平成 15 年度

学士学位論文

特性の異なるスピーカの音質を再現する 信号補正法

Signal correction method for reproduces tone quality of speaker with defferent characteristic.

1040296 高野 容輔

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

特性の異なるスピーカの音質を再現する

信号補正法

高野 容輔

理想的な音質で音楽を再生しようとする場合,それに適したスピーカを使用する必要があ る.しかし,一般に普及しているスピーカでは,理想的な音質での再生に適さない場合があ る.また,スピーカは,一つ一つ異なる伝達特性を持っており,同じものは存在しない.

そこで,任意のスピーカで,理想的な音質での再生に適したスピーカを再現することにより,一般に普及しているスピーカで理想的な音質での楽音再生を目指す.

本研究では、観測信号を所望信号に近付けるようにディジタルフィルタのパラメータを自動的に更新する学習機能を持った適応フィルタを構成することにより、任意のスピーカで所望のスピーカの伝達特性を再現する方法を提案する.また、計算機シミュレーションを行い、 その有効性を検証する.

キーワード 適応信号処理, 適応フィルタ, ディジタルフィルタ

Abstract

Signal correction method for reproduces tone quality of speaker with defferent characteristic.

Yousuke TAKANO

When music is reproduced by ideal tone quality, it is necessary to use a suitable speaker. However, the speaker widespread in general might be unsuitable to the reproduction by ideal tone quality. Moreover, the speaker has a different transmission characteristic, and the same one doesn't exist. Suitable speaker for reproduction by ideal tone quality is reproduced by arbitrary speaker. and aims at the tone reproduction by ideal tone quality with the speaker widespread in general.

This research, it proposes the method of reproducing the transmission characteristic of the speaker of the desire with an arbitrary speaker by composing the adaptive filter with learning function to which parameter of digital filter is automatically updated to bring observation signal close to desire signal. Furthermore, this signal processing system by this method is simulated by computer.

key words Adaptive Signal Processing, Adaptive Filter, Digital Filter

目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景と目的	1
1.2	本論文の概要..................................	1
第2章	ディジタル信号処理	3
2.1	まえがき	3
2.2	ディジタルフィルタ	3
	2.2.1 FIR フィルタ	4
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 LMS アルゴリズム	8
	2.3.4 学習同定法	9
	2.3.5 計算機シミュレーション	10
第3章	音響装置	15
3.1	まえがき	15
3.2	スピーカの分類	15
3.3	動電形直接放射スピーカ	16
3.4	スピーカが観測信号に与える影響	17
3.5	計算機シミュレーション	18
	3.5.1 シミュレーション条件	18
	3.5.2 シミュレーション結果	20

第4章 特性の異なるスピーカの音質を再現する信号補正法

 $\mathbf{22}$

4.1	まえがき	22
4.2	特性の異なるスピーカの音質を再現する信号補正システム	23
4.3	計算機シミュレーション	24
	4.3.1 シミュレーション条件	24
	4.3.2 シミュレーション結果	27
4.4	保持パラメータによる適応フィルタの再構成	29
4.5	計算機シミュレーション	29
	4.5.1 シミュレーション条件	29
	4.5.2 シミュレーション結果	30
第5章	結論	32
5.1	結論	32
5.2	今後の課題	32
謝辞		33
参考文献	Ŕ	34

図目次

2.1	FIR ディジタルフィルタ	4
2.2	適応フィルタを用いたブロック図	6
2.3	入力信号	12
2.4	未知系パラメータ	12
2.5	未知系出力と LMS アルゴリズムによる推定信号	13
2.6	未知系出力と学習同定法による推定信号	13
2.7	評価量に対する収束特性..............................	14
3.1	入力信号	19
3.2	インパルス応答1..................................	19
3.3	インパルス応答2.................................	19
3.4	インパルス応答3	20
3.5	インパルス応答4	20
3.6	インパルス応答5	20
3.7	評価量に対する収束特性..............................	21
4.1	信号処理システム	23
4.2	入力信号	25
4.3	Y(t)のパラメータ (1[kHz])	25
4.4	E(t)のパラメータ (1[kHz])	25
4.5	Y(t)のパラメータ (2[kHz])	26
4.6	E(t)のパラメータ (2[kHz])	26
4.7	Y(t)のパラメータ (1+2[kHz])	26
4.8	E(t)のパラメータ (1+2[kHz])	26

4.9	Y(t) のパラメータ (2+4+5[kHz])	26
4.10	E(t) のパラメータ (2+4+5[kHz])	26
4.11	所望信号と観測信号	28
4.12	評価量に対する収束特性.............................	28
4.13	保持パラメータ1	30
4.14	保持パラメータ2.................................	30
4.15	保持パラメータ3	30
4.16	保持パラメータ4.................................	30
4.17	所望信号と観測信号.................................	31
4.18	評価量に対する収束特性..............................	31



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	8

第1章

序論

1.1 本研究の背景と目的

理想的な音質で音楽を再生しようとする場合,それに適したスピーカを使用する必要があ る.たとえば,高い周波数成分を多く含む音楽を再生する場合には,高周波域まで忠実に再 生可能なスピーカを使用する必要がある.また,低い周波数を多く含む音楽の再生には,低 周波域まで忠実に再生することができるスピーカを用いる必要がある.しかし,このような スピーカは,高価な場合やサイズが大きく設置が困難な場合などの問題がある.また,一般 に普及しているスピーカでは,理想的な音質での再生に適さない場合がある.

そこで,任意のスピーカで,理想的な音質での再生に適したスピーカを再現することにより,一般に普及しているスピーカで理想的な音質での楽音再生を実現する方法を考える.しかし,スピーカは一つ一つが異なる伝達特性を持っており,同じものは存在しない.また,入力信号に含まれる周波数成分によって伝達特性が変化する場合がある.

本研究では,観測信号を所望信号に近付けるようにディジタルフィルタのパラメータを自動的に更新する学習機能を持った適応フィルタを構成することにより,任意のスピーカで所望のスピーカの伝達特性を再現する方法を提案する.また,計算機シミュレーションを行い, その有効性を検証する.

1.2 本論文の概要

本節では、本論文の概要について述べる.

第2章では、本研究で使用するディジタル信号処理の基礎技術である、ディジタルフィル タと適応信号処理について述べる.また、計算機によるシミュレーションを行い、適応アル ゴリズムの比較を行うとともに、本研究で使用する適応アルゴリズムを検討する.

第3章では、スピーカの構成や特徴、音波の発生原理について述べるとともに、スピーカ が観測信号に与える影響について説明する.また、伝達特性が時間とともに変化するシステ ムの同定に適した適応アルゴリズムを計算機シミュレーションにより明らかにする.

第4章では、特性の異なるスピーカの音質を再現する信号補正法についての説明を行い、 計算機シミュレーションを行うことにより検証を行うとともに、問題点を明らかにする.また、問題点に対応する手法を提案し、検証を行う.

第5章では、計算機によるシミュレーション結果をもとに本手法の評価を行う.

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は、連続的な値を持つアナログ信号を離散的な値を持つディジタル信 号に変換することにより、計算機上でデータの処理を行う技術である.近年、計算機技術の 進歩と共にディジタル信号処理技術も大きく進歩し、音響の分野のみならず多くの分野で利 用され、その重要性は大きなものになっている.

本研究の基幹技術であるディジタルフィルタやシステム同定もディジタル信号処理の一分 野である.

本章では、ディジタルフィルタについて述べた後、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持つ適応フィルタについての説明を行う.

2.2 ディジタルフィルタ

フィルタとは、何らかの処理が加わった信号を処理することにより、必要な信号を得るために使用するデバイスである.

ディジタルフィルタは、有限長のインパルス応答を持つ FIR(Finite Impulse Response: 有限長インパルス応答) フィルタと無限長のインパルス応答を持つ IIR(Infinite Impulse Response:無限長インパルス応答) フィルタに大別することができる.

本節では、本研究で使用するフィルタが有限長であることから、FIR フィルタの説明を 行う.

2.2.1 FIR フィルタ

FIR フィルタは、インパルス応答の継続時間が有限のフィルタである。従って、入力信号が0になれば、インパルス応答の継続時間が過ぎた時に出力も0になる。FIR フィルタには、直接形、転置形、縦続形、格子形等の構成方法がある。この中で最も良く使われているものが、直接形の構成である。図 2.1 に直接形 FIR フィルタのブロック図を示す。



図 2.1 FIR ディジタルフィルタ

x(t) は入力信号, y(t) は出力信号, z^{-1} は単位遅延演算子を表す.

直接形 FIR フィルタでは,各タップにおける入力信号と係数 w(n) の積の和が,結果として出力されている.

このフィルタの入出力関係は,

$$y(t) = \sum_{n=0}^{N} w(n) \cdot x(t-n)$$
(2.1)

で与えられる. ここで,係数 w(n) はインパルス応答である.

FIR フィルタは, タップ付き遅延線フィルタ, あるいはトランスバーサルフィルタとも呼ばれる.

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用いることにより、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定するパラメータが変化しない場合は、 時間の経過にかかわらず処理を行うことができる.しかし、観測信号の統計的性質が時間と 共に変化する場合は、パラメータが固定のフィルタリングでは対応することができない.そ こで、処理に使用するフィルタのパラメータを、時間と共に変化する信号の特性に応じて能 動的に更新する機能が必要となる.

このような、システムの特性を必要に応じて変化させる機能を有する信号処理を適応信号 処理と呼び、これを実現するシステムを適応フィルタと呼ぶ.

2.3.1 適応フィルタ

適応フィルタとは、自己設計する装置であると言える.調整可能なパラメータを持ち、 扱っている信号の推定した統計的性質に基づき、そのパラメータ値が自動的に更新される.

ここで, 適応フィルタの一例として, FIR 形のディジタルフィルタで構成された未知の システムの特性を決定しているパラメータ (インパルス応答)を推定するシステムを考える. 図 2.2 にシステムのブロック図を示す.ここで, 図 2.2 の変数についての説明を表 2.1 に 示す.

このとき,未知システムの入出力関係は,

$$d(t) = \sum_{i=0}^{N-1} w(i)x(t-i)$$
(2.2)

であり, 適応フィルタの入出力関係は,

$$y(t) = \sum_{i=0}^{N-1} h(i)x(t-i)$$
(2.3)

と表すことができる.また,出力誤差は

$$e(t) = d(t) - y(t)$$
 (2.4)

と表すことができる.

問題は, 推定系のパラメータである h(i) により未知系のパラメータである w(i) を推定す ることである. そのためには, 推定のための何らかの基準 (評価量) を設定しなければなら ない. 最も効果的な方法は, 未知系パラメータ w(i) と推定系パラメータ h(i) の距離を評価 量とすることだが, w(i) は未知であるためこれらの情報を評価量に利用することはできな い. そこで, 式 2.4 で定義された出力誤差 e(t) を評価量とし, これを最小にする方法が考え られる.



図 2.2 適応フィルタを用いたブロック図

表 2.1 凶 2.2 における変数の	り記明
-----------------------	-----

t	時間
N	インパルス応答長
x(t)	時間 t における入力信号
w_N	未知システムのフィルタ係数 $(w = [w(0), w(1), \cdots, w(N-1)]^T)$
h_N	適応フィルタのフィルタ係数 $(h = [h(0), h(1), \cdots, h(N-1)]^T)$
y(t)	未知系の出力信号 (所望信号)
d(t)	推定系の出力信号
e(t)	出力誤差

[]^T は転置を表す.

2.3.2 適応アルゴリズム

各時間で観測される入力信号と観測信号の出力誤差を用い,パラメータを更新することに より最適解を得る計算手法を適応アルゴリズムと言う.

式 2.4 で定義された出力誤差信号 e(t) の 2 乗平均値を評価量として,これを最小にする h を考える.

図 2.2 において,入力信号 x(t) に対する未知系の出力 y(t) は,式 2.5 のように表された.

$$y(t) = \sum_{i=0}^{N-1} w(i)x(t-i)$$
(2.5)

式 2.5 で表される y(t) は,

$$y(t) = h_N^T x_N(t) \tag{2.6}$$

と表すことができる. ただし, h_N , x_N は,

$$h_N = [h(0), h(1), \cdots, h(N-1)]^T$$
(2.7)

$$x_N = [x(0), x(1), \cdots, x(N-1)]^T$$
(2.8)

で、定義される.

ここで,出力誤差の2乗平均値をJとして,

$$J = E[e^{2}(t)]$$

= $E[(d(t) - y(t))^{2}]$
= $E[(d(t) - h_{N}^{T}x_{N}(t))^{2}]$ (2.9)

とする. ただし, *E*[·] は期待値を表す.

図 2.2 では,未知系の出力 y(t) と推定系の出力 d(t) 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.

以下に, 適応アルゴリズムの基本的なパラメータ更新の手順を示す.

1. 時間 t = 0 として、パラメータ h_N の初期値を設定する。

(通常 h_N の初期値は $h_N = 0$)

2. 時間 t における未知系の出力 y(t) と出力誤差 e(t) を計算する.

3. $x_N(t)$ と e(t) を用い,各種適応アルゴリズムにより修正量 $\Delta h_N(t)$ を計算し,式 2.10 によりパラメータ $h_N(t)$ を修正して $h_N(t+1)$ を得る.

$$h_N(t+1) = h_N(t) + \alpha \cdot \Delta h_N(t) \tag{2.10}$$

ここで, αはパラメータの修正率を制御する量であるステップゲインを表す.

4. 上記 2., 3. の操作を繰り返す.

これらの更新手順のうち,過程 3. の具体的な修正量 Δh_N の算出方法が,各種適応アルゴリズムを特徴づける部分といえる.

表 2.2 に代表的な適応アルゴリズムの特徴を示す.

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

表 2.2 代表的な適応アルゴリズムの特徴比較

2.3.3 LMS アルゴリズム

LMS アルゴリズムは, 1960年に Widrow と Hoff によって開発された方式である. この アルゴリズムは,広い意味で,2乗平均誤差を最急降下法に基づいて最小にする一方式であ るといえる.

時間 t における入力信号の状態を表すベクトル x(t) を,

$$x(t) = [x(t), x(t-1), x(t-2), \cdots, x(t-N)]^T$$
(2.11)

2.3 適応信号処理

とおくと, 時点 t の誤差 e(t) は,

$$e(t) = d(t) - h(t)^{T} x(t)$$
(2.12)

と,表現できる.

LMS アルゴリズムのパラメータ修正量は,

$$w_N(k+1) = w_N(k) + \alpha * e(k)x_N(k)$$
(2.13)

で与えられる.

*α*はステップゲインを表す.

2.3.4 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.学習同定法は、別名 NLMS (Normalized-LMS) アルゴリズムとも呼ばれているように、LMS アルゴリズムの係数修正 項をフィルタの状態ベクトルノルムで正規化した形になっている.

ある時間 t において, 推定系の出力 d(t) が未知系の出力 y(t) に等しいと考えると,

$$y(t) = h_N^T x_N(t) \tag{2.14}$$

と表すことができる.

しかし,適応フィルタのパラメータ h_N は w_N に等しいとは限らない. $h_N = w_N$ を満た すためには,すべての入力信号に対し,式 2.14 が成立しなければならない. そこで,式 2.14 を満たす解集合の代表ベクトルを $h_N(t)$ とする. この開集合は,式 2.14 より,入力ベクト $\mu x_N(t)$ に直交していると言える. 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 に近い点であると言える.

従って、 $h_N(t)$ 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 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、以上のことにより、

$$h_N(t) = h_N(t) + h_N(t+1) - h_N(t)$$

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

$$\cdot \frac{h_N(t+1) - h_N(t)}{||h_N(t+1) - h_N(t)||}$$
(2.15)

となる. ただし, ||・||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. ここで,

$$\frac{h_N(t+1) - h_N(t)}{||h_N(t+1) - h_N(t)||} = \frac{x_N(t)}{||x_N(t)||}$$
(2.16)

$$(w_N - h_N(t))^T x_N(t) = d(t) - y(t) = e(t)$$
(2.17)

が成立するため,式2.15は

$$w_N(k+1) = w_N(k) + \frac{x_N(k)}{||x_N(k)||^2} e(k)$$
(2.18)

のように変形できる. 学習同定法は,式 2.18の修正ベクトルにステップゲインを掛け

$$w_N(k+1) = w_N(k) + \alpha \frac{x_N(k)}{||x_N(k)||^2} e(k)$$
(2.19)

で与えられる.

2.3.5 計算機シミュレーション

本研究で使用する適応アルゴリズムの決定を目的とし,FIR型で構成された未知系システ ムのパラメータ (インパルス応答)を推定する適応フィルタを構成し,LMS アルゴリズムと 学習同定法の比較を以下の条件で行う.

• 入力信号 (図 2.3 参照):

 $-1 \le r(t) \le +1$

• パラメータ (図 2.4 参照):

$$h(i) = r(i)e^{-0.050i}$$

• 評価量: ERLE(Echo Return Loss Enhancement) $ERLE = 10 \log_{10} \frac{E[y^2(t)]}{E[e^2(t)]} [dB]$

ただし, r(·) は乱数を表す.

図 2.7 に各手法を用いた際の評価量に対する収束特性を示す.また,図 2.5 と図 2.6 は各 手法を用いた際の所望信号と観測信号を表す.

シミュレーションの結果,どちらの適応アルゴリズムを使用した場合でも,推定系の出力 が未知系の出力に近づく様子が,図 2.5 と図 2.6 により観測された.このとき,図 2.7 から, 学習同定法の方が LMS アルゴリズムよりも良い収束特性が得られることがわかった.

したがって、本研究では学習同定方を用いたシステムを構成する.



図 2.3 入力信号



図 2.4 未知系パラメータ







図 2.6 未知系出力と学習同定法による推定信号

2.3 適応信号処理



図 2.7 評価量に対する収束特性

第3章

音響装置

3.1 まえがき

現在,楽音の再生には電気音響変換器を用いたスピーカが用いられている.

本章では、スピーカの構成や特徴、音波の発生原理について述べるとともに、スピーカが 観測信号に与える影響について説明する.また、伝達特性が時間とともに変化するシステム の同定に適した適応アルゴリズムを計算機シミュレーションにより明らかにする.

3.2 スピーカの分類

音響機器の多くは電気と音の変換に機械振動の助けを借りている.電気エネルギーで機械 振動を起こし、これによって音波を発生させるものがスピーカである.

スピーカは、電気から音響への変換方式と音響の放射方式によって分類することができる。 電気から音響への変換方式には、動電形、電磁形、静電形がある。

動電形

磁界と電流による電磁エネルギーを利用する方式で、ダイナミックスピーカとして最も 広く用いられている。強くて均一な磁束に直交して、振動板に直結したコイルを置き、 コイルに音声電流を流すと振動板にその電流にしたがった振動が起こる。

• 電磁形

音響振動電圧が磁界の強さに変換され、磁性材料で作られた振動場案を吸引して機械振動が生ずる.

静電形

振動板と固定電極の間に電圧を加えたときに,両極間に働く静電気力によって変換を行 う方式である.

音響の放射方式で分類した場合,直接放射スピーカとホーンスピーカに分けられる.

● 直接放射スピーカ

中心部の駆動点からみた面積率を大きくするため円錐形の振動板を用いる.

ホーンスピーカ

小さな振動部から低音特性と効率とを改善するためにホーン系の道波菅を通して空間に 音響を放射する.

3.3 動電形直接放射スピーカ

現在一般に普及しているスピーカのほとんどがこの動電形直接放射スピーカ (ダイナミックスピーカ) である.

この方式のスピーカが普及している理由として,

- 低音での台振動に耐えられる
- 感度周波数特性が良い
- 電気インピーダンスが純抵抗に近い
- コーン製作技術の進歩
- 磁石鋼が進歩し大きな磁気エネルギーが得られるようになった

等があげられる.

ダイナミックスピーカは、磁石と鉄で作られた磁界の中にボイスコイルがあり、これに振 動板が取り付けられている.ボイスコイルに電流の変化を与えることにより電流と磁界の直 角方向に力が発生し、振動板に伝えられる.これにより、振動板前後の空気は加圧あるいは 減圧されて空気の疎密波、即ち音を発生する. 振動数の小さい低音を再生する場合,スピーカは空気をゆっくりと大きく振動させる必要 がある.そのため,振動板を可能な限り大きくし,かつ大振幅で振動するようにしなければ ならない.一方,高音域では,振幅は小さくとも高速に振動させる必要があり,振動板は可 能な限り軽くする必要がある.

っまり,低音再生の条件と高音再生の条件は相矛盾しており,一つのスピーカで全音域を 再生することはほぼ不可能といっていい.そこで,低音専用のスピーカと高音専用のスピー カを用い,さらに中音域を受け持つスピーカを加えた 3way のシステムが良く使われてい る.それでも,低音域を人間のか聴範囲である 20[Hz] まで再生しようとすると,スピーカ が 1m 近い大きさになってしまう.

3.4 スピーカが観測信号に与える影響

スピーカはそれぞれ異なる伝達特性を持っており、同じものは存在しない.これは、ス ピーカボックスや振動板の構造や材質、表面積などの違いによる影響で音が変質するためで あり、たとえ同じ種類のスピーカを用い、同じ信号を入力したとしても、全く同じ音は再生 することができない.

また,スピーカは入力信号に含まれる周波数成分によって伝達関数が変化することがあ る.スピーカは,ボイスコイルに電流の変化を与えることにより電流と磁界の直角方向に 力を発生させることにより,振動板を駆動している.ボイスコイルの変位が振動板に加わる とき,振動板は必ずしも並行移動するのではなく,波のように中心部から周辺部に変位が伝 わってゆく.このとき,エッジで反射された波との干渉で音が変化する場合がある.

音楽には様々な周波数成分が含まれており,刻々と変化している. 伝達関数の再現を適応 フィルタを用いて行う場合,時間とともに未知系のパラメータが変化するシステムの同定に 適した適応アルゴリズムを考える必要がある.

3.5 計算機シミュレーション

本研究で用いる適応アルゴリズムが,パラメータが時間とともに変化するシステムの同定 に適しているかを確認するため,FIR型で構成された時間とともにパラメータが変化する未 知系システムのパラメータ (インパルス応答)を推定する適応フィルタを構成し,以下の条 件でシミュレーションを行う.

3.5.1 シミュレーション条件

• 入力信号 (図 3.1 参照):

 $-1 \le r(t) \le +1$

- パラメータ (図 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 参照): $h(i) = r(i)e^{-0.050i}$
- 評価量: ERLE(Echo Return Loss Enhancement)

 $ERLE = 10log_{10} \frac{E[y^2(t)]}{E[e^2(t)]} [dB]$

ただし, r(·) は乱数を表す.

インパルス応答を5種類生成し、400サンプル毎に変化させる.他の適応アルゴリズムとの比較を行うため、LMS アルゴリズムを用いた場合の結果を示す.



図 3.2 インパルス応答1





3.5.2 シミュレーション結果

図 3.7 に時間とともに推定するシステムのパラメータが変化する場合の各適応アルゴリズ ムによる評価量に対する収束特性を示す.

入力信号のサンプル数が 400,800,1200,1600 のポイントでパラメータが変化している.パラメータが変化した直後は評価量に対する収束特性が劣化するものの,短時間のうちに安定する様子が観測された.

3.5 計算機シミュレーション



図 3.7 評価量に対する収束特性

第4章

特性の異なるスピーカの音質を再現 する信号補正法

4.1 まえがき

スピーカは一つ一つが異なる伝達特性を持っており,同じものは存在しない.これは,ス ピーカボックスの構造,振動板の材質や面積の違いによる影響であり,たとえ同じ種類のス ピーカを用い,同じ信号を入力したとしても,全く同じ音は再生することができない.ま た,入力信号に含まれる周波数成分によって伝達特性が変化する場合がある.任意のスピー カで,理想的な音質での再生に適したスピーカを再現することにより,一般に普及している スピーカで理想的な音質での楽音再生を実現するためには,任意のスピーカで所望のスピー カの伝達特性を再現し,伝達特性の変化にも対応する必要がある.

本章では,観測信号を所望信号に近付けるようにディジタルフィルタのパラメータを自動 的に更新する学習機能を持った適応フィルタを構成することにより,任意のスピーカで所望 のスピーカの伝達特性を再現する方法を提案する.また,計算機シミュレーションを行い, その有効性を検証する.

4.2 特性の異なるスピーカの音質を再現する信号補正シス テム

図 4.1 に、特性の異なるスピーカの音質を再現することを目的とした。信号処理システム の構成を示す。



図 4.1 信号処理システム

図中のD(t)は適応フィルタ,E(t)は任意のスピーカの伝達特性,Y(t)は所望のスピーカ の伝達特性を表す.また,x(t)は入力信号,y(t)は観測信号,e(t)は所望信号,z(t)は出力 誤差を表す.

図に示した適応フィルタは,観測信号を所望信号に近付けるようにディジタルフィルタの パラメータを自動的に更新する学習機能を持っている.観測信号と所望信号の誤差を算出 し,その誤差が最小になるようにディジタルフィルタのパラメータを更新する.

本手法では、入力信号 x(t) に任意のスピーカの伝達関数 E(t) を適応した信号 e(t) を所 望信号とし、観測信号 y(t) との出力誤差 z(t) = e(t) - y(t) を用いて適応フィルタのパラ メータを更新する.

4.3 計算機シミュレーション

ここでは,図 4.1 に示した特性の異なるスピーカの音質を再現する信号処理システムを, 計算機上でシミュレーションする.

4.3.1 シミュレーション条件

入力信号には,標本化周波数 44.1[kHz] でサンプリングした異なる周波数成分を含 む正弦波の合成波とする.また,処理中に伝達特性が変化した場合を想定し,400 サ ンプル間隔で含まれている周波数成分を変化させる.1[kHz],2[kHz],1[kHz]+2[kHz], 2[kHz]+4[kHz]+5[kHz] の正弦波を作成し,400 サンプルずつ繋ぎ合わせた波形データを入 力信号とする.

スピーカの伝達関数 *E*(*t*), *Y*(*t*) のパラメータは,入力信号に含まれる正弦波をそれぞれ のスピーカで実際に再生し,観測した信号と入力信号から推定したインパルス応答とする. また,スピーカの伝達関数 *E*(*t*), *Y*(*t*) と適応フィルタのインパルス応答長を 100 とする. 収束特性の評価量として, ERLE(Echo Return Loss Enhancement)

$$ERLE = 10\log_{10} \frac{E[z^2(t)]}{E[e^2(t)]} [dB]$$
(4.1)

を用いる.

e(t) は所望信号, z(t) は観測信号と所望信号の差である出力誤差を表す.

また, *E*[·] は期待値を表す.

ERLE は所望信号と誤差信号の2乗平均値を dB 表現した値であり、出力誤差の減少に ともない収束する.





4.3.2 シミュレーション結果

図 4.3.2 に本手法を用いた際の評価量に対する収束特性を示す.また,図 4.3.2 は本手法 を用いた際の所望信号と観測信号を表す.

図 4.3.2 より, 観測信号が所望信号に近付いて行く様子が観測された.また, 図 4.3.2 より, 入力信号の変化に伴う伝達特性の変化にも追従し, 短時間の内にある程度の収束特性が 得られる様子が観測された.

適応フィルタによるパラメータ更新中に伝達特性が変化した場合,適応フィルタは変化した伝達特性に対応するようにパラメータを更新して行く.しかし,変化した特性に対応する までに多少時間がかかる.この間,入力信号には伝達特性が変化する前のパラメータが作用 し,必要以上の増幅や減衰が行われる.これにより,受聴者に不快感を与える可能性がある.

そこで,適応フィルタのパラメータをあらかじめ多数保持しておき,伝達特性が変化した 場合に,変化した伝達特性に応じたパラメータを決定することにより,伝達特性の変化に対 応する方法を提案し,検証を行う.



図 4.12 評価量に対する収束特性

4.4 保持パラメータによる適応フィルタの再構成

適応フィルタによるパラメータ更新中に伝達特性が変化した場合に対応するため,適応 フィルタのパラメータをあらかじめ多数保持しておき,伝達特性が変化した場合に変化した 伝達特性に応じたパラメータを決定する方法を検証する.

ここで問題となるのが、パラメータの決定方法である.保持しているパラメータをランダ ムに使用した場合、無関係なパラメータを選択してしまうことにより、さらに収束特性が劣 化したり、適当なパラメータの選択に時間がかかり収束に時間がかかる可能性がある.

本研究では、パラメータの決定方法として、保持している各パラメータ毎に使用頻度に よる重み付を行い、パラメータ決定の基準にする方法をとる.この方法により、適当なパラ メータを選択する効率の向上が期待できる.

4.5 計算機シミュレーション

適応フィルタによるパラメータ更新中に伝達特性が変化した場合への対策として,適応 フィルタのパラメータをあらかじめ多数保持しておき,伝達特性が変化した場合に変化した 伝達特性に応じたパラメータを決定する方法を用いた信号処理システムの検証を行うため, 以下の条件で計算機シミュレーションを行う.

4.5.1 シミュレーション条件

入力信号として,図 4.2 で示される標本化周波数 44.1[kHz] でサンプリングした正弦波の 合成波を用いる.

適応フィルタのパラメータとして, 図 4.13, 図 4.14, 図 4.15, 図 4.16 をあらかじめ保持 しておき,入力信号の変化に伴う伝達特性の変化によって誤差が急激に増加した場合に, 変 化した伝達特性に応じたパラメータを決定する. ERLE をパラメータ変更を行う際の評価 量とし,評価量の最大値を算出し,評価量が最大値の 1/2 以上減少した場合に,適応フィル タをあらかじめ保持しているパラメータを用いて再構成する.



4.5.2 シミュレーション結果

図 4.5.2 に,処理中に伝達特性が変化した場合にあらかじめ保持していたパラメータを使 用して変化に対応した場合の評価量に対する収束特性を示す.また,図 4.5.2 は本手法を用 いた際の所望信号と観測信号を表す.

図 4.5.2 より、本手法を用いた方が、学習同定法によるパラメータ更新のみの場合に比べ、 より良い収束が得らることが解った.また、図 4.5.2 より、以前の補正フィルタのパラメー タによって必要以上の増幅あるいは減衰が行われていた現象が、緩和されている様子が観測 できる.しかし、パラメータが急に変わったことで、信号にひずみが発生するという問題が 発生した.



図 4.18 評価量に対する収束特性

第5章

結論

5.1 結論

本研究では、伝達特性を再現することにより、任意のスピーカで所望のスピーカを再現す る信号処理システムを提案し、計算機シミュレーションによる検証を行った.

計算機シミュレーションの結果,任意のスピーカで所望のスピーカの伝達特性を再現する ことに関しては,適応フィルタを用いて対応することができた.

また,処理中に伝達特性が変化した場合への対策は,あらかじめ保持していたパラメータ を使用することにより,学習同定法によるパラメータ更新のみの場合よりも良い収束が得ら れた.

5.2 今後の課題

処理中に伝達特性が変化した場合への対策としてパラメータ変更を行ったが、パラメータ が急に変化したため、信号にひずみが発生した.現在の収束特性を保ったまま、ひずみを解 消するシステムの開発が必要となる.また、パラメータの決定方法についても、見直しを行 う必要がある.

謝辞

本研究を行うにあたり、御指導ならびに御助言を頂いた高知工科大学情報システム工学科 の福本昌弘助教授に深く感謝致します.

また,本研究を審査してくださる島村和典教授,菊池豊助教授,情報システム工学科の先 生方に心より感謝致します.

最後に,研究,論文作成を行うにあたり御協力頂いた福本研究室の皆様に感謝します.

参考文献

- [1] 辻井重男, 適応信号処理, 昭晃堂, 1995.
- [2] サイモンヘイキン, 武部幹, 適応フィルタ入門, 現代工学社, 1994.
- [3] 三上直樹, ディジタル信号処理の基礎, CQ 出版株式会社, 1998.
- [4] 酒井英昭, 信号処理, オーム社, 1998.
- [5] 城戸健一, 基礎音響工学, コロナ社, 1995.
- [6] 三井田惇郎, 音響工学, 昭晃堂, 1995.
- [7] 西山静男,池谷和夫,山口善司,奥島基良,音響振動工学,コロナ社,1992.