

平成 15 年度

学士学位論文

# 多入力信号補正によるステレオ型音場再生 システム

1040265 氏原亮太

指導教員 福本昌弘

2004 年 2 月 27 日

高知工科大学 情報システム工学科

## 要 旨

### 多入力信号補正によるステレオ型音場再生システム

氏原亮太

スピーカを用いた音場再生システムのトランスオーラルシステムは、受音される時に不必要な空間の伝達特性の影響を受けるために、それを除去するようなフィルタ設置が必要である。よって1つのスピーカは1つの補正フィルタに対する処理しか行うことができないため伝達経路の数だけ補正フィルタが必要となってくる。

秋山らは、受聴者の移動に伴う伝達特性の変動が生じない場合に、1つの補正フィルタで2本の伝達経路を制御する多入力信号補正法を考案した。これによりスピーカの数に任意に増やすことができるようになった。

本研究では、多入力信号補正によるステレオ型音場再生システムの提案する。またステレオ型音場再生システムに予測フィルタと補正フィルタを導入しクロストーク問題を検証する。さらに、計算機シミュレーションによりシステムの有効性を示す。

キーワード トランスオーラルシステム, クロストーク, 多入力信号補正法, 予測フィルタ

# Abstract

RyotaUjihara

The toransaural system in a sound reproduction system needs establishment one channel out of one correct filter. Because one channel is influenced of the unnecessary room transfer characteristic, when receiving sound.

Akiyama and others devised the system which controls two channel by one correct filter. It is called the Multi-Incoming Signal Rectifying Method (MISRM). But it is when change of the transfer characteristic accompanying movement of listener does not arise.

In this research, a stereo type sound reproduction system is proposed using the MISRM. Moreover, crosstalk problem is verified using a prediction filter and correct filter. Furthermore, a computer simulation is performed and show the validity of the stereo type sound reproduction system using MISRM.

**key words** Toransaural System, Crosstalk, Multi-Incoming Signal Rectifying Method(MISRM), Prediction Filter

# 目次

第 1 章	緒論	1
1.1	本研究の背景と目的 . . . . .	1
1.2	本論文の概要 . . . . .	2
第 2 章	ディジタル信号処理	3
2.1	まえがき . . . . .	3
2.2	FIR ディジタルフィルタ . . . . .	4
2.3	適応フィルタ . . . . .	5
2.4	適応アルゴリズム . . . . .	7
2.4.1	学習同定法 . . . . .	10
2.5	まとめ . . . . .	11
第 3 章	音場再生システム	13
3.1	まえがき . . . . .	13
3.2	バイノーラルシステム . . . . .	13
3.3	トランスオーラルシステム . . . . .	14
3.3.1	問題点 . . . . .	16
3.4	まとめ . . . . .	17
第 4 章	多入力信号補正システムにおけるフィルタ構成法	18
4.1	まえがき . . . . .	18
4.2	多入力信号補正システム . . . . .	19
4.2.1	適切な補正フィルタ . . . . .	20
4.2.2	室内伝達特性の逆特性 . . . . .	21
4.2.3	補正フィルタパラメータ更新 . . . . .	21

## 目次

4.3	まとめ . . . . .	23
第 5 章	多入力信号補正法によるステレオ型音場再生システム	24
5.1	まえがき . . . . .	24
5.2	多入力信号補正によるステレオ型音場再生システム . . . . .	25
5.2.1	提案手法 . . . . .	25
5.2.2	室内伝達特性の逆特性 . . . . .	26
5.2.3	補正フィルタパラメータ更新 . . . . .	27
5.3	計算機シミュレーション . . . . .	28
5.3.1	シミュレーション条件 . . . . .	28
5.3.2	シミュレーション結果 . . . . .	29
5.4	まとめ . . . . .	29
第 6 章	結論	32
6.1	本研究における評価 . . . . .	32
6.2	今後の課題 . . . . .	32
	謝辞	33
	参考文献	34

# 図目次

2.1	FIR デジタルフィルタ . . . . .	4
2.2	入力誤差を調べるシステムブロック図 . . . . .	6
3.1	バイノーラルシステムの構成 . . . . .	14
3.2	室内伝達特性の補正 . . . . .	15
3.3	トランスオーラルシステムの構成 . . . . .	15
4.1	多入力信号補正システム . . . . .	19
4.2	多入力信号による音場再生システム . . . . .	20
5.1	多入力信号補正によるステレオ型音場再生システム . . . . .	25
5.2	提案手法を用いた多入力信号補正システムによるステレオ型音場再生システム	26
5.3	室内伝達特性の逆特性算出のためのブロック図 . . . . .	27
5.4	右耳に与えられた音声 . . . . .	30
5.5	左耳に与えられた音声 . . . . .	30
5.6	提案手法のシステムと無制御のシステムの評価量 . . . . .	31

# 表目次

2.1 図 2.2 における変数の説明 . . . . .	6
2.2 代表的な適応アルゴリズムの特徴比較 . . . . .	7

# 第 1 章

## 緒論

### 1.1 本研究の背景と目的

近年，デジタル技術の著しい発展によって，音声，映像，文字，などのデータをインターネットを通じて世界中に伝送することが容易に出来るようになり，マルチメディア時代を迎えてきた．

そうした背景の中，バーチャルリアリティへの要求が高まってきている．例えば，デジタル信号処理分野では，もとの空間での音場（原音場）を，音場の再現を要求する空間（再現空間）で実現することのできる音場再生システムの構築が求められている．

スピーカを用いて音場再生が行われた場合，1 つのスピーカから発せられた音は，左右耳に対して 2 つの異なる経路で伝達されるため，通常 2 つの補正フィルタを必要とする．しかし，1 つのスピーカは 1 つの補正フィルタに対する処理しか行うことができない．したがって，複数経路に対する処理を単一の制御系で行う必要が生じる．

秋山らによって受聴者の移動を考慮しない場合に，1 つのフィルタにより 2 つの伝達経路を制御する多入力信号補正法が提案され，その有効性が示された．

本研究では，その多入力信号補正法を用いたステレオ型音場再生システムを提案する．しかし，このシステムを実現するにあたり，いくつかの問題がある．今回，その問題に対し提案手法を用いる．次に計算機シミュレーションを行い，多入力信号補正法を用いたステレオ型音場再生システムについて検討する．



## 1.2 本論文の概要

ここで、本論文の概要について述べる．

第 2 章では、本研究のために用いるデジタル信号処理の基礎技術である、FIR デジタルフィルタ、適応信号処理の適応フィルタ、適応アルゴリズムについて述べる．適応アルゴリズムの LSM アルゴリズムと学習同定法についての説明をおこなう．

第 3 章では、音場再生システムの一般的に知られている、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る．またこれらのシステムにおける問題点を指摘していく．

第 4 章では、スピーカを用いた複数経路にたいする処理を単一の制御で行う多入力信号補正システムについて述べる．

第 5 章では、第 4 章で用いた多入力信号補正システムを用いてステレオ型音場再生システムを提案、問題定義、解決策計算機シミュレーションにより検証する．

最後に、6 章では、本研究での計算機シミュレーション結果を評価、問題点を指摘し今後の課題を吟味する．

## 第 2 章

# ディジタル信号処理

### 2.1 まえがき

ディジタル信号処理技術は近年急速に進歩し，現在では通信や音声，画像などの幅広い分野が広く用いられ，今日の高度情報化社会では必須の技術となっている．音楽，音声などの音響信号はアナログ信号である．これらをディジタル処理するには，まずアナログ信号を離散的な値をもつディジタル信号に変換することで，コンピュータ上でディジタル処理を行うことができる．

ディジタル信号処理において，中心的な役割を果たす倫理の 1 つにディジタルフィルタがある．ディジタルフィルタとはその特性によって出力を変化させるものであり，数値計算によって実現させる．処理の対象となる観測信号は，入力されてから観測されるまでの間のシステムに関する何らかの情報を保持している．

フィルタとは，入力にある処理を行い変形することによって，必要とする出力を得るものである．ディジタルフィルタは，有限長の応答をもつ FIR(Finite Impulse Response) フィルタと，無限長の応答をもつ IIR(Infinite Impulse Response) フィルタに分類される．

本研究で用いるフィルタが有限長であることから，FIR ディジタルフィルタについて述べる．また，FIR ディジタルフィルタを用いて未知のパラメータを推定する機能をもつ適応フィルタについて説明を行う

## 2.2 FIR デジタルフィルタ

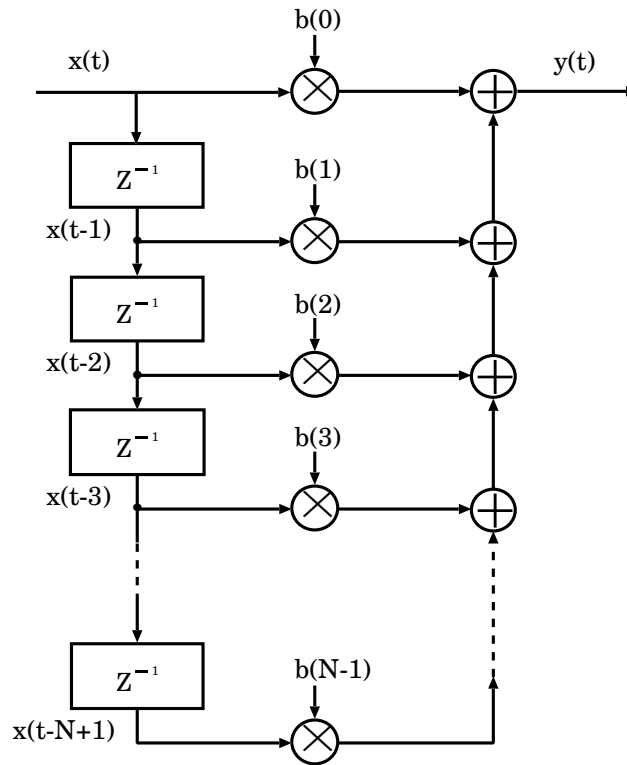


図 2.1 FIR デジタルフィルタ

## 2.2 FIR デジタルフィルタ

FIR(Finite Impulse Response) フィルタとは，インパルスを入力した時の出力信号が有限時間で 0 に収束するフィルタのことである．図 2.1 は，単位遅延素子  $Z^{-1}$  を多数用いて標本化周期ごとに入力された  $N$  個の信号を加算して，出力する構成のフィルタである．入力信号  $x(t)$  は単位遅延を受けるごとに乗算器をもつ各タップに出力され，パラメータ (フィルタ係数)  $b_n$  が乗算される．その後それらが加算された結果  $y(t)$  が出力される [1]．

このフィルタの入出力関係は，

$$y(t) = \sum_{i=0}^{N-1} b(i)x(t-i) \quad (2.1)$$

与えられる．このように，インパルス応答 (impulse response) の長さ  $N$  が必ず有限長となるようなデジタルフィルタのことを FIR(Finite Impulse Response) デジタルフィルタと呼ぶ．

## 2.3 適応フィルタ

式 2.1 から，出力信号  $y$  はパラメータ  $b_n$  に依存することがわかる．このことは，同一の入力信号を与えた場合でもパラメータが異なれば得られる結果も異なることを表している．ただし，パラメータ  $w_n$  は，

$$b_N = b_0, b_1, \dots, b_{n-1} \quad (2.2)$$

で表される．

FIR フィルタはデジタルフィルタらしいフィルタで，原理的に不安定になることがないなどの長所があり，デジタル信号処理システムに広く用いられる．

## 2.3 適応フィルタ

適応フィルタ (Adaptive Filter) は，その出力を，目標とする信号に近づけていく機能をもったフィルタである．適応フィルタの応用範囲は，近年ますます広範囲となっている．その代表的な例として，適応エコーキャンセラ，適応ノイズキャンセラ，適応自動等化器などが挙げられる．

一般的に適応フィルタは FIR フィルタによって構成される．

次に適応アルゴリズムを示すために FIR フィルタで構成された適応フィルタと未知システムのパラメータ (インパルス応答) をつかって誤差を算出するシステムを考える．図 2.2 は入力誤差を調べるシステムブロック図である．また，図 2.2 における変数についての説明は表 2.1 に示す．

図 2.2 の適応フィルタのとき，未知系出力信号  $d(t)$  と推定系の出力信号  $y(t)$  は

$$d(t) = \sum_{i=0}^{N-1} w(i)x(t-i) \quad (2.3)$$

$$y(t) = \sum_{i=0}^{N-1} h(i)x(t-i) \quad (2.4)$$

と表すことができる．また，入力誤差  $e(t)$  は

$$e(t) = x(t) - y(t) \quad (2.5)$$

## 2.3 適応フィルタ

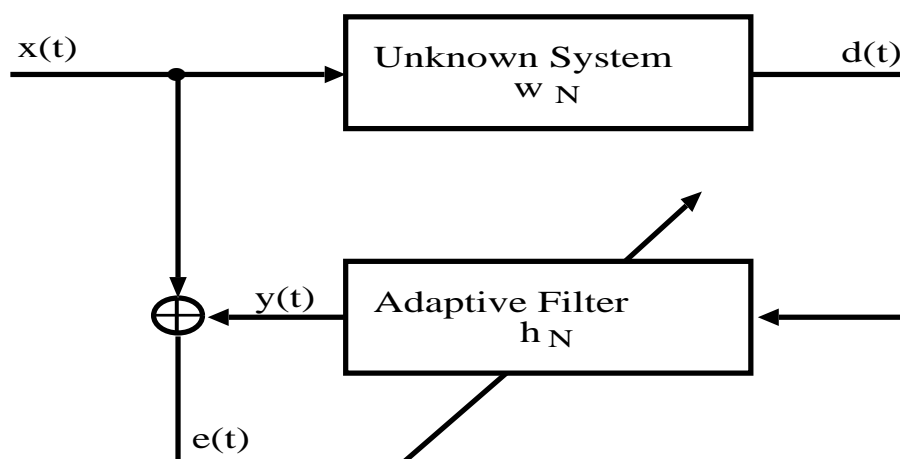


図 2.2 入力誤差を調べるシステムブロック図

表 2.1 図 2.2 における変数の説明

$t$	時刻
$N$	インパルス応答長 (フィルタタップ)
$x(t)$	入力信号
$w_N$	未知システムのフィルタ係数 ( $w_N = [w(0), w(1), \dots, w(N)]^T$ )
$h_N$	適応フィルタのフィルタ係数 ( $h_N = [h(0), h(1), \dots, h(N)]^T$ )
$d(t)$	未知系の出力信号
$y(t)$	推定系の出力信号
$e(t)$	入力誤差

と表される .

式 2.3,2.4 において

$$w(i) = h(i); i = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (2.6)$$

であれば , 常に同じ出力を得ることができる . したがって , 未知システムのインパルス応答長が有限で , その個数が既知であるならば , 同一の入力信号に対して完全に等しい出力結果を与える FIR デジタルフィルタを構成することが可能である .

しかし , 一般に , 未知システムのインパルス応答長は無限に続く , この場合 , 式 2.6 のよ

## 2.4 適応アルゴリズム

うな仮定が成り立たないために，同一の入力信号に対して完全に等しい出力結果が得られるような FIR デジタルフィルタを構成することはできない．

そこで，室内音響系をはじめとする実際のシステムの多くのインパルス応答が，時間と共に減衰して行くという性質を利用する．

すると，未知系システムのインパルス応答のうち最初の適当な  $N$  個の値を推定することによって，推定系出力信号を未知系出力信号に近づけることが可能である．

このようにして，推定系システムのパラメータ  $h_N$  を逐次的に推定する学習機能をもったフィルタのことを，適応フィルタという [1, 3] ．

また誤差  $e(t)$  が最小となるように，自分自身の特性を調節する，この特性の調節方法を適応アルゴリズムと呼ぶ．

## 2.4 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  $x(t)$  と誤差  $e(t)$  に基づいて，係数  $h(t)$  を修正することによって最適係数を求める方法のことである．

適応アルゴリズムには，Widrow-Hoff の LMS アルゴリズムに始まり，学習同定法．その他にも RLS アルゴリズム，BLMS アルゴリズムなどが挙げられる．表 2.2 に各アルゴリズムの特徴を示す．

表 2.2 代表的な適応アルゴリズムの特徴比較

適応アルゴリズム	特徴	演算量
LMS アルゴリズム	・ 安定性がある ・ 有色信号での収束特性の劣化	$2N$
学習同定法	・ 高速な収束特性 ・ 有色信号で収束特性が劣化	$3N$
RLS アルゴリズム	・ パラメータが時不変ならば良好に収束 ・ パラメータが変化すると不安定	$2N^2$

## 2.4 適応アルゴリズム

代表的な適応アルゴリズムの特徴と，フィルタタップ数が  $N$  の場合の演算量を比較すると

図 2.2 において，出力信号  $d(t)$  に対する未知系出力の逆特性  $y(t)$  は，式 2.7 のように与えられる．

$$y(t) = \sum_{i=0}^{N-1} h(i)d(t-i) \quad (2.7)$$

式 (2.7) で表される未知系出力の逆特性  $y(t)$  は，出力状態ベクトル  $d_N(t)$  および係数ベクトル  $h_N$  の内積として

$$y(t) = h_N^T d_N(t) \quad (2.8)$$

と表すことができる．ただし， $h_N$ ， $d_N$  はそれぞれ

$$h_N = [h(0), h(1), h(2), \dots, h(N-1)]^T \quad (2.9)$$

$$d_N = [d(1), d(2), d(3), \dots, d(N-1)]^T \quad (2.10)$$

で定義される．

ここで，誤差の 2 乗平均値を評価量  $J$  として

$$\begin{aligned} J &= E[e^2(t)] \\ &= E[(x(t) - y(t))^2] \\ &= E[(x(t) - h_N^T d_N(t))^2] \end{aligned} \quad (2.11)$$

とする．ただし， $E[\cdot]$  は期待値を表す．

入力信号  $x(t)$  と推定系出力  $y(t)$  との差の 2 乗平均値が最小となるように，適応フィルタのパラメータを更新する．

次に，適応アルゴリズムの基本的なパラメータ更新方法についての手順を示す．

1. 時刻  $t = 0$  として，パラメータの初期値  $h_N$  を設定する (通常  $h_N = 0$ ).
2. 時刻  $t$  における出力  $y(t)$  と誤差  $e(t)$  を次式により計算する．

$$y(t) = h_N^T d_N(t) \quad (2.12)$$

$$e(t) = x(t) - y(t) \quad (2.13)$$

## 2.4 適応アルゴリズム

3.  $d_N(t)$ ,  $e(t)$  を用いて各種アルゴリズムで修正量  $\Delta h_N(t)$  を計算し，次式によりパラメータ  $h_N$  を修正して  $\Delta h_N(t+1)$  を得る．

$$h_N(t+1) = h_N(t) + \alpha \cdot \Delta h_N(t) \quad (2.14)$$

4.  $t$  の値を 1 つ増やして上記 2., 3. を繰り返す．

ただし，過程 3. のステップゲインとは，パラメータの修正量の大きさを制御し，収束速度を決定するものである．例えば， $\alpha = 0$  のとき式 2.14 は

$$h_N(t+1) = h_N(t) \quad (2.15)$$

となり，まったくパラメータの更新が行われない．

逆に  $\alpha = 1$  のとき式 2.14 は

$$h_N(t+1) = h_N(t) + \Delta h_N(t) \quad (2.16)$$

となり，算出された修正量分だけパラメータの更新を行う．

すなわち， $\alpha = 1$  の時が最適であると言える．しかし，これはシステムが最良状態の時のみ有効で，雑音などの問題が生じることを考慮すると，必ずしも最適であるとは言えない．したがって，システムの状態にとって最適なステップゲインを選択する必要がある．

これらの手順のうち，過程 3. の具体的な修正量  $\Delta h_N$  の算出方法が，各種アルゴリズムを特徴づける部分となる．

本研究では，時間的に変化するパラメータを扱う．したがって，パラメータが時間変化した場合も良好な収束特性を示すアルゴリズムが必要となる．実時間処理を要するために演算量もできるだけ少なく，高速な収束特性を有するものが好ましい．

これについては，秋山らは LMS アルゴリズムと学習同定法のどちらが有効であるか調べている．その結果，多入力信号補正システム構築には学習同定法を用いた場合がよい収束特性を得られることがわかった．



## 2.4 適応アルゴリズム

### 2.4.1 学習同定法

学習同定法は、1967 年に野田と南雲により発表された。LMS アルゴリズムとは独立に導かれた適応アルゴリズムであるため演算量は LMS アルゴリズムより多少増加するが、高速な収束特性を有しており、入力信号の大きさによって、収束特性が変化するという問題点がなく、実用的にも優れた適応アルゴリズムである。学習同定法は、別名 NLMS(Normalized-LMS) アルゴリズムと呼ばれ、LMS アルゴリズムのパラメータ修正項をフィルタの状態ベクトルで正規化されたものとみなすことができる。

ある時刻  $t$  において、推定系出力  $y(t)$  が未知系出力  $d(t)$  に等しいとすると

$$y(t) = h_N^T d_N(t) \quad (2.17)$$

と表すことができる。

しかし、 $h_N = w_N$  を満たすためには、すべての目標信号  $d(t)$  に対して式 2.17 が成り立たなければならない。

そこで、式 2.17 を満たす解集合の代表ベクトルを  $h_N(t)$  とする。この解集合は、式 2.17 より、観測信号の状態ベクトル  $d_N(t)$  に直交しているといえる。更に、 $w_N$  はこの解集合に含まれているので、 $h_N(t)$  はある点から  $d_N(t)$  方向にパラメータ修正したとき、もっとも  $w_N$  に近い点といえる。

したがって、 $h_N(t)$  を  $w_N$  に更に近づけるためには、適当に定めたある点よりも  $w_N$  より近い  $h_N(t+1)$  を次の修正パラメータの初期値とすれば良い。以上のことより

$$\begin{aligned} h_N(t+1) &= h_N(t) + (h_N(t+1) - h_N(t)) \\ &= h_N + \frac{(w_N - h_N(t))^T (h_N(t+1) - h_N(t))}{\|h_N(t+1) - h_N(t)\|} \\ &\quad \cdot \frac{h_N(t+1) - h_N(t)}{\|h_N(t+1) - h_N(t)\|} \end{aligned} \quad (2.18)$$

となる。但し、 $\|\cdot\|$  はベクトルのユークリッドノルムを表し、要素の 2 乗和の平方根と定

## 2.5 まとめ

義する．また，式 2.18 において

$$\frac{(w_N - h_N(t))^T (h_N(t+1) - h_N(t))}{\|h_N(t+1) - h_N(t)\|}$$

はパラメータの修正量を示し

$$\frac{h_N(t+1) - h_N(t)}{\|h_N(t+1) - h_N(t)\|}$$

はパラメータの修正方向をしめす．

ここで

$$\frac{h_N(t+1) - h_N(t)}{\|h_N(t+1) - h_N(t)\|} = \frac{d_N(t)}{\|d_N(t)\|} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} (w_N - h_N(t))^T d_N(t) &= x_N(t) - y(t) \\ &= e(t) \end{aligned} \quad (2.20)$$

が成立するので，式 2.18 は

$$h_N(t+1) = h_N(t) + \frac{d_N(t)}{\|d_N(t)\|^2} e(t) \quad (2.21)$$

と変形できる．学習同定法では，式 2.22 の修正ベクトルにステップゲインを掛け

$$h_N(t+1) = h_N(t) + \alpha \frac{d_N(t)}{\|d_N(t)\|^2} \quad (2.22)$$

で与えられる．

## 2.5 まとめ

本章では，FIR デジタルフィルタ，適応フィルタ，適応アルゴリズムなどのデジタル信号について述べた．

本研究では，多入力補正信号システムによるフィルタ構成法を用いるので，未知システムの逆特性を求める適応フィルタを用いる．また適応アルゴリズムについて秋山らは，LMS アルゴリズムと学習同定法のどちらが有効であるか調べている [5]．その結果，多入力信号

## 2.5 まとめ

補正システム構築には学習同定法を用いた場合がよい収束特性を得られることがわかった．  
よって，本研究では，LMS アルゴリズムよりよい収束特性を得られる学習同定法を用いる  
こととする．

## 第 3 章

# 音場再生システム

### 3.1 まえがき

音場再生技術とは，ある音場で収録した音を，異なる音場で再生する技術のことである．

例えば，現在では専用の LSI を用いた音場プロセッサ (Digital Sound Field Processor) の利用や，映画産業から派生した技術を家庭に適応させる音場再生，いわゆるホームシアターが一般家庭に普及し始めている．このとき要求されることは，可能な限り所望の音場に近い音場を再生するということである．

そこで現在，音場再生を実現する方法として，ヘッドホンを用いて再生するバイノーラルシステム技術とスピーカを用いて再生するトランスオーラルシステム技術が既に研究されている．

本章では，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，各々の問題点について考える．

### 3.2 バイノーラルシステム

バイノーラルシステムとは，原音場における音場をヘッドホンを利用することによって再現する技術である．[1, 2].

図 3.1 のように原音場にダミーヘッド (疑似頭) 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．収録された音響信号は，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．よって再生された音響信号は，再現

### 3.3 トランスオーラルシステム

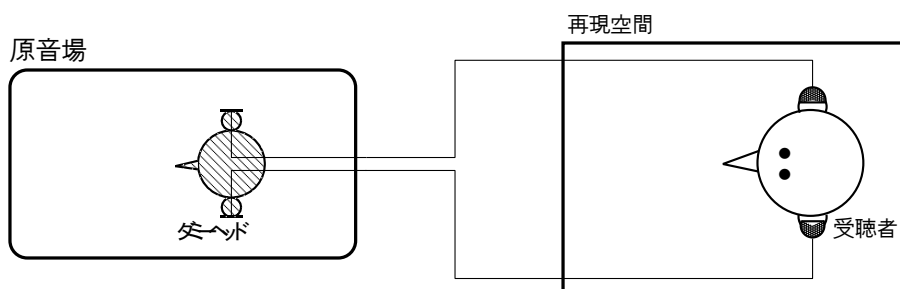


図 3.1 バイノーラルシステムの構成

空間における室内の伝達特性の影響を受けることがない．このため受聴者は，あたかも原音場で受聴しているような状況を実現する．

### 3.3 トランスオーラルシステム

トランスオーラルシステムとは，バイノーラルシステムと同様の効果を，スピーカを用いて実現しようとする技術である [1, 2]．原音場にダミーヘッドを設置して 2 チャンネル収音された音は，異なった部屋 (再現音場) において，スピーカを用いて再生される．スピーカを用いた信号再生では，所望信号に室内伝達系の特性が付加された音が観測される．したがって，室内伝達特性の影響を除去するためのフィルタが必要となる．

図 3.2 に室内伝達特性  $G(z)$  を補正するモデル図を示す．音場再生では，所望信号  $s(t)$  を観測信号  $d(t)$  として得ることを目的としている．空間への入力信号  $x(t)$  は，所望信号  $s(t)$  がフィルタ  $C(z)$  と通過するものとして与える．また，観測信号  $d(t)$  は，入力信号  $x(t)$  が室内伝達特性  $G(z)$  の影響を受けることにより得られるものとする．ここで，システムが線形系であると仮定すると，

$$X(z) = C(z)S(z) \quad (3.1)$$

$$D(z) = G(z)X(z) \quad (3.2)$$

となる．式 (3.1)(3.2) より

$$D(z) = G(z)C(z)S(z) \quad (3.3)$$

### 3.3 トランスオーラルシステム

となり

$$G(z)C(z) = 1 \quad (3.4)$$

となるようにフィルタ  $C(z)$  を導入すると所望信号が観測信号の近似となるように設計することができる．このように，室内伝達特性の影響を除去するために構成されたフィルタを補正フィルタと呼ぶこととする．トランスオーラルシステムでは，バイノーラルシステムと同

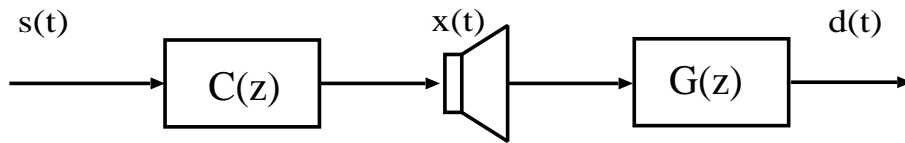


図 3.2 室内伝達特性の補正

様に原音場に設置されたダミーヘッドで 2 チャンネル録音を行う．その後，録音された音がスピーカを用いて再生される．図 3.3 にトランスオーラルシステムの模式図を示す．このと

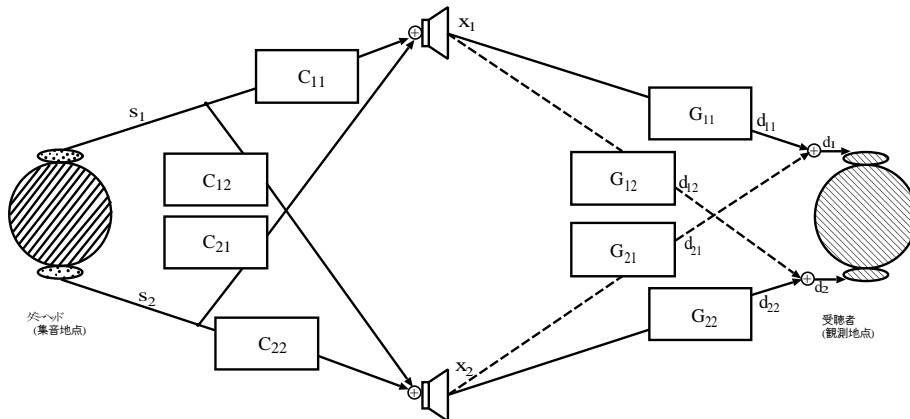


図 3.3 トランスオーラルシステムの構成

き，観測信号と入力信号の関係は

$$D_1(z) = G_{11}(z)X_1(z) + G_{21}(z)X_2(z) \quad (3.5)$$

$$D_2(z) = G_{12}(z)X_1(z) + G_{22}(z)X_2(z) \quad (3.6)$$

となり行列

$$\begin{pmatrix} D_1(z) \\ D_2(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11}(z) & G_{21}(z) \\ G_{12}(z) & G_{22}(z) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1(z) \\ X_2(z) \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

### 3.3 トランスオーラルシステム

で表すことができる．これは，本来は右耳（左耳）にだけ伝えられるべき音が，反対側の耳にも聞こえるという現象が生じることを意味する．この現象はクロストークと呼ばれ，原音場を再現するための妨害要因となる．そこで，室内伝達特性の影響とクロストークを除去するために補正フィルタを用いる．所望信号と入力信号の関係を式 (3.7) と同様に行列で表すと

$$\begin{pmatrix} X_1(z) \\ X_2(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11}(z) & C_{21}(z) \\ C_{12}(z) & C_{22}(z) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1(z) \\ S_2(z) \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

となる．室内伝達経路系，補正フィルタ系をそれぞれ

$$G(z) = \begin{pmatrix} G_{11}(z) & G_{21}(z) \\ G_{12}(z) & G_{22}(z) \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

$$C(z) = \begin{pmatrix} C_{11}(z) & C_{21}(z) \\ C_{12}(z) & C_{22}(z) \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

とおくと式 (3.7)(3.8) より

$$D(z) = G(z)C(z)S(z) \quad (3.11)$$

となり

$$G(z)C(z) = 1 \quad (3.12)$$

の関係をもつ補正フィルタを構成する．

#### 3.3.1 問題点

これらのシステムには，それぞれ問題点がある．

バイノーラルシステムは，ヘッドホンを用いて再生されるため空間の伝達特性の影響を受けずに受聴者の耳元で再生することができる．しかし，ダミーヘッドと受聴者の頭部の形状の違い，ヘッドホン特性の混入，ヘッドホン装着による違和感，長時間利用時の疲労といった問題が生じる．

また，トランスオーラルシステムは受音されるときに不必要な空間の伝達特性の影響を受けるために，それを除去するようなフィルタ設置が必要とされる．

### 3.4 まとめ

しかし，良好な音声を受聴するためには，スピーカと受聴者との位置関係が正三角形である必要がある．また，補正フィルタはクロストーク問題を解決するためのものであり，室内伝達特性を補正するためのものではない．したがって，空間のあらゆる場所に適応できないことから受聴範囲を限定してしまう．

### 3.4 まとめ

本章では，ヘッドホンを用いて音場再生を行うバイノーラルシステム，バイノーラルシステムと同様の効果をスピーカを用いて実現するトランスオーラルシステムについて述べた．また，それらの問題点を示した．次ぎはこれらの問題点を解決するため，多入力音場再生システムにおける信号補正法について述べる．



## 第 4 章

# 多入力信号補正システムにおける フィルタ構成法

### 4.1 まえがき

仮想空間で再生される映像や音声には，再現性が要求される．特に，音声に再現性を求める場合には，再現空間での音場再生が重要となる．音場再生を実現するためには，バイノーラルシステムやトランスオーラルシステム技術が既に研究されている．しかしながら，これらの音場再生技術にはヘッドホン利用や受聴範囲の限定などの問題点が指摘されている．

今回は，音場再生のためにスピーカを用いる．スピーカの利用は，バイノーラルシステムにおけるヘッドホン装着による違和感や長時間利用できないといった問題点を解消することができる．また，適応フィルタを用いて室内伝達特性を補正し，スピーカを用いた音場再生では，室内伝達特性の影響を除去するフィルタを構成することが重要となる．通常，2つの伝達経路を補正するためには，2つのフィルタを必要とする．しかしながら，スピーカ数の増加と共にフィルタの構成が複雑になってしまうという問題点がある．

空間での音場再生では，複数の経路に対して制御を単一の制御系で行う必要が生じる．多入力信号補正システムでは，問題を単純化するために，まず1つのスピーカ（適応フィルタ）で音場再生する方法を考える．そこで，本稿で提案する手法は，信号は空間を伝達されることを前提とし，1つのスピーカに対して被験者の左右の耳への伝達経路を補正するシステムを検討する．また，このようなシステムを確立することによって，スピーカ数は任意に増やすことができる．さらに，スピーカと被験者の位置関係を固定しないことで，受聴地点を

## 4.2 多入力信号補正システム

自由に与える．ただし，受聴地点において被験者の左右の耳に極めて近い場所でマイクロホンにより受信信号が観測可能と仮定する [5] ．

## 4.2 多入力信号補正システム

スピーカを用いた音場再生では，左右耳に対してそれぞれ異なる室内伝達特性の影響を除去しなければならない．ここでは，1 つの補正フィルタで 2 つの伝達経路を補正する多入力信号補正システムについて示す．図 4.1 は，多入力信号を補正するためのシステム構成を表している．

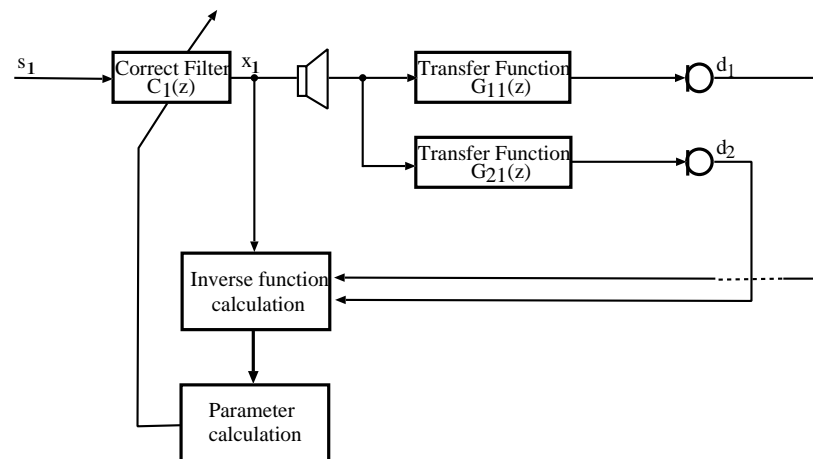


図 4.1 多入力信号補正システム

多入力信号補正システムにおけるパラメータ更新は

- 室内伝達特性の逆特性の算出
- 補正フィルタのパラメータ更新

の 2 つに分けられる．

室内伝達特性の逆特性は，適応フィルタを用いて算出する．そして，室内への入力信号を補正するために，左右耳それぞれ対する室内伝達特性  $G_j(z)$  の逆特性を用いて補正フィルタのパラメータを更新する．

## 4.2 多入力信号補正システム

### 4.2.1 適切な補正フィルタ

図 4.2 は，スピーカを用いた音場再現のためのシステムのブロック図である．

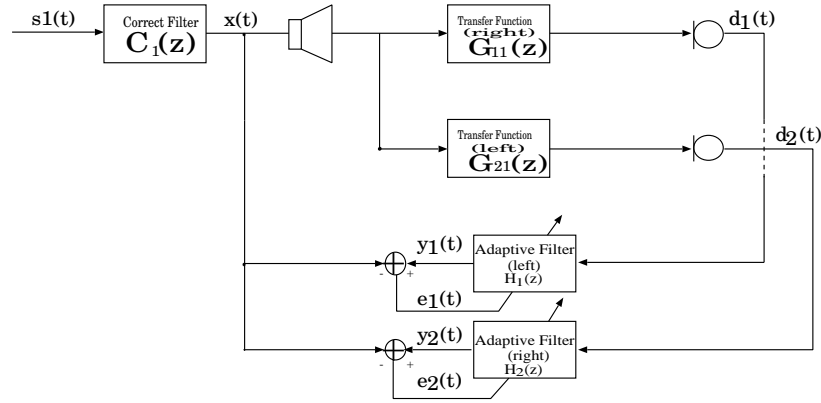


図 4.2 多入力信号による音場再生システム

ただし，図 4.2 では 1 つのスピーカに対する処理についてのみ示す．システムへの入力信号  $x(t)$  は，所望信号  $s(t)$  が補正フィルタ  $C(z)$  を通過したものと与える．また，観測信号  $d_j(t)$  は入力信号  $x(t)$  が空間の伝達特性  $G_j(z)$  の影響を受けることにより得られる．ここで，システムが線形系であると仮定すると

$$X(z) = C(z)S(z) \quad (4.1)$$

$$D_j(z) = G_j(z)X(z) \quad (4.2)$$

となる．ただし

$$j = \begin{cases} 1 & \text{left} \\ 2 & \text{right} \end{cases} \quad (4.3)$$

とする．また， $S(z), X(z), D_j(z)$  は  $z$  変換後の所望信号，入力信号，観測信号をそれぞれ表す．したがって，所望信号と観測信号の関係は式 (4.2), 式 (4.2) より

$$D_j(z) = G_j(z)C(z)S(z) \quad (4.4)$$

となる．式 (4.4) より所望信号を観測信号として得るためには

$$C(z) = G_j^{-1}(z) \quad (4.5)$$

## 4.2 多入力信号補正システム

の関係をもつ補正フィルタを構成する必要がある．

### 4.2.2 室内伝達特性の逆特性

図 4.2 から適応フィルタ通過後の信号を出力信号  $y_j(t)$  とする．出力信号  $y_j(t)$  と入力信号  $x(t)$  の差を入力誤差

$$e_j(t) = x(t) - y_j(t) \quad (4.6)$$

とする．そして，入力誤差が最小となるように学習同定法 [5] により適応フィルタのパラメータを

$$h_{jN}(t+1) = h_{jN}(t) + \alpha \frac{d_N(t)}{\|d_N(t)\|^2} e_j(t) \quad (4.7)$$

で更新する．ここで， $d_N, h_{jN}(t)$  はそれぞれ観測信号の状態ベクトル，適応フィルタのパラメータであり， $\|\cdot\|$  ベクトルのユークリッドノルムを表す．また， $N, \alpha$  はそれぞれインパルス応答長，ステップゲインを示す．室内伝達特性の逆特性は，出力誤差が最小となるように適応フィルタのパラメータを更新することで求めることができる．

### 4.2.3 補正フィルタパラメータ更新

1 つのスピーカから室内へ入力された信号は，2 つの異なる伝達経路を経て左右耳へ伝達される．したがって，1 つの補正フィルタは複数経路に対する処理を行う必要がある．補正フィルタのパラメータは，4.2.2 で求められる適応フィルタのパラメータから求める．

4.2.1 では，補正フィルタ  $C$  が伝達特性  $G_j$  に対する逆システムと同様の性質である場合に，受聴点での所望信号の再現が可能であると述べた．したがって，複数経路の伝達経路を補正する場合 4.2.2 で示した方法を用いて各伝達特性に対する逆特性のパラメータ推定を行った後，補正フィルタのパラメータが与えられたとき，特定の伝達特性のみを補正するように動作してはならない．そこで，過去の逆特性のパラメータ値を考慮して新たなパラメータを生成することにより，補正フィルタのパラメータが他方の伝達経路の影響を大きく受けた場合でも自らの伝達経路の逆特性のパラメータを算出できるようにする．また，補正

## 4.2 多入力信号補正システム

フィルタを構成する場合，補正フィルタのパラメータが急激に更新されないように注意しなければならない．なぜなら，急な補正フィルタのパラメータの変化は，観測信号にも影響を及ぼすからである．

したがって，各々の伝達特性に対する補正フィルタのパラメータ修正量を

$$c_{jN} = rc_{jN}(t) + (1 - r)h_{jN}(t) \quad (4.8)$$

で求める．式 (4.8) ではで求める．修正率  $r(0 \leq r \leq 1)$  により式 4.7 で得られたパラメータをどの程度適応させるかを決定している．また，補正フィルタのパラメータ生成のためには，過去に得られた補正フィルタのパラメータ値と式 4.8 で求められた修正量との平均を

$$c_N(t+1) = \frac{c_N(t) + c_{1N}(t+1) + c_{2N}(t+1)}{3} \quad (4.9)$$

で求める．補正フィルタのパラメータに，過去の値と左右における修正量との平均値を与えることで信号の変動を平滑化する．

多入力信号補正システムにおける補正フィルタのパラメータ更新をまとめると 1. 出力誤差  $e_j(t)$  の算出

### 2. 適応フィルタのパラメータ更新

$$h_{jN}(t+1) = h_{jN}(t) + \alpha \frac{d_N(t)}{\|d_N(t)\|^2} e_j(t) \quad (4.10)$$

### 3. 修正量の算出

$$c_{jN} = rc_{jN}(t) + (1 - r)h_{jN}(t) \quad (4.11)$$

### 4. 補正フィルタパラメータの更新

$$c_N(t+1) = \frac{c_N(t) + c_{1N}(t+1) + c_{2N}(t+1)}{3} \quad (4.12)$$

となる．ここで  $C_{jN}(t), C_N(t)$  はそれぞれ左右における修正量，補正フィルタのパラメータを示す．

## 4.3 まとめ

本章では，多入力信号補正における最適な補正フィルタの条件とその導出法について示し，複数経路に対する制御を単一の制御系で行う場合のうち，1つの補正フィルタによって2つの異なる伝達特性を補正する多入力信号補正法を示した．

本研究では，この多入力信号補正法をつかってステレオ音場再生システムを提案，再現し検討する．

## 第 5 章

# 多入力信号補正法によるステレオ型音場再生システム

### 5.1 まえがき

スピーカを用いた音場再生システムのトランスオーラルシステムは，スピーカから出た音は受音される時に室内の伝達特性の影響を受けるために，本来の音とは違って聞こえる．そこでそれを除去するようなフィルタ設置が必要とされる．よって 1 つのスピーカは 1 つの補正フィルタに対する処理しか行うことができないため伝達経路の数だけ補正フィルタが必要となる．また，スピーカの増加と共にフィルタの構成が複雑化してしまうといった問題も残る．

秋山らが，受聴者の移動に伴う伝達特性の変動が生じない場合に，1 つの補正フィルタで 2 本の伝達経路を制御する多入力信号補正法を考案した．これによりスピーカの数も任意に増やすことができるようになった．しかし，秋山らは 1 つのスピーカで音場再生を再現したが，ステレオ化は行っていなかった．ステレオとは，2 つ以上のスピーカによって作り出される立体音響のことである．

そこで本研究ではステレオ化をすすめる上で，多入力信号補正システムを用いたステレオ型音場再生システムを考える．

## 5.2 多入力信号補正によるステレオ型音場再生システム

図 5.1 は，多入力信号補正によるステレオ型音場再生システムを表している．以下のように多入力信号補正システムを 2 つ並べてステレオ化する．

しかし，ステレオ化において左（右）耳に聞こえるはずの音が反対側にも聞こえてしまうクロストークという問題がある．本研究では本システムの有効性を示すために，このクロストーク成分の軽減を計らなければならない．

そこで提案手法を用いて，クロストーク成分を軽減させる．

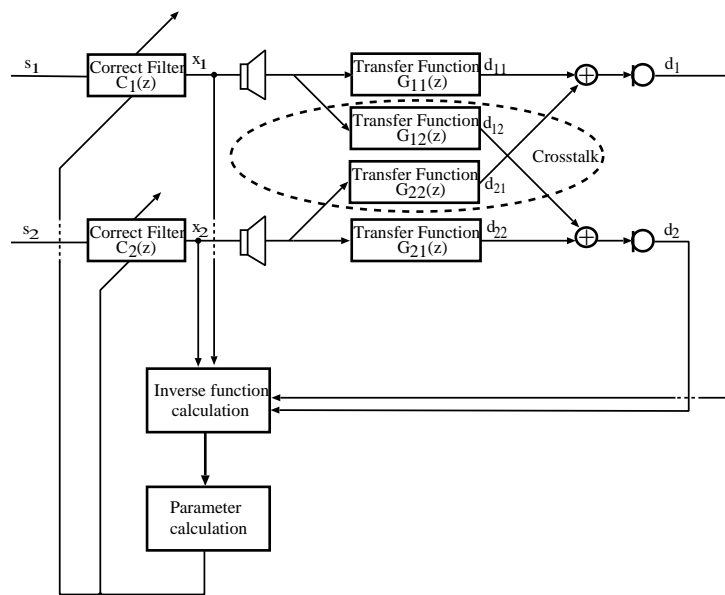


図 5.1 多入力信号補正によるステレオ型音場再生システム

### 5.2.1 提案手法

クロストーク成分を軽減させるための提案手法として，予測フィルタを導入する．予測フィルタとはクロストーク成分の室内伝達特性の逆特性を算出するフィルタである．

予測フィルタを用いて室内伝達特性の逆特性を算出し，それによりクロストークを考慮した補正フィルタのパラメータ更新を行う．その際多入力信号補正におけるステレオ型音場再生システムのパラメータ更新過程を次に示す．



## 5.2 多入力信号補正によるステレオ型音場再生システム

- 室内伝達特性の逆特性の算出
- 補正フィルタのパラメータ更新

また図 5.2 より，クロストーク部分の室内伝達特性  $G_{12}, G_{21}$  の相関が強いことに着目する．本研究では室内伝達特性を乱数で算出しているため室内伝達特性  $G_{12}, G_{21}$  は相関であると言えない．そのため実際のシステムに近い状態にするために，シミュレーション上クロストーク部分の室内伝達特性  $G_{12}, G_{21}$  を同じにする．

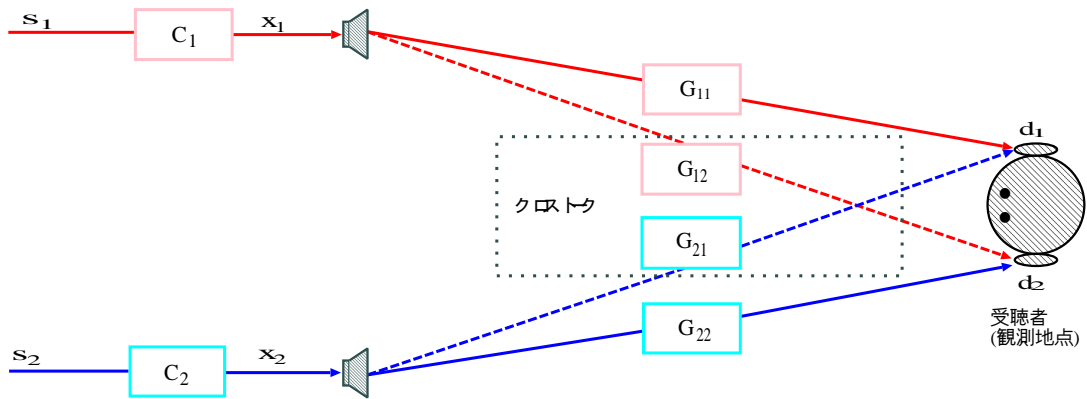


図 5.2 提案手法を用いた多入力信号補正システムによるステレオ型音場再生システム

### 5.2.2 室内伝達特性の逆特性

図 5.3 に，室内伝達特性の逆特性を求めるためのブロック図を示す．本研究では LMS アルゴリズムよりも，よい収束特性が得られる学習同定法を用いる．

まず適応フィルタ通過後の観測信号を出力信号  $y_{ij}(t)$  とする．出力信号  $y_{ij}$  と入力信号  $x_j(t)$  の差を出力誤差を

$$e_{ij}(t) = x_j(t) - y_{ij}(t) \quad (5.1)$$

とする．そして，出力誤差が最小となるように学習同定法により適応フィルタのパラメータを

$$h_{ij}(t+1) = h_{ij}(t) + \alpha \frac{d_{ij}(t)}{\|d_{ij}(t)\|^2} e_{ij}(t) \quad (5.2)$$

## 5.2 多入力信号補正によるステレオ型音場再生システム

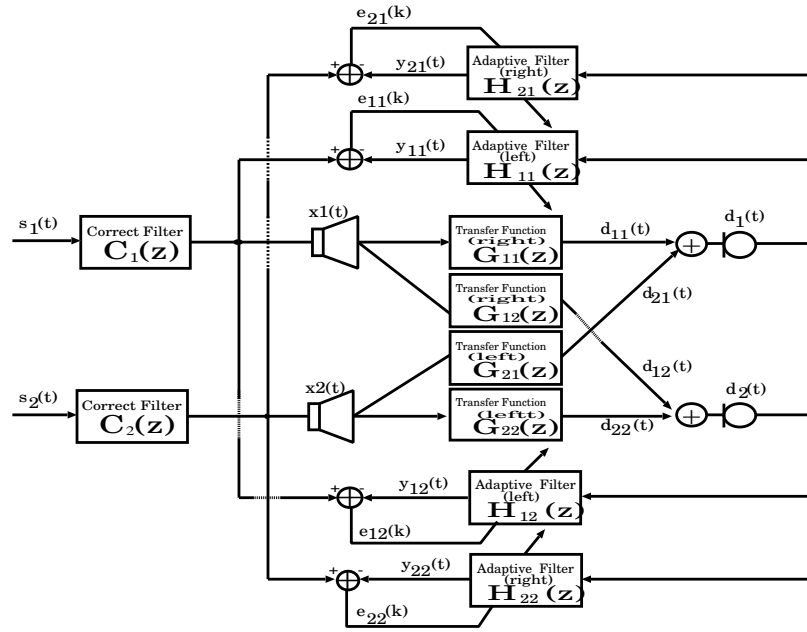


図 5.3 室内伝達特性の逆特性算出のためのブロック図

で更新する．ここで， $d_{ijN}(t)$ ,  $H_{ijN}(t)$  はそれぞれ観測信号の状態ベクトル，適応フィルタのパラメータであり， $\|\cdot\|$  はベクトルのユークリッドノルムを表す．また， $\alpha$  はステップゲインを示す．室内の伝達特性の逆特性は出力誤差が最小となるように適応フィルタのパラメータを更新することで求めることができる．

### 5.2.3 補正フィルタパラメータ更新

多入力信号補正システムを使って 2 つのスピーカから室内へ入力された信号は，4 つの異なる伝達経路を経て左右耳へ伝達される．この時補正フィルタ  $C_j$  が伝達特性  $G_{ij}$  に対する逆システムと同様の性質である場合に受聴点での所望信号の再現が可能である．また各々の伝達特性に対する補正フィルタのパラメータ修正量を

$$c_{ij} = rc_{ij}(t) + (1 - r)h_{ij}(t + 1) \quad (5.3)$$

で求める．式 5.3 では，修正率  $r(0 \leq r \leq 1)$  により式 5.2 で得られたパラメータをどの程度適応させるかを決定している．また，補正フィルタのパラメータ生成のためには，過去に

### 5.3 計算機シミュレーション

得られた補正フィルタのパラメータ値と式 5.2 で求められた修正量との平均を

$$\begin{aligned}c_1(t+1) &= \frac{c_{11}(t+1) + c_{21}(t+1)}{2} \\c_2(t+1) &= \frac{c_{12}(t+1) + c_{22}(t+1)}{2}\end{aligned}\quad (5.4)$$

で求める．

多入力信号補正システムによるステレオ型音場再生システムの補正フィルタのパラメータ更新過程をまとめると

1. 出力誤差  $e_{ij}(t)$  の算出
2. 適応フィルタのパラメータ更新

$$h_{ij}(t+1) = h_{ij}(t) + \alpha \frac{d_{ij}(t)}{\|d_{ij}(t)\|^2} e_{ij}(t) \quad (5.5)$$

3. 修正量の算出

$$c_{ij} = r c_{ij}(t) + (1-r) h_{ij}(t+1) \quad (5.6)$$

4. 補正フィルタパラメータの更新

$$\begin{aligned}c_1(t+1) &= \frac{c_{11}(t+1) + c_{21}(t+1)}{2} \\c_2(t+1) &= \frac{c_{12}(t+1) + c_{22}(t+1)}{2}\end{aligned}\quad (5.7)$$

となる．ここで  $C_1(t), C_2(t)$  はそれぞれ左右における修正量，補正フィルタのパラメータを示す．また  $\alpha$  はパラメータ修正の大きさを制御するステップゲイン， $r(0 \leq r \leq 1)$  は左右における補正フィルタのパラメータに対する修正量を制御し，急激なパラメータ変動を制御する修正量を表す．

## 5.3 計算機シミュレーション

### 5.3.1 シミュレーション条件

多入力信号補正によるステレオ型音場再生システムにおいて，提案手法を用いた制御システムと提案手法を用いない場合の無制御システムの収束特性を比べる．

## 5.4 まとめ

まず図 5.3 の左右  $s_1, s_2$  に約 10 秒の音声信号 (図 5.4 , 5.5) を与える．シミュレーション条件は，適応フィルタのインパルス応答長  $N = 256$ , 室内伝達特性のインパルス応答長  $L = 124$  とする．室内伝達特性の相関が強いことに着目して， $G_{12}(z), G_{21}(z)$  の室内伝達特性を揃える，ステップゲイン  $\alpha = 0.1$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ), 修正率  $r = 0.5$  ( $0 \leq r \leq 1$ ) とする．今回のステップゲイン，修正率は適当であり，なるべく変動の少ない小さい値を用いる．ただし受聴者の移動に伴う伝達関数の変化は生じないものとする．

評価量には ERLE(Echo Return Loss Enhancement) を用いる．これは所望信号 ( $S_1, S_2$ ) と観測信号 ( $d_1, d_2$ ) との 2 乗平均比を dB で表現．誤差の減少にともない収束する．

$$10 \cdot \log_{10} \frac{E[s_i^2(n)]}{E[\{s_i(n) - d_i(n)\}^2]} \quad i = \begin{cases} 1 & \text{left} \\ 2 & \text{right} \end{cases} \quad (5.8)$$

を用いた．ここで， $E[\cdot]$  は期待値を表す．

### 5.3.2 シミュレーション結果

結果は，図 5.6 より制御システムの評価量は約 4 秒で 2.5dB に収束している．一方無制御システムも約 4 秒で収束はしているが提案手法を用いてないため良い結果が得られていない．

これより提案手法を用いたことによりクロストークの成分を軽減することができ，本システムの有効性を確認できる．

## 5.4 まとめ

本章では，多入力信号補正システムを用いたステレオ型音場再生システムの提案．それによる問題定義とその解決策である提案手法をあらわした．その方法として，予測フィルタの導入，室内伝達特性の相関に着目した．

また計算機シミュレーションにより提案手法を用いた制御システムと用いない無制御システムとを比べ，本システムの有効性を調べた．

## 5.4 まとめ

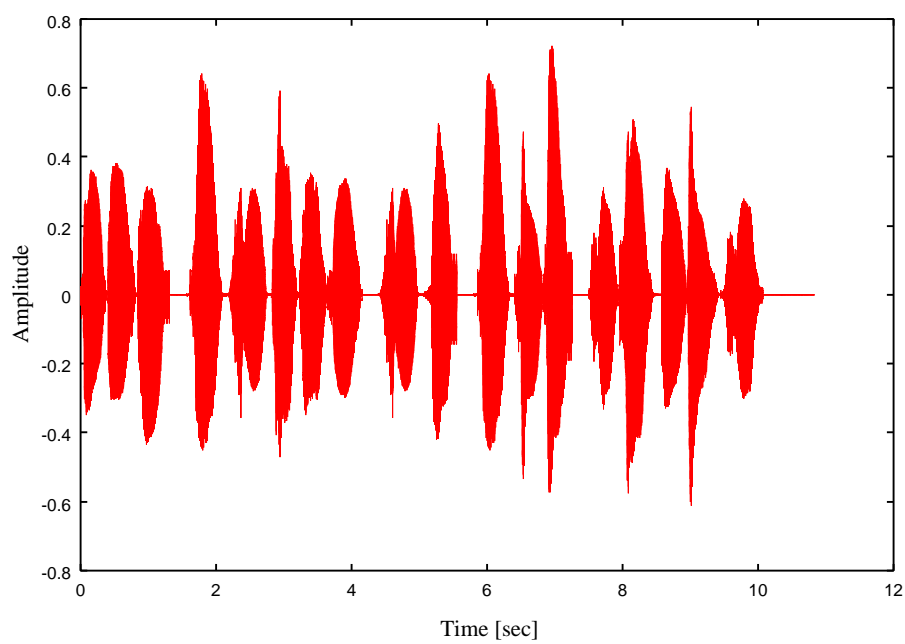


図 5.4 右耳に与えられた音声

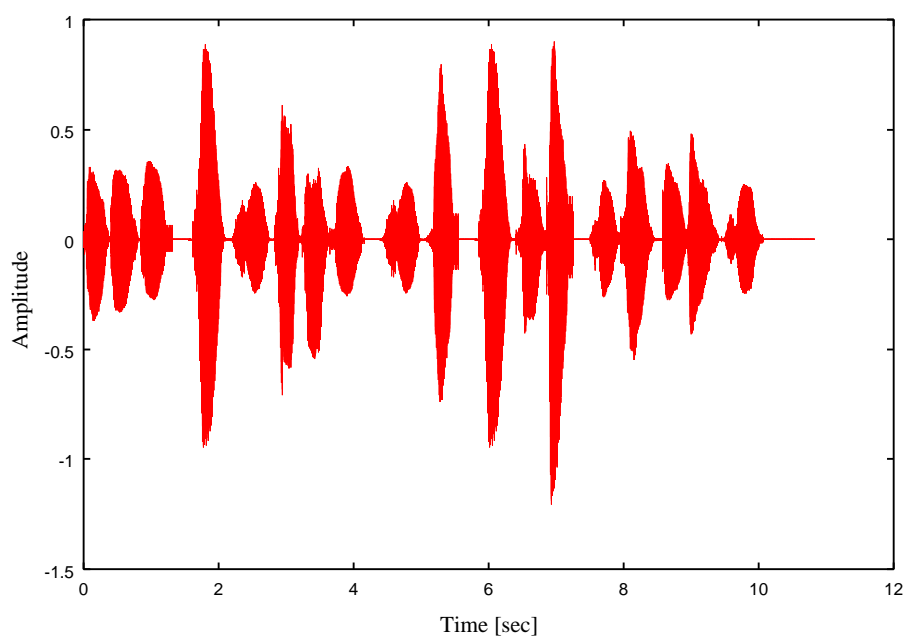


図 5.5 左耳に与えられた音声

## 5.4 まとめ

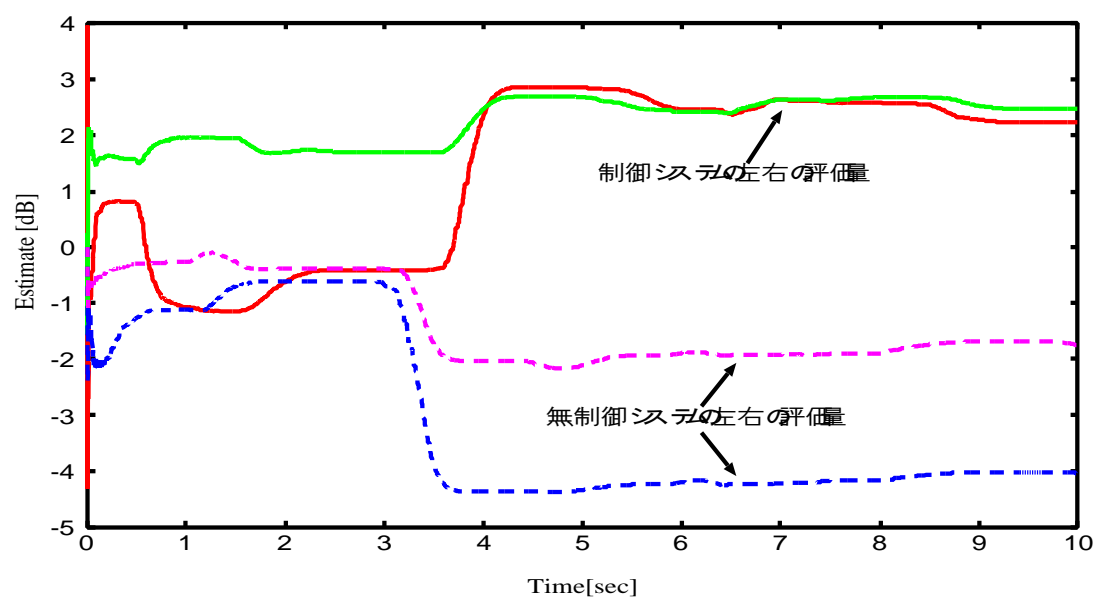


図 5.6 提案手法のシステムと無制御のシステムの評価量

## 第 6 章

# 結論

### 6.1 本研究における評価

多入力信号補正システムを用いてステレオ型音場再生の提案をした．またそれによる問題を  
を確認し，問題解決を行うために提案手法を考案した．次に計算機シミュレーションにより  
本システムの有効性を示した．

### 6.2 今後の課題

本論文では，多入力信号補正によるステレオ型音場再生システムのの提案とその有効性を  
示した．

しかし人間が信号の表現性を評価するため，人の聴覚特性に応じた処理を行わなければな  
らない．そのため，左右の補正フィルタ係数合成時における重み付けの検討する必要がある．

また，本論文の計算機シミュレーションでは，受聴者の移動に伴う伝達特性の変化に対応  
することを想定していないため，固定された場所からの適応性は得られたが，移動に伴う適  
応性は得られてない．よって，一定地点から受聴範囲を拡大することが不可能である．

このことから，室内伝達特性の変動に追従するパラメータ更新について検討する必要が  
ある．

# 謝辞

本研究を行うにあたり，夜遅くまで御指導，御助言を終始いただいた高知工科大学 情報システム工学科 福本昌弘助教授には，深く感謝いたします．また本論文の審議をしていただいた島村 和典教授，岡田 守教授に感謝致します．ならびに情報システム工学科教員の皆様に感謝致します．

そして，いちから御指導いただいた高知工科大学大学院情報システム工学コースの浜崎真二さんに深く感謝致します．また，よく晩飯をご一緒し，よき話相手になってくれた坂本研究室の皆様に感謝致します．

最後に研究，論文作成などさまざまなことに御協力頂いた福本研究室の皆様に感謝致します．



# 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] 北脇信彦，デジタル音声・オーディオ技術，電気通信協会，1999.
- [3] 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.
- [4] 辻井重男，鎌田一雄，デジタル信号処理，昭晃堂，1997.
- [5] 秋山由佳，”聴覚特性にもとづいた重み付き誤差による多入力信号補正法,”平成 14 年度 修士学位論文, 2003
- [6] 酒井英昭，信号処理，オーム社，1998
- [7] S．ヘイキン (武部幹 訳)，適応フィルタ入門，現代工学社，1994