

平成 15 年度

特別研究セミナー課題研究報告書

多入力信号補正システムにおける 最適パラメータの検討

1040280 川上 裕司

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

多入力信号補正システムにおける最適パラメータの検討

川上 裕司

ある空間で録音された音を異なる空間で再生する場合には，受聴地点での音の再現正が要求される．スピーカを用いた音場再生では，所望信号に伝達系の特性が付加された音が観測される．したがって，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．一般的に，1つのスピーカから発せられた音は，左右耳に2つの異なった伝達経路をとる．このとき，それぞれの伝達特性の影響を除去するためには通常2つの補正フィルタを必要とする．しかし，1つのスピーカでは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制御系で行う必要が生じる．

秋山らが提案した多入力信号補正法によって，1つのフィルタにより2つの伝達経路を補正することが可能となった．そして，それを応用した多入力信号補正によるステレオ型音場再生システムが，浜崎らによって提案された．しかしながら，このシステムの性能を決定する2つのパラメータ，ステップゲインと修正率に対する最適な値の検討は行われていない．

本研究では，このシステムの性能を決定する2つのパラメータ，ステップゲインと修正率に対して検討を行う．

キーワード 多入力信号補正システム，ステップゲイン，修正率

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	音響モデルにおける信号処理	3
2.1	まえがき	3
2.2	FIR デジタルフィルタ	3
2.3	適応信号処理	5
2.3.1	適応フィルタ	5
2.3.2	適応アルゴリズム	7
2.3.3	学習同定法	9
2.4	まとめ	11
第 3 章	多入信号補正システム	12
3.1	まえがき	12
3.2	多入力信号補正システム	12
3.2.1	最適な補正フィルタ	13
3.2.2	室内伝達特性の逆特性	15
3.2.3	補正フィルタパラメータ更新	15
3.3	まとめ	17
第 4 章	ステレオ型音場再生システム	18
4.1	まえがき	18
4.2	ステレオ化における問題点とその解決法	18
4.2.1	問題点	18

目次

4.2.2	解決法	19
4.3	ステレオ型の多入力信号補正システム	19
4.3.1	補正フィルタの構成	19
4.3.2	室内伝達特性の逆特性算出	21
4.3.3	補正フィルタのパラメータ更新	22
4.4	まとめ	23
第 5 章	多入力信号補正システムにおける最適パラメータの検討	24
5.1	まえがき	24
5.2	ステップゲインと修正率	24
5.3	最適パラメータの検討	25
5.3.1	検討の流れ	25
5.3.2	シミュレーション結果	26
5.4	まとめ	27
第 6 章	結論	33
6.1	今後の課題	33
謝辞		34
参考文献		35

図目次

2.1	FIR デジタルフィルタ	4
2.2	適応フィルタを用いたブロック図	6
3.1	多入力信号補正システム	13
3.2	多入力信号による音場再生システム	13
3.3	室内伝達特性の逆特性算出のためのブロック図	14
4.1	多入力信号補正によるステレオ型音場再生システム	20
4.2	室内伝達特性の逆特性算出のためのブロック図	21
5.1	右側所望信号	28
5.2	左側所望信号	28
5.3	ある α , r における評価量	29
5.4	評価量の時間平均値 (右耳)	29
5.5	評価量の時間平均値 (左耳)	30
5.6	評価量の時間平均値 (左右耳)	30
5.7	右耳最適パラメータにおける評価量	31
5.8	左耳最適パラメータにおける評価量	31
5.9	左右耳最適パラメータにおける評価量	32

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	9
5.1 最適パラメータ	26

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進展によって、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可能となった。また、通信網、デジタル通信、信号処理、通信端末におけるハードウェア・ソフトウェア技術の著しい発展により情報流通社会へと進展した。こうした流れからマルチメディア時代を迎え、バーチャルリアリティへの要求が高まっている。バーチャルリアリティを実現するためには、臨場感のある立体再生が望まれる。例えば、音声の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システムの構築が求められる。

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。秋山らの研究で、一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た。また、この多入力信号補正を利用した、ステレオ型音場再生システムが浜崎らによって提案された。

しかし、このシステムにおいて、適応フィルタのパラメータ修正の大きさを制御するステップゲイン α や、補正フィルタの修正量を決定する修正率 r の最適な値の検討には至っていない。

そこで、本研究は、多入力信号補正によるステレオ型音場再生システムの性能を決定する

1.2 本論文の概要

ステップゲイン，修正率に対する検討を行い，最適な値を求める事を目的とする．

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，多入力信号補正システムに用いられているデジタル信号処理の基礎技術である，FIR デジタルフィルタと適応信号処理について述べる．適応信号処理では，信号処理を行う際に用いられる適応アルゴリズムのうち，学習同定法についての説明を行う．

第3章では，複数経路にたいする処理を単一の制御系で行う多入力信号補正システムについて述べる．

第4章では，多入力信号補正によるステレオ型音場再生システムについて述べる．

第5章では，4章で述べたシステムにおけるステップゲイン，修正率について検討し，その結果について述べる．

最後に，第6章では，本研究での検討結果を評価する．

第 2 章

ディジタル信号処理

2.1 まえがき

音声，音楽といった音響信号は連続的な量をもつアナログ信号である．この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ータの処理を行うことができる．

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．そこで，観測信号から目的とする信号成分を抽出する機能を持ったディジタルフィルタについて考える．

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ためのものである．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) に分類される．

本章では，多入力信号補正システムが有限長のフィルタを用いていることから，FIR ディジタルフィルタについて述べた後，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の説明を行う．

2.2 FIR ディジタルフィルタ

ディジタルシステムでは，ここの信号を一時的に記憶するため，過去の信号を取り出すことが可能である．そこで，図 2.1 のように， z^{-1} を有限個用いたフィルタを考える．図 2.1 では，入力信号 $x(t)$ が各タップにおいてパラメータ (フィルタ係数) と乗ぜられ，それらが

2.2 FIR デジタルフィルタ

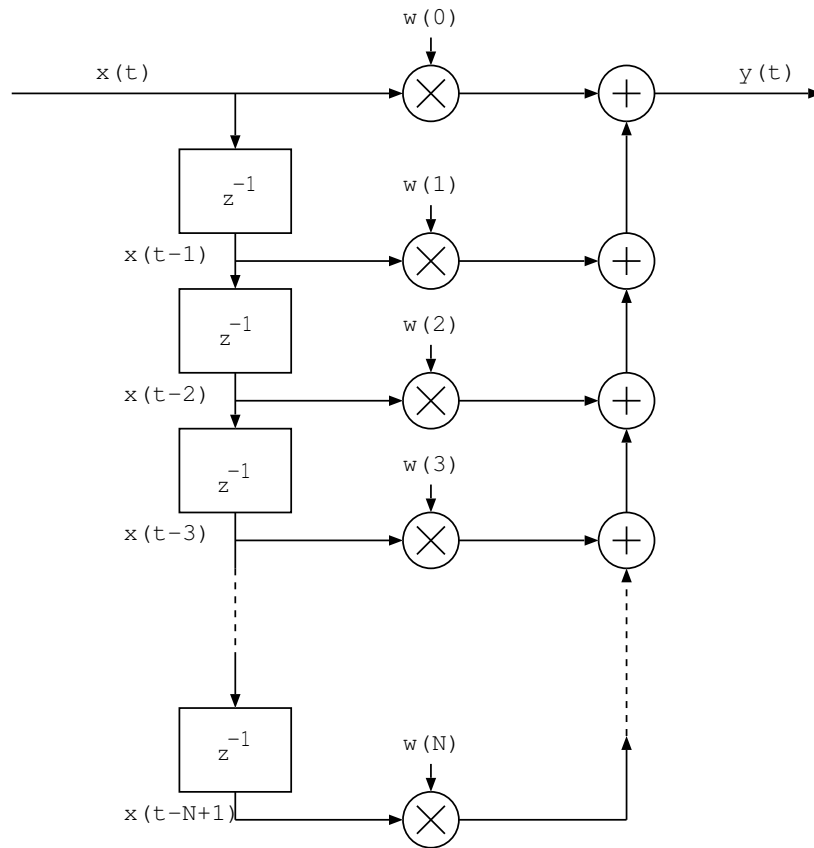


図 2.1 FIR デジタルフィルタ

加算された結果 $y(t)$ が出力される．このフィルタの入出力関係は，

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

で与えられる．

このように，インパルス応答の長さが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．

式 (2.1) から，出力信号 $y(t)$ はパラメータ w_N とは，

$$w_N = [w(0), w(1), \dots, w(N)]^T \quad (2.2)$$

で表される．ここで T は転置を表す．

2.3 適応信号処理

信号処理では、観測された信号にフィルタを作用させることによって、望ましい信号が出力されるように処理を行う。このとき、フィルタの特性を決めるパラメータが固定である場合は、時間の変化に関係なく処理を行う個とが可能である。しかし、観測信号の統計的性質が時間と共に変化する場合には、固定的な処理では正確に対応できない。そこで、時間と共に変化する信号の性質に応じて、パラメータを更新することのできる適応フィルタを用いる。このような処理を行うために、Widrow の先駆的な研究により始められたのが適応信号処理である。

近年では、移動通信システムの分野の飛躍的な成長により、適応エコーキャンセラ、適応ノイズキャンセラ、適応干渉キャンセラ、適応等化器などの適応信号処理技術が多く利用されている。

2.3.1 適応フィルタ

次に、FIR 形で構成された未知システムのパラメータ (インパルス応答) を推定することを考える。図 2.2 にシステムのブロック図を示す。ただし、図 2.2 における変数についての説明は表 2.1 に示す。

このとき、未知系出力信号 $d(t)$ と推定系の出力信号 $y(t)$ は

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

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

と表すことができる。また、出力誤差 $e(t)$ は

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

とあらわされる。

2.3 適応信号処理

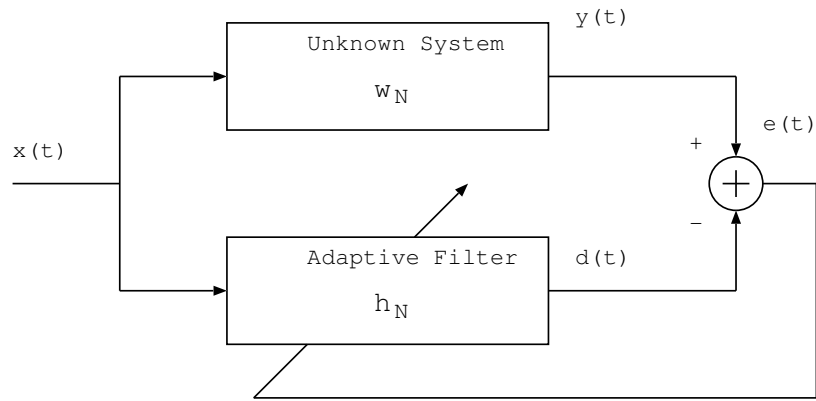


図 2.2 適応フィルタを用いたブロック図

t	時刻
N	インパルス応答長 (フィルタタップ数)
$x(t)$	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
$e(t)$	出力誤差

表 2.1 図 2.2 における変数の説明

式 (2.3), (2.4) において

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

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

2.3 適応信号処理

よ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い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、推定システムの出力 $y(t)$ が未知システムの出力 $d(t)$ に近づくように、推定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。

2.3.2 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って最適解を求める計算手順のことである。

適応アルゴリズムは、1960 年に Widrow-Hoff の LMS アルゴリズムに始まり、1967 年これとは独立に、野田と南雲により学習同定法が発表された。また、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。

図 2.2 において、入力信号 $x(t)$ に対する未知系出力 $y(t)$ は、式 (2.7) のように与えられ。

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

式 2.7 で表される $y(t)$ 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

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

と表すことができる。ただし、 x_N 、 h_N はそれぞれ

$$x_N = [x(0), x(1), \dots, x(N)]^T \quad (2.9)$$

$$h_N = [h(0), h(1), \dots, h(N)]^T \quad (2.10)$$

2.3 適応信号処理

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

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

とする. ただし, $E[\cdot]$ は期待値をあらわす.

図 2.2 では, 未知系出力 $d(t)$ 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.

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

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

3. $x_N(t), e(t)$ 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 $h_N(t)$ を修正して $h_N(t+1)$ を得る.

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

ここで, α はパラメータ修正の大きさを制御する量であるステップゲインを表す.

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

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

2.3 適応信号処理

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、 $\alpha = 1$ のとき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ときのみ有効で、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 Δh_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。

適応アルゴリズム	特徴	演算量
<i>LMS</i> 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	$3N$
<i>RLS</i> 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	$2N^2$

表 2.2 代表的な適応アルゴリズムの特徴比較

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表 2.2 のようになる。本研究に用いられる多入力信号補正システムは、適応アルゴリズムとして学習同定法を利用している。よって、学習同定法の説明を行う。

2.3.3 学習同定法

学習同定法は、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。しかし、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

2.3 適応信号処理

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 k 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

$$d(t) = h_N^T x_N(t) \quad (2.17)$$

と表すことができる。

しかし、 $h_N = w_N$ を満たすためには、すべての入力信号 $x(t)$ 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、入力ベクトル $x_N(t)$ 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 $x_N(t)$ 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 $w_N(t)$ 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 により近い $h_N(t+1)$ 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

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

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示す。

ここで

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

2.4 まとめ

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

が成立するので、式 (2.18) は

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

と変形できる.

学習同定法は、式 (2.21) の修正ベクトルにステップゲインを掛け

$$h_N(t+1) = h_N(t) + \alpha \frac{x_N(t)}{\|x_N(t)\|^2} e(t)\tag{2.22}$$

で与えられる.

2.4 まとめ

本章では、補正フィルタのパラメータ推定時に必要となる音響モデルについて述べた。また、多入力信号補正システムに利用されている学習同定法という適応アルゴリズムについて述べた。ここでは、ステップゲイン α の役割についても述べている。

第 3 章

多入信号補正システム

3.1 まえがき

本章では，秋山らによって提案された多入力信号補正システムについて説明を行う．このシステムは複数経路に対する処理を単一の制御系で行うシステムである．ただし，このシステムは，受聴地点において被験者の左右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であると仮定するという事が前提にある．

3.2 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 3.1 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．

多入力信号補正システムにおけるパラメータ更新過程は

- 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，左右耳それぞれに対する信号伝達特性 $G_j(x)$ 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．

3.2 多入力信号補正システム

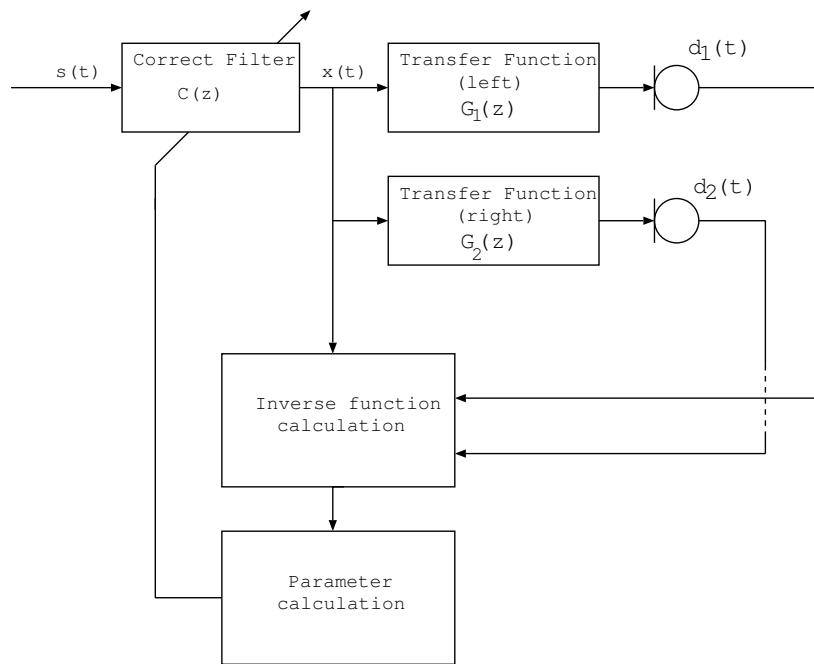


図 3.1 多入力信号補正システム

3.2.1 最適な補正フィルタ

図 3.2 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。ただし、図 3.2 では 1 つのスピーカに対する処理についてのみ示す。

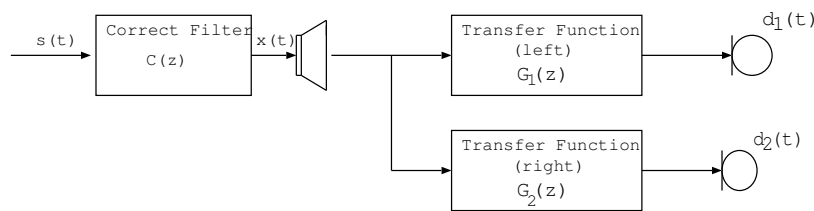


図 3.2 多入力信号による音場再生システム

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 $C(z)$ を通過したものとして与える。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

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

$$D_j(z) = G_j(z)X(z) \quad (3.2)$$

3.2 多入力信号補正システム

となる。ただし

$$j = \begin{cases} 1 & \text{left} \\ 2 & \text{right} \end{cases} \quad (3.3)$$

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 (3.1) と式 (3.2) より

$$D_j(z) = G_j(z)C(z)S(z) \quad (3.4)$$

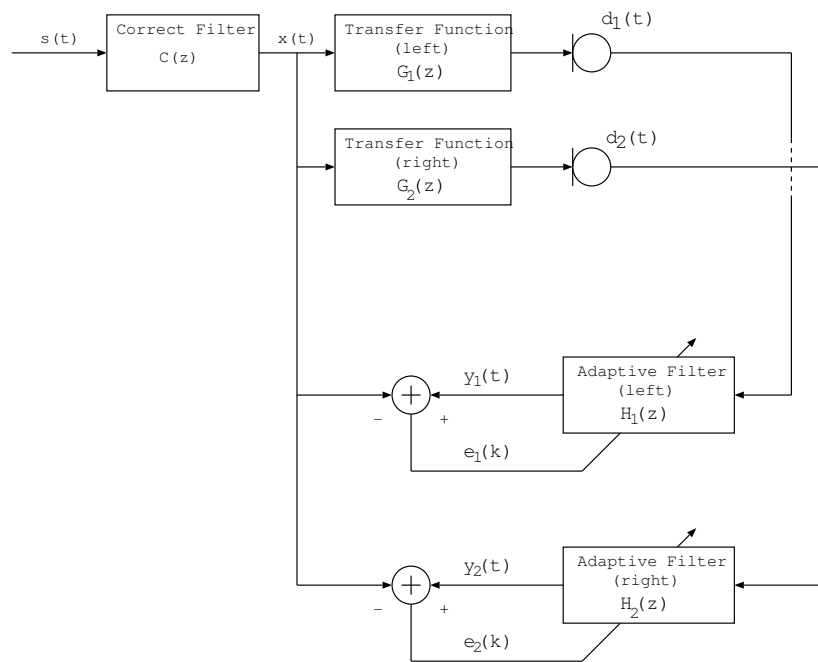


図 3.3 室内伝達特性の逆特性算出のためのブロック図

となる。式 (3.4) より所望信号を観測信号として得るためには

$$C(z) = G_j^{-1}(z) \quad (3.5)$$

の関係をもつ補正フィルタを構成する必要がある。

3.2 多入力信号補正システム

3.2.2 室内伝達特性の逆特性

図 3.3, 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. 適応フィルタ通過後の観測信号を出力信号 $y_j(t)$ とする. 出力信号 $y_j(t)$ と入力信号 $x(t)$ の差を出力誤差

$$e_j(t) = y_j(t) - x(t) \quad (3.6)$$

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

$$h_{jN}(t+1) = h_{jN}(t) + \alpha \frac{d_N(t)}{\|d_N(t)\|^2} e_j(t) \quad (3.7)$$

で更新する. ここで, $d_N(t)$, $h_{jN}(t)$ 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, $\|\cdot\|$ はベクトルのユークリッドノルムを表す. また, N はインパルス応答長, α は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.

3.2.3 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, 3.2.2 で求められる適応フィルタのパラメータから求める.

3.2.1 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, 複数の経路の伝達特性を補正する場合, 3.2.2 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時, 特定の伝達特性のみを補正するように動作しなくてはならない. そこで, 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.

3.2 多入力信号補正システム

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

$$c_{jN}(t+1) = rc_{jN}(t) + (1-r)h_{jN}(t) \quad (3.8)$$

で求める．式 (3.8) では、修正率 $r(0 \leq r \leq 1)$ により式 (3.7 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 (3.8) で求められた修正量との平均値を

$$c_N(t+1) = \frac{c_N(t) + c_{1N}(t+1) + c_{2N}(t+1)}{3} \quad (3.9)$$

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過程をまとめると

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

$$h_{j,N}(t+1) = h_{j,N}(t) + \alpha \frac{d_{j,N}(t)}{\|d_{j,N}(t)\|^2} e_j(t) \quad (3.10)$$

3. 修正量の算出

$$c_{jN}(t+1) = rc_{jN}(t) + (1-r)h_{jN}(t) \quad (3.11)$$

4. 補正フィルタパラメータの更新

$$c_N(t+1) = \frac{c_N(t) + c_{1N}(t+1) + c_{2N}(t+1)}{3} \quad (3.12)$$

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．

3.3 まとめ

3.3 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について述べた．

第 4 章

ステレオ型音場再生システム

4.1 まえがき

3 章では多入力信号補正システムについて述べた。本章では，その多入力信号補正システムを利用して，スピーカを 2 つにした多入力信号補正によるステレオ型音場再生システムについて述べる。

4.2 ステレオ化における問題点とその解決法

スピーカを 2 つにすることによって，いくつか問題点が発生する。ここでは，その問題点について述べた後，解決法を示す。

4.2.1 問題点

ステレオ化を実現するにあたって，発生する問題点は，

- フィルタ構成の複雑化

ステレオ化を再現するためにスピーカを増やす。そのために，フィルタの数も増加し，フィルタ構成が複雑になってしまうという問題である。

- クロストーク問題

ステレオ化におけるスピーカの複数化によって，所望信号間に強い相関が生じる。つまり，右耳 (左耳) だけに伝えられるべき音が反対側の耳にも聞こえるということである。これをクロストーク問題という。

4.3 ステレオ型の多入力信号補正システム

がある。

4.2.2 解決法

それぞれの問題に対する解決法を説明する。

- フィルタ構成の複雑化に対する解決法

先に説明した，多入力信号補正を利用することで，1つのスピーカで2本の伝達経路を制御できる．このことにより，フィルタの構成をシンプルにすることができる．

- クロストーク問題に対する解決法

所望信号間に強い相関があるという事実を利用する．左右の所望信号間に強い相関があるとすれば，その左右の信号は同じものと仮定する．このことにより，その信号に対する空間伝達特性の逆特性もまた同じであると考えられる．したがって，空間伝達特性の逆特性算出の際，クロストークする伝達経路に関する空間伝達特性の逆特性を同じものにするによって，クロストークを軽減できるとしている．

この点に基づいたフィルタ構成を次に説明する．

4.3 ステレオ型の多入力信号補正システム

先に説明した問題点の解決法を考慮したフィルタ構成を説明する．

4.3.1 補正フィルタの構成

図 4.1 は，スピーカを用いた音場再生のためのシステムのブロック図である．システムへの入力信号 $x_1(t), x_2(t)$ は，所望信号 $s_1(t), s_2(t)$ が補正フィルタ $C_1(z), C_2(z)$ を通過したものとして与える．また観測信号 $d_1(t)$ は，入力信号 $x_1(t), x_2(t)$ が室内の伝達特性 $G_{11}(z), G_{21}$ の影響を受けることにより得られる2つの観測信号の合わさった音である．ここでシステムが線形系であると仮定すると

4.3 ステレオ型の多入力信号補正システム

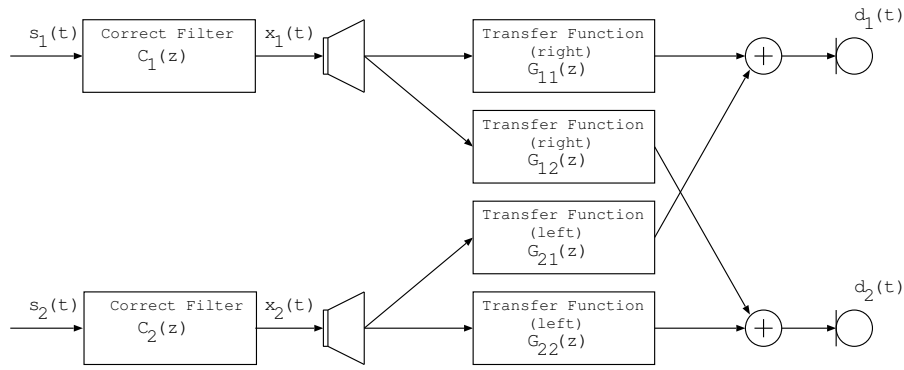


図 4.1 多入力信号補正によるステレオ型音場再生システム

$$X_1(z) = C_1(z)S_1(z) \quad (4.1)$$

$$X_2(z) = C_2(z)S_2(z) \quad (4.2)$$

$$D_j(z) = \begin{pmatrix} G_{11}(z) & G_{21}(z) \\ G_{12}(z) & G_{22}(z) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1(z) \\ X_2(z) \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

となる。ただし

$$j = \begin{cases} 1 & \text{left} \\ 2 & \text{right} \end{cases} \quad (4.4)$$

となる。また、 $S_j(z), X_j(z), D_j(z)$ 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。

ここで、4.2.2 のクロストーク問題の解決法として、クロストークする補正フィルタの室内伝達特性、図 4.1 の $G_{12}(z)$ と $G_{21}(z)$ について、この 2 つの室内伝達特性を同じ物と考える。 $G_{12}(z)$, $G_{21}(z)$, どちらかを選択し、 $G_3(z)$ として置き換える。

所望信号と観測信号の関係式は式 (4.2) と式 (4.3) より

$$\begin{aligned} D_1(z) &= G_{11}(z)C_1(z)S_1(z) + G_3(z)C_2(z)S_2(z) \\ D_2(z) &= G_3(z)C_1(z)S_1(z) + G_{22}(z)C_2(z)S_2(z) \end{aligned} \quad (4.5)$$

となる。式 4.5 より所望信号を観測信号として得るには

$$\begin{aligned} C_1(z) &= G_{11}^{-1}(z) + G_3^{-1}(z) \\ C_2(z) &= G_3^{-1}(z) + G_{22}^{-1}(z) \end{aligned} \quad (4.6)$$

4.3 ステレオ型の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。

4.3.2 室内伝達特性の逆特性算出

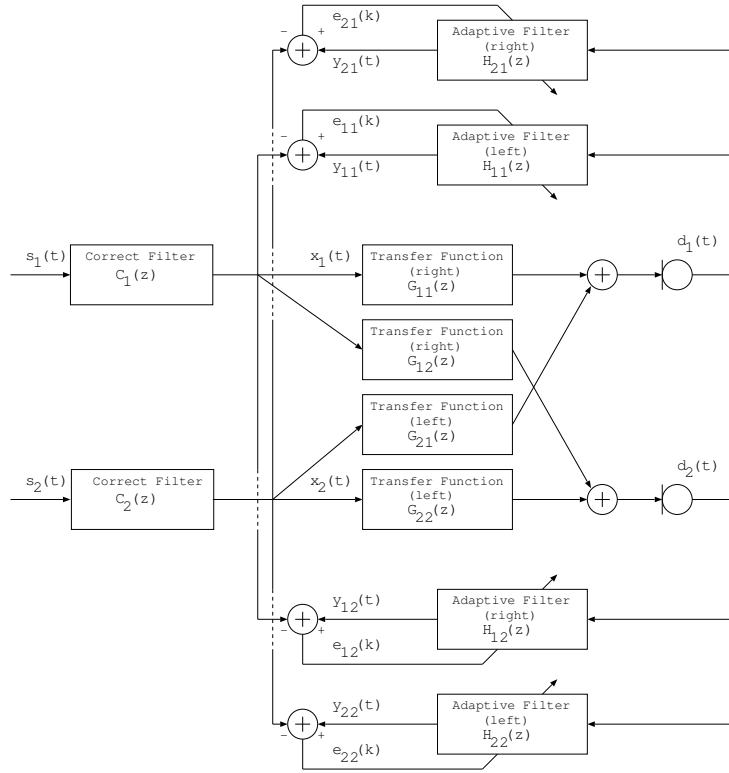


図 4.2 室内伝達特性の逆特性算出のためのブロック図

図 4.2 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。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

$$e_{ij}(t) = y_{ij}(t) - x_j(t) \quad (4.7)$$

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

$$h_{ij}(t+1) = h_{ij}(t) + \alpha \frac{d_{ij}(t)}{\|d_{ij}(t)\|^2} e_{ij}(t) \quad (4.8)$$

で更新する。ここで、 $d_{ij}(t), h_{ij}(t)$ 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、 α はステップゲイン

4.3 ステレオ型の多入力信号補正システム

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．

4.3.3 補正フィルタのパラメータ更新

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

$$c_{ij} = rc_{ij}(t) + (1 - r)h_{ij}(t + 1) \quad (4.9)$$

で求める．式 (4.9) では、修正率 $r(0 \leq r \leq 1)$ により式 (4.8) 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値を

$$\begin{aligned} c_1(t + 1) &= \frac{c_{11}(t + 1) + c_{21}(t + 1)}{2} \\ c_2(t + 1) &= \frac{c_{12}(t + 1) + c_{22}(t + 1)}{2} \end{aligned} \quad (4.10)$$

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

$$h_{ij}(t + 1) = h_{ij}(t) + \alpha \frac{d_{ij}(t)}{\|d_{ij}(t)\|^2} e_{ij}(t) \quad (4.11)$$

3. 修正量の算出

$$c_{ij} = rc_{ij}(t) + (1 - r)h_{ij}(t + 1) \quad (4.12)$$

4.4 まとめ

4. 補正フィルタパラメータの更新

$$\begin{aligned}c_1(t+1) &= \frac{c_{11}(t+1) + c_{21}(t+1)}{2} \\c_2(t+1) &= \frac{c_{12}(t+1) + c_{22}(t+1)}{2}\end{aligned}\tag{4.13}$$

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．

4.4 まとめ

本章では，多入力信号補正によるステレオ型音場再生システムについて述べた．このシステムの補正フィルタパラメータ更新の際用いられている2つのパラメータ，ステップゲインと修正率によって，更新に影響を与えている事が分かる．そこで，この2つのパラメータについて検討を行う必要があると考える．

第 5 章

多入力信号補正システムにおける最適パラメータの検討

5.1 まえがき

多入力信号補正におけるステレオ型音場再生システムは、補正フィルタのパラメータの更新の際、適応フィルタの修正量を制御するステップゲインと、適応フィルタによって求められた値を制御する修正率によって、システムの性能を決定している。

本章では、このステップゲイン、修正率という 2 つのパラメータについて検討を行う。

5.2 ステップゲインと修正率

4 章で述べたステレオ型音場再生システムの補正フィルタパラメータ更新過程において、学習同定法による適応フィルタのパラメータ更新式 (5.1) に用いられているステップゲイン α はパラメータの修正の大きさを制御する。

$$h_{ij}(t+1) = h_{ij}(t) + \alpha \frac{d_{ij}(t)}{\|d_{ij}(t)\|^2} e_{ij}(t) \quad (5.1)$$

また、修正量の算出式 (5.2) に用いられている修正率 r は、式 (5.1) で得られたパラメータをどの程度適応させるかを示している。

$$c_{ij} = r c_{ij}(t) + (1 - r) h_{ij}(t+1) \quad (5.2)$$

このことから、ステップゲイン α 、修正率 r が、システムの性能に影響を与えていることがわかった。

5.3 最適パラメータの検討

次に示す流れで、最適パラメータの検討を行う。

5.3.1 検討の流れ

1. 計算機シミュレーションによる評価量の算出

以下に計算機シミュレーションの条件を示す。 s_1 は右側所望信号として図 5.1 に示される標本化周波数 10kHz, s_2 は左側所望信号として図 5.2 に示される標本化周波数 10kHz の音声を与える。適応フィルタのインパルス応答長 $N = 256$, 室内におけるスピーカからの受聴者の左右への伝達特性のインパルス応答長 $L = 124$ とする。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。収束特性の評価量 (ERLE: Echo Return Loss Enhancement) としては

$$\text{ERLE} = 10 \cdot \log_{10} \frac{E[s_j^2(t)]}{E[\{s_j(t) - d_j(t)\}^2]} \quad (5.3)$$

を用いた。ここで、 $E[\cdot]$ は期待値を表す。

2. 各パラメータにおける評価量の時間平均値の算出

図 5.3 は、ある α , r における評価量である。この評価量の時間平均値を算出する。評価量は、左耳、右耳、2つの評価量を算出できる。したがって、評価量の時間平均値も、左耳、右耳、2つ場合の値を算出する。

3. 1 と 2 の作業を、 α , r の範囲分繰り返す。

4. 左右耳における評価量の時間平均値

3 で求めた左耳、右耳の評価量の時間平均値の平均をとり、それを左右耳における評価量の時間平均値とする。

5. 最適パラメータの算出

4 で求めた左耳、右耳、左右耳それぞれの評価量の時間平均値の最大値を求め、その時の α , r をそれぞれの場合に対する最適パラメータとする。

5.3 最適パラメータの検討

	ステップゲイン： α	修正率： r
右耳	0.075	0.90
左耳	0.020	0.95
左右耳	0.084	0.99

表 5.1 最適パラメータ

5.3.2 シミュレーション結果

図 5.5, 図 5.4, 図 5.6 は, 左耳, 右耳, 左右耳それぞれの評価量の時間平均値である. 表 5.1 は, 左耳, 右耳, 左右耳それぞれの評価量の時間平均の最大値を示す最適パラメータである.

3つの場合における最適パラメータを算出できた. 各最適パラメータを用いて, 実際に計算機シミュレーションを行い, 3つの場合における最適パラメータによる評価量を算出した.

図 5.7, 図 5.8, 図 5.9 は, 右耳, 左耳, 左右耳の最適パラメータにおける評価量である. この結果をみると, 3つの場合いずれにおいても, 左右比のバランスが悪く, システムに良い結果であるとはいえないということが分かった. そこで, この左右のバランスをとるようなパラメータが必要であると考えることができる.

5.4 まとめ

本章では，4章で述べた多入力信号補正システムにおいて最適パラメータの検討を行った．右耳，左耳，左右耳という3つの場合における評価量の時間平均の最大値を示す最適パラメータを算出することができた．しかし，実際にそのパラメータを用いて計算機シミュレーションを行った結果，どの場合においても，評価量の左右比のバランスが悪く，システムについて良い結果だとはいえないことがわかった．また，その左右のバランスをとるようなパラメータがこのシステムには必要であるということが分かった．

5.4 まとめ

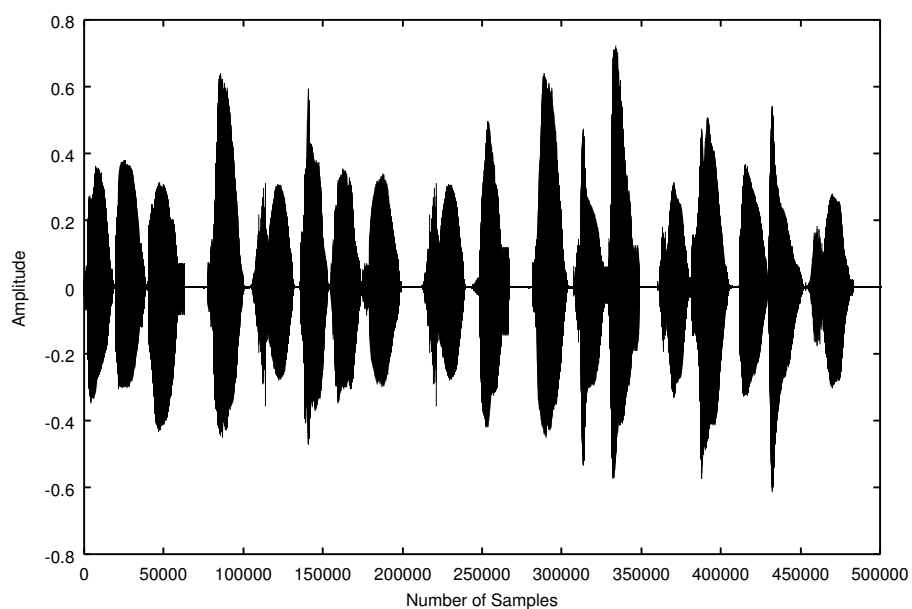


図 5.1 右側所望信号

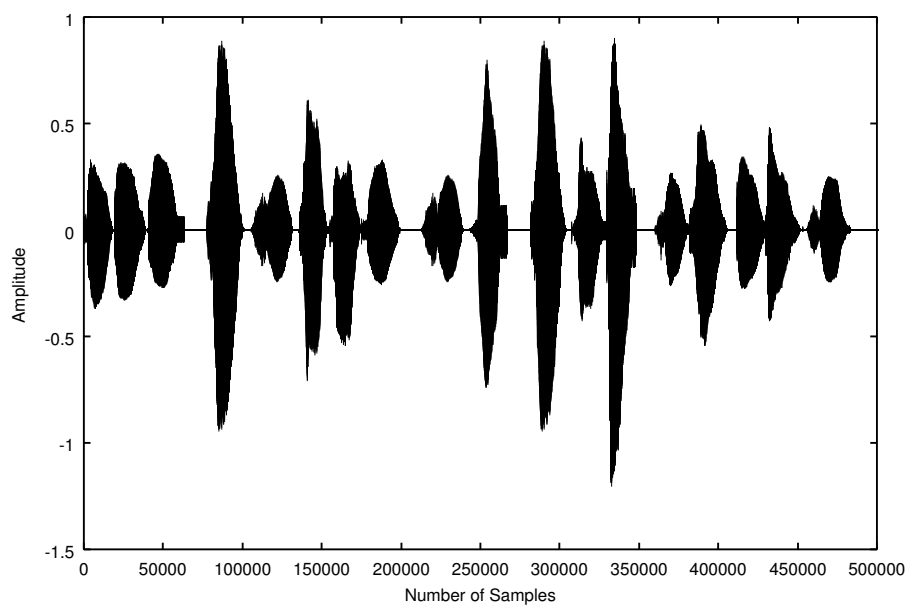


図 5.2 左側所望信号

5.4 まとめ

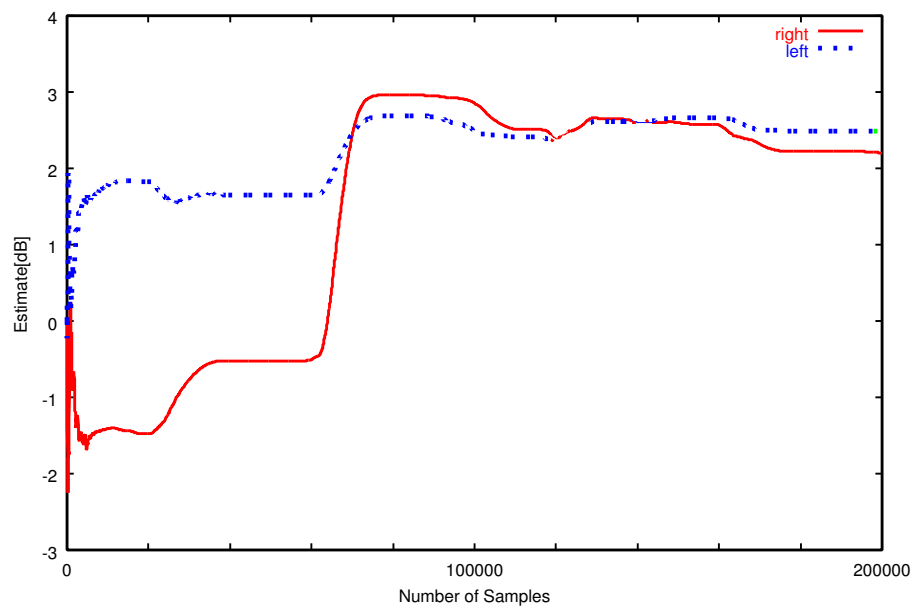


図 5.3 ある α , r における評価量

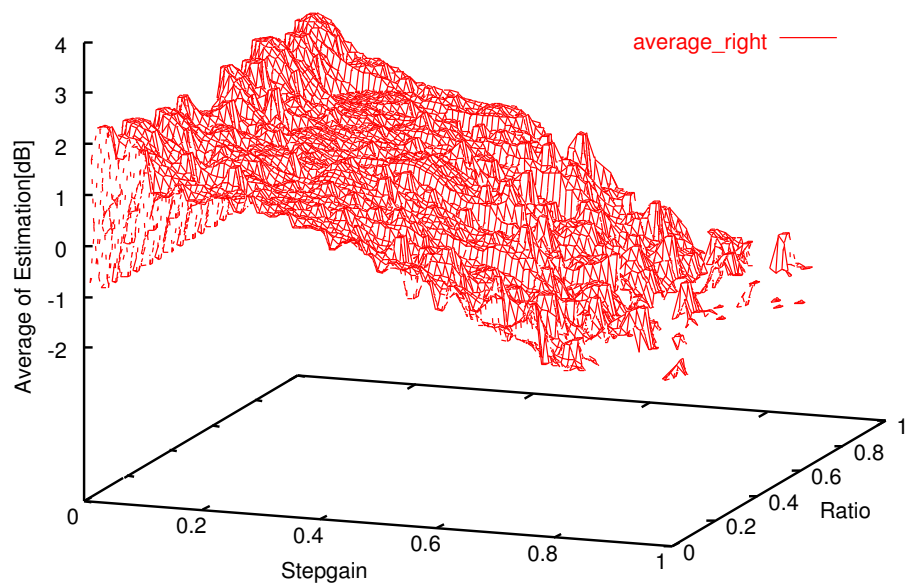


図 5.4 評価量の時間平均値 (右耳)

5.4 まとめ

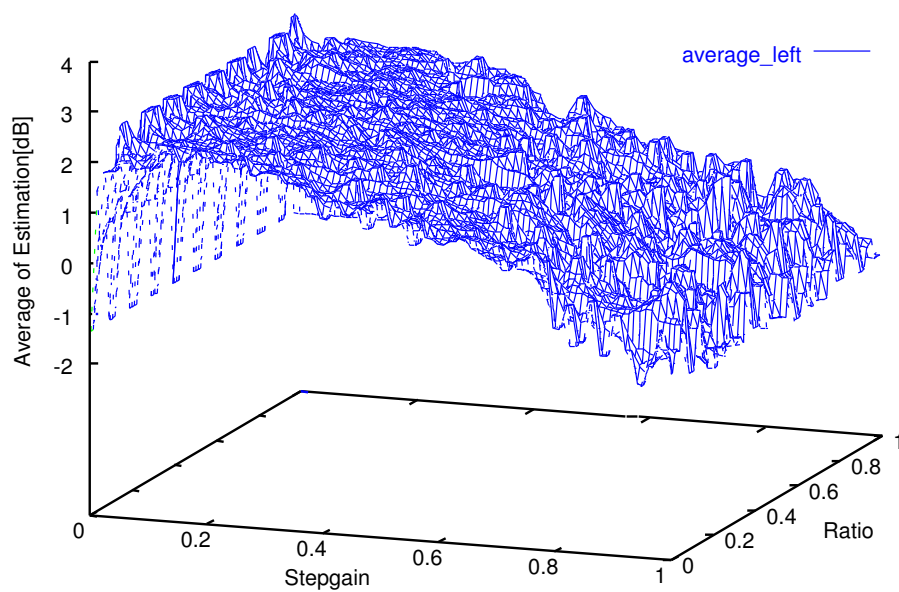


図 5.5 評価量の時間平均値 (左耳)

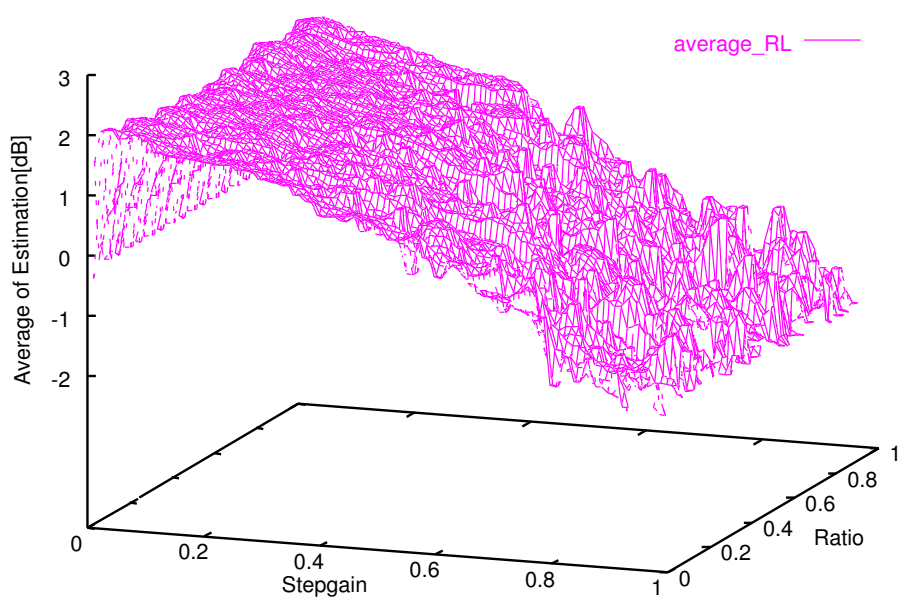


図 5.6 評価量の時間平均値 (左右耳)

5.4 まとめ

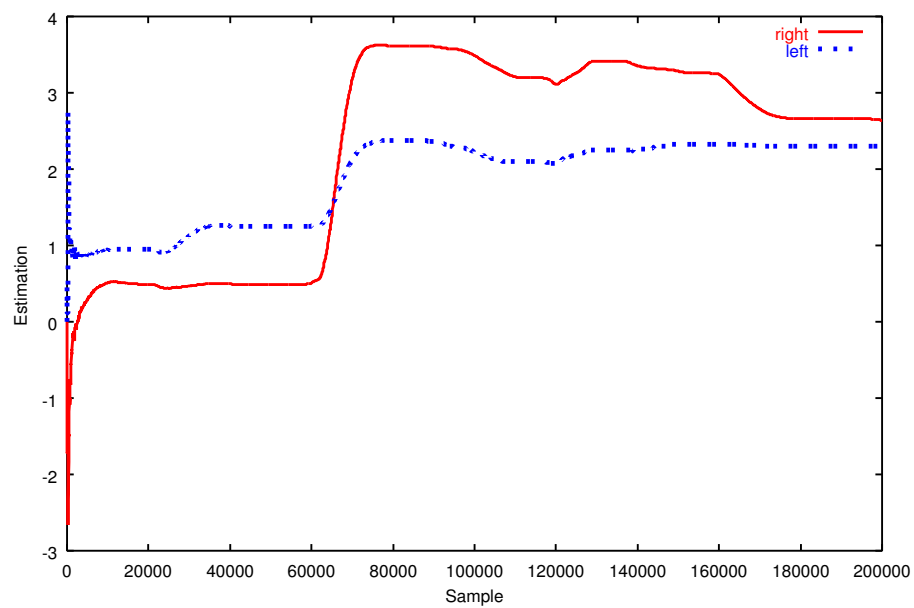


図 5.7 右耳最適パラメータにおける評価量

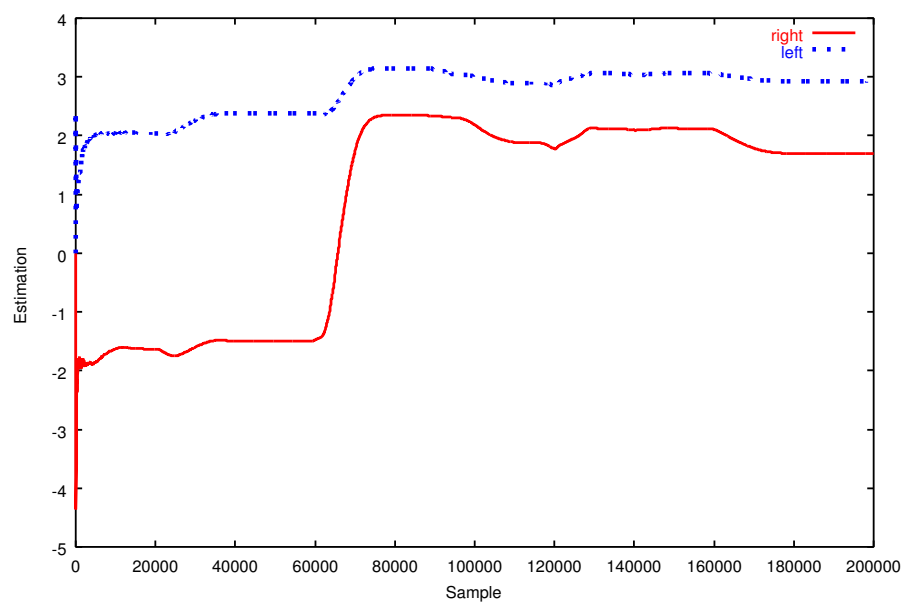


図 5.8 左耳最適パラメータにおける評価量

5.4 まとめ

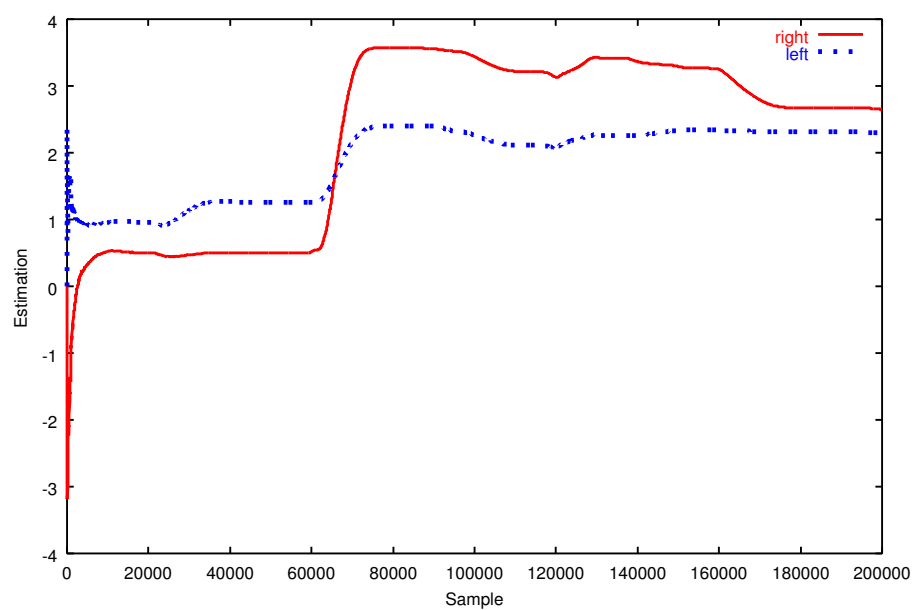


図 5.9 左右耳最適パラメータにおける評価量

第 6 章

結論

多入力信号補正によるステレオ型音場再生システムの性能を決定する 2 つのパラメータ, ステップゲインと修正率に対して検討を行った.

結果, 右耳, 左耳, 左右耳という 3 つの場合における評価量の時間平均が最大をとる最適パラメータを算出することができた.

6.1 今後の課題

本研究により, 3 つの場合における最適パラメータを算出することができた. しかし, どのパラメータも評価量の左右比のバランスが悪く, システムについて良いパラメータであるとはいえない. そこで, 左右比のバランスをとるようなパラメータが必要となってくる. 今回の検討では, このパラメータについては検討できなかった. したがって, このパラメータについて検討する必要がある.

謝辞

高知工科大学 情報システム工学科 福本 昌弘助教授には，本研究を行うにあたり，御指導いただいたことに深く感謝致します。また，本論文の審議をしていただいた岡田 守教授，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，高知工科大学大学院 情報システム工学コース 浜崎 真二氏には，本研究についての御助言をいただいたことに深く感謝致します。

また，木村研究室 横川 晃康氏，坂本研究室 中山 靖之氏には，共に研究生活を励まし合いながら今日までこられた事に深く感謝致します。

最後に，本研究を行う際に日頃から支援頂いた福本研究室の皆さんに感謝致します。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.