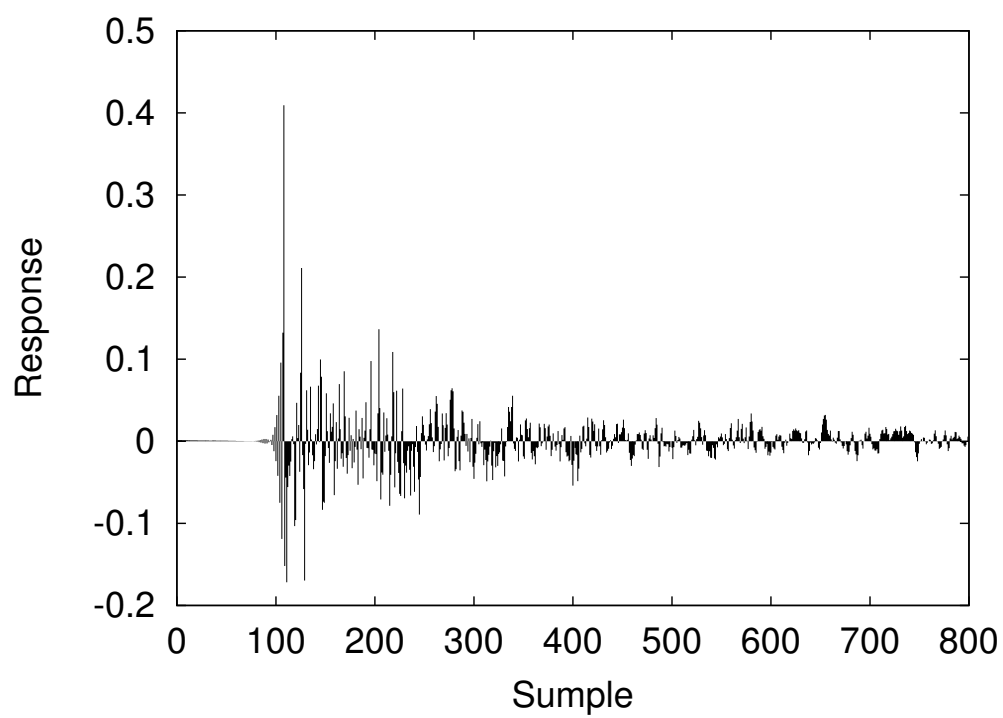


図 4.15 受聴点 D でのインパルス応答 g_{22}

4.6 まとめ

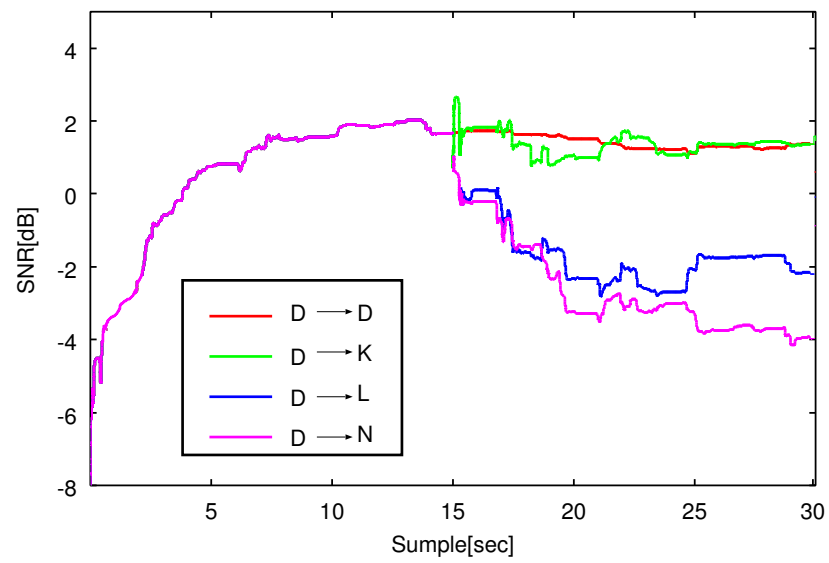


図 4.16 無補正状態での横方向の移動への影響

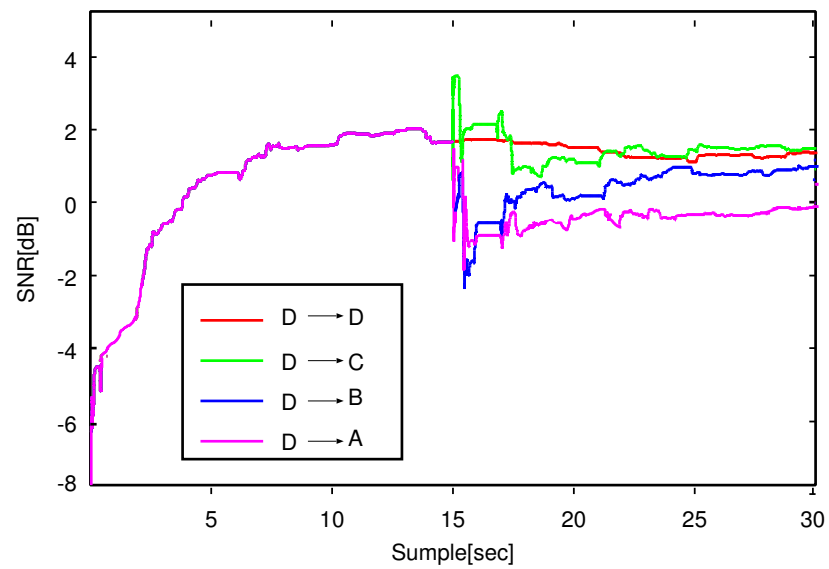


図 4.17 無補正状態での縦方向の移動への影響

4.6 まとめ

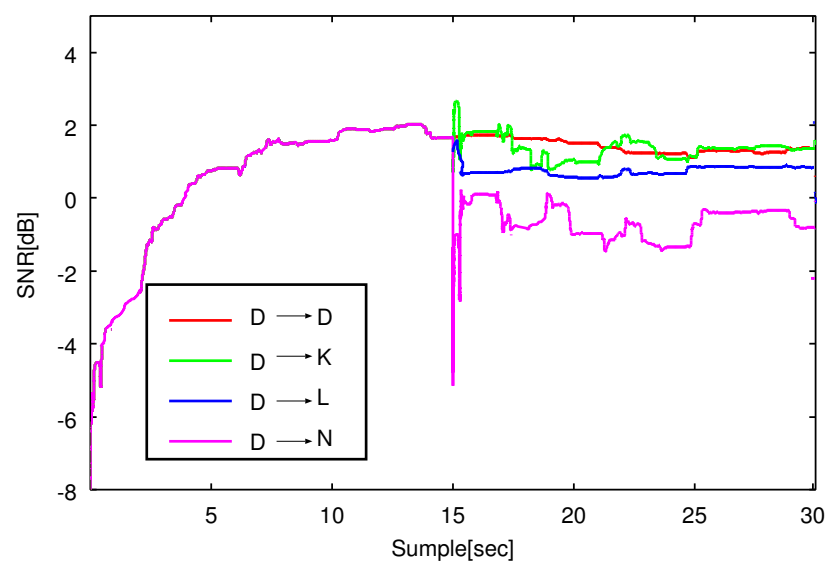


図 4.18 従来手法での横方向の移動への影響

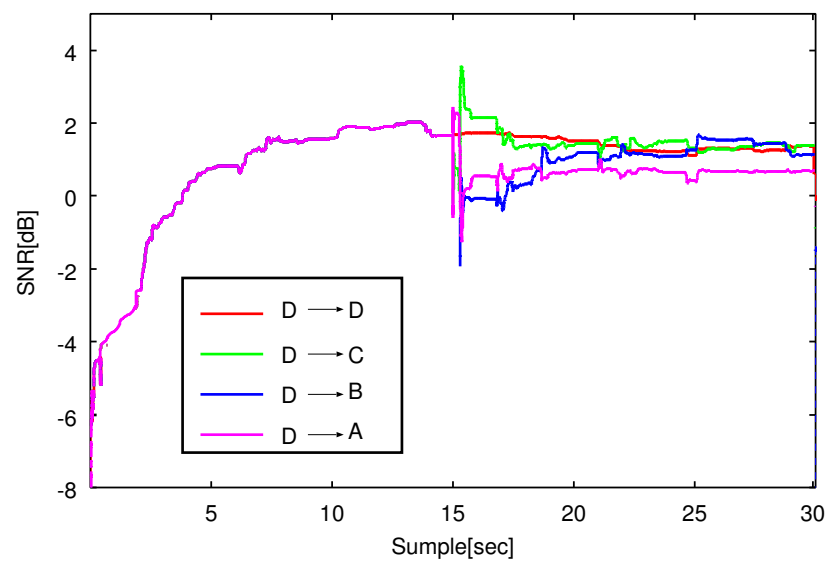


図 4.19 従来手法での縦方向の移動への影響

4.6 まとめ

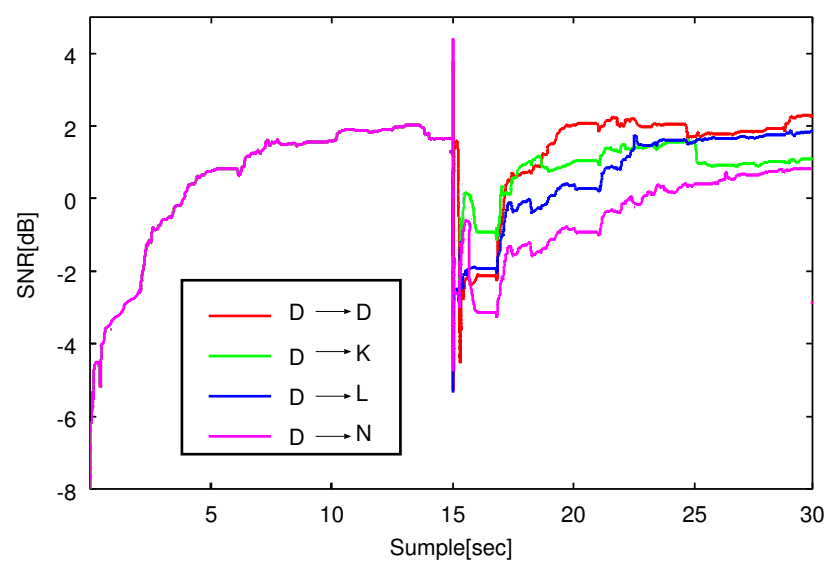


図 4.20 提案手法での横方向の移動への影響

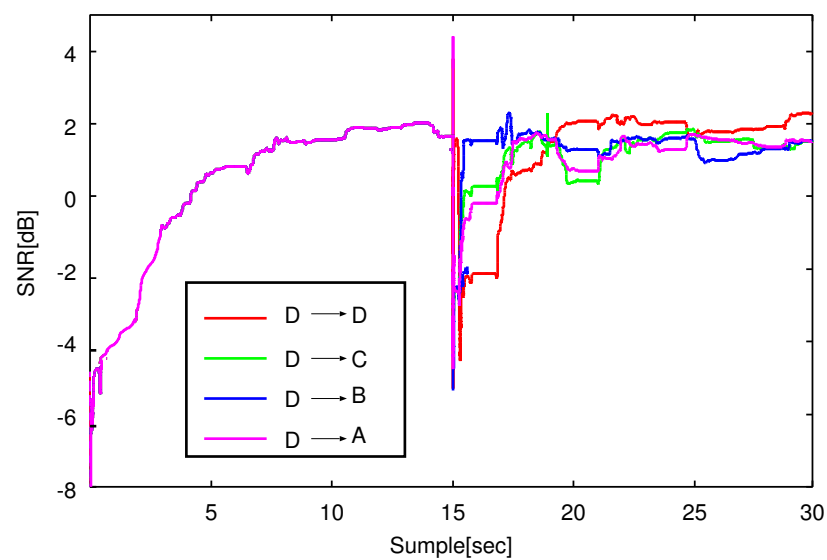


図 4.21 提案手法での縦方向の移動への影響

第5章

結論

5.1 本研究のまとめ

2つのスピーカを用いて音場再生を行う多入力信号補正法が提案されているが、この手法は受聴者の移動による影響を考慮していない。そこで本論文では、受聴者の移動距離に応じてフィルタの制御を行うことにより、受聴者の移動に対応する音場再生システムの提案を行った。また、従来考案されていた受聴者の移動に対応する音場再生手法と提案手法に対し計算機シミュレーションを行い、性能の比較を行った。シミュレーションの結果、本研究で提案した音場再生手法は、改善量に関してフィルタの初期化が有効に働く距離について事前検証が行えていれば、有効な手法であると言えることが分かった。

5.2 今後の課題

今後の課題としては、再現環境とフィルタの初期化を行う距離との間にある関係性について検証を行い、各部屋の特徴からおおまかな切替え位置の特定が行えるように検証を行う必要がある。また今回、フィルタの初期化直後での改善量の低下に関して対策を行わなかったため、この問題に対し対処を行う手法について考慮する必要がある。本研究で提案したシステムでは、プロセッサの性能限界から実用化されていないリアルタイム処理に関する手法を一部に用いているため、今後、高速なプロセッサの開発が望まれる。

謝辞

本研究を行うにあたり，最後まで見捨てずに御指導して頂いた福本昌弘助教授に心から感謝致します。

また，本研究の審査をして頂いた島村和典教授，坂本明雄教授にも感謝致します。

御自身が多忙にも係わらず，御指導して頂いた佐伯幸郎様，福富英次様，劉立剛様にも心からお礼申し上げます。

特に佐伯様には技術的な面だけでなく，プレゼンの練習や梗概の書き方などあらゆる面に関して面倒を見て頂き，本当に感謝しております。

供に卒業研究に取り組んできた福本研究室の一同にも感謝致します。

特に隣の席の吉本改め澤田君には，実験を行う上での様々な助力と適度なスリルを提供して頂き大変感謝しています。

最期に，私の大学生活に関わって頂いた全ての方々に感謝致します。

参考文献

- [1] 大賀寿郎 山崎芳男 金田豊, 音響システムとデジタル処理, 電子情報通信学会, 1995
- [2] 下上泰治, 福本昌弘, "多入力信号システムにおける制御点近傍での音場再生", 平成 17 年度 高知工科大学 学士学位論文, 2006
- [3] P.A.Nelson, H.Hamada and S.J.Elliott, "Inverse Filters for Multi-Channel Sound Reproduction," IECE Trans. Fundamentals, Vol, E75-A, no.11, pp, 1468-1473, Nov, 1992
- [4] J.Nagumo and A.Noda, "A Learning Method for System Identification," IEEE Trans. AC, Vol, 12, no.3, pp282-287, 1967
- [5] 山崎芳男 金田豊, 音・音場のデジタル処理, コロナ社, 1999
- [6] 金井浩, 音・振動のスペクトル解析, コロナ社
- [7] 北脇信彦, デジタル通信・オーディオ技術, 電器通信協会, 1999
- [8] 辻井重男, 久保田一, 古川利博, 趙晋輝, 適応信号処理, 昭晃堂, 1995
- [9] 浜崎信二, 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", 信学技報, SIP2004-115, vol.104, no.559, pp.31-36, Jan.2005.

付録 A

適応アルゴリズム

適応アルゴリズムとは、各時刻で観測される入力信号 $x(t)$ と出力誤差 $e(t)$ を用いて、パラメータを修正することにより最適解を求める計算手順のことである。1960 年に Widrow-Hoff の LMS アルゴリズムから始まり、1967 年には野田と南雲により学習同定法が発表され、これ以外にも RLS アルゴリズム、BLMS アルゴリズムなど様々な手法が考案されている。

入力信号 $x(t)$ に対する未知系出力 $y(t)$ は

$$y(t) = \sum_{i=0}^{N-1} h(i)x_{t-i+1} \quad (\text{A.1})$$

で与えられる。この式で求められる $y(t)$ は入力状態ベクトル $x_N(t)$ および係数ベクトル h_N の内積として

$$y(t) = h_N^T x_N(t) \quad (\text{A.2})$$

と表すことができる。ただし、 h_N, x_N はそれぞれ

$$h_N = [h(0), h(1), h(2), \dots, h(N-1)]^T \quad (\text{A.3})$$

$$x_N = [x(0), x(1), x(2), \dots, x(N-1)]^T \quad (\text{A.4})$$

とする。ここで、出力誤差 $e(t)$ の 2 乗平均値を評価量 J として

$$\begin{aligned} J &= E[e^2(t)] \\ &= E[(d(t) - y(t))^2] \\ &= E[(d(t) - h_N^T x_N(t))] \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

とする。ただし、 $E[\cdot]$ は期待値である。