平成 21 年度

学士学位論文

適応フィルタを用いた
ハウリングキャンセラ

Howling Canceller using Adaptive filter

1100358　　森田 徹

指導教員　　福本 昌弘

2010 年 3 月 1 日

高知工科大学 情報システム工学科

要 旨

適応フィルタを用いたハウリングキャンセラ

森田 徹

ハウリングを抑圧するためにノッチフィルタを用いて特定の周波数を減衰させるシステム等が提案されている．このシステムでは，超音波を用いてスピーカとマイクロフォン間の距離を推定し，そこからハウリング周波数の候補を求め，それらの周波数をノッチフィルタにより除去している．ハウリングは一つの周波数成分が増大する共振現象である．そのため，すべてのハウリング周波数を除去するためにノッチフィルタを縦続接続する．しかし，ノッチフィルタを縦続接続することにより出力音質が劣化するという問題がある．

そこで本論文では，誰にでも簡単に扱え自動でハウリング周波数を除去する適応フィルタを用いたハウリングキャンセラを提案している．このシステムでは，適応フィルタによりハウリングの原因となっているエコーを推定し，エコー除去を行うことでハウリングの抑圧を行っている．提案したシステムを用いて，計算機シミュレーションを行った結果，ハウリング抑圧が行えていることを確認した．

キーワード　ハウリングキャンセラ，FIR フィルタ，学習同定法

Abstract

Howling Canceller using Adaptive filter

Toru Morita

The system to suppress howling using the nocth filter which attenuates a specific frequency is proposed. In this system, howling frequency is estimated based on the distance measured by an ultrasonic. Then, it computes multiple frequency candidates of the howling. Those frequency removes them by notch filter. Howling is resonate occurred by increasing a specific frequency. And, to remove all howling frequencies the notch filters are cascading connected. However, output sound quality is deteriorated by passing the cascading notch filter.

In this paper, I have proposed howling canceller used an adaptive filter which can be operated easily by anyone and remove howling frequency automatically. In proposed system, the adaptive filter which estimate an echo causing the howling and remove an echo suppress howling. As a result of computer simulation, effectiveness of howling suppression can be confirmed.

key words Howling Canceller, FIR filter, NLMS Algorithm

目次

第 1 章　序論 **1**

1.1　本研究の背景と目的 1

1.2　本論文の構成 2

第 2 章　既存のハウリングキャンセラについて **3**

2.1　はじめに 3

2.2　ハウリングの原理 3

2.3　距離計測に基づくハウリングキャンセラ 4

2.3.1　ノッチフィルタを用いたハウリング周波数の除去 5

2.4　まとめ 6

第 3 章　適応フィルタを用いたハウリングキャンセラ **7**

3.1　はじめに 7

3.2　提案するシステムの構成 7

3.3　計算機シミュレーションによる評価 8

3.3.1　シミュレーション条件 9

3.3.2　シミュレーション結果 10

ステップゲインの値が 0.6 の時の結果 11

ステップゲインの値が 0.7 の時の結果 15

ステップゲインの値が 0.8 の時の結果 19

3.4　まとめ 23

第 4 章　結論 **24**

4.1　本研究のまとめ 24

4.2　今後の課題 24

目次

謝辞 **25**

参考文献 **27**

付録 A　適応信号処理 **28**

A.1　パラメータ推定問題 28

A.2　適応アルゴリズム 28

A.3　学習同定法 29

図目次

2.1 拡声システム 4
2.2 距離計測に基づくハウリングキャンセラ 5

3.1 適応フィルタを用いたハウリングキャンセラ 8
3.2 白色雑音 9
3.3 適応フィルタがない場合の拡声信号の波形 10
3.4 距離 50cm の時の SN 比 11
3.5 距離 100cm の時の SN 比 11
3.6 距離 150cm の時の SN 比 12
3.7 0.5 秒間に距離を 50cm から 100cm へ移動した時の SN 比 12
3.8 0.5 秒間に距離を 100cm から 150cm へ移動した時の SN 比 13
3.9 距離 50cm の時の適応フィルタのフィルタ係数 13
3.10 距離 100cm の時の適応フィルタのフィルタ係数 14
3.11 距離 150cm の時の適応フィルタのフィルタ係数 14
3.12 距離 50cm の時の SN 比 15
3.13 距離 100cm の時の SN 比 15
3.14 距離 150cm の時の SN 比 16
3.15 0.5 秒間に距離を 50cm から 100cm へ移動した時の SN 比 16
3.16 0.5 秒間に距離を 100cm から 150cm へ移動した時の SN 比 17
3.17 距離 50cm の時の適応フィルタのフィルタ係数 17
3.18 距離 100cm の時の適応フィルタのフィルタ係数 18
3.19 距離 150cm の時の適応フィルタのフィルタ係数 18
3.20 距離 50cm の時の SN 比 19
3.21 距離 100cm の時の SN 比 19

3.22 距離 150cm の時の SN 比 20
3.23 0.5 秒間に距離を 50cm から 100cm へ移動した時の SN 比 20
3.24 0.5 秒間に距離を 100cm から 150cm へ移動した時の SN 比 21
3.25 距離 50cm の時の適応フィルタのフィルタ係数 21
3.26 距離 100cm の時の適応フィルタのフィルタ係数 22
3.27 距離 150cm の時の適応フィルタのフィルタ係数 22

第 1 章

序論

1.1　本研究の背景と目的

学校での運動会や朝礼，カラオケボックスなどのマイクロフォンとスピーカを扱う場面で，不快な音がなる場合がある．これはハウリングと呼ばれるもので，拡声した音が正帰還することにより生じる共振現象である．ハウリングが発生すると聴衆に不快感を与えるだけでなく．場合によってはスピーカやアンプなど，使用している音響機器の破損にもつながる．スピーカの指向性の制御やグラフィックイコライザを用いることにより，発生をある程度は軽減することができるが，音響知識が必要となるため一般の方には難しいのが現状である．また，事前にハウリング抑圧の設定を行っている場合でも，マイクロフォンによる拡声が始まると新たに別のハウリングが突然起こることがある．これは，前もって設定しておいたときには存在しなかった別のハウリングを起こす原因が，状況が変化することにより起こるためである．

このハウリングを抑圧する方法としてノッチフィルタを用いた手法 [1] 等が提案されている．このシステムでは，まず超音波を用いてスピーカ-マイクロフォン間の距離を推定し，そこからハウリング周波数の候補を求め，それらの周波数をフィルタにより除去している．ハウリングは一つの周波数成分が増大する共振現象であることから，フィルタにはノッチフィルタを用いている．また，全てのハウリング周波数を除去するためにノッチフィルタを縦続接続する．しかし，ノッチフィルタを縦続接続することにより出力音質が劣化するという問題がある．

一方，スピーカからマイクロフォンへ帰還される信号と同一の信号をマイクロフォンの出

力信号から減算すれば，ハウリングを発生させないようにすることは可能である．帰還音の推定に対し障害となっている直接音を除去するために，話者方向を既知とし話者方向の感度をなくすアレーマイクロホンを用いる手法も提案されている [2, 3]．また，室内伝達特性を平坦化することにより帰還系の安定性を向上させる方法も提案されている [4, 5]．特性が相補的な二つの櫛型フィルタを一定時間ごとに切り替える交互櫛型フィルタを用いると，すべての周波数成分が必ずフィルタの阻止域を通過するため，広い周波数帯域にわたりハウリングを低減する手法も提案されている [6]．

本研究では，誰にでも簡単に扱え自動でハウリング周波数を除去する適応フィルタを用いたハウリングキャンセラのシステムについて性能を確認する．本システムでは，適応フィルタによりハウリングの原因となっているエコーを推定し，エコー除去を行うことでハウリングの抑圧を行っている．

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，ハウリングが起こる原理と既存のハウリングキャンセラのシステムについて述べる．既存のハウリングキャンセラについては，ノッチフィルタを用いた手法について説明する．

第３章では，適応フィルタを用いたハウリングキャンセラについて提案し，提案したシステムの構成について説明する．また，提案したシステムの有効性を確認するために，計算機シミュレーションを行った結果について述べる．

最後に第４章では，本研究で得られた結果をもとに本研究のまとめと今後の課題について述べる．

第 2 章

既存のハウリングキャンセラについて

2.1　はじめに

演奏会場や講演などで拡声装置を使用する時に発生するハウリングは，非常に不快なものでその発生を防ぐために音響技術者は，常に注意をしなければならない．このハウリングを防ぐために現在までに様々なシステムが考案されてきた [1-6]．本章では，まずハウリングが起こる原理について説明する．次に距離計測に基づくハウリングキャンセラについて説明を行う．

2.2　ハウリングの原理

スピーカから拡声した音をマイクロフォンにより収音し，再びスピーカから拡声するような場合，ハウリングが問題となる．図 2.1 に示すように，スピーカから放射された音がマイクロフォンによって拾われスピーカから再放射されることの繰り返しにより閉ループが形成される．このとき，以下に示す二つの条件を同時に満たした時，ハウリングが発生する．まず，一つ目は，音は減衰するのでそれを補填するためにアンプで増幅していく振幅条件，二つ目はマイクロフォンの振動板を押す形で電気信号に変換された信号が，回りまわってその振動板を再び押すような音で戻ると言う位相条件である [7]．図 2.1 では，マイクロフォン

とスピーカ間の伝達関数は以下のように表される．

$$G(z) = \frac{F(z)H(z)}{1 - F(z)H(z)} \tag{2.1}$$

$F(z)$ はマイクロフォンとスピーカ間の機器の伝達関数，$H(z)$ はスピーカとマイクロフォン間の空間伝達関数である．式 (2.1) において，ハウリングを起こさないようにするための十分条件は式 (2.2) である．

$$|F(z)H(z)| < 1 \tag{2.2}$$

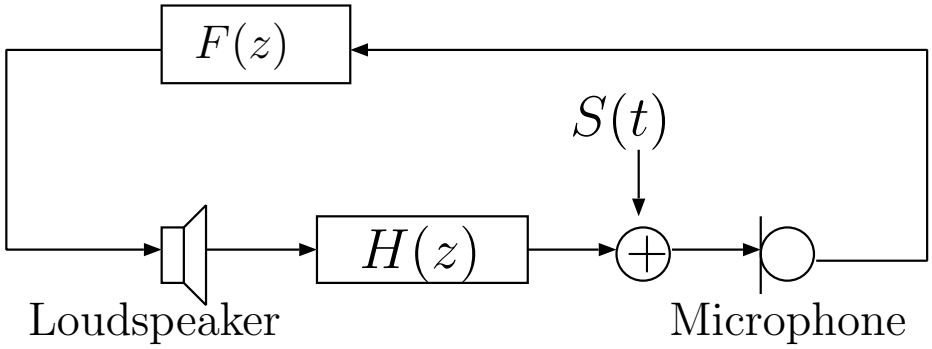

図 2.1　拡声システム

2.3　距離計測に基づくハウリングキャンセラ

距離計測に基づくハウリングキャンセラの原理図を図 2.2 に示す．

この手法では，まず超音波であるパイロット信号を用いてスピーカ-マイクロフォン間の距離を推定し，次に推定した距離からハウリングが起こる周波数の候補を求め，そしてこれらの周波数全てをノッチフィルタを用いて除去する．先で述べた位相条件を満たす周波数でハウリングは発生する．つまりハウリングが発生する可能性の高い周波数は，スピーカ-マイクロフォン間の距離 $L[m]$ が波長の整数倍となる周波数である．したがって，m 番目のハウリング周波数の候補は

$$F_m = \frac{mc}{L} \tag{2.3}$$

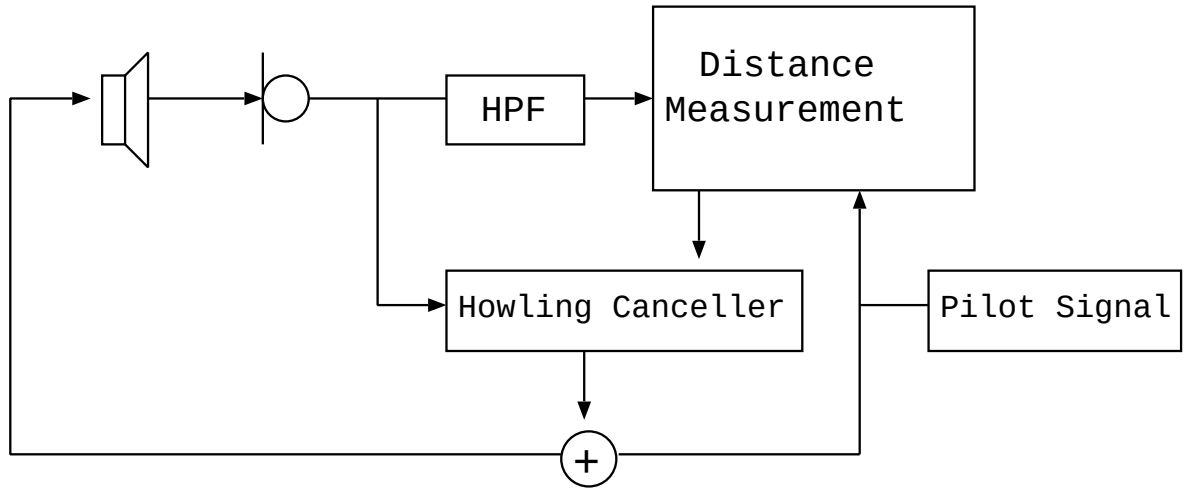

図 2.2　距離計測に基づくハウリングキャンセラ

となる．ただし，m は自然数で，$c[m/s]$ は音速である．

スピーカ-マイクロフォン間の距離計測には，スピーカから超音波であるパイロット信号を放射し，マイクロフォンに受信するまでの到来時間 $D[s]$ を利用する．この D から，

$$L = cD \tag{2.4}$$

としてスピーカ-マイクロフォン間の距離 L を求めることができる．この距離が求まることにより，式 (2.6) からハウリング周波数を推定することが可能となる．ここで，到来時間 D から式 (2.5) と式 (2.6) を使い m 番目のハウリング周波数の候補を，

$$\begin{aligned} F_m &= \frac{mc}{L} \\ &= \frac{m}{D} \end{aligned} \tag{2.5}$$

と音速に依存しない形で表すことができる．

2.3.1　ノッチフィルタを用いたハウリング周波数の除去

ハウリングは，ある一つの周波数が急激に増大することにより発生する．このため，ハウリングを除去するには，一つの周波数だけを除去し，その他の周波数には影響を与えないフィルタが必要である．したがって，ここではノッチフィルタを使いハウリング除去を行う．

ノッチフィルタの伝達関数 $H(z)$ を次式に示す．

$$H_z = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{r_A + az^{-1} + z^{-2}}{1 + az^{-1} + r_A z^{-2}}\right) \tag{2.6}$$

ここで，r_A はノッチフィルタの除去帯域幅であり，a は除去周波数を決定するパラメータである．除去したいハウリング周波数を F_m とすると，a を次のように設定する．

$$a = -(1 + r_A)cos\left(2\pi\frac{F_m}{F_s}\right) \tag{2.7}$$

ここで，F_s はサンプリング周波数である．一つのノッチフィルタで一つのハウリング周波数を除去することができるので，全てのハウリング周波数の候補を除去するためにノッチフィルタを縦続接続する．しかし，ノッチフィルタを縦続接続しすぎた場合には，出力音質が劣化するという問題がある．文献 [1] によればノッチフィルタの縦続接続数が 20 を超えると出力音質が劣化すると報告されている．

2.4　まとめ

本章ではハウリングの原理と既存のハウリングキャンセラについて説明し，それの問題について述べた．距離計測に基づくハウリングキャンセラでは，ノッチフィルタを縦続接続することにより出力音質が劣化するといった問題がある．また，縦続接続数が 20 の場合には，有効にハウリング周波数が除去できるスピーカ-マイクロホン間の距離は，約 $200cm$ とされている [1]．このことから現実的なシステムとしては難しい．そこで，第 3 章ではこの問題に対する提案を行う．

第 3 章

適応フィルタを用いたハウリングキャンセラ

3.1 はじめに

前章で述べた通り，既存のハウリングキャンセラでは出力音質の劣化や有効にハウリング除去が行える距離に制限があるなど，問題点が残されている．そこで本章では，誰にでも簡単に扱え自動でハウリング周波数を除去できる，適応フィルタを用いたハウリングキャンセラの性能について確認する．本システムでは，適応フィルタによりハウリングの原因となっているエコーを推定し，エコー除去を行うことでハウリングの抑圧を行っている．また，計算機シミュレーションを用いて提案手法の有効性を検証する．

3.2 提案するシステムの構成

図 3.1 に適応フィルタを用いたハウリングキャンセラの構成図を示す．ここで，$W(t)$ は時刻 t における適応フィルタのインパルス応答，H はスピーカからマイクロフォンまでのインパルス応答，$s(t)$ は発声者からの直接音，$d(t)$ は拡声されてマイクロフォンへ帰還する信号，$e(t)$ は適応フィルタの出力誤差である．スピーカへの拡声信号 $x(t)$ を適応フィルタに入力し，その出力 $y(t)$ が帰還音の推定値となる．また，スピーカへの拡声信号 $x(t)$ と発声者からの直接音である $s(t)$ を足し合わせたものを $s(t) + d(t)$ とする．本システムでは，$y(t)$

をマイクロフォンで観測した信号から減算処理をすることによりハウリングの除去を行う．

$$e(t) = s(t) + d(t) - y(t) \tag{3.1}$$

なお，適応フィルタでは評価関数

$$G = E[\{s(t) + d(t) - y(t)\}^2] \tag{3.2}$$

を最小にするようにフィルタ係数の更新を行う．ここで，$E[\cdot]$ は期待値を表している．

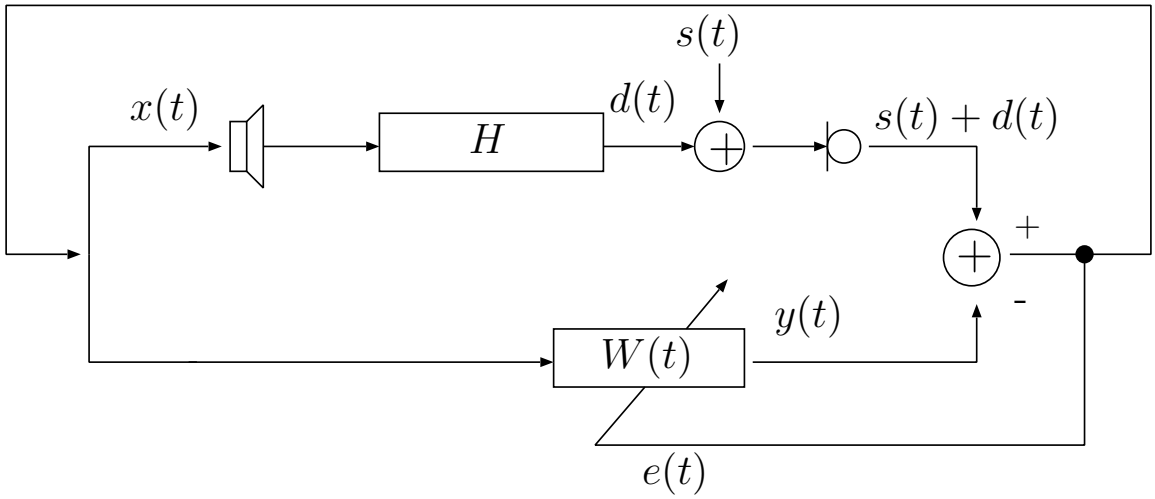

図 3.1　適応フィルタを用いたハウリングキャンセラ

3.3　計算機シミュレーションによる評価

適応フィルタを用いたハウリングキャンセラの原理を用いて，計算機シミュレーションを行い，有効性を検証する．

3.3.1　シミュレーション条件

発声者からの直接音に用いた白色雑音を図 3.2 に示す．また，適応アルゴリズムには学習同定法 [8] を用いる．適応フィルタの性能を評価する式は，

$$\mathbf{SNR}[\mathbf{dB}] = 10\log_{10}\frac{\sum s^2(t)}{\sum(d(t)-s(t-1))^2}[\mathbf{dB}] \tag{3.3}$$

を用いる．式 (3.3) では，拡声されたあとエコーが加わった信号と発声者からの直接音との SN 比を表している．スピーカとマイクロフォン間の距離は $50cm$，$100cm$，$150cm$ と固定した場合と，0.5 秒間に $50cm \rightarrow 100cm$ へと移動した場合，同じく 0.5 秒間に $100cm \rightarrow 150cm$ へと移動した場合のハウリングの除去性能を評価した．なお，ここではフィルタのタップ数を 200 に固定し，適応フィルタが推定を行うためのパラメータであるステップゲインの値を 0.6〜0.8 の間で 0.1 ずつ変化させ検証を行った．また，適応フィルタがない場合の拡声信号の波形を図 3.3 に示す．

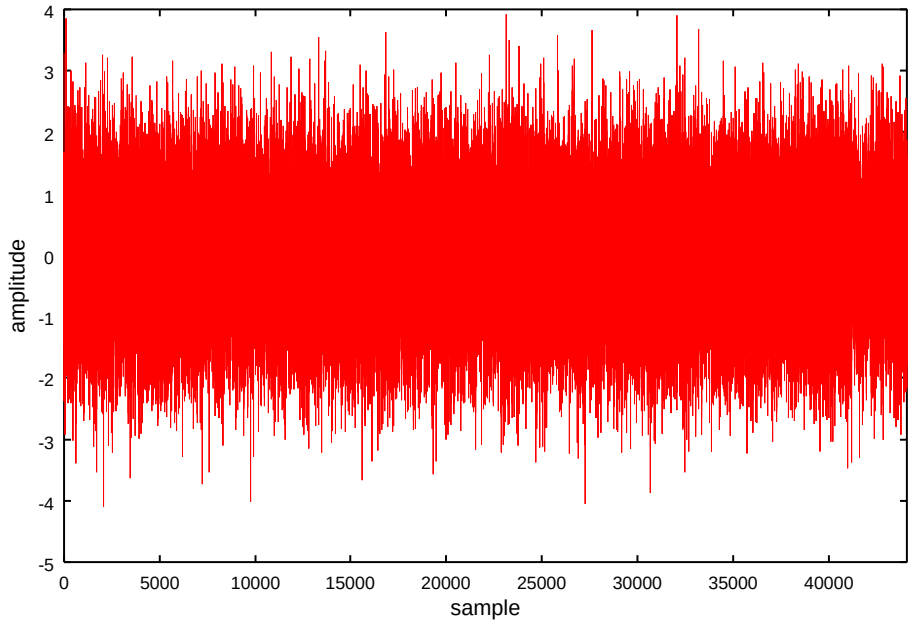

図 3.2　白色雑音

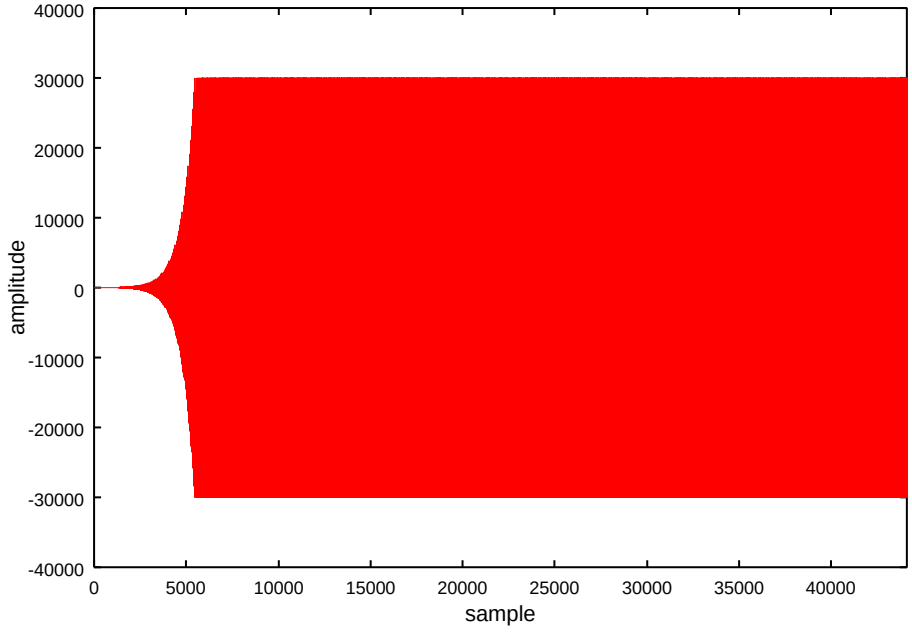

図 3.3　適応フィルタがない場合の拡声信号の波形

3.3.2　シミュレーション結果

図 3.4，図 3.5，図 3.6，図 3.7，図 3.8 は，式 (3.3) により求めた SN 比の結果で，ステップゲインの値が 0.6 の時の値を表し，図 3.12，図 3.13，図 3.14，図 3.15，図 3.16 はステップゲインの値が 0.7 の時，図 3.20，図 3.21，図 3.22，図 3.23，図 3.24 はステップゲインの値が 0.8 の時の値をそれぞれ表している．

図 3.9，図 3.10，図 3.11 は，ステップゲインの値が 0.6 の時，図 3.17，図 3.18，図 3.19 は，ステップゲインの値が 0.7 の時，図 3.25，図 3.26，図 3.27 は，ステップゲインの値が 0.8 の時のそれぞれの距離での適応フィルタのフィルタ係数を表している．この結果より，SN 比が向上していることからエコーを推定し，拡声信号からエコー除去が行えているためハウリングが抑圧できていることが確認できた．また，距離が変化する場合においてもハウリング抑圧が有効に行えていることが確認できた．ステップゲインの値については，大きくするほど収束速度が向上している．しかし，距離が 150cm の場合においては，ステップゲインの値は 0.6 の時の方が収束速度が早いという結果が得られた．

ステップゲインの値が **0.6** の時の結果

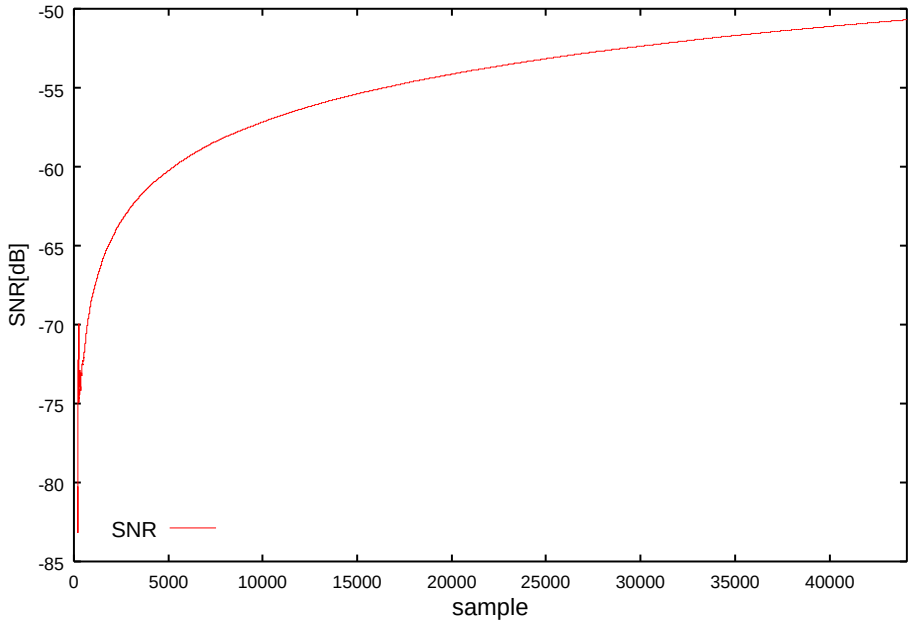

図 3.4　距離 50cm の時の SN 比

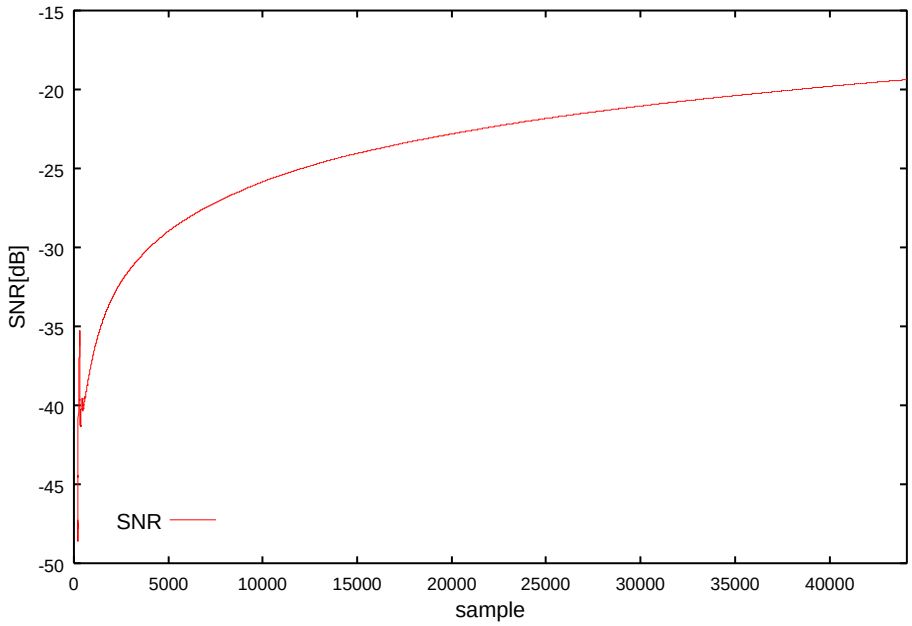

図 3.5　距離 100cm の時の SN 比

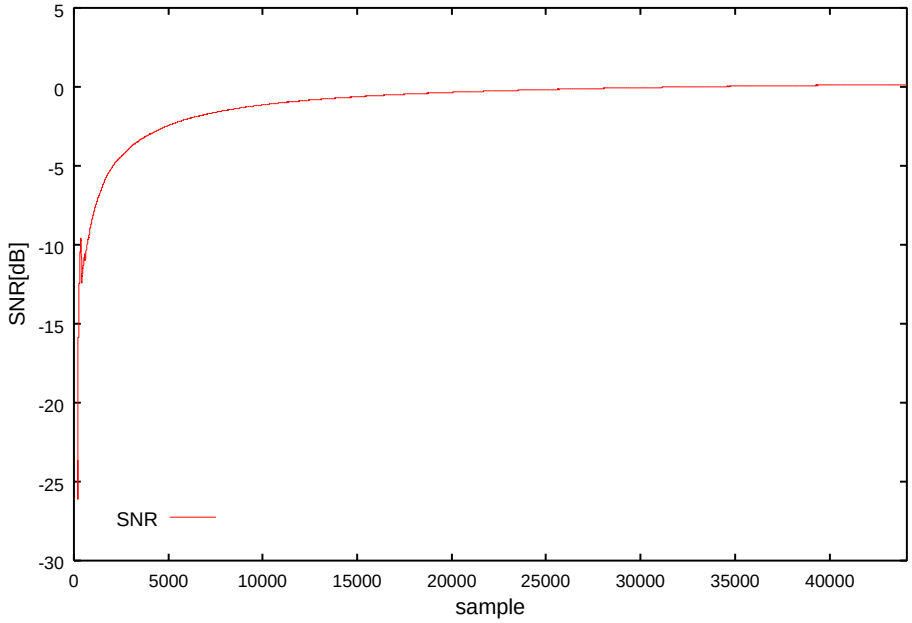

図 3.6　距離 150cm の時の SN 比

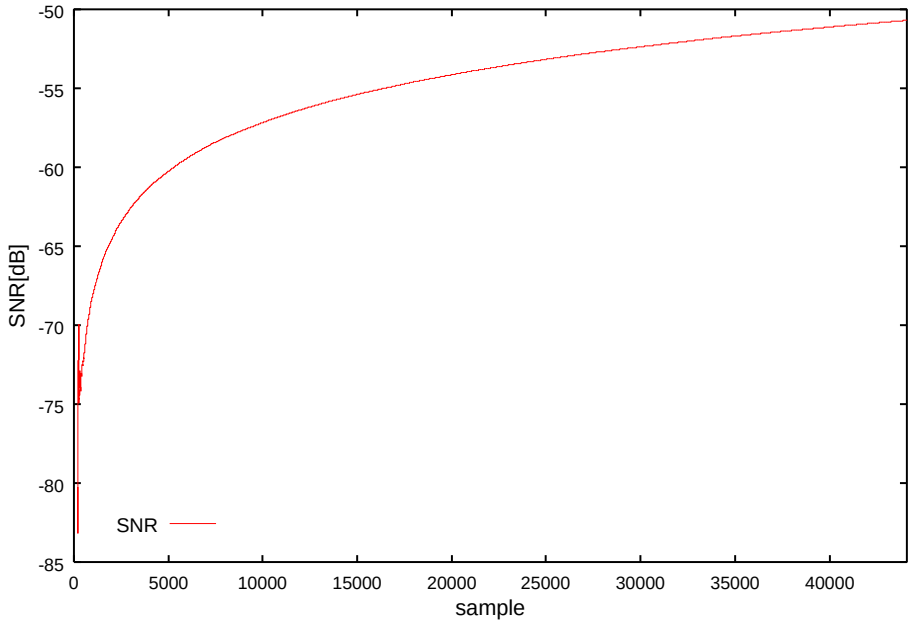

図 3.7　0.5 秒間に距離を 50cm から 100cm へ移動した時の SN 比

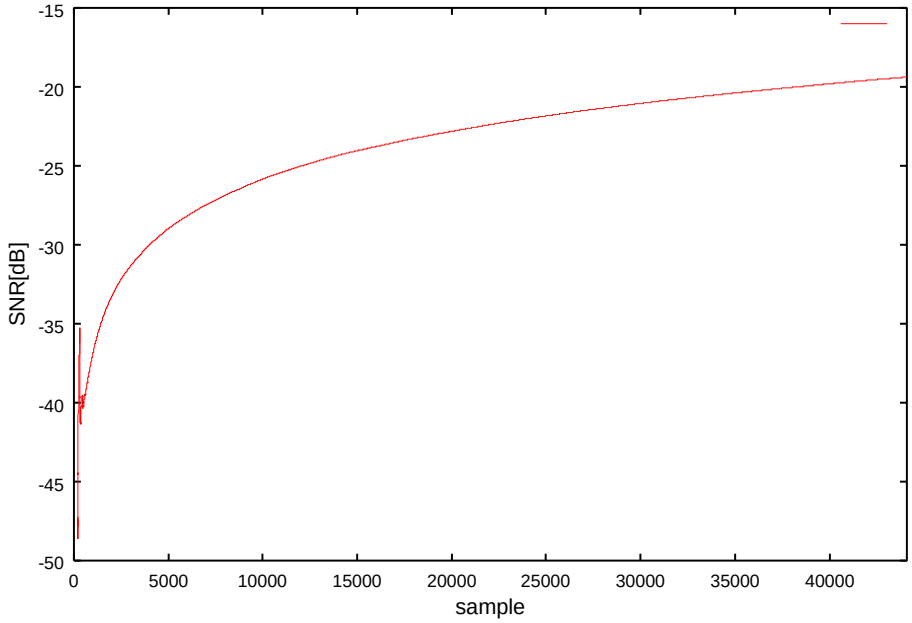

図 3.8　0.5 秒間に距離を 100cm から 150cm へ移動した時の SN 比

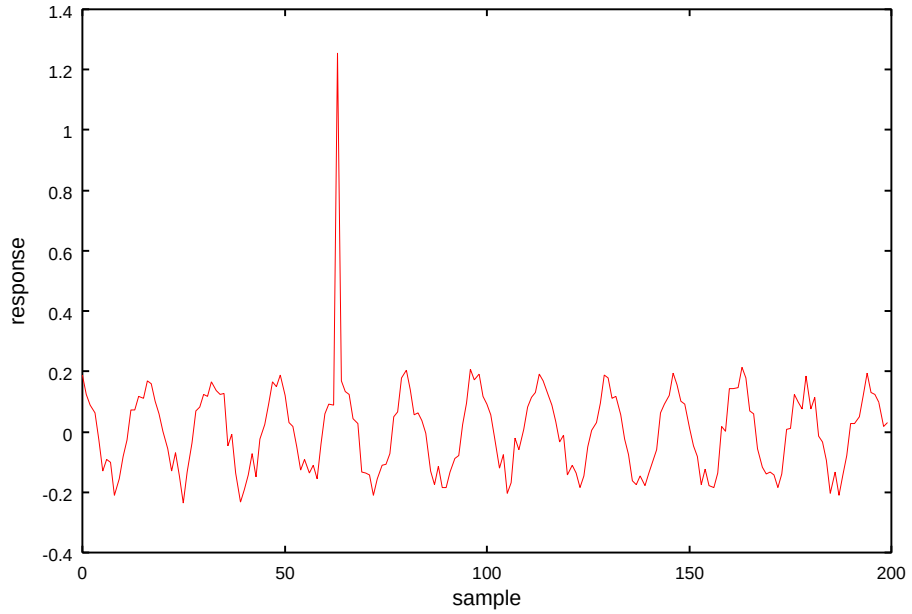

図 3.9　距離 50cm の時の適応フィルタのフィルタ係数

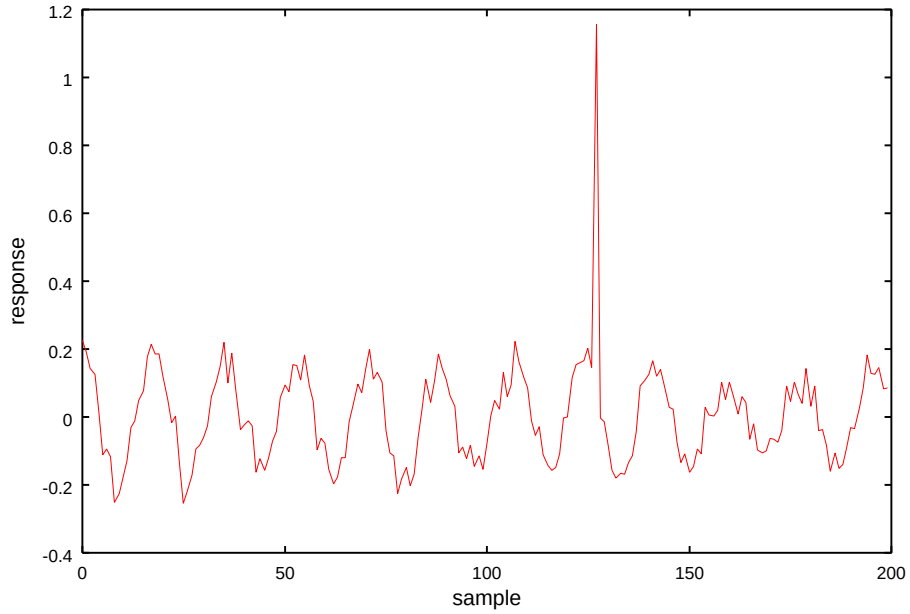

図 3.10　距離 100cm の時の適応フィルタのフィルタ係数

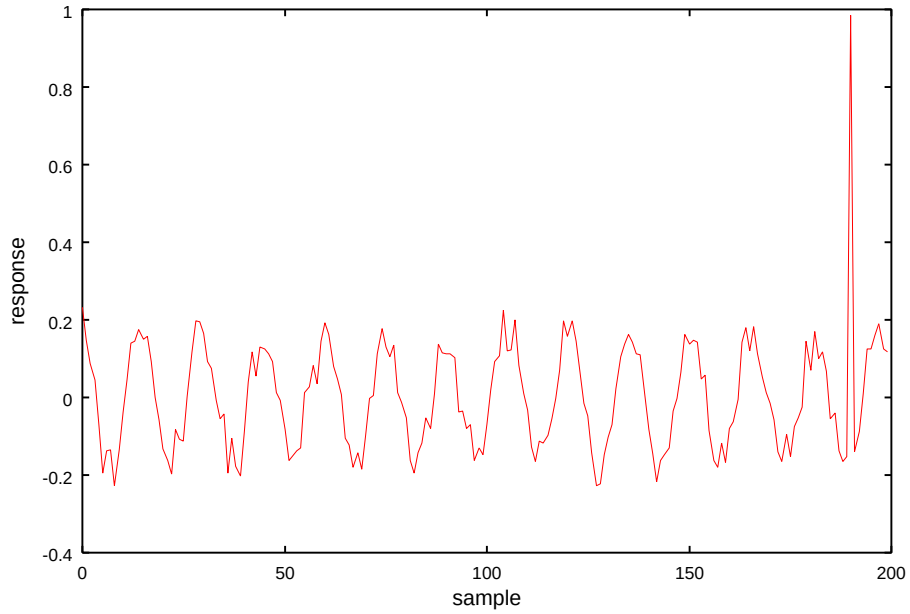

図 3.11　距離 150cm の時の適応フィルタのフィルタ係数

ステップゲインの値が **0.7** の時の結果

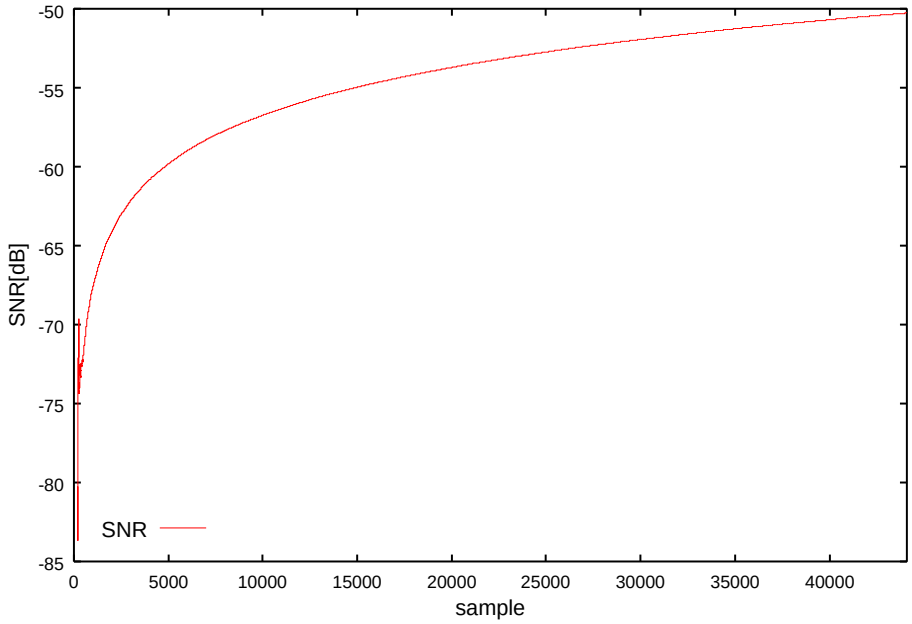

図 3.12　距離 50cm の時の SN 比

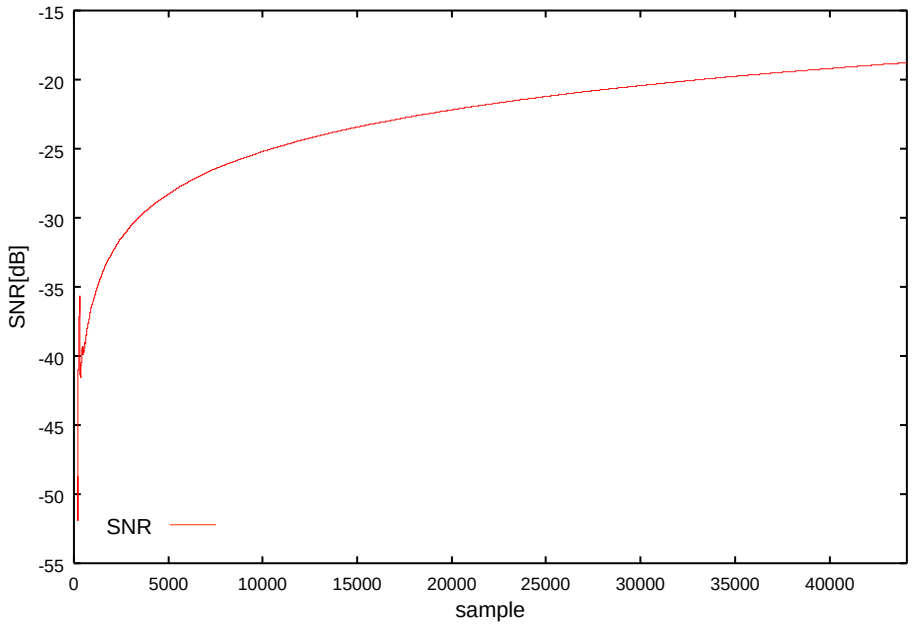

図 3.13　距離 100cm の時の SN 比

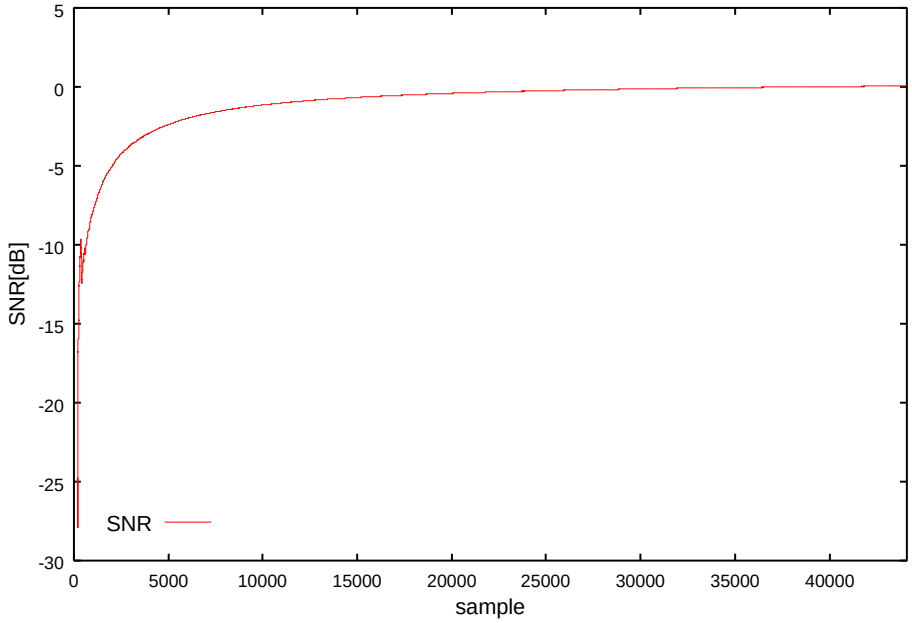

図 3.14　距離 150cm の時の SN 比

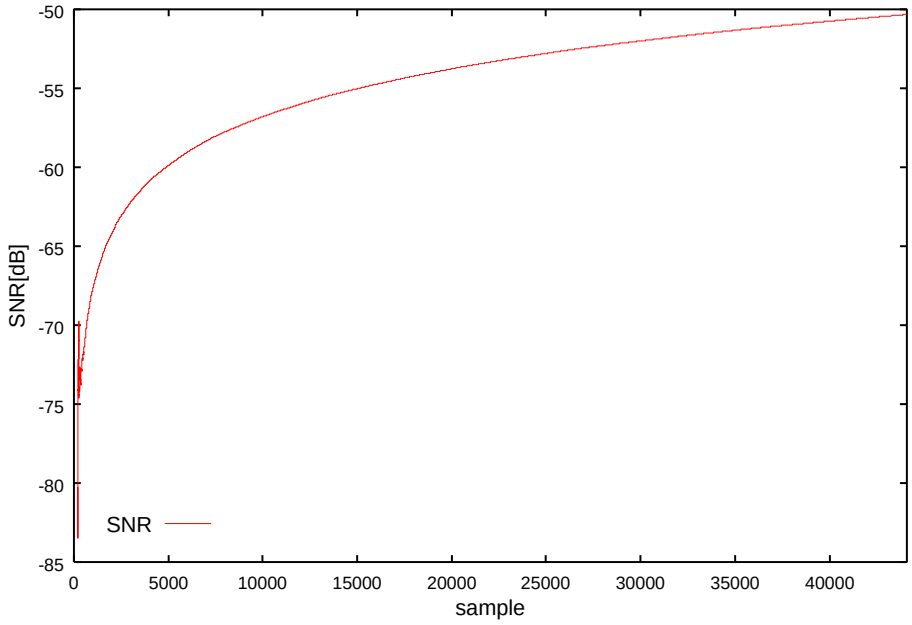

図 3.15　0.5 秒間に距離を 50cm から 100cm へ移動した時の SN 比

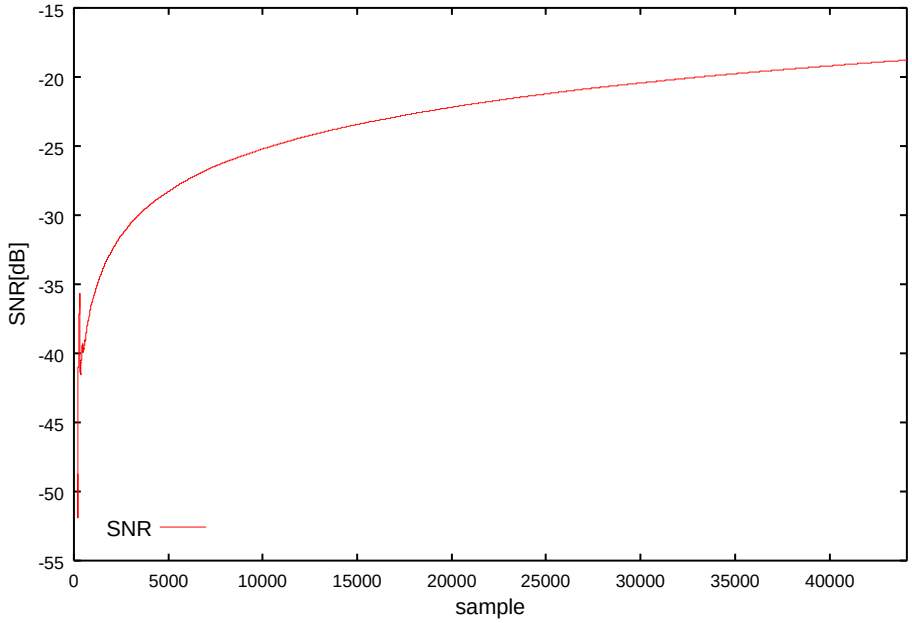

図 3.16　0.5 秒間に距離を 100cm から 150cm へ移動した時の SN 比

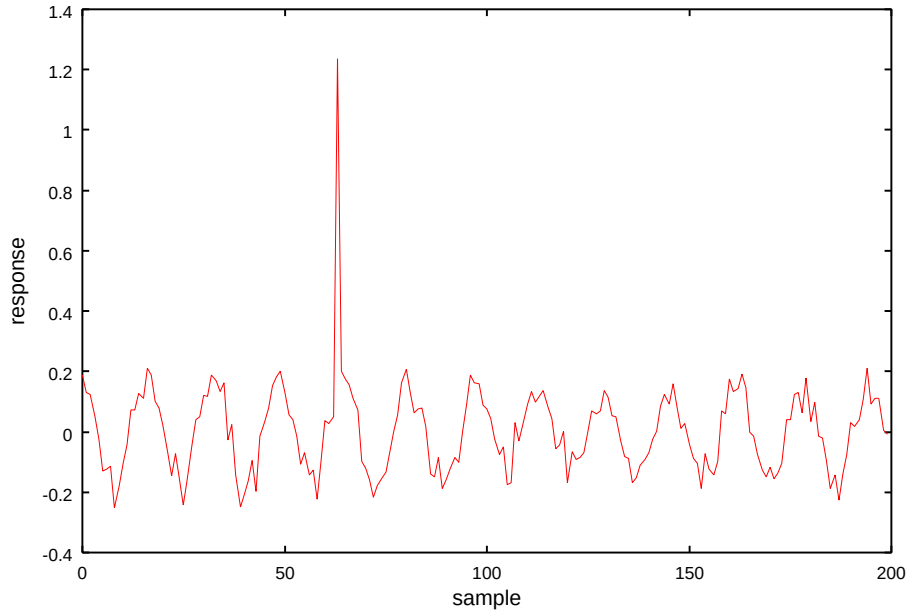

図 3.17　距離 50cm の時の適応フィルタのフィルタ係数

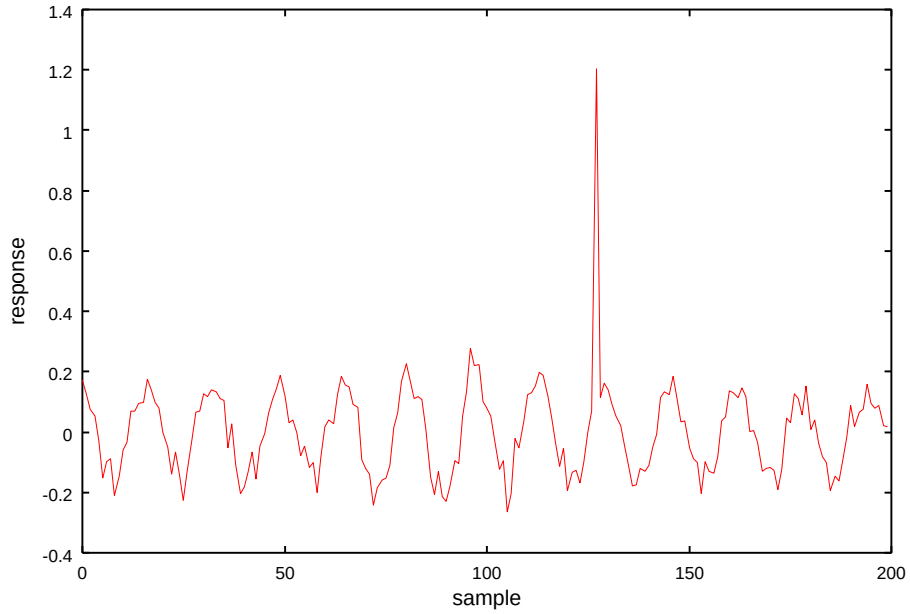

図 3.18　距離 100cm の時の適応フィルタのフィルタ係数

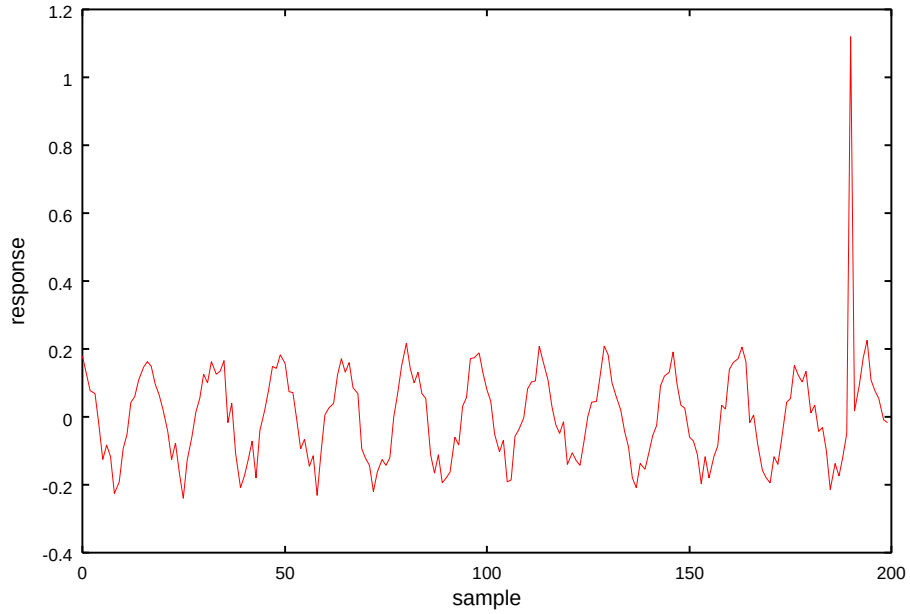

図 3.19　距離 150cm の時の適応フィルタのフィルタ係数

ステップゲインの値が **0.8** の時の結果

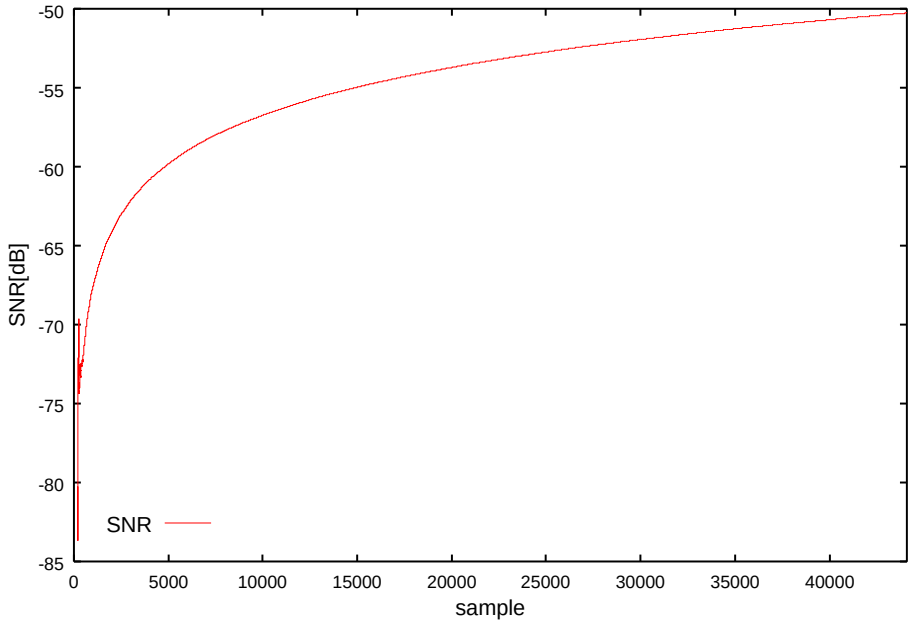

図 3.20　距離 50cm の時の SN 比

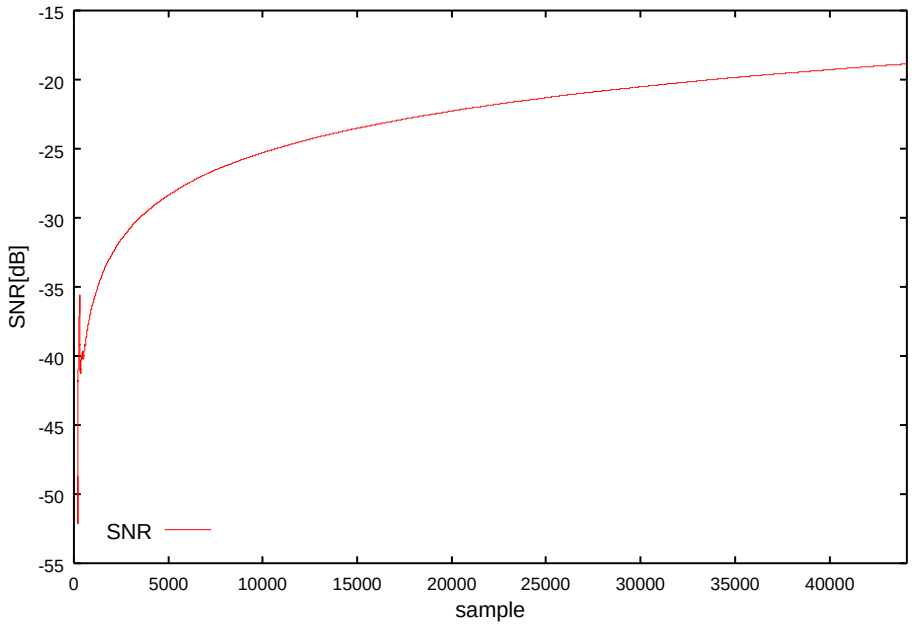

図 3.21　距離 100cm の時の SN 比

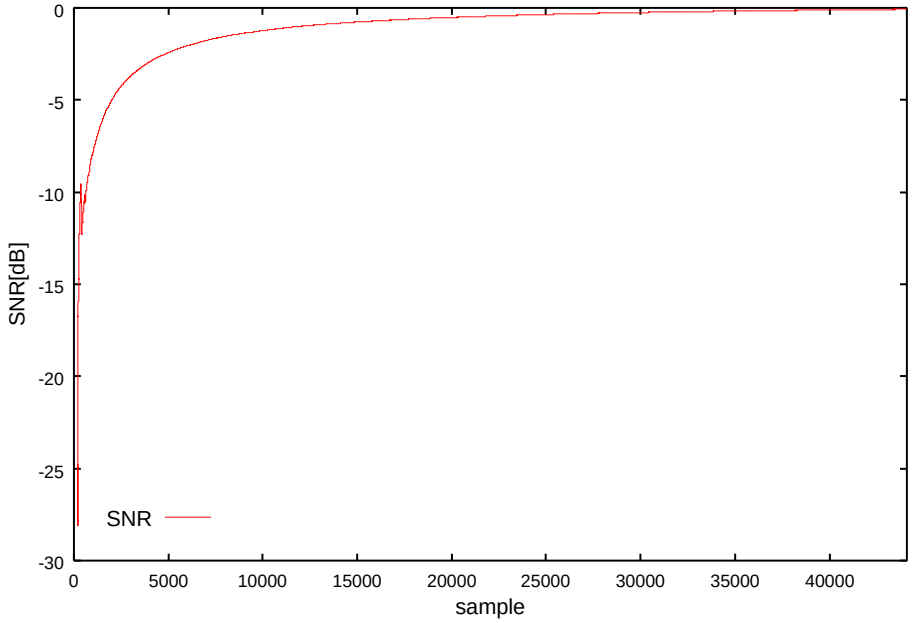

図 3.22　距離 150cm の時の SN 比

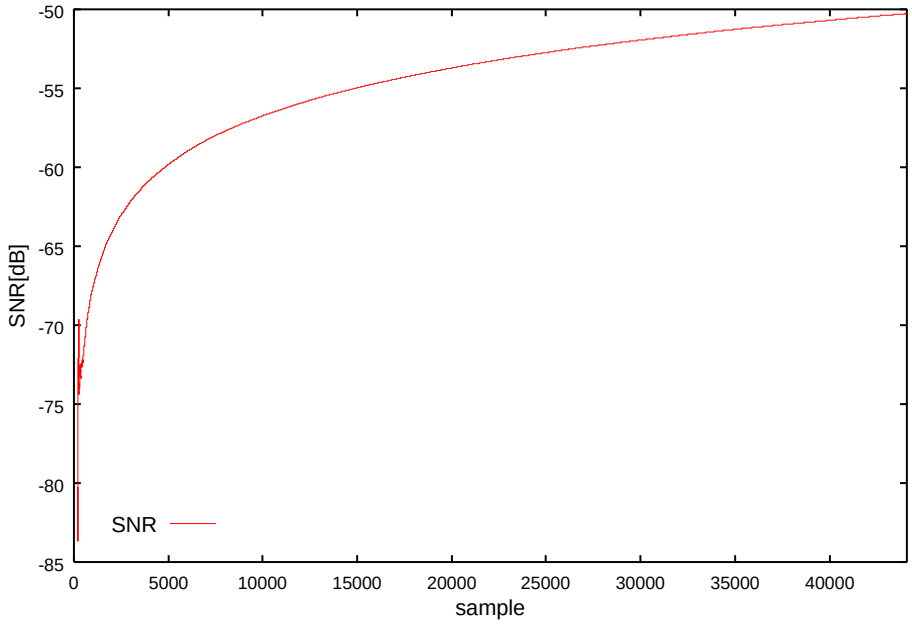

図 3.23　0.5 秒間に距離を 50cm から 100cm へ移動した時の SN 比

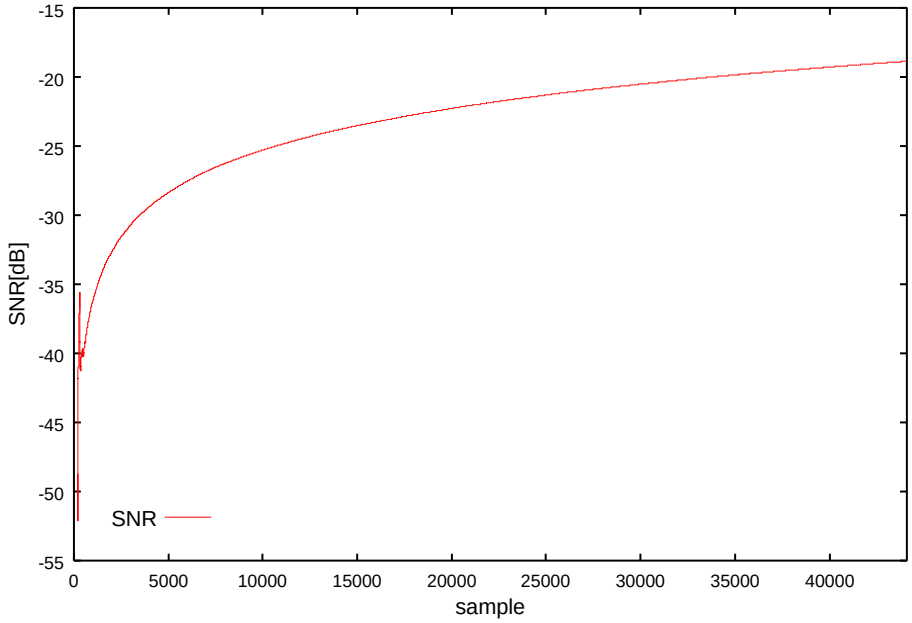

図 3.24　0.5 秒間に距離を 100cm から 150cm へ移動した時の SN 比

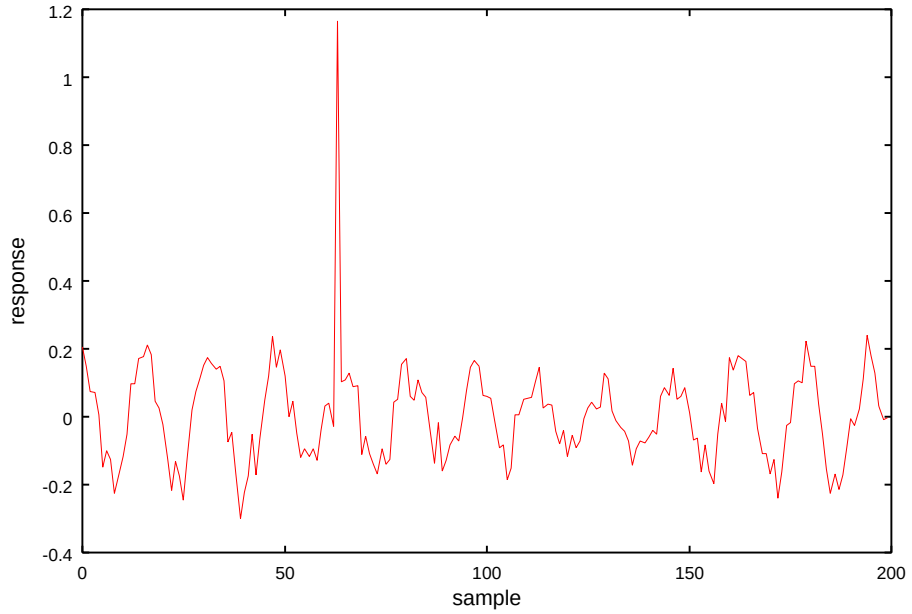

図 3.25　距離 50cm の時の適応フィルタのフィルタ係数

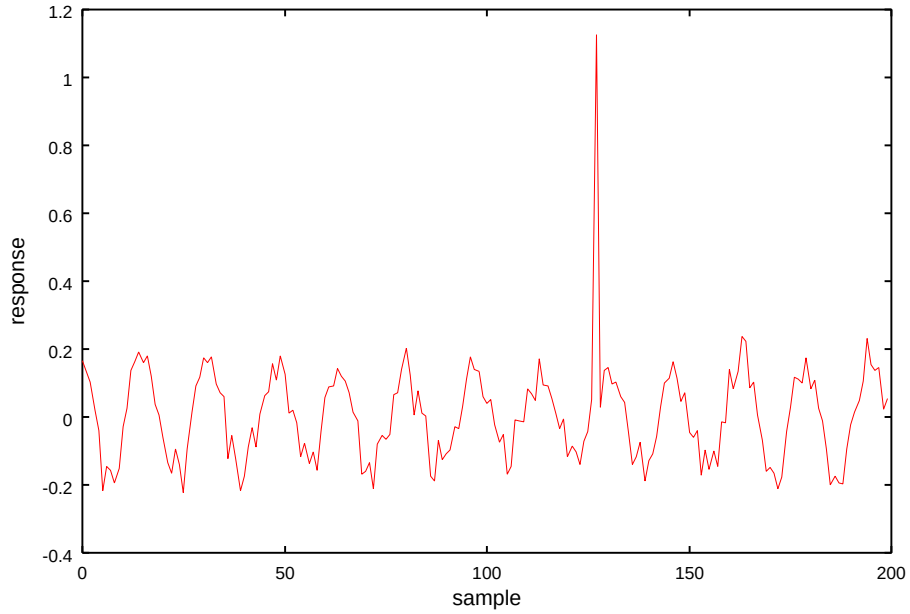

図 3.26　距離 100cm の時の適応フィルタのフィルタ係数

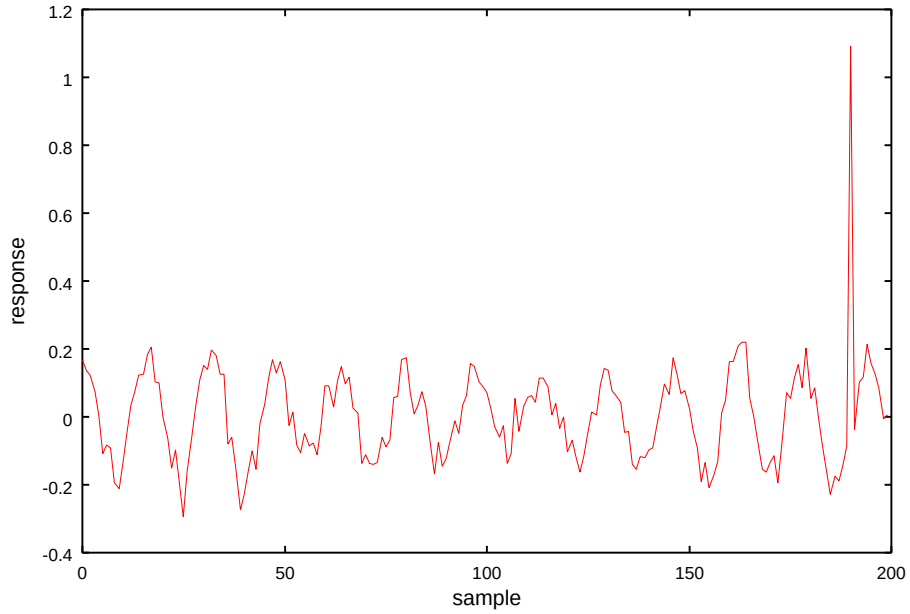

図 3.27　距離 150cm の時の適応フィルタのフィルタ係数

3.4　まとめ

本章では，まず適応フィルタを用いたハウリングキャンセラについての構成の説明を行った．次にこの手法を用いて計算機シミュレーションによる評価を行い，提案手法の有効性について検証を行った．計算機シミュレーションを行った結果，エコーを推定し，拡声信号からエコー除去が行えているためハウリングが抑圧できていることが確認できた．距離が変化する場合においてもハウリングの除去が行えていることが確認でき，本手法の有効性を確認できた．また，ステップゲインの値は大きくするほど，収束速度が向上することが確認できた．なお，適応フィルタがない場合には，SN 比はマイナス無限大へと劣化する．

第 4 章

結論

4.1　本研究のまとめ

ハウリング抑圧にはノッチフィルタを用いた手法等が提案されているが，音質の劣化や有効にハウリング周波数を除去できる距離に制限があるなど未だ多くの問題がある．そこで本論文では，誰にでも簡単に扱え，自動でハウリング周波数を除去できる適応フィルタを用いたハウリングキャンセラについて提案を行った．適応フィルタによりハウリングの原因となっているエコーを推定し，エコー除去を行うことでハウリングの抑圧を行った．本手法では，距離が変化する場合においてもハウリング除去が有効に行えることを確認したが，音質がどの程度劣化するかについては未検証のため今後検証が必要である．本研究で提案した手法を用いて計算機シミュレーションを行い性能を評価した結果，ハウリング除去が有効に行えることを確認した．

4.2　今後の課題

今後の課題としては，ステップゲインの値やフィルタのタップ数によって，収束速度がどの程度向上するか検証を行う必要がある．音場は時変であるため適応速度についての検討も必要である．また，適応フィルタへの入力信号 $x(n)$ と発声者からの直接音 $s(n)$ が相関を持つと，適応フィルタは拡声対象音を同定してしまう．このような場合には，適応フィルタはスピーカからマイクロフォン間のインパルス応答を精度良く推定することができない．このため，遅延回路を挿入するなど今後の検討が必要である．

謝辞

本研究を行うにあたり，何の知識もない私に対し見捨てることなく一から御指導して頂いた福本昌弘教授に心から感謝致します．家庭があるにも関わらず毎日夜遅くまで面倒を見て頂き先生には大変御迷惑をおかけしました．この研究室での生活を乗り越えたことは，自分にとって非常に大きな財産になり，社会に出てから少々のことではくじけない精神を身に付けれたと自負しています．それも全て先生のおかげだと思います．

また，本研究の審査をして頂いた浜村昌則准教授，吉田真一講師にも感謝致します．梗概の提出が遅れ御迷惑をおかけしました．

毎日私の馬鹿げた質問にもお答え頂き，時には，食べ物や飲物をごちそうになり大変お世話になりました佐伯幸郎助手にも心からお礼申し上げます．全種類のうまい棒が食べられたのも佐伯先生のおかげです．また研究についてやプレゼンの資料作りなどでも大変お世話になりました．

分野が違うにも係わらず，面倒を見て頂いた福冨英次助手にも心からお礼申し上げます．意味のわからない私の話を聞いてくださりありがとうございました．また，発表資料作成時には大変お世話になりました．

御自身が多忙にも係わらず，出来の悪い私に対し懇切丁寧に教えて頂いた金井宏一郎氏にも感謝致します．この研究室での生活を通して私の目標は,『金井さんのような人間になること』になりました．今後も金井さんのような人間を目指して精進します．今までの人生で最も尊敬する先輩です．

御自身の研究があるにも係わらず，何一つできない私を指導して頂いた徳久翔太氏にも感謝致します．徳久さんから頂いたおにぎりとからあげみたいな物のおかげであの日の研究を乗り切ることができました．また，研究室での徳久さんの行動は見習うべきところが非常に多く，研究以外でもたくさんのことを勉強させて頂きました．

同４年生の上岡君には研究の面すべてにおいて，助けられ感謝の気持ちでいっぱいです．

謝辞

プログラムのできない私は，上岡君に多大な御迷惑をおかけしました．卒業できたことは，上岡君のおかげと言っても過言ではありません．就職先も同じためこれから長いつき合いになるとは思いますがどうかよろしくお願い致します．上岡君は私にとっての畏友です．

同じく同４年生の四宮君には卒業研究発表前にいろいろと助けて頂きありがとうございました．発表前で緊張が極限に達していた私を落ち着かせて頂き大変助かりました．同じく島田君にも３年生の時からソフトウェア工学の講義等でも大変お世話になりました．知識の乏しかった私を助けて頂きありがとうございました．同じく船橋君にも感謝します．いろいろなことがあるとは思いますが今後も頑張ってください．

最後に私を支えてくださった全ての人に感謝致します．

参考文献

[1] 曽我美 明，川村 新，飯國 洋二，距離計測に基づくハウリングキャンセラに関する検討，信学技報，pp.15-20，Mar.2007

[2] 小林 和則，古家 賢一，適応型アレーを用いたハウリング防止について，音講論集，Vol.I，pp.541-542，2001

[3] 小林 和則，古家 賢一，片岡 章俊 ，ハウリング抑圧マイクロホンアレイ，日本音響学会誌，60，pp.115-125，2004

[4] 平田能睦，西村正昭，伊藤 毅，櫛歯形フィルタを用いた拡声同時通話系ハウリング防止法，音響学会誌，Vol.32，pp247-252，Apr.1976

[5] 牛山 聡，平井 徹，東山 三樹夫，清水 寧，伝達特性の平滑化によるハウリング抑止効果，信学技報，EA94，pp.23-28，Apr.1994

[6] 蘆原 郁，桐生 昭吾，交互櫛型フィルタによるハウリング低減法，信学技報，pp56-60，Jan.2007

[7] 日本音響学会，音のなんでもコーナー Q and A，http://www.asj.gr.jp/qanda/answer/123.html

[8] 辻井 重男，適応信号処理，昭晃堂，1995

[9] S. ヘイキン，(武部 幹 訳)，適応フィルタ入門，現代工学社，1987

[10] 谷口 慶治，信号処理の基礎，共立出版株式会社，2001

付録 A

適応信号処理

A.1　パラメータ推定問題

入出力データからその未知システムの構造とパラメータを推定することをシステム同定と呼び，適応信号処理はその大半がパラメータ (インパルス応答) 推定問題として取り扱われる．

A.2　適応アルゴリズム

ここでは代表的な適応アルゴリズムについて述べる．1960 年，Widraw と Hoff は適応スイッチング回路の研究で Widrow-Hoff の LMS アルゴリズム (Least Mean Square Algorithm，以下 LMS アルゴリズムと表記) と呼ばれる適応アルゴリズムの提案を行った．LMS アルゴリズムは，二乗平均誤差を最急降下に基づいて最小にする方式で，安定性があり，演算量が少ないという特徴から現在でも代表的な適応アルゴリズムとなっている．一方，1967 年に野田と南雲が，学習同定法の提案を行った．これは，先に述べた LMS アルゴリズムに比べ複雑ではあるが，収束速度が入力信号の大きさに依存しないという特徴を持っており，実用的にも優れた適応アルゴリズムであるといえる．これらのアルゴリズムは，推定すべきパラメータの変化にある程度追従できる特徴がある．しかし，入力信号が有色である場合には，収束速度が著しく劣化するといった欠点が知られている．また，1960 年，Kalman により離散時間カルマンフィルタが提案された．カルマンフィルタにおいて，状態変数を推定すべき未知パラメータとし，このパラメータが時間的に変動しないと仮定すると，このカ

ルマンフィルタはよく知られた逐次最小 2 乗アルゴリズム (Recursive Least Square，以下 RLS アルゴリズムと表記) と一致する．RLS アルゴリズムは，推定すべきパラメータの個数を N とすると，1 サンプルあたり N^2 に比例する回数の乗算を必要とする．LMS アルゴリズムや学習同定法の乗算回数が N に比例するのと比較すれば，RLS アルゴリズムは演算量からリアルタイムの処理は困難といえる．適応アルゴリズムでは演算量と収束速度の関係は一般にトレードオフの関係にある．

A.3　学習同定法

学習同定法は，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入力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．時刻 t における適応フィルタの出力 $y(t)$ が未知システムの出力 $d(t)$ に等しいとすると，

$$d(t) = h_N^T x_N(t) \tag{A.1}$$

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 (A.1) が成り立たなければならない．

そこで式 (A.1) 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 (A.1) より，入力ベクトル $x_N(t)$ に直交しているといえる．さらに，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，最も 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，

$$\begin{aligned} h_N(t+1) &= h_N(t) + \{h_N(t+1) - h_N(t)\} \\ &= h_N(t) + \frac{\{w_N - h_N(t)\}^T \{h_N(t+1) - h_N(t)\}}{\parallel h_N(t+1) - h_N(t) \parallel} \\ &\quad \times \frac{h_N(t+1) - h_N(t)}{\parallel h_N(t+1) - h_N(t) \parallel} \end{aligned} \tag{A.2}$$

となる．ただし，$\|\cdot\|$ 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．ここで，

$$\frac{h_N(t+1)-h_N(t)}{\| h_N(t+1)-h_N(t) \|} = \frac{x_N(t)}{\| x_N(t) \|} \tag{A.3}$$

$$\begin{aligned}\{w_N - h_N(t)\}^T x_N(t) &= d(t) - y(t) \\ &= e(t)\end{aligned} \tag{A.4}$$

が成立するので，式 (A.2) は，

$$h_N(t+1) = h_N(t) + \frac{x_N(t)}{\| x_N(t) \|^2} e(t) \tag{A.5}$$

のように変形できる．学習同定法は，式 (A.5) の修正ベクトルにステップゲインを掛け

$$h_N(t+1) = h_N(t) + \alpha \frac{x_N(t)}{\| x_N(t) \|^2} e(t) \tag{A.6}$$

で与えられる．